

Projet de Physique P6

STPI/P6/2020 – n°39

Projet P6:

Etude des défauts de fabrication et de l'influence d'un traitement thermique sur la microstructure d'un alliage obtenu par fabrication additive

Etudiants:

Hugo Augusto

Thomas Colin-Daigremont

Anna Dinand

Barbara Estienne

Thomas Riou

Louis Rollé

Enseignant-responsable du projet :

Clément Keller

Date de remise du rapport : 15/06/2020

Référence du projet : STPI/P6/2019 – 039

Intitulé du projet : Etude des défauts de fabrication et de l'influence d'un traitement thermique sur la microstructure d'un alliage obtenu par fabrication additive

Type de projet : Initialement expérimental

Bibliographique dû à la crise Covid-19

Objectifs du projet : L'objectif de ce projet est d'analyser puis comparer les caractéristiques mécaniques de plusieurs échantillons d'acier 316L créés par fabrication additive.

Nous allons étudier la dureté et les caractéristiques mécaniques suite à des traitements thermiques sur chaque face des échantillons. Nous cherchons à obtenir un comportement mécanique proche de celui d'une pièce de même structure géométrique mais fabriquée par un autre procédé qui répond aux besoins industriels

Mots-clefs du projet :

Fabrication Additive Métallique

Traitement thermique

Etude de dureté

Caractéristiques Mécaniques

Sommaire :

Introduction

I. Recherches théoriques

1. La Fabrication Additive
 - a. *Fusion sélective par laser*
 - b. *Stéréolithographie*
 - c. *Dépôt de fil fondu*
 - d. *Projection de poudre*
 - e. *Projection de gouttes*
 - f. *Stratoconception*
 - g. *Projection de liant sur poudre*
 - h. *Avantages et inconvénients généraux de la Fabrication Additive*
2. Acier Inox
3. Acier 316L
4. Traitement Thermique

II. Expérimentations et résultats

1. Préparation des échantillons
 - a. *Découpage*
 - b. *Enrobage*
 - c. *Polissage*
 - d. *Traitement thermique*
2. Analyse microscopique
 - a. *Échantillons sans traitements thermiques*
 - b. *Observations générales*
3. Étude de la dureté
4. Traction

Conclusion

Lexique

Bibliographie

Annexes

1. Documents techniques
2. Proposition de sujets de projets

Remerciement

Nous tenons à remercier tout particulièrement M. Clément KELLER pour son investissement, ses précieux conseils et son attention tout au long de ce projet.

Malgré les conditions inédites dues au Covid-19, il a su rester à notre écoute et répondre à toutes nos questions. Par sa présence, ce projet nous a été très enrichissant tout au long du semestre.

Nous souhaitons également remercier l'Administration de l'INSA Rouen Normandie pour nous avoir mis à disposition du matériel de haute qualité afin de réaliser ce projet de groupe.

Introduction

Notre deuxième année à l'INSA nous a permis de mener en groupe un projet d'étude concernant la fabrication additive métallique, aussi appelée impression 3D métallique. Nous tenons à préciser qu'en raison des circonstances liées à la pandémie du Covid-19, nous avons dû poursuivre l'élaboration de ce rapport à distance. Certaines études expérimentales n'ont pas pu être réalisées, ce qui nous a empêché d'obtenir assez de données sur l'alliage et de compléter notre analyse.

Il existe différentes techniques de fabrication additive métallique, néanmoins, celle qui nous intéresse est la fusion sur lit de poudre. Une fine couche de poudre métallique est déposée, puis un laser vient faire fusionner la poudre couche par couche. La fabrication additive permet la création de pièces plus complexes qu'avec les techniques dites classiques telles que le fraisage ou le tournage. L'impression 3D métallique a plusieurs conséquences par rapport à une pièce usinée par un autre procédé. La première est l'homogénéité. En effet, il est possible que lorsque la poudre fusionne, des aspérités se créent, ce qui peut avoir un impact sur le comportement mécanique de la pièce. La deuxième concerne les propriétés mécaniques de la pièce. Cette technique apporte un comportement mécanique différent, qui peut rendre réticents la plupart des industriels qui préfèrent se rapporter à des comportements de matériaux auxquels ils sont familiers. L'impression 3D métallique est notamment utilisée dans le domaine de l'aéronautique mais aussi dans le domaine aérospatial, de l'automobile ou encore du médical.

Objectif:

L'objectif de notre projet est de déterminer les traitements thermiques qu'il faut appliquer à la pièce métallique afin qu'elle obtienne un comportement mécanique se rapprochant d'une pièce ayant la même structure géométrique mais fabriquée par un autre procédé afin de répondre aux besoins des industriels.

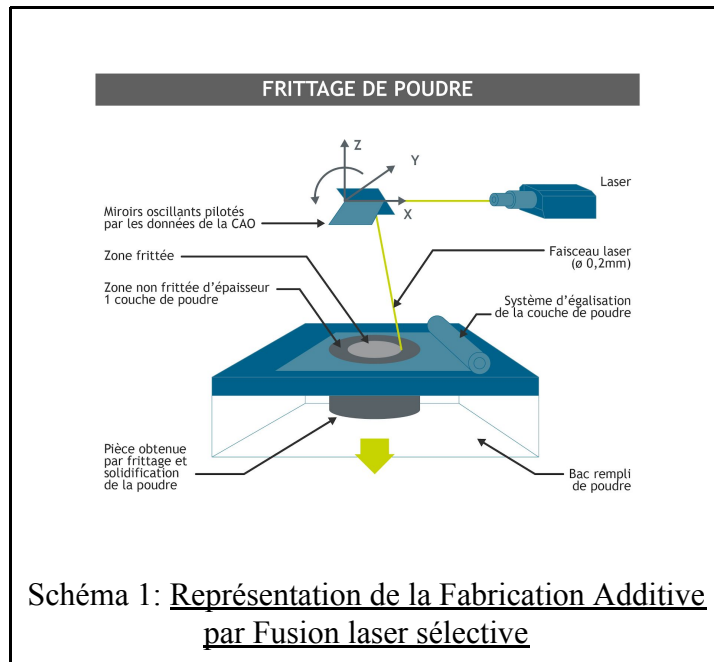
I. Recherches théoriques

1. La Fabrication Additive

a. Fusion sélective par laser (SLM, selective laser melting)

La fusion sélective par laser, traduit de l'anglais Selective Laser Melting et apparue dans les années 1990, est une technique de fabrication additive qui permet la réalisation de pièces complexes utiles dans de nombreux secteurs tels que le médical (cf Image 1) ou l'aérospatiale.

Cette technique (cf schéma 1) consiste à former une pièce 3D par une succession de couches de particules. Après avoir rentré un fichier - Conception Assistée par Ordinateur -, une fine poudre est préalablement insérée sur le plateau de la machine. Un puissant laser va fondre et souder les particules de cette poudre de façon à produire les premières couches de notre pièce. Les modèles peuvent être réalisés dans de nombreuses matières comme l'Inox 316L, 17-4 PH et 15- 5 PH, Chrome-cobalt, Inconel 625, 718 et 939 , Hastelloy X, Aluminium AlSi10Mg ou le Titane grade 5 Ti6Al4V par exemple. Ainsi, nous obtenons la pièce finale par multiplication de ce processus.



❖ Étudions les avantages et les inconvénients de ce type de fabrication additive :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • La SLM permet de réaliser des formes complexes. • Ce système est fiable. • Il permet de faire des pièces en grande quantité. La fusion additive est composée d'un système de contrôle appelé "Maîtrise Statistique des Procédés" - SPC. Son objectif principal est, grâce au contrôle qualité de la production en continu et par prélèvements, de réduire les taux de rebuts ou de retouches, par anticipation de la non-qualité. • Les matériaux produits sont uniques et isotropes. La microstructure des matériaux frittés est homogène dans les trois directions de l'espace. D'un autre côté, le mécanisme de diffusion à l'état solide lors du frittage donne des matières qui sont impossibles par fusion, telles que des matériaux composites de phases insolubles ou non miscibles entre elles, ou encore des matériaux micro-encapsulés. • Il possède un autolubrifiant: La microporosité de la matière peut être remplie d'une huile lubrifiante, qui fournit une lubrification en continu entre le coussinet et l'arbre, de sorte que le système n'ait pas besoin de graissage externe. • Une densité de 99.99 à 100 % pourra s'obtenir par compression isostatique à chaud - technique de densification de matériaux pour de meilleures propriétés mécaniques • Amortissement des vibrations. • Les pièces sont 5 à 25% moins lourdes, très avantageux pour le secteur de l'aéronautique et spatial ou encore du sport automobile. • Précision dimensionnelle. 	

