

École polytechnique de Louvain

Optimisation mécanique et topologique d'une pièce fonctionnelle en AlSi10Mg pour la fabrication additive en SLM

Auteur : Manon VATLET

Promoteur : Aude SIMAR

Lecteurs : Bruno DEHEZ, Pierre DUYSINX, Camille VAN DER REST

Année académique 2019–2020

Master [120] : ingénieur civil mécanicien

"L'Homme a besoin de passion pour exister"

Eric Tabarly

Remerciements

Ce Travail de Fin d'Etudes n'aurait jamais pu aboutir sans l'aide précieuse et les conseils avisés qui m'ont guidée tout au long de ce quadrimestre.

Je tiens à remercier particulièrement :

Le professeur, **Madame Aude Simar**, promotrice de ce travail, tant pour son soutien dans ma volonté de le lier à ma passion que pour son appui et ses conseils pendant sa réalisation.

Madame Camille van der Rest, pour son aide précieuse et son enthousiasme à me faire découvrir les procédés, techniques et machines.

Le professeur, **Monsieur Pierre Duysinx** et ses assistants, en particulier **Monsieur Pablo Alarcón**, pour leur aide et leurs conseils dans le cadre de la partie "Topologie".

Tous les membres du pôle IMAP de l'UCLouvain et en particulier **Messieurs Marc Sinnaeve et Alban Maton** pour avoir répondu à toutes mes questions et m'avoir aidée à mettre en œuvre les solutions.

Mes parents pour leur aide incommensurable tant morale que logistique.

Mes amis pour les moments d'évasions indispensables.

Abréviations

3D	T ridimensionnel
AM	Fabrication Additive (A dditive M anufacturing)
CAO	C onception A ssistée par O rdinateur
DAO	D essin A ssisté par O rdinateur
EDM	Electroérosion (E lectrical D ischarge M achining)
HAZ	Zone Affectée thermiquement (H eat A ffected Z one)
SEM	Microscope à balayage électronique (S canning E lectron M icroscopy)
SLM	Fusion Sélective par Laser (S elective L aser M elting)
STL	Format de fichier 3D (S Téréo L ithographie)
TED	Densité d'Énergie Linéique (T rack E nergy D ensity)
TFE	T ravail de F in d' E tudes
VED	Densité d'Énergie Volumique (V olumic E nergy D ensity)

Table des Matières

1	Introduction.....	1
2	Etat de l'art	3
2.1	Fabrication additive	3
2.1.1	Etapas de création en AM	4
2.1.2	Avantages et inconvénients des procédés AM.....	5
2.1.3	Fusion Sélective par Laser	6
2.1.4	Matériau : AISi10Mg	12
2.1.5	Fabrication par SLM à base de l'AISi10Mg.....	12
2.1.6	Propriétés mécaniques de l'AISi10Mg fabriqué par SLM	17
2.2	Etude topologique.....	19
2.2.1	Etapas	19
2.2.2	Point de vue numérique	20
2.2.3	Méthode SIMP.....	21
2.2.4	Variable d'optimisation	22
2.2.5	Instabilités numériques.....	22
2.2.6	Filtres	23
2.2.7	Boucle de conception, apport d'expertise, finalisation du design	24
3	Choix et caractéristiques de la pièce.....	26
4	Matériel et méthode.....	29
4.1	Infrastructure d'impression.....	29
4.1.1	Machine SLM	29
4.1.2	Poudre.....	30
4.1.3	Séparation et découpe des pièces imprimées.....	31
4.2	Fabrication des échantillons	31
4.2.1	Cubes pour la mesure de densité et l'observation de la microstructure ..	32
4.2.2	Plaques pour grandes éprouvettes de traction horizontales.....	32
4.2.3	Grandes éprouvettes de traction horizontales	33
4.2.4	Eprouvettes de tractions verticales et à 45°	33
4.3	Caractérisation des échantillons	35
4.3.1	Mesure de densité.....	35
4.3.2	Microstructure.....	38
4.3.3	Essais de traction	40
4.4	Optimisation Topologique	43
4.4.1	Définition du domaine de conception et maillage	43
4.4.2	Points fixes et chargement	44
4.4.3	Paramètres de simulation.....	45
5	Résultats	46

5.1	Mesure de densité relative des cubes.....	46
5.2	Microstructure	48
5.2.1	Porosités	48
5.2.2	Zones thermiquement affectées.....	49
5.3	Essais de traction.....	51
5.4	Optimisation Topologique	55
5.4.1	Facteur de pénalisation.....	55
5.4.2	Détermination de la fraction volumique	55
5.4.3	Paramètres de l'optimisation topologique retenue	56
5.4.4	Topologie finale.....	56
6	Discussion	58
6.1	Influence des paramètres SLM sur la densité relative et la porosité	58
6.1.1	Influence de la vitesse et de la puissance sur la densité relative	58
6.1.2	Influence de la distance inter-cordons sur la densité relative	62
6.1.3	Influence des paramètres sur les porosités.....	63
6.1.4	Lien entre porosités et densité relative.....	65
6.2	Analyse des essais de traction.....	67
6.2.1	Mesure de la section effective.....	67
6.2.2	Explication du module de Young.....	68
6.2.3	Comparaison avec la littérature.....	68
6.2.4	Entrée en striction	69
6.2.5	Faciès de rupture	73
6.3	Lien entre microstructure, densité relative et essais de traction	75
6.3.1	Largeur de zone	75
6.3.2	Lien entre la porosité des cubes et la rupture des éprouvettes	76
6.4	Pièce finale : Taquet d'amarrage	77
6.4.1	Design CAO	77
6.4.2	Impression de la pièce	80
6.4.3	Analyse des images de porosité	82
6.4.4	Vérification des cotes	84
6.4.5	Test de traction	86
6.4.6	Etude budgétaire.....	88
7	Conclusion.....	91
A.	Annexe 1: Fiche Technique de la machine [33]	
	92
B.	Annexe 2 : Fiche technique de la poudre [34] ..	94
C.	Annexe 3 : Batch X200-191008	95