- Excellent état de surface. Zones planes de très faible rugosité, interrompues par des creux qui correspondent aux porosités. Cet état de surface est de meilleure qualité que celui des matières solides usinées, qui présentent une succession alternée de pics et de creux.
- Pas de frais d'outillage

❖ Pièces réalisées au frittage de poudre:

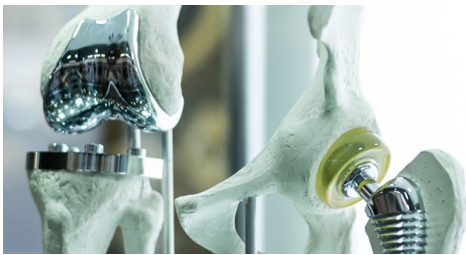


Image 1: Photo d'une rotule fabriquée par Fusion Laser Sélective

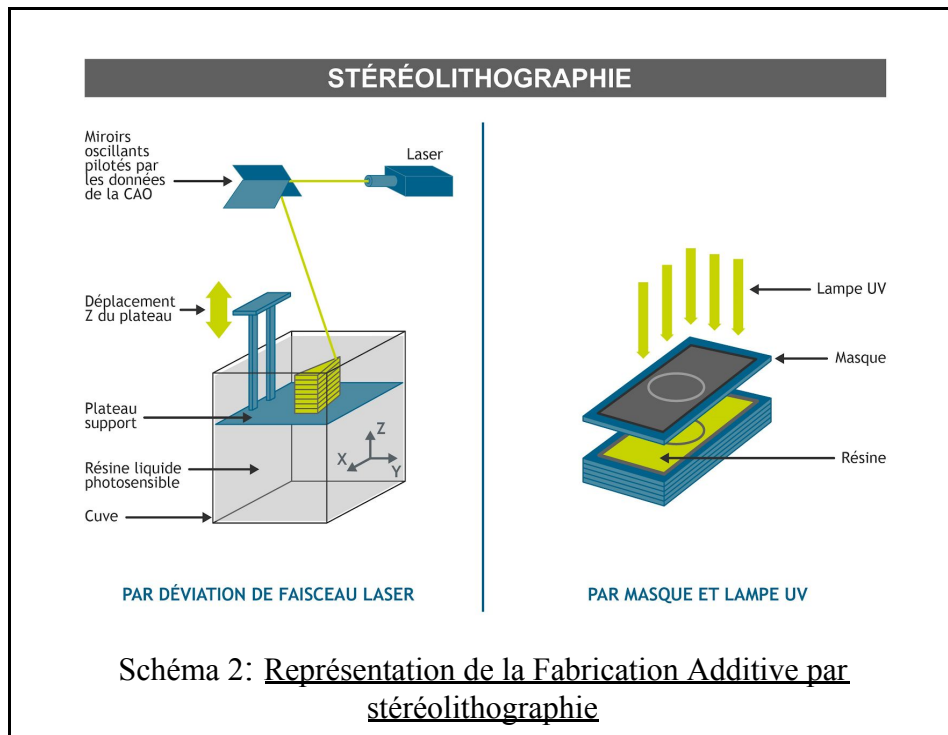


Image 2: Photo d'un piston fabriqué par Fusion Laser Sélective

b. Stéréolithographie (SLA)

La Stéréolithographie, étymologiquement « écriture en relief », est l'une des techniques les plus anciennes d'impression 3D. Cette technique a été brevetée en 1984 par Charles Hull et la première machine commerciale développée par 3D Systems était en 1988. Cette méthode se base sur la résine.

Le principe de photopolymérisation - polymérisation en chaîne qui est initiée par l'absorption de la lumière visible ou ultraviolette - est utilisé pour fabriquer des modèles 3D à partir d'une résine sensible aux UV. La résine est solidifiée couche par couche jusqu'à former notre pièce finale. Cette technique est bien connue par le secteur industriel qui s'est familiarisé à ce procédé. Sa maîtrise permet de l'exploiter au mieux, contrairement à d'autres impressions 3D, parfois plus avantageux, mais plus récents et moins bien connus.

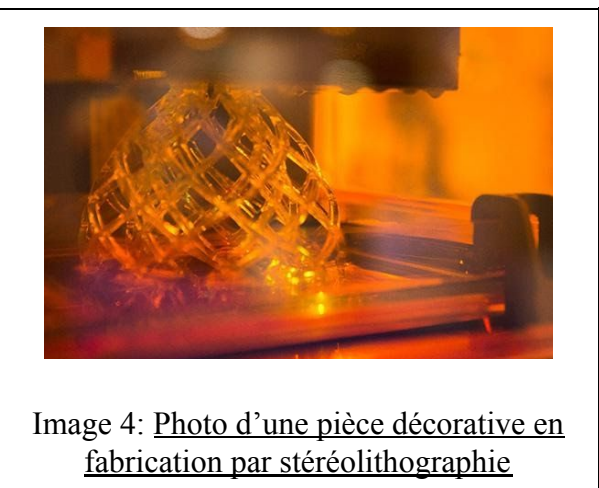
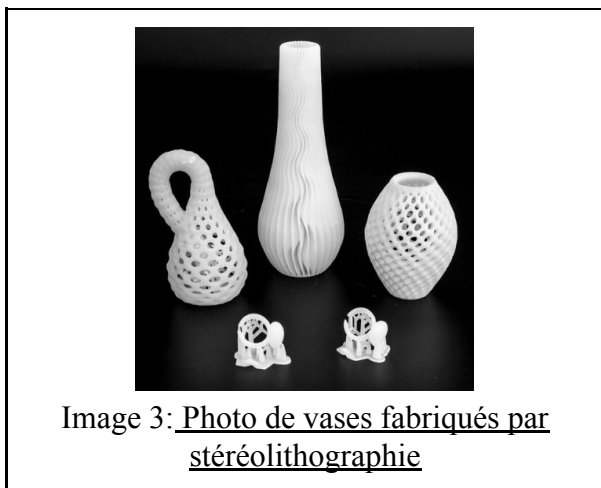


❖ Étudions les avantages et les inconvénients de ce type de fabrication additive:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● Haute précision, finesse du détail : de par la faible épaisseur de chaque couche appliquée en stéréolithographie - entre 0,05 et 0,10 mm - et la finesse du faisceau laser. ● Qualité de la pièce : malgré l'utilisation de résine, les pièces réalisées par stéréolithographie ont de bonnes qualités fonctionnelles de surface. ● Finition lisse : les pièces ont un rendu lisse, avec possibilité de choisir entre un certain nombre de résines pour des rendus différents. ● De plus petit au plus grand : avec la stéréolithographie il est possible de 	<ul style="list-style-type: none"> ● Fragilité : Les pièces sont plus fragiles que les définitives. Si la qualité de la finition permet d'obtenir des prototypes fonctionnels, la stéréolithographie ne permet cependant pas d'obtenir des pièces pour des tests mécaniques. ● Machines coûteuses : si l'on avait prédit le boom de l'impression 3D il y a quelques années, les experts ont négligé le coût des machines et la difficulté de la prise en main. Ainsi, il est plus difficile pour les entreprises de créer elles-mêmes leurs prototypes en stéréolithographie. ● Production unitaire : du fait du temps nécessaire pour produire une pièce,

<p>créer des pièces petites avec une grande précision, tout comme des pièces plus grandes pouvant aller jusqu'à deux mètres, tout en gardant une grande précision.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Délais : réalisation d'une pièce sous environ deux jours avec fichier 3D de CAO. • Prix: le coût est raisonnable, car il n'est pas nécessaire de créer un moule. 	<p>l'usage de la stéréolithographie est limitée à trois exemplaires.</p>
--	--

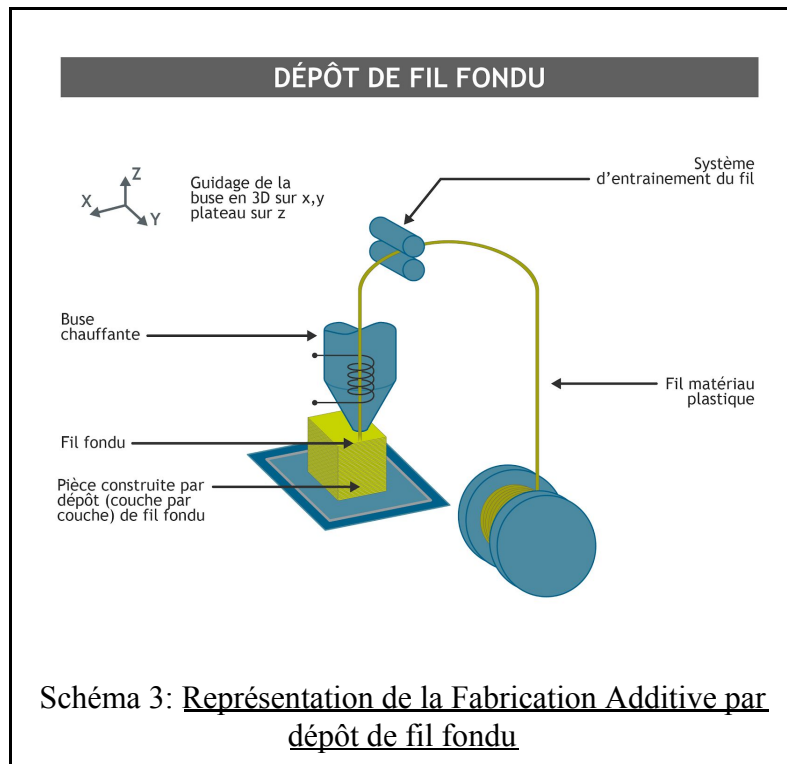
❖ Pièces réalisées par stéréolithographie :



c. *Dépôt de fil fondu (FDM) :*

Dans les années 1980, S. Scott Crump a développée ce procédé bien connu, FDM. Depuis Stratasys, un acteur majeur dans l'impression 3D, commercialise la technologie FDM.

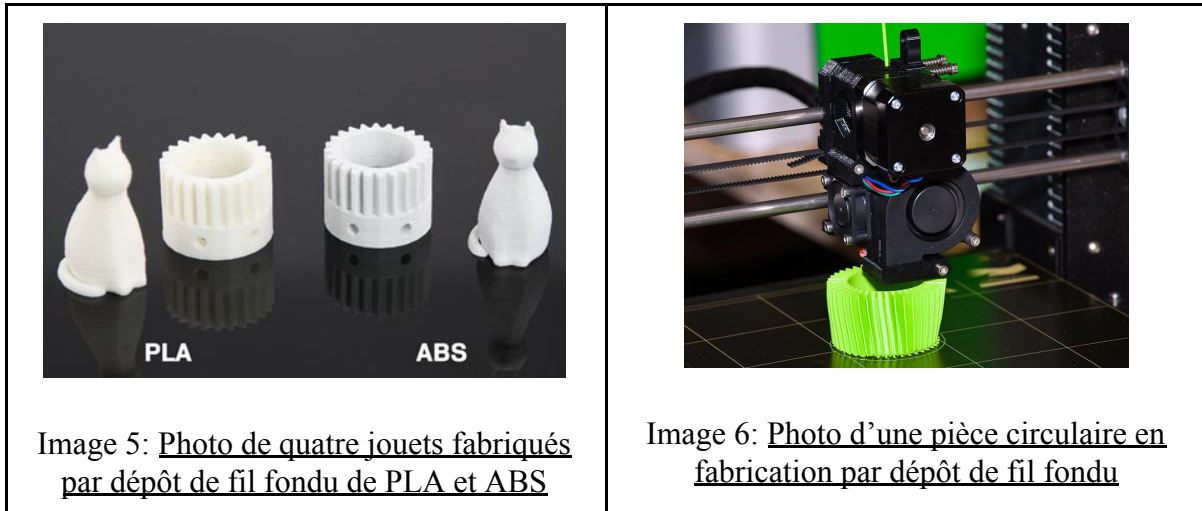
Cette fabrication est considérée comme l'une des plus simples. Elle repose sur 3 éléments principaux dont un plateau sur lequel est imprimé la pièce, une bobine de filament qui sert de matériau d'impression et une tête d'extrusion également appelée extrudeur (cf Schéma 3). Le filament est fondu pour être déposé couche par couche sur la pièce en formation (cf Image 6).



❖ Étudions les avantages et les inconvénients de ce type de fabrication additive:

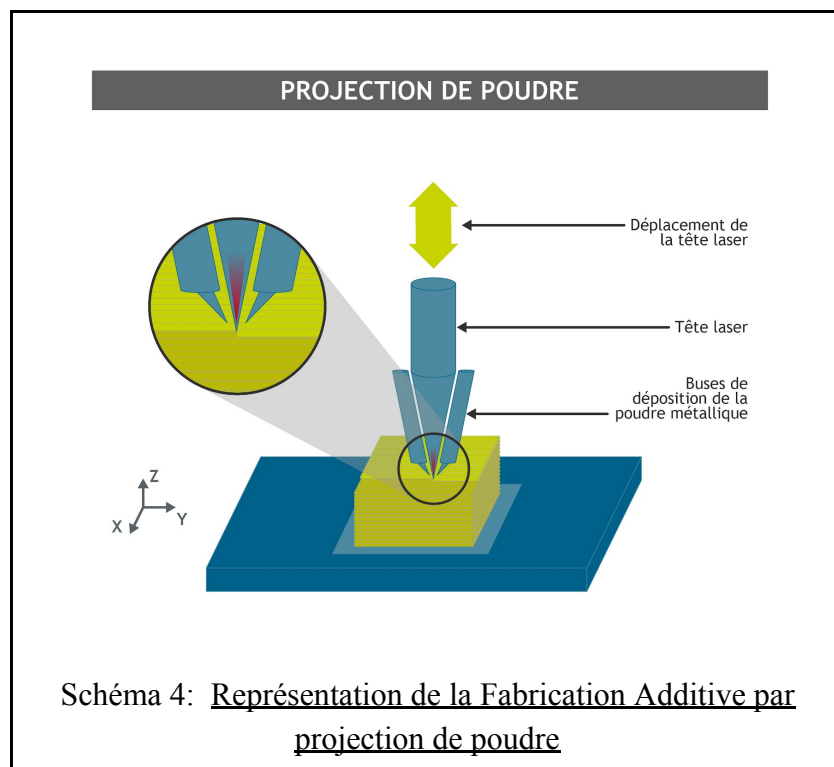
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● Simplicité d'utilisation. ● Faible coût de l'imprimante et de fabrication de pièces. ● Fabrication de plus en plus rapide avec de nombreuses têtes d'imprimantes différentes. Utile pour les industries. ● Différents matériaux de production car les fils sont interchangeables tels que l'ABS (polymère thermoplastique), le PLA (matériau recyclé à partir d'amidon de maïs souvent utilisé dans les emballages alimentaires), le polycarbonate (PC), le polyamide, le polystyrène (cf Image 5). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Précision modérée. Pour améliorer la qualité du produit, on peut les lisser mécaniquement ou chimiquement en fonction du matériau utilisé. ● Faible précision dimensionnelle et de résolution.

❖ Pièces réalisées par dépôt de fil fondu:



d. Projection de poudre :

En pulvérisant directement la poudre métallique dans le laser, on place le métal en fusion directement sur un support pour fabriquer la pièce. Le plateau sur lequel repose le rendu s'abaisse au fur et à mesure de la conception (cf Schéma 4). C'est un dépôt de matière sous flux d'énergie dirigé (DED).



❖ Pièces réalisées par projection de poudre:

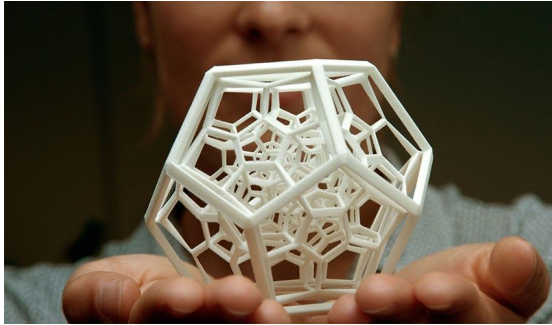


Image 7: Photo d'une pièce décorative fabriquée par projection de poudre



Image 8: Photo d'une pièce de moteur fabriquée par projection de poudre

e. *Projection de gouttes:*

Ce procédé consiste à envoyer une résine photopolymère sous forme de gouttes, comme une imprimante traditionnelle, pour former une première couche. Ensuite, une source UV solidaire de la tête d'impression solidifie la résine par polymérisation (cf schéma 5). Cette technologie est très innovante mais aussi récente, ce qui la rend peu répandue dans le secteur industriel. Les connaissances des ingénieurs sur ce procédé sont limitées ce qui rend les industriels frileux quant à l'achat d'une telle technologie.

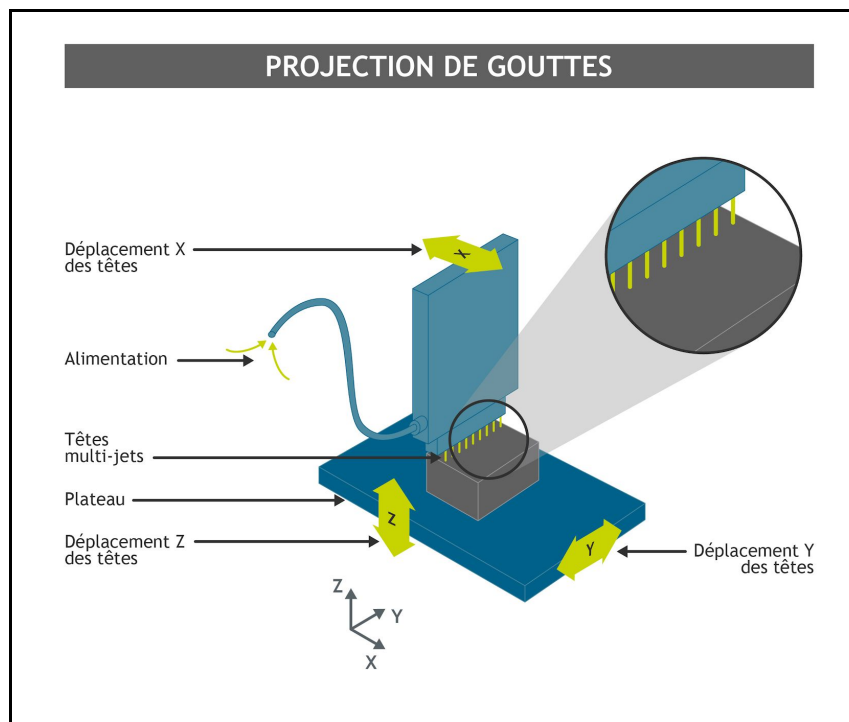


Schéma 5: Représentation de la Fabrication Additive par projection de gouttes

❖ Pièces réalisées par projection de poudre:

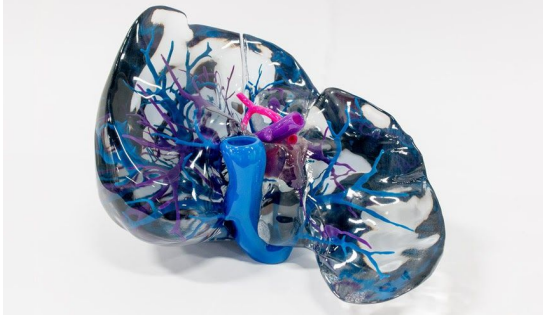


Image 9: Photo d'un objet décoratif par projection de gouttes

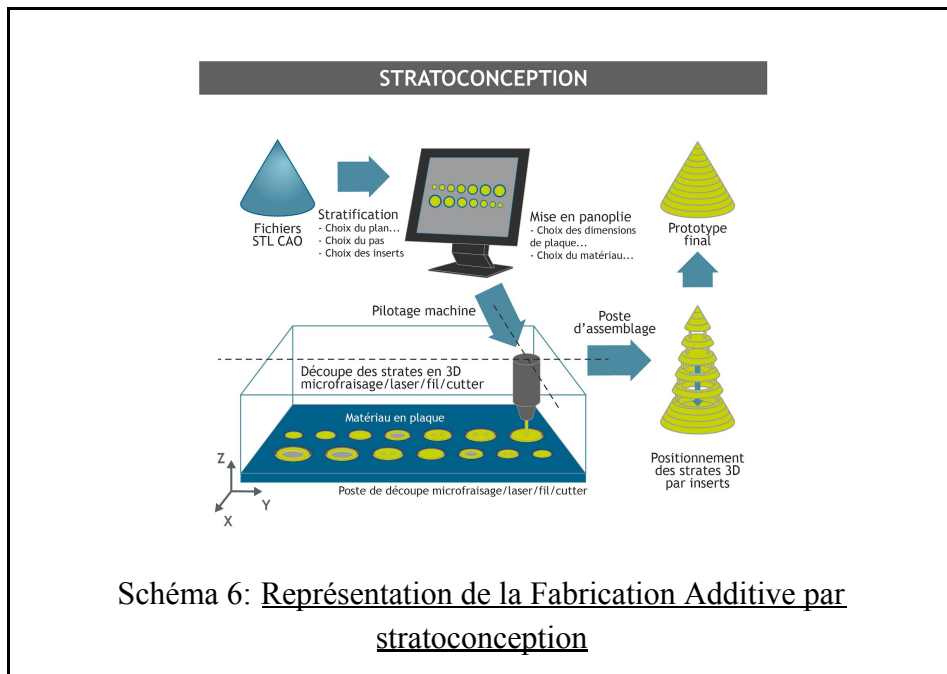


Image 10: Photo d'une maquette de corps humain pour la médecine fabriquée par projection de gouttes

f. Stratoconception :

A la fin des années 1980, ce sont les travaux de recherche initiés par le Professeur Claude Barlier et son équipe qui ont conduit au procédé breveté de Stratoconception, en 1991.

La Stratoconception est le procédé de fabrication additive de type solide - solide qui permet une fabrication couche par couche, d'un objet dessiné en CAO. Le procédé consiste en la décomposition de l'objet en une série de couches élémentaires complémentaires appelées strates, dans lesquelles sont placés des inserts de positionnement et des renforts. Chacune de ces strates est directement mise en panoplie puis fabriquée par micro-fraisage rapide, par découpe laser, par découpe au fil par découpe cutter, ou par tout autre moyen de découpe à partir de matériaux en plaques. Toutes ces strates sont ensuite positionnées par des inserts, des pontets ou par des éléments d'imbrication et assemblées afin de reconstituer la pièce finale (cf schéma 6). L'assemblage des strates est pris en compte dès l'étape de conception afin d'assurer la tenue aux contraintes mécaniques pendant l'utilisation.



❖ Étudions les avantages et les inconvénients de ce type de fabrication additive:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Diversité des matériaux possibles : matériaux en plaques, plastiques, résines usinables, mousses, aluminium, acier • Les pièces peuvent être de très grande taille • Pièces complexes possibles. Il permet l'insertion au sein des couches de systèmes de régulation, d'aspiration ou d'instrumentation. Possibilité d'avoir des petits détails. Et l'utilisateur peut choisir le temps et la qualité de conception. • Coût faible de la machine et du matériau • Liberté d'application 	

❖ Pièces réalisées par projection de poudre:



Image 11 : Photo de vaisselle fabriquée par stratoconception

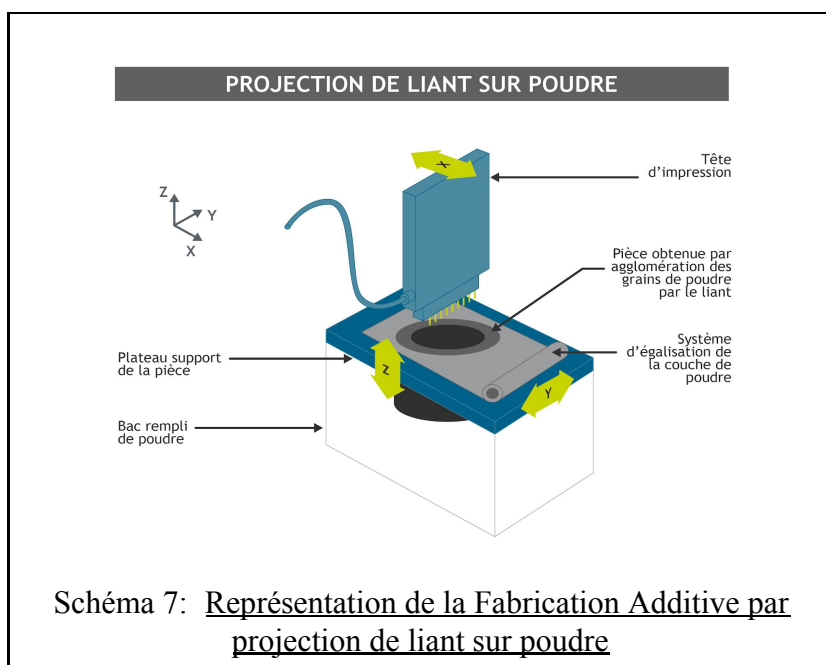


Image 12 : Photo d'une aube de turbine Stratora fabriquée par stratoconception

g. Projection de liant sur poudre :

Cette méthode de Fabrication additive a été inventée en 1993 au “Massachusetts Institute of Technology” qui a commencé à travailler avec de la céramique. Les droits ont été repris deux ans plus tard par Z Corporation. Celle-ci a été rachetée en 2012 par le géant 3D Systems. En ce qui concerne la projection de liant métallique, elle a été développée par la société américaine ExOne en 1996.

A l'aide d'un rouleau, ce procédé consiste à déposer une fine couche de poudre de matériau sur le plateau d'impression (cf schéma 7). Une tête d'impression vient ensuite appliquer un liant liquide. Lorsque le processus est terminé, le plateau de poudre est retiré de l'imprimante et placé dans un four pour la cuisson. Lorsque l'objet est solidifié, il est extrait du plateau et traité de la poudre grâce à des brossages et des souffleuses à air. Puis, la boucle se répète.



❖ Étudions les avantages et les inconvénients de ce type de fabrication additive:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Grande liberté de design • Rapidité de production • Economique • Précision • Permet d'imprimer plusieurs alliages métalliques tels que les aciers inoxydables • Appropriée pour les prototypes ou encore des pièces uniques telles que des bijoux 	<ul style="list-style-type: none"> • Propriétés mécaniques des pièces en métal imprimées sont souvent limitées. Pour fabriquer des pièces ayant de fortes propriétés mécaniques, il est conseillé de se tourner vers les technologies d'impression 3D métal DMLS ou SLM. • La qualité d'impression est souvent moindre que les technologies de fusion sur lit de poudres (SLS, SLM ou DMLS), et que la stéréolithographie (SLA) ou le procédé DLP • Pièces moins résistantes, moins solides. • Texture rugueuse

❖ Pièces réalisées par projection de liant sur poudre:



Image 13: Photo d'une maquette de réacteur aéronautique



Image 14 : Photo du liant coulant sur la poudre pour la fabrication de la pièce

h. Avantages et inconvénients généraux de la Fabrication Additive :

On remarque finalement que la Fabrication Additive présente plus d'avantages que de contraintes dans la production industrielle. On la compare généralement avec la Fabrication Soustractive, méthode la plus répandue il y a encore quelques années.

Un de ses atouts majeurs est la réalisation de pièces complexes irréalisables auparavant. En effet la complexité de ces pièces réside dans des cavités internes ou encore des canaux non rectilignes par exemple. En FS, on imagine bien sûr ce genre de pièce impossible à fabriquer.

De plus, le coût de fabrication ne sera pas le même selon la méthode choisie. Tandis que le coût avec FS se base sur la complexité de fabrication d'une pièce, le coût par FA ne dépend plus que du matériau et de sa quantité utilisée. Il suffit, pour réduire ce coût, d'augmenter la complexité de la pièce afin de réduire le volume par exemple, chose impossible avec les limites imposées par la FS.