D.	Annexe 4 : Batch X200-191021	99
E.	Annexe 5 : Batch X200-191022.....	102
F.	Annexe 6 : Batch X200-191205.....	106
G.	Annexe 7 : BATCH X200-191212.....	109
H.	Annexe 8 : BATCH X200-191218.....	111
I.	Annexe 9 : Propriétés Mécaniques	113
J.	Annexe 10 : Comparaison entre le module de Young mesuré et réel.....	115
K.	Annexe 11 : Largeur de zones.....	116
L.	Annexe 12 : Contrainte de Von Mises sur la topologie brute.....	117
	Bibliographie.....	119

Table des Figures

Figure 2-1 : Classification des différents procédés de fabrication additive, traduit de [2].....	3
Figure 2-2 : Etapes de la fabrication additive [37]	4
Figure 2-3 : Diminution du temps d'assemblage grâce à l'AM [4].....	5
Figure 2-4 : Description du mécanisme SLM (traduit de [8]), Z représente la direction de fabrication.....	7
Figure 2-5 Différents paramètres d'impression [14].....	9
Figure 2-6 : différentes stratégies de lasage : a) ilots et contour d'une couche, b) Alternance des couches [15].....	11
Figure 2-7 : Diagramme de phases des alliages Al-Si	12
Figure 2-8 : Fenêtre de paramètres : (1) pas de fusion, (2) fusion insuffisante, (3) Bonne fenêtre de paramètres, (4) surfusion (keyhole) [42].....	13
Figure 2-9 : Evolution de la densité en fonction des paramètres d'impression [11]	14
Figure 2-10 : Morphologie typique d'échantillons d'AlSi10Mg imprimés par SLM pour différents paramètres [11]	15
Figure 2-11 : Représentation des trois coupes d'une impression SLM [22]	15
Figure 2-12 : Microstructure des frontières des bains de fusion (vues en coupe) : (a) trois différentes zones, (b) région fine, (c) région grossière, (d) zone affectée thermiquement [21]	16
Figure 2-13 : Influence des paramètres d'impression sur la résistance à la traction	17
Figure 2-14 : Revue bibliographie des propriétés mécaniques de l'AlSi10Mg fabriqué par SLM ..	18
Figure 2-15 : domaine de conception :	19
Figure 2-16 : Définition des cas de charge [28].....	20
Figure 2-17 : Méthode SIMP de pénalisation [28]	21
Figure 2-18 : Structure en damier : cellule pleine en noir et vide en blanc [28].....	22
Figure 2-19 : Dépendance du maillage [28]	22
Figure 2-20 : Action des filtres : a) domaine de conception, b) étude topologique sans filtre (présence de beaucoup de damiers), c) filtrage de faible rayon, d) filtrage de rayon large	23
Figure 2-21 : Filtre Heaviside [28]	24
Figure 2-22 : Résultat topologique lissé [25].....	24
Figure 2-23 : Pièce reconstruite et rendue réaliste par CAO	25
Figure 3-1 : Différentes géométries de taquets [45] [43] [46].....	26
Figure 3-2 : Schéma de principe des chargements : en rouge force radiale sur le pied (40 000 N) et en bleu force verticale sur les ailes (4 000 N).....	28
Figure 4-1: Imprimante ProX DMP 200 et ses bombonnes d'argon	29
Figure 4-2 : Composition de la poudre [34]	30
Figure 4-3 : Tamiseuse semi-automatique.....	30
Figure 4-4 : Px BOX.....	30
Figure 4-5 : Séparation des échantillons du plateau de fabrication par EDM	31
Figure 4-6 : EDM - vue d'ensemble de la machine [48]	31
Figure 4-7 : Batch X200-191008 sorti de machine	32
Figure 4-8 : Batch X200-191021 sorti de machine	32
Figure 4-9 : Eprouvette pour les batch X200-191021 & 22 (en mm).....	32
Figure 4-10 : Batch X200-191022 sorti de machine	33
Figure 4-11 : Batch X200-191205 sorti de machine	33
Figure 4-12 : Plans de découpe des éprouvettes du batch X200-191205 (en mm) (a) plaques étroites, éprouvettes verticales – (b) plaques larges, éprouvettes à 45° - (c) petites plaques, éprouvettes uniques à 45° - (d) éprouvettes uniques à 45°	34
Figure 4-13 : Balance <i>Mettler AE 200</i> ® [39]	35