Il est important de souligner qu'avec l'arrivée de la FA, les fabricants ont revus leurs limites de conception. C'est-à-dire que, grâce à la FA, ils ne conçoivent plus en fonction des limites du procédé de fabrication mais plutôt en fonction des possibilités. Contrairement à la FS, les limites sont imposées par l'imagination et la connaissance des méthodologies de conception. Néanmoins, cela peut être contraignant car il est donc impératif de s'approprier les bonnes procédures de fabrication. Il faut constamment se mettre à jour les méthodologies de conception sous peine de passer à côté des possibilités innovantes qu'offre la fabrication additive.

A tout cela, d'autres avantages s'ajoutent tels que l'énergie nécessaire qui est 2 fois moins importante selon une étude américaine, mais encore le délai de fabrication, l'utilisation minimale de produits dangereux, etc.

Quelques contraintes propres à cette méthode subsistent tout de même. En effet, à la fin de la fabrication, il faut évacuer la poudre résiduelle. Cela implique d'anticiper un ou plusieurs chemins d'évacuation. Il est également souvent nécessaire d'améliorer l'état de surface de la pièce par différents traitements. Le coût d'installation est important et les dimensions des pièces sont plus limitées.

Il est donc nécessaire pour le fabricant d'avoir conscience des bénéfices apportés par la FA, mais aussi de se renseigner sur les contraintes qu'elle implique. Chaque industriel a des objectifs de production différents dépendants de nombreux facteurs (surtout le type de pièce à fabriquer). On remarque de plus en plus que la FA est plus adaptée que la FS dans les chaînes de production.

2. L'acier Inoxydable

L'acier inoxydable est un alliage métallique ferreux comportant au moins 10.5% de chrome et moins de 1.2% de carbone. Cet acier, plus communément appelé inox, est particulièrement connu pour sa grande résistance à la corrosion et à l'oxydation. Il est très utilisé dans l'industrie étant très économique, recyclable entièrement, facile à fabriquer et possédant une bonne résistance mécanique. C'est pourquoi l'acier inoxydable est utilisé dans

de nombreux domaines allant de la médecine, aux transports, à la construction navale en passant par la cuisine.

Il existe en réalité différentes variantes de l'acier inoxydable pouvant être classés dans différentes familles en fonction de leur composition chimique :

- **Austénitique** : fer, chrome (14 à 30%), nickel (8 à 10%), carbone (< 0,1 %)
 - le plus commun, représente 65% des aciers inoxydables trouvés aujourd'hui
 - facilement déformable, ductile
 - grande résistance aux chocs
- **Martensitique** : fer, chrome (12 à 18%), carbone ([0.1;1.2%])
 - propriétés magnétiques
 - rigide
 - bonne résistance à la corrosion modérée
 - aptes à la trempe (terme expliqué par la suite)
- **À durcissement par précipitation** : chrome (15-17%)
 - utilisation pour la conception d'épée
 - doit subir un traitement spécifique qui permet d'améliorer sa résistance à la rupture
- **Ferritique** : fer, chrome (1 à 27%), carbone (< 0,1%)
 - propriétés magnétiques
 - bonnes caractéristiques mécaniques
 - il existe différents types d'aciers ferritiques (stabilisé, non-stabilisé, faiblement alliés, réfractaires), différents selon leur taux de chrome. Les plus chromés sont notamment utilisés en milieux marins.
- **Duplex** : fer-chrome-nickel, structure mixte austénitique-ferritique (propriété magnétique)
 - propriétés mécaniques meilleures que les aciers inoxydables ferritiques ou austénitiques
 - utilisé dans des environnements où la température ne dépasse pas les 300°

On peut par ailleurs ajouter d'autres éléments chimiques à l'acier inoxydable pour modifier ses propriétés.

- Le Nickel apporte de la ductilité et de la malléabilité
- Le Cuivre renforce la tenue en milieu corrosif
- Le Tungstène améliore la tenue aux températures élevées
- Le Silicium renforce sa résistance à l'oxydation

Le choix d'une famille d'acier inoxydable dépend de nombreux facteurs et doit prendre en compte l'environnement dans lequel sera placé l'inox. La caractéristique principale recherchée comme dit précédemment est la capacité à résister à la corrosion et à l'oxydation. Pour cela, l'acier doit contenir un minimum de 10.5% de chrome. Mais d'autres caractéristiques sont souvent nécessaires et doivent être prises en compte pour choisir le matériau le plus adapté. Voici quelques exemples :

- Les caractéristiques mécaniques
- Le facteur de sécurité d'usage
- L'état de surface
- L'épaisseur de l'acier

- L'aptitude de l'acier au soudage

Le fer est le composant principal de cet alliage. Il possède différentes structures cristalline variant selon le traitement thermique de l'alliage. Sous sa forme alpha (α), le fer a une structure cubique centrée. On la retrouve en dessous de 906°C.

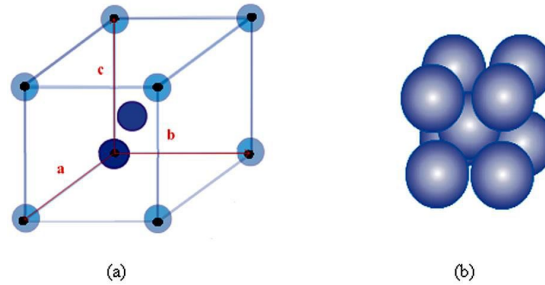


Figure 1 : Structure cristalline cubique centrée

La forme gamma (γ) est une structure cristalline cubique à faces centrées qui se forme entre 906°C et 1401°C.

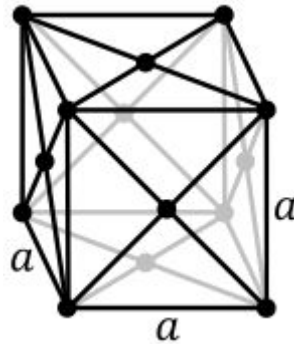


Figure 2 : Structure cristalline cubique à faces centrées

Une dernière forme delta (δ) est atteinte au dessus de 1401°C jusqu'à 1538°C qui est sa température de fusion. Cette dernière est une structure cristalline cubique centrée à nouveau (cf figure 1).

C'est grâce à ces différents arrangements d'atomes que les propriétés d'un acier inoxydable varient en fonction du traitement thermique reçu.

3. L'acier 316L et son utilisation

Lors de ce projet nous avons étudié un acier inoxydable austénitique et amagnétique, nommé acier 316L. Cet acier est particulièrement résistant dans des domaines agressifs et possède une bonne résistance chimique. Sa qualité inoxydable s'obtient par l'intermédiaire de la formation d'un film d'oxyde transparent riche en chrome sur le métal. Ce film est une barrière protectrice contre l'oxydation qui se reforme à la suite d'un choc. L'acier 316L est aussi ductile donc facile à usiner, et permet d'obtenir des états de surface et des usinages de qualité. Étant austénitique, ce matériau comporte du fer, du chrome, du nickel et une teneur

en carbone très faible, qui lui offre une meilleure résistance à la corrosion dans les structures soudées. Du molybdène a été ajouté afin de le rendre plus résistant à la corrosion. Voici sa composition exacte :

%C ⁽¹⁾	%Mn ⁽²⁾	%P ⁽²⁾	%S ⁽¹⁾	%Si ⁽²⁾	%Cr ⁽²⁾	%Ni ⁽²⁾	%Mo ⁽²⁾	%N ⁽²⁾	%O ⁽²⁾	%Fe
< 0,03	< 2	< 0,01	< 0,005	< 1	16-19	9-13	1,5-3	< 0,003	< 0,002	Compl.

Cet acier est notamment très répandu en bijouterie et en horlogerie, car il reflète la lumière une fois polie, ne change pas de couleur et ne ternit pas dans le temps tout en restant facile à travailler. Ensuite on peut retrouver ce matériau dans nos ustensiles de cuisine et couverts, grâce à sa qualité à résister aux dommages et à la corrosion. Il peut ainsi être nettoyé régulièrement sans ternir. Enfin l'acier 316L est utilisé dans les constructions navales, aéronautiques et automobiles, car son coût de fabrication et ses propriétés mécaniques sont intéressantes.

4. Traitements thermiques

Le traitement thermique d'un matériau constitue un ensemble de procédés industriels ayant pour but de modifier les propriétés physiques ou chimiques de celui-ci. Un traitement thermique peut être réalisé sur divers matériaux comme le bois, les aliments, le verre et surtout les matériaux.

Un traitement thermique consiste à jouer sur trois facteurs : la température, le temps et le milieu de maintien en température du matériau.

Ainsi cet ensemble de procédé possède généralement trois étapes et est appelé recuit :

1. **Montée en température** : la pièce est chauffée jusqu'à une température définie appelé température de recuit. Le matériau est chauffé dans un four dont la température peut varier de 450 à 1100° en fonction des matériaux choisis et des propriétés attendues.
2. **Maintien à température** : la température choisie doit être maintenue pendant un temps donné.
3. **Refroidissement** : la pièce peut être refroidie à des vitesses différentes en fonction du milieu dans lequel elle est refroidie (trempe à l'eau, trempe à l'huile, air, vide...). On obtient un état structural du métal proche de l'état d'équilibre stable, et la trempe permet d'obtenir des aciers très durs mais peu ductiles.

Ce traitement permet d'éliminer ou de réduire les contraintes résiduelles du métal liées à une action antérieure (soudure, déformation...) ou à un traitement thermique antérieur, et va modifier différentes caractéristiques des matériaux :

- leur ductilité
- leur résilience ou ténacité
- leur résistance
- leur dureté

II. Expérimentations et résultats

1. Préparation des échantillons

a. Découpage :

Pour effectuer nos tests nous devons préparer nos échantillons. La 1ère étape fut de découper des petits morceaux d'acier 316L. Nous avons utilisé l'appareil de tronçonnage à notre disposition : la ACCUTOM-100 de chez STRUERS (cf Image 15).



Image 15: Photo de la ACCUTOM-100 - STRUERS à notre disposition pour le tronçonnage de l'acier 316L

Pour une découpe de notre échantillon, il suffit de positionner une barre d'acier 316L avec l'étau, puis régler sa position ainsi que celle de la scie horizontalement pour fixer le point de découpe. Puis il faut ensuite indiquer la largeur de la découpe. Après ça, on règle la vitesse de rotation de la scie (attention à ne pas la faire tourner trop vite au risque de la casser si le matériau est trop résistant). Enfin, on ferme la vitre de protection et on lance la découpe. Un lubrifiant est aspergé sur la lame en rotation durant la découpe.

Nous avons ainsi découpé une quinzaine d'échantillons d'une longueur d'environ 10mm. Dans notre cas, la précision des dimensions des échantillons nous importe peu. Néanmoins cette machine peut s'avérer très utile pour des coupes nécessitant une très grande précision.

b. Enrobage :

Afin de réaliser efficacement nos mesures, nous avons besoin de faciliter la manipulation des pièces. Pour cela, nous avons décidé d'enrober les différentes pièces grâce à la Predopress de chez Struers (cf Image 16).



Image 16: Photo de la PEDROPRESS - STRUERS utilisée pour l'enrobage des échantillons

La première étape est de poser la pièce que l'on veut étudier face contre le piston de la machine. Puis, il faut redescendre le piston suffisamment, afin de recouvrir la pièce de la poudre de Bakélite servant à l'enrobage. Après cela, il faut fermer le couvercle, remonter le piston au plus haut et mettre la machine sous pression. Ensuite, l'appareil va passer par trois étapes :

- La première est l'étape de Préchauffage.
- La deuxième est l'étape de Chauffage.
- La troisième est l'étape de Refroidissement.

Enfin, il nous reste plus qu'à enlever le couvercle, remonter le piston au plus haut et récupérer la pièce enrobée. Mais pour pouvoir étudier la pièce, il faut maintenant la polir.

c. Polissage :

Le polissage est une étape essentielle afin de réaliser nos différentes mesures. En effet, que cela soit pour effectuer les tests de duretés ou faire les études aux microscopes, le polissage est nécessaire pour obtenir des résultats fiables ou exploitables. Nous utilisons pour cela, une polisseuse manuelle de chez Struers (cf Image 17).



Image 17: Photo de la polisseuse utilisée avec un papier polisseur de 600 grains

Premièrement, pour effectuer les tests de duretés, il faut avoir une face parfaitement plane à étudier. Or, après l'enrobage les deux faces sont irrégulières. Nous réalisons un polissage de la face d'étude avec des disques de grains 600 et 800. La première étape est de placer le disque 600 de le mettre à tourner et allumer l'eau. Il faut ensuite venir tenir la pièce en contact avec le disque pendant quelques minutes (cf Image 18). Après quoi, on remplace le disque 600 par le 800 et on vient tenir la pièce de façon perpendiculaire aux rayures faites précédemment afin de polir plus efficacement la pièce, on effectue cela aussi pendant quelques minutes. Enfin, il ne reste plus qu'à l'autre face pendant quelques secondes afin d'avoir deux faces planes pour avoir un test de dureté exploitable.

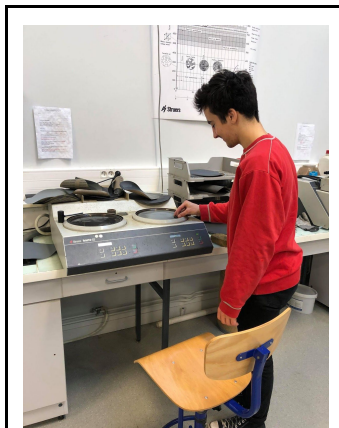


Image 18 : Photo de Thomas Riou polissant un échantillon dans le laboratoire du projet

Deuxièmement, pour réaliser les études au microscope, il nous faut aussi avoir des faces parfaitement plates. Mais, les disques de grains 600 et 800 posent problèmes. En effet, les rayures sont encore trop grosses pour avoir des résultats exploitables. Pour cela, nous utilisons des disques avec plus de grains mais plus fin (des disques 1200 et 2400). On réalise ensuite les mêmes procédures que pour les disques 600 et 800. Une fois cela fait, on peut enfin réaliser les études aux microscopes, la taille des rayures faites par le polissage est suffisamment petite pour ne pas interférer avec nos études.

d. Traitements thermiques :

Afin de répondre aux besoins des industriels, notre pièce doit acquérir un comportement isotrope. Nous allons tenter ici d'appliquer différents traitements thermiques à nos échantillons afin de modifier leurs propriétés.

Pour réaliser ces traitements thermiques, nous disposons de fours haute température (cf Image 19).

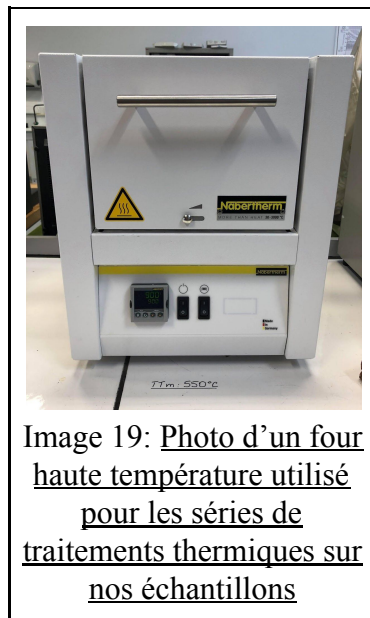


Image 19: Photo d'un four haute température utilisé pour les séries de traitements thermiques sur nos échantillons

Nous pouvons faire varier deux paramètres : La température de chauffage et le temps de chauffage.

Le protocole expérimental est le suivant : Après avoir réglé le four à la température voulue, il faut le laisser monter en température jusqu'à ce qu'il ait atteint sa consigne. Ensuite, il faut introduire l'échantillon dans le four, en le déposant sur une petite brique afin d'éviter tout contact direct avec le four. Pour réaliser toutes ces opérations en sécurité, il est nécessaire de porter des gants de protection thermique, une blouse et des lunettes.

Dans un premier temps, afin d'évaluer l'impact de la température et du temps de chauffage sur le comportement de nos échantillons, nous avons réalisé une série de traitements thermiques sur 6 échantillons distincts : 4 échantillons pendant 30 minutes à respectivement 700, 800, 900 et 1000 °C, un échantillon à 800°C pendant 15 minutes et un échantillon à 800 °C pendant une heure.

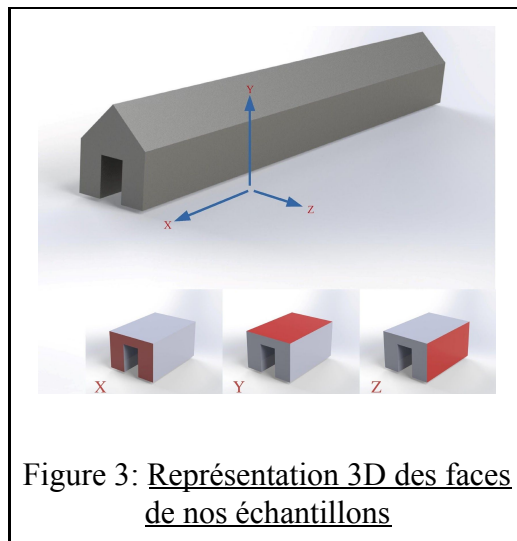
A l'issue de ces traitements thermiques, nous avons analysé la dureté de chaque échantillon.

2. Analyse microscopique

Après avoir fait les tests de dureté sur nos échantillons nous avons mené une étude microscopique sur chacun d'eux. Le but de cette étude était de voir si le matériau est homogène ou non. Sur chaque échantillon nous avons pris une dizaine de photos par face, afin de pouvoir faire une étude statistique sur l'homogénéité du matériau. Si un défaut était visible nous augmentons le grossissement pour mieux voir celui-ci. Pour analyser notre échantillon fallait dans un premier temps que le microscope s'initialise après avoir été allumé. Puis il nous suffisait de poser notre échantillon sur la porte échantillon et de faire la mise au point tout d'abord avec le plus petit grossissement nous pouvions ensuite passer à un grossissement plus important. Le microscope était commandé à l'aide d'une petite manette, relié à un ordinateur afin d'avoir le rendu visuel de l'échantillon et pouvoir prendre des photos. Ce microscope optique permettait d'avoir une grande précision comparée à un microscope optique manuel.