Figure 4-14 : Accessoire de mesure des densités [40]	35
Figure 4-15 : Découpe des cubes	38
Figure 4-16 : Demi-cube enrobé.....	38
Figure 4-17 : SEM Ultra 500 [38]	39
Figure 4-18 : SEM : Observation des différentes zones thermiquement affectées	39
Figure 4-19 : SEM - Vue d'ensemble des porosités	40
Figure 4-20 : Optique - Bains de fusion et porosités après une attaque au réactif de Keller	40
Figure 4-21 : Machine de traction	41
Figure 4-22 : Détail des mors	41
Figure 4-23 : Mesure type des propriétés mécaniques sur les courbes de traction	41
Figure 4-24 : Vue macroscopique d'un faciès de rupture	42
Figure 4-25 : Domaine de conception	43
Figure 4-26 : Maillage définitif	44
Figure 4-27 : Application des cas de charge et des contraintes.....	44
Figure 5-1 : Identification des échantillons principaux issus du batch X200-191008	46
Figure 5-2 : Mesure de densité des cubes du batch X200-191008	46
Figure 5-3 : Densité relative en fonction de la VED pour une vitesse de balayage donnée	47
Figure 5-4 : Vue générale des porosités des différents échantillons en fonction de la densité relative - numéros des échantillons : a) 9A, b) 14, c) 6, d) 28, e) 30, f) 10, g) 19, h) 24	48
Figure 5-5 : Morphologie des porosités (échantillon 6 ●) – zoom de la Figure 5-4 (c)	48
Figure 5-6 : SEM : Observation des différentes zones thermiquement affectées (échantillon 6 ●)	49
Figure 5-7 : Tailles des zones thermiquement affectées, classées par taille de HAZ.....	49
Figure 5-8 : Evolutions des largeurs de zones thermiquement affectées en fonction de la VED : 50	
Figure 5-9 : Essais de traction des éprouvettes horizontales. Set de paramètres : ▲ h=75µm, P=100%, V=1800mm/s.....	51
Figure 5-10 : Eprouvettes imprimées "en forme"	51
Figure 5-11 : Courbes de traction des éprouvettes horizontales pour les 8 sets différents	52
Figure 5-12 : Valeurs moyennes des propriétés mécaniques pour les trois directions d'impression	53
Figure 5-13 : Courbes de traction des 6 sets de paramètres et pour les trois directions	54
Figure 5-14 : Comparaison des différentes fractions volumiques : a) 30 %, b) 50 %, c) 70 %	55
Figure 5-15 : Paramètres TOPOL	56
Figure 5-16 : Résultat brut de l'optimisation topologique	56
Figure 5-17 : Contrainte de Von Mises sur la topologie brute pour le chargement longitudinal en +X	57
Figure 5-18 : Résultat topologique lissé	57
Figure 6-1 : Evolution de la densité relative en fonction de la VED pour une vitesse donnée	59
Figure 6-2 : Evolution de la densité relative en fonction de la puissance pour une vitesse donnée	59
Figure 6-3 : Evolution de la densité relative en fonction de la VED pour une puissance donnée .	61
Figure 6-4 : Evolution de la densité relative en fonction de la vitesse de balayage pour une puissance donnée	61
Figure 6-5 : Comparaison des distances inter-cordons.....	62
Figure 6-6 : Bains de fusion et porosités, image optique de l'échantillon (▲) attaqué au réactif de Keller	63
Figure 6-7 : Bains de fusion et porosités, image optique de l'échantillon (■) attaqué au réactif de Keller	63
Figure 6-8 : Bains de fusion et porosités, image optique de l'échantillon (▲) attaqué au réactif de Keller	64
Figure 6-9 : Bains de fusion et porosités, image optique de l'échantillon (●) attaqué au réactif de Keller	64