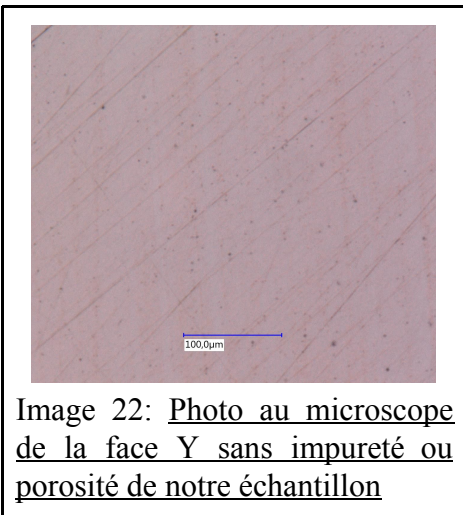
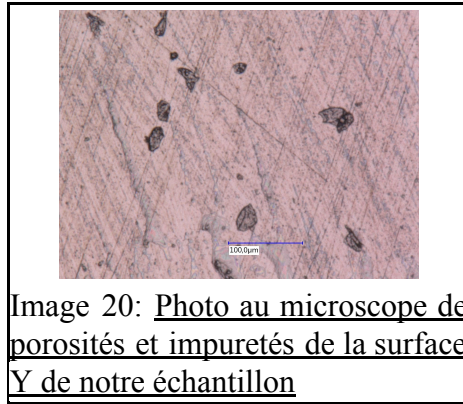
a. Échantillons sans traitements thermiques :

Dans un premier temps, nous avons observé au microscope optique des échantillons sans traitement thermique. Nous avons alors étudié les trois faces de notre pièce : face de dessus - "Y", face de dessous - "Z" et face de côté - "X".



Voici ci-dessous nos résultats :

❖ *Face du dessus - Y :*



Sur cette face, on remarque des trous au niveau des coins de chaque marquage de test de dureté. Mis à part ces légers trous visibles au microscope avec un grossissement de 700 mm, on peut observer des traces de résidus de matière et des rayures dans l'acier dus au polissage.

De plus, sur la première image concernant cette face, on observe des lamelles aux joints de grains. Elles sont remarquables par les longues bandes grises. De plus, cette image est intéressante car on peut voir des empilements de dislocations s'arrêtant au joint de grains. Ceux-ci sont représentés par la fine ligne perpendiculaires aux rayures du polissage.

On n'observe ses caractéristiques que sur notre première photographie.

❖ *Face de dessous - Z :*

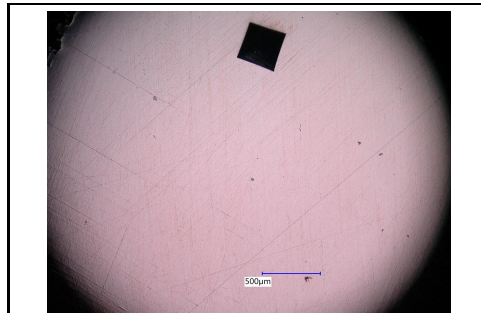


Image 23: Photo de la face Z avec marquage du test de dureté et sans impureté de notre échantillon

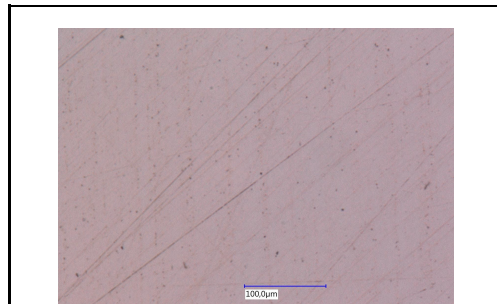


Image 24: Photo de la face Z avec des rayures du polissage de notre échantillon



Image 25: Photo de la face Z avec rayures du polissage de notre échantillon

Sur la Face de dessous, les trous sont peu présents. Les impuretés sont négligeables et les rayures (cf Images 23,24 et 25) moins flagrantes que celles présentes sur la face de dessous. Ici, le polissage a été mieux réalisé et le résultat est plus net.

❖ *Face de côté - X :*

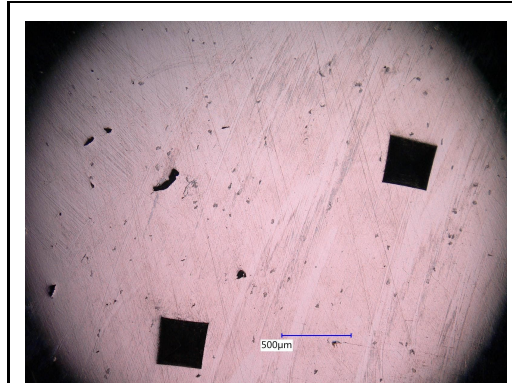


Image 26: Photo au microscope de la face X avec de nombreuses impuretés

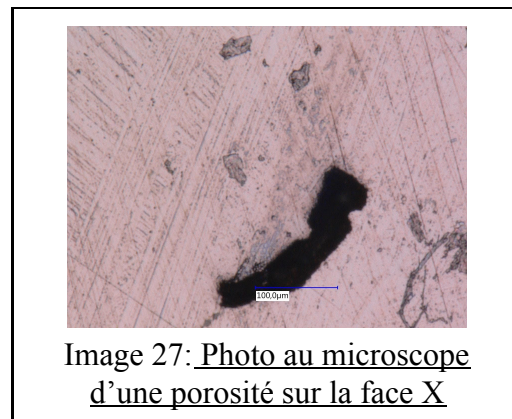


Image 27: Photo au microscope d'une porosité sur la face X



Image 28: Photo de la face X avec rayures dues au polissage

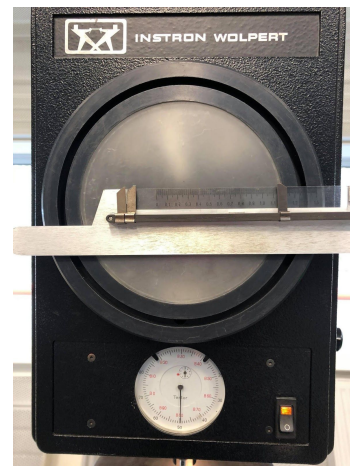
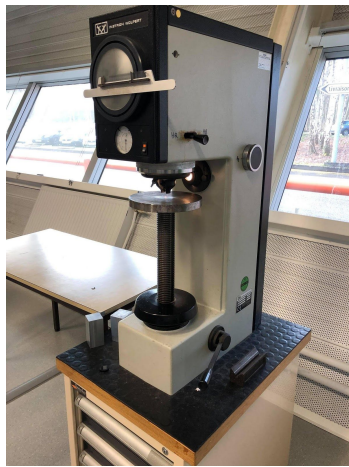
Cette face de côté présentes de nombreux trous (cf Image 27) et rayures (cf Image 28). Les traces noires sont réparties sur tout le côté (cf Images 26 et 27).

b. *Observations Générales :*

Les photos au microscope ne nous montrent pas une forte différence dans la taille du grain, dans la taille des trous après les tests de dureté ou encore la taille des trous toujours présents après polissage. Cependant, sur la face de dessus, on est en présence de joints de grains mais ceux-ci restent en très petite quantité.

3. Étude de la dureté

Pour déterminer la dureté de nos échantillons, nous avons utilisé un duromètre Vickers.



Le protocole expérimental est le suivant : L'échantillon à tester est placé sur un plateau réglable en hauteur. Au-dessus du plateau, un microscope permet de visualiser la pièce sur un écran. On règle la hauteur du plateau afin de faire la mise au point, et l'on place la zone que l'on souhaite analyser au centre de l'écran. Puis, en actionnant le levier situé sur le côté du duromètre, on fait descendre l'indenteur pyramidal sur l'échantillon. Il convient d'attendre quelques secondes afin que le poinçon ait le temps de laisser son empreinte définitive, puis on relève le levier. On peut alors évaluer la taille de l'empreinte sur l'écran en mesurant ses diagonales d_1 et d_2 .

On détermine enfin la dureté de Vickers, noté H_v , par la formule suivante :

$$H_v = 1,8544 \times P/d^2$$

Avec H_v en Kg/mm^2

P en kg

D en mm

Ici, le duromètre est réglé pour exercer une force de 30 kg .

d est la moyenne des diagonales d_1 et d_2 .

La dureté n'étant pas toujours uniforme à la surface de nos échantillons, on répète 5 fois cette mesure en différents points afin d'avoir une valeur finale fiable et de pouvoir évaluer les incertitudes. De même, notre matériau conçu par fabrication additive n'est pas forcément isotrope. Par conséquent, il faut effectuer le test de dureté pour les trois faces de nos échantillons afin de connaître les propriétés du matériau dans les trois directions de l'espace.

Voici les résultats de dureté obtenus pour le premier échantillon :

Échantillon 1 : Face X	d (mm)	Hv (kg/mm ²)
Essai 1	0,505	218,14
Essai 2	0,505	218,14
Essai 3	0,500	222,53
Essai 4	0,500	222,53
Essai 5	0,495	227,05

Incertitude : $I = \sigma / \sqrt{n} = 3,33 / \sqrt{5} = 1,49$

Dureté : $Hv = 222 \pm 2$

Échantillon 1 : Face Y	d (mm)	Hv (kg/mm ²)
Essai 1	0,470	251,80
Essai 2	0,420	315,40
Essai 3	0,415	323,10
Essai 4	0,415	323,10
Essai 5	0,440	287,35

Incertitude : $I = 12,3$

Dureté : $Hv = 300 \pm 13$

Échantillon 1 : Face Z	d (mm)	Hv (kg/mm ²)
Essai 1	0,510	213,90
Essai 2	0,475	246,60
Essai 3	0,500	222,50
Essai 4	0,510	213,90
Essai 5	0,515	209,8

Incertitude : $I = 5,95$

Dureté : $H_v = 221 \pm 6$

Ces résultats confirment le caractère anisotrope de nos échantillons. En effet, nous pouvons constater que notre matériau est 35 % plus dur dans la direction Y. En revanche, la dureté est très similaire dans les deux autres directions. Cela résulte du fait que la pièce soit conçue debout lors de la fabrication additive.