Figure 6-10 : Evolution de la densité relative en fonction de la vitesse de balayage et influence sur la porosité,.....	65
Figure 6-11 : Reproduction de la Figure 2-9 : Evolution de la densité en fonction des paramètres d'impression [11] [11]	66
Figure 6-12 Epaisseur d'éprouvette au pied à coulisse vs au comparateur	67
Figure 6-13 : Points de rupture de la littérature et de cette étude	68
Figure 6-14 : Meilleure éprouvette usinée imprimée horizontalement avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 75 \%$ et $v = 600 \text{ mm/s}$ ●	70
Figure 6-15 : Pire éprouvette usinée imprimée horizontalement avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 75 \%$ et $v = 600 \text{ mm/s}$ ●	70
Figure 6-16 : Pire éprouvette imprimée horizontalement "en forme" avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 75 \%$ et $v = 600 \text{ mm/s}$ ●	71
Figure 6-17 : Epreuve imprimée horizontalement avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$ et $v = 1800 \text{ mm/s}$ ▲	72
Figure 6-18 : Epreuve imprimée à 45° avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$ et $v = 1800 \text{ mm/s}$ ▲	72
Figure 6-19 : Epreuve imprimée verticalement avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$ et $v = 1800 \text{ mm/s}$ ▲	73
Figure 6-20 : Faciès de rupture de l'éprouvette horizontale ▲	74
Figure 6-21 : Faciès de rupture de l'éprouvette horizontale ▲	74
Figure 6-22 : Comparaison des propriétés mécaniques pour différentes largeurs de HAZ.....	75
Figure 6-23 : Vue générale des porosités en fonction de la contrainte à la rupture (R_m)	76
Figure 6-24 Résultat Topologique	77
Figure 6-25 Premier modèle CAO	77
Figure 6-26 : Premier design ailes pleines.....	78
Figure 6-27 : Système de fixation du taquet	79
Figure 6-28 : Design définitif	79
Figure 6-29 : Design définitif (en gris) avec les zones de treillis (en bleu)	80
Figure 6-30 : Plateau de fabrication de deux taquets (1 ^{er} set de paramètres)	81
Figure 6-31 : Sortie de fabrication (2 ^{ème} set de paramètres)	82
Figure 6-32 : Faces observées du taquet découpé.....	82
Figure 6-33 : Surface 1 : structure en treillis.....	83
Figure 6-34 : Surface 3 : Observation des porosités dans le pied du taquet	83
Figure 6-35 : Evaluation du volume des porosités au moyen de l'analyse d'image (surface 2)	84
Figure 6-36 : Résultats de l'analyse d'image des porosités des zones du taquet	84
Figure 6-37 : Vérification des cotes du taquet final	85
Figure 6-38 : Différents montages : a) avec surgaine, b) en boucle	87
Figure 6-39 : Premier essai du montage du test de traction : a) montage initial, b) rupture de la gaine	87
Figure 6-40 : Coûts de production.....	90

1 Introduction

La fabrication additive, plus communément appelée impression 3D, est en plein essor ces dernières années. Elle consiste à fabriquer une pièce couche par couche, au départ d'un fichier informatique qui représente la pièce en 3D. Elle se divise en deux grandes familles :

- L'**impression polymère** qui se démocratise et s'ouvre de plus en plus au grand public.
- La **fabrication additive de métaux** qui est encore novatrice et en pleine étude.

La fabrication additive de métaux est encore réservée à la technologie de pointe du spatial, de l'aéronautique, du médical et de la course automobile, mais n'a pas encore percé dans le monde du nautisme.

Même si les premières pièces de production commencent à apparaître sur le marché, la technologie est loin d'être totalement aboutie et de nombreux aspects nécessitent encore recherche et développement, notamment le choix et l'adéquation des nombreux paramètres.

Elle révolutionne les possibilités de conception; en effet, même si elle engendre un nouveau mode opératoire complexe, elle permet de se libérer de nombreuses contraintes liées aux procédés plus classiques que sont la fabrication soustractive (usinage), le moulage ou l'extrusion.

L'impression permet en effet d'imaginer des conceptions beaucoup plus élaborées et, grâce à elle, l'optimisation topologique prend tout son sens.

L'optimisation topologique est une méthode basée sur des outils numériques, qui consiste à optimiser la répartition de la matière dans un domaine de conception donné, en fonction des contraintes et des chargements fixés. Elle permet de réduire le volume de matière et donc la masse d'une pièce, tout en conservant ses propriétés mécaniques; elle supprime la matière inutile de la conception initiale.

Le pôle IMAP de l'UCLouvain possède deux machines de fabrication additive par fusion laser de poudre métallique (procédé SLM). Des recherches ont déjà été effectuées sur les différents paramètres, les possibilités d'impression et les post-traitements, mais la chaîne complète depuis la conception jusqu'à l'impression finale n'a pas encore été entreprise sur ces machines. C'est l'objectif de ce Travail de Fin d'Etudes.

La pièce finale sélectionnée pour cette réalisation est un taquet d'amarrage pour voilier; il s'agit d'une pièce indispensable pour amarrer le bateau dans les ports. Elle est présente sur tous les voiliers quel que soit la taille ou le niveau technologique, mais n'est d'aucune utilité pour la performance intrinsèque du voilier sur l'eau. C'est pourquoi on essaye d'alléger et de minimiser l'encombrement de cette pièce au maximum.

La pièce sera imprimée dans un alliage d'aluminium et de silicium, l'*AlSi10Mg*.

L'étude abordera donc trois thèmes distincts :

- **Analyse, caractérisation et optimisation des différents paramètres d'impression en AISi10Mg par SLM** : des cubes et des éprouvettes sont imprimés et analysés pour comprendre l'influence des paramètres sur la microstructure et les propriétés mécaniques des pièces imprimées.
- **Conception et optimisation topologique de la pièce finale** : détermination et énumération des chargements et limites de la pièce et étude topologique dans le but d'obtenir la géométrie définitive de la pièce.
- **Impression de la pièce finale** : fabrication et caractérisation de la pièce finale.

Chacun de ces trois thèmes est abordé dans les quatre grandes sections de cet exposé :

- **Etat de l'art** : présentation des principes de la technologie, des méthodes utilisées et des connaissances actuelles en la matière, notamment au travers de la littérature.
- **Matériel et méthode** : présentation détaillée du matériel, des matériaux et des procédures spécifiques à cette étude, ainsi que le suivi complet de la démarche d'analyse et de fabrication.
- **Résultats** : compte rendu structuré des résultats des différents tests et manipulations.
- **Discussion** : analyse des résultats entre eux et par comparaison avec la littérature, dans le but de dégager une approche de plus en plus ciblée pour optimiser la méthode et l'impression du taquet.