A l'issue des phases de traitements thermiques, nous avons analysé la dureté de chaque échantillon.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

Échantillon 1 : Face Y 700°C - 30 min	d (mm)	Hv (kg/mm ²)
Essai 1	0,450	274,73
Essai 2	0,465	257,29
Essai 3	0,480	241,46
Essai 4	0,480	241,46
Essai 5	0,460	262,91

Incertitude : $I = 5,73$

Dureté : $H_v = 256 \pm 6$

Échantillon 2 : Face Y 800°C - 30 min	d (mm)	Hv (kg/mm ²)
Essai 1	0,550	183,91
Essai 2	0,525	201,84
Essai 3	0,520	205,74
Essai 4	0,545	187,30
Essai 5	0,520	205,74

Incertitude : $I = 4,20$

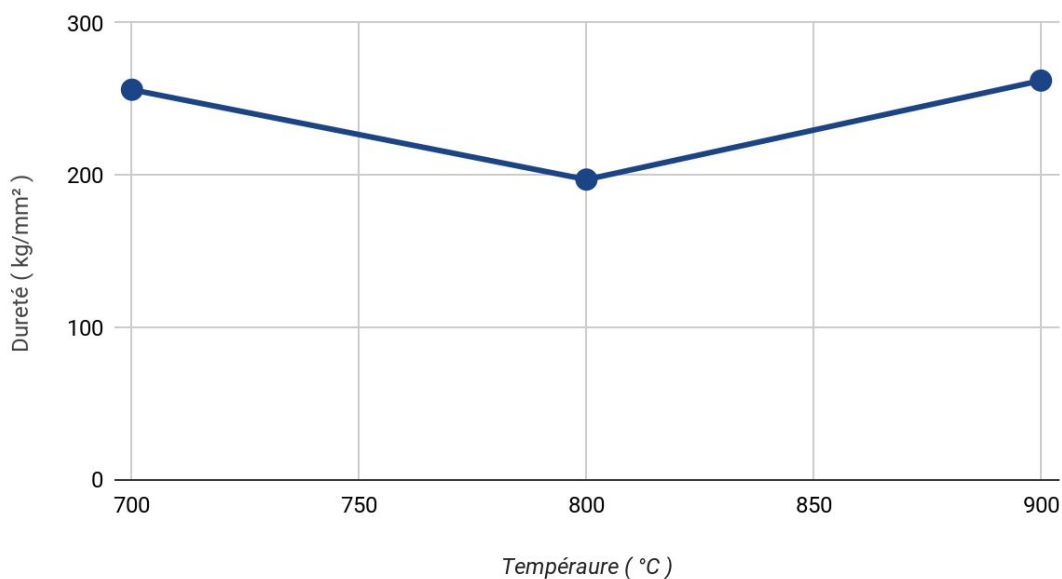
Dureté : $H_v = 197 \pm 5$

Échantillon 3 : Face Y 900°C - 30 min	d (mm)	Hv (kg/mm ²)
Essai 1	0,430	300,88
Essai 2	0,460	262,91
Essai 3	0,470	251,84
Essai 4	0,470	251,84
Essai 5	0,480	241,46

Incertitude : $I = 9,25$

Dureté : $Hv = 262 \pm 10$

Dureté en fonction de la température pour un traitement de 30 minutes



Nous pouvons constater que la dureté sur la face Y, qui était à l'origine de 300 ± 13 , descend à 256 ± 6 après un traitement thermique de 30 minutes à 700°C. Pour un traitement thermique à 800°C, la dureté est de 197 ± 5 . Il semble donc que la dureté soit inversement proportionnelle à la température du traitement thermique, ce qui correspond à ce que l'on peut prévoir théoriquement. Cependant, la dureté relevée après un traitement à 900°C remonte à 262 ± 10 , comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessus. Cette valeur étant inattendu, nous pouvons émettre plusieurs hypothèses :

- Les barres d'acier 316l à partir desquelles nous avons découpé nos échantillons n'étaient peut être pas totalement homogènes. Certains échantillons pourraient alors

être plus durs que d'autres. Cependant, cette hypothèse est peu plausible du fait de la grande différence entre les valeurs obtenues et les valeurs attendues.

- Une seconde hypothèse serait que l'on se soit trompé de face lors de cette dernière mesure. Encore une fois, cette hypothèse nous semble peu plausible car les faces sont très facilement reconnaissables grâce à la forme des échantillons.
- La dernière hypothèse serait que nos résultats soient justes, bien que nous ne les attendions pas. Il faudrait alors essayer de comprendre le phénomène à l'origine de cette hausse de dureté.

Afin de déterminer la bonne hypothèse, il faudrait réaliser une nouvelle série de tests afin de voir si nos résultats se répètent ou non. Cela ne sera malheureusement pas possible cette année puisque nous n'avons plus eu accès au laboratoire. Ainsi il sera difficile de conclure sur des recherches théoriques dans l'ensemble.

4.Traction

Nous n'avons malheureusement pas pu réaliser des études de tractions sur nos différents échantillons suite à la pandémie, donc nous n'avons pas de résultats à analyser.

Conclusion

L'objectif initial de ce projet était d'étudier expérimentalement les propriétés mécaniques de plusieurs échantillons d'acier 316L obtenus par fabrication additive, puis d'essayer de modifier leur comportement en leur appliquant un traitement thermique afin de répondre aux exigences des industriels. Cependant, suite à la crise sanitaire du Covid-19, nous n'avons pas pu accéder aux locaux de l'INSA à compter du 17 Mars. Ainsi, sur les 13 séances prévus pour le projet, seules les 5 premières ont pu être effectuées en laboratoire. Le projet a donc pris une tournure plus théorique et bibliographique.

Les mesures que nous avons effectuées lors des 5 premières séances n'ont pas été suffisantes pour répondre au problème posé. De plus, nous avons relevé plusieurs anomalies suite aux traitements thermiques, et il aurait donc fallu réaliser de nouvelles mesures pour pouvoir tirer des conclusions. Néanmoins, ces séances ont été très intéressantes puisqu'elles nous ont permis de comprendre et d'expérimenter plusieurs méthodes de préparation, d'analyse et de traitement des matériaux.

Les recherches théoriques ont également été très enrichissantes. Nous avons ainsi eu le temps d'explorer en détail les différentes méthodes de fabrication additive, avec leurs avantages et leurs inconvénients respectifs. Cela nous a permis de prendre conscience du potentiel considérable de cette technologie très prometteuse. Nous avons également effectué des recherches approfondies sur l'acier inoxydable, afin de mieux comprendre les caractéristiques de l'acier 316L.

Enfin, ce projet a été l'occasion de développer notre capacité à travailler en équipe. En effet, s'organiser au sein d'un groupe de 6 personnes demande de la rigueur et une bonne communication, tout particulièrement en cette période de travail à distance.

Malgré les difficultés liées à cette situation exceptionnelle, nous sommes donc très satisfaits d'avoir mené à bien ce projet, qui nous a été profitable à tout point de vue.

Lexique

Définitions trouvées majoritairement sur le site Larousse ou sur Wikipedia

Recherches/Théorie:

alliage: Produit métallique obtenu en incorporant à un métal un ou plusieurs éléments

corrosion: Lente destruction d'une matière par son environnement sans action mécanique

oxydation: Réaction chimique, souvent provoquée par l'oxygène, par laquelle on retire des électrons à un atome ou à une molécule. La réaction opposée s'appelle la réduction.

ductilité: Propriété d'un matériau de se laisser déformer facilement ; en particulier, propriété d'un métal de se laisser étirer facilement.

propriétés magnétiques: Faculté d'un matériau à s'aimanter ou non

rigidité: Caractère de ce qui résiste aux efforts de torsion, de cisaillement, qui ne plie pas

caractéristiques mécaniques: Elles permettent de définir un matériau en se basant sur son comportement face à une action mécanique. La dureté, la ductilité, la résistance à la rupture sont toutes des caractéristiques mécaniques des matériaux mais il en existe bien d'autres.

malléabilité: Propriété de ce qui se laisse modeler, travailler

facteur de sécurité d'usage: Paramètres servant à dimensionner des systèmes, permettant de s'assurer de la sécurité des utilisateurs.

état de surface: Élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées.

soudage: Opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base

usinage: Soumettre une pièce à l'action d'une ou de plusieurs machines-outils, essentiellement dans le cas où cette action consiste en un enlèvement de matière.

dureté: Caractère de ce qui est dur, de ce qui résiste au choc, à la pression

Microscope:

homogénéité du matériau: Une ou plusieurs de ses propriétés est(sont) uniforme(s), c'est-à-dire a(ont) la même valeur partout dans le matériau considéré.

Dureté et traitements thermiques:

lubrifiant: liquide ayant pour rôle de lubrifier, réfrigérer ou les deux à la fois et de réduire le frottement d'une pièce par rapport à une autre.