Finalement la conclusion reprendra un aperçu des principales tendances de cette étude et proposera un positionnement par rapport aux connaissances actuelles et aux perspectives d'avenir.

2 Etat de l'art

2.1 Fabrication additive

La fabrication additive (*additive manufacturing - AM*), regroupe l'ensemble des procédés de mise en forme qui créent une pièce en y ajoutant successivement de la matière, couche par couche, et s'oppose donc aux procédés classiques par enlèvement de matière ou moulage [1].

L'AM permet de limiter grandement les pertes de matière première, mais surtout elle permet la réalisation de designs novateurs et plus légers qu'avec les procédés classiques.

Les avantages et contraintes de fabrication liés à l'AM sont très spécifiques et détaillés dans le paragraphe 2.1.2.

Il existe de nombreux procédés différents qui peuvent s'appliquer à des matériaux très variés (polymères, métaux, céramiques, composites, ...); ils sont repris de manière non exhaustive à la Figure 2-1.

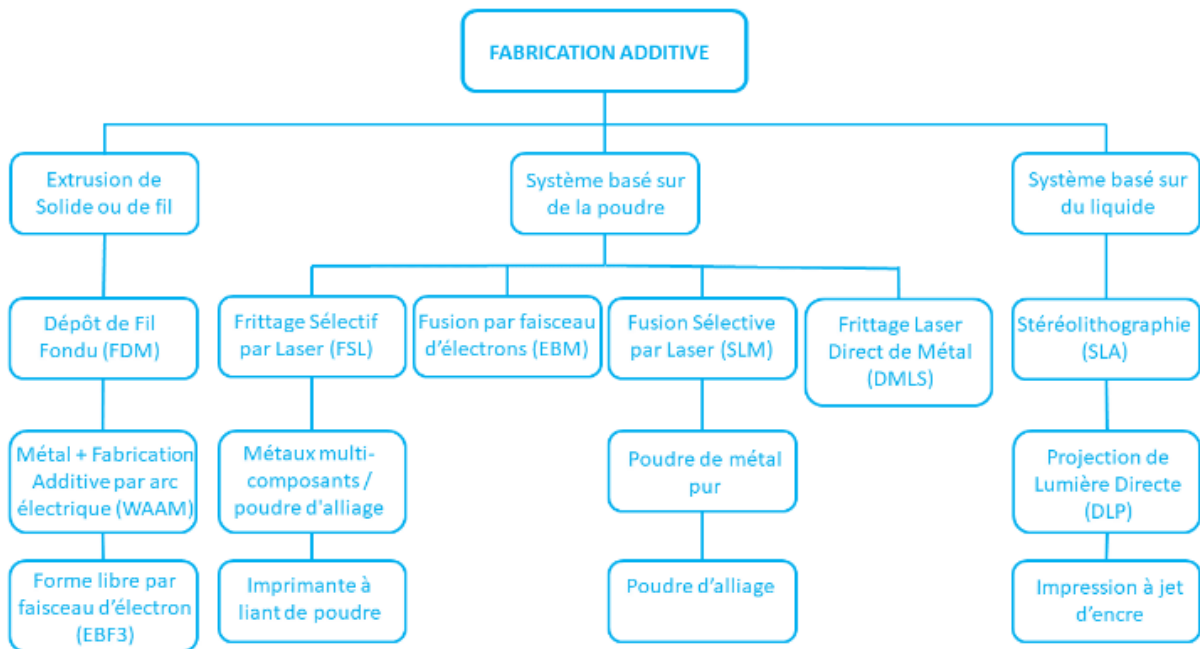


Figure 2-1 : Classification des différents procédés de fabrication additive, traduit de [2]

Le procédé utilisé dans ce Travail de Fin d'Etudes (TFE) est la fusion de lit de poudre par laser (*Laser Powder Bed Fusion – L-PBF*). C'est le nouveau nom officiel de la méthode, mais le nom usuel actuel est **la fusion sélective par laser** (*Selective Laser Melting (SLM)*). Ce procédé de pointe fusionne localement un lit de poudre au moyen d'un laser et permet la réalisation de pièces de haute technologie. Il sera détaillé au paragraphe 2.1.3.

2.1.1 Etapes de création en AM

Tous les procédés d'AM suivent le même schéma pour la réalisation d'une pièce. La chaîne de conception détaillée ci-dessous est également illustrée à la Figure 2-2 [2] [3].

1. Création d'un modèle virtuel par DAO (dessin assisté par ordinateur), CAO (conception assistée par ordinateur) ou en "reverse engineering" au moyen d'un scanner 3D.
2. Conversion du modèle au format STL, un fichier qui contient le solide à part entière et est interprétable par tous les programmes "slicer" (voir point 3) indépendamment de l'origine du fichier initial (voir point 1).
3. Création d'un fichier interprétable par la machine d'impression (habituellement un ".gcode"), au moyen d'un programme propre à la machine, communément appelé "slicer". Le fichier contient les informations suivantes :
 - Orientation de la pièce.
 - Découpage virtuel de la pièce en couches (layer).
 - Définition des paramètres d'impression (vitesse, température, épaisseur de couche, précision ...).
 - Listage séquentiel des actions et mouvements de la machine.
 - Elaboration, si nécessaire de supports pour constituer un appui physique lors de l'impression de surplombs ou de voûtes.
4. Mise en œuvre de la pièce, phase d'impression. Cette étape demande beaucoup de temps machine mais très peu de temps à l'opérateur.
5. Sortie et nettoyage de la pièce : sortie de la machine, retrait du plateau et des éventuels supports, bavures ou matière première résiduelle (post-forming).
6. Eventuel "post-processing" : traitement de surface, traitement thermique, filetage ...

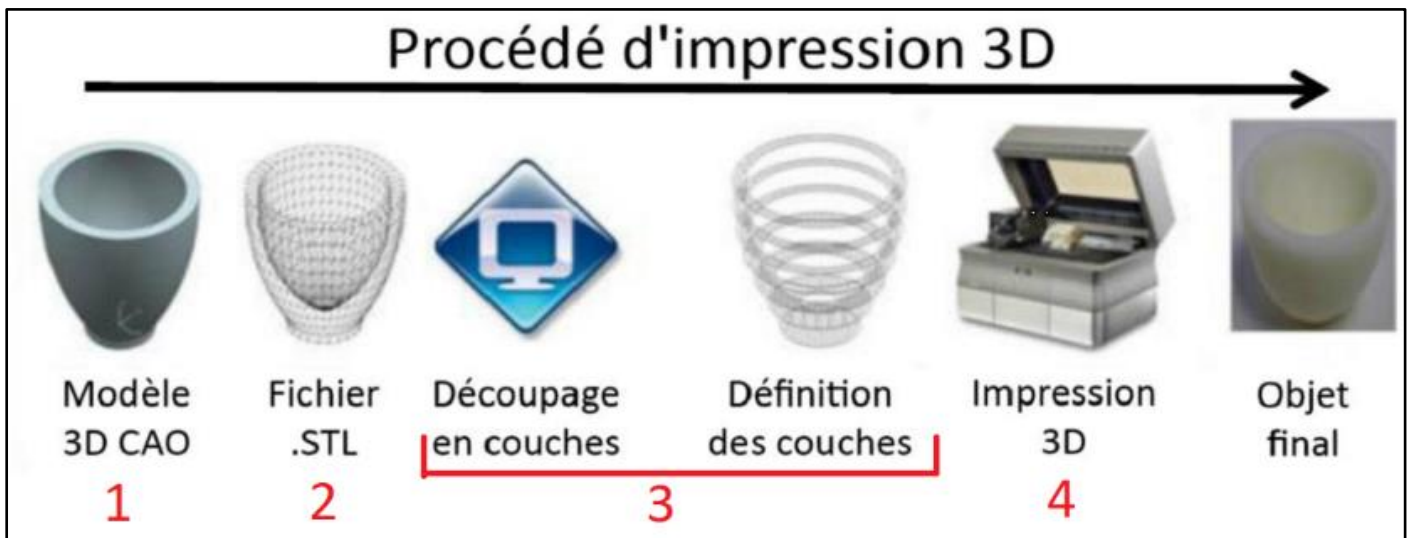


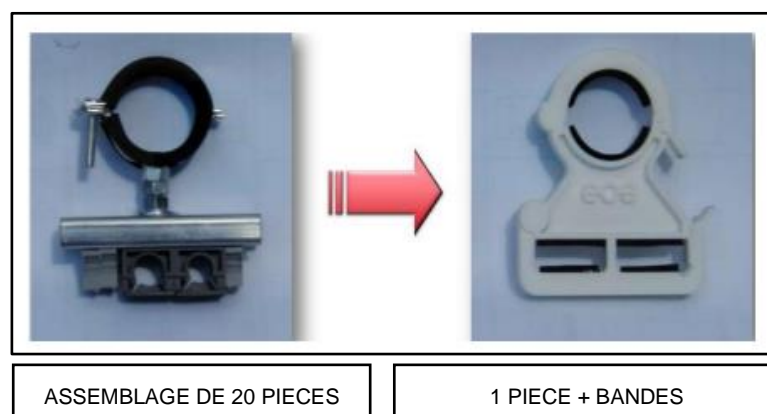
Figure 2-2 : Etapes de la fabrication additive [37]

2.1.2 Avantages et inconvénients des procédés AM

Quel que soit le procédé d'AM utilisé, on peut observer de nombreux avantages mais également des contraintes et limitations par rapport à l'usinage. Cette section est inspirée des sources [3] [4] [5].

Avantages :

- Facilité de réalisation de prototypes : le passage d'une pièce générée par CAO à une pièce physique se fait sans nécessiter la création de nouveaux outils ou moules. Possibilité d'itérer la conception grâce à une visualisation facile qui permet une discussion rapide entre le client et le fabricant.
- Liberté de conception et nouvelles perspectives de forme et de complexité des pièces. Possibilité de profiter entièrement de l'optimisation topologique.
- Limitation du temps d'assemblage : un ensemble complet et/ou articulé qui doit être assemblé lors d'un usinage classique peut être imprimé en limitant fortement le nombre de pièces et donc la durée d'assemblage, comme illustré à la Figure 2-3.
- Perte de matière première très réduite : il n'y pas de copeaux ou d'enlèvement de matière qui serait perdue et la poudre ou la résine non lasée peut être recyclée.
- Possibilité de créer des zones moins denses dans la matière : cavités cachées, canaux ou structures en treillis (latices), ce qui réduit significativement la masse de la pièce et permet d'ajuster la densité en fonction des propriétés mécaniques nécessaires dans chaque zone de la pièce.
- Conception sur mesure de chaque pièce : très utilisée en médecine pour adapter la pièce à la morphologie du patient. Réalisation de prothèses, mais aussi de "copies" de tumeurs ou autres parties opérables dans le cadre d'une simulation préopératoire.
- Economiquement rentable pour des petites séries ou des pièces sur mesure.
- Permet de limiter les stocks, la pièce pouvant être fabriquée à tout moment en fonction de la demande.



ASSEMBLAGE DE 20 PIECES

1 PIECE + BANDES

Figure 2-3 : Diminution du temps d'assemblage grâce à l'AM [4]

Contraintes et limitations :

- De nombreux paramètres doivent être optimisés en fonction de la méthode, du matériau et des spécificités de la pièce. Les paramètres propres à la SLM seront détaillés dans la section 2.1.3.
- Le temps de fabrication proprement dit est assez long, même si le processus global depuis l'avant-projet jusqu'à la réalisation d'une seule pièce est assez court.
- Le matériau n'est généralement pas isotrope et les propriétés mécaniques dépendent de la direction de fabrication.
- Il est difficile de combiner plusieurs matériaux différents; c'est possible pour des procédés par dépôt qui sont équipés de doubles buses, mais cela induit un grand nombre de contraintes supplémentaires
- L'état de surface est souvent de moindre qualité que celui obtenu par les procédés classiques.
- Contraintes d'orientations : certaines formes (comme les cylindres) doivent être imprimées de manière spécifique afin d'assurer une bonne précision géométrique.
- Un "post-processing" est presque systématiquement nécessaire : amélioration de l'état de surface (polissage, traitement chimique, ...), augmentation des propriétés mécaniques (traitement thermique, grenailage, ...), forage, filetage, ...
- Nécessité d'adapter la logique de conception : pour utiliser tout le potentiel de l'AM il faut changer l'approche de conception, car les contraintes liées au procédé de fabrication se révèlent souvent antagonistes par rapport aux procédés classiques de mise en forme.
- Processus encore très manuel : la pièce finie doit toujours être manipulée et nettoyée manuellement et, actuellement, la préparation de la machine est assez longue.
- Nécessité de supports pour des pièces présentant des surplombs ou des ponts.
- Les supports ne peuvent pas être recyclés et constituent donc de la matière perdue.

2.1.3 Fusion Sélective par Laser

La méthode d'impression utilisée dans le cadre du présent projet est la Fusion Sélective par Laser ou *Selective Laser Melting* (SLM).

Il s'agit d'une méthode à lit de poudre où l'énergie de fusion est fournie par un laser. Chacun des termes de sa dénomination (*Selective Laser Melting*) pointe une caractéristique principale de ce procédé [6] :

- **Selective** : Seule une partie (la fraction utile) de la poudre est lasée à chaque couche suivant le tracé généré par le fichier "slicer".
- **Laser** : Un laser est utilisé pour fusionner la poudre.
- **Melting** : La poudre "sélectionnée" est fondue (melted) localement.

Description de la méthode SLM :

La fusion sélective par laser se fait dans une chambre sous gaz inerte (généralement de l'argon). Son principe de fonctionnement est illustré à la Figure 2-4.

La pièce est imprimée sur le plateau de fabrication dont la taille est encore limitée (40 x 80 cm pour les plus grandes machines actuelles [7]). Le plateau est mobile et se déplace verticalement en descendant au fur et à mesure de l'impression de la pièce. Il est constitué de la même matière que la pièce imprimée, afin d'unifier les contraintes thermiques. Lors de la fusion de la première couche, le plateau sera également localement fondu et la pièce et le plateau seront littéralement soudés ensemble.

On peut décomposer la mise en œuvre d'une couche en 6 étapes :

1. Au début de chaque couche, le piston de la zone de fabrication descend d'une hauteur supérieure à la hauteur d'une couche (généralement 2 hauteurs de couche)
2. Simultanément le piston du magasin (de même section que celui de la zone de fabrication) monte pour approvisionner en poudre (généralement de 3 hauteurs de couche).
3. Le rouleau balaye l'ensemble et vient déposer et comprimer uniformément la poudre du magasin sur toute la surface de fabrication. Le surplus de poudre est alors envoyé dans le réservoir de recyclage.
4. Le piston de la zone de fabrication remonte pour s'aligner à la hauteur de la nouvelle couche à laser.
5. Le rouleau retourne ensuite à sa position initiale, comprimant une nouvelle fois la poudre en repassant sur la zone de fabrication.
6. Le laser (d'une puissance pouvant varier entre 20 W et 1 kW [7]) fusionne alors la poudre selon le chemin tracé dans le fichier de découpe de la pièce (type .gcode) pour la couche donnée.

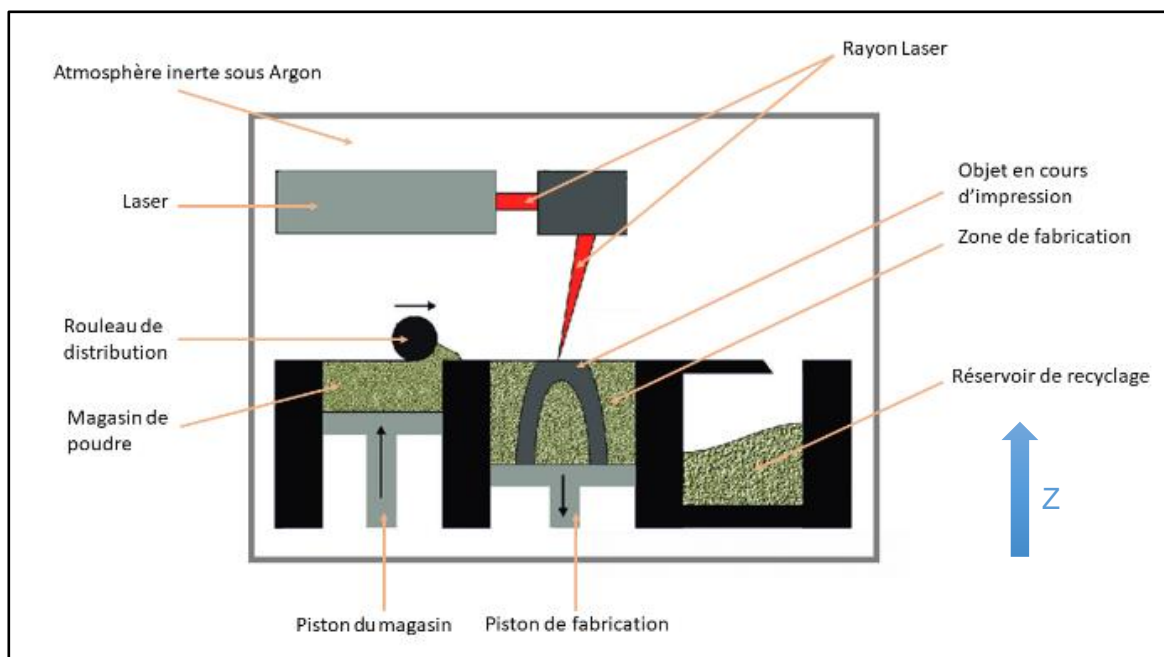


Figure 2-4 : Description du mécanisme SLM (traduit de [8]), Z représente la direction de fabrication

Ces opérations sont répétées successivement pour chaque couche jusqu'au sommet de la pièce. [8]

Une fois l'impression terminée, la poudre non lasée est retirée manuellement à l'aide d'un pinceau, afin de pouvoir sortir de la machine la pièce et le plateau de fabrication auquel elle est soudée.

La pièce est séparée du plateau de fabrication au moyen d'un tronçonnage ou d'une électro-érosion par fil (EDM).

Le plateau de fabrication est ensuite rectifié afin d'être utilisé pour des impressions ultérieures.

La poudre contenue dans le magasin de recyclage ainsi que la poudre non lasée autour de la pièce peuvent être récupérées et recyclées par une opération de tamisage.

Avantages et défis propres à cette méthode :

En plus des spécificités communes à tous les procédés, certaines sont propres à la SLM :

- La SLM permet l'utilisation d'une grande plage de matériaux différents : alliages d'aluminium ou de titane, acier inoxydable, superalliage à base de nickel, cobalt-chrome, ... [7]
- L'état de surface de la pièce est limité par le diamètre de la poudre et le diamètre de scannage du laser.
- La matière présente une forte hétérogénéité liée à la structure en bains de fusion [9].
- Certaines pièces nécessitent un support pour "asseoir" les surplombs. Le support est imprimé dans la même matière, en simultané avec la pièce, couche par couche et avec une densité qui peut être différente. Cela augmente le temps d'impression et nécessite une gestion de l'élimination de ces supports.
- Dans une certaine mesure on peut se passer de support, car la présence de poudre non lasée sous les ponts ou cavités de la pièce peut en faire office [10].
- Il n'est pas judicieux d'imprimer des cavités fermées; en effet la poudre non lasée de la cavité resterait emprisonnée dans la pièce [3].

Paramètres d'impression :

Lors de l'impression SLM il faut prendre en compte un certain nombre de paramètres.

Spécification et qualité de la poudre :

- **Matériau** utilisé et composition de la poudre : tous les autres paramètres qui suivent dépendent directement du choix initial du matériau.
- **Granulométrie** et forme des particules de poudre : la granulométrie correspond au diamètre maximum des particules de poudre; il y a donc une distribution du diamètre des particules de poudre (définie par le fournisseur). La présence de beaucoup de petites particules diminue la "fluidité" de la poudre car elles ont tendance à s'agglomérer, mais elles augmentent la surface spécifique de la poudre et donc l'absorption de l'énergie du rayon laser [11].
- **Humidité** de la poudre : La poudre doit impérativement être sèche; la présence d'humidité peut créer des bulles de gaz et des porosités lors de l'impression.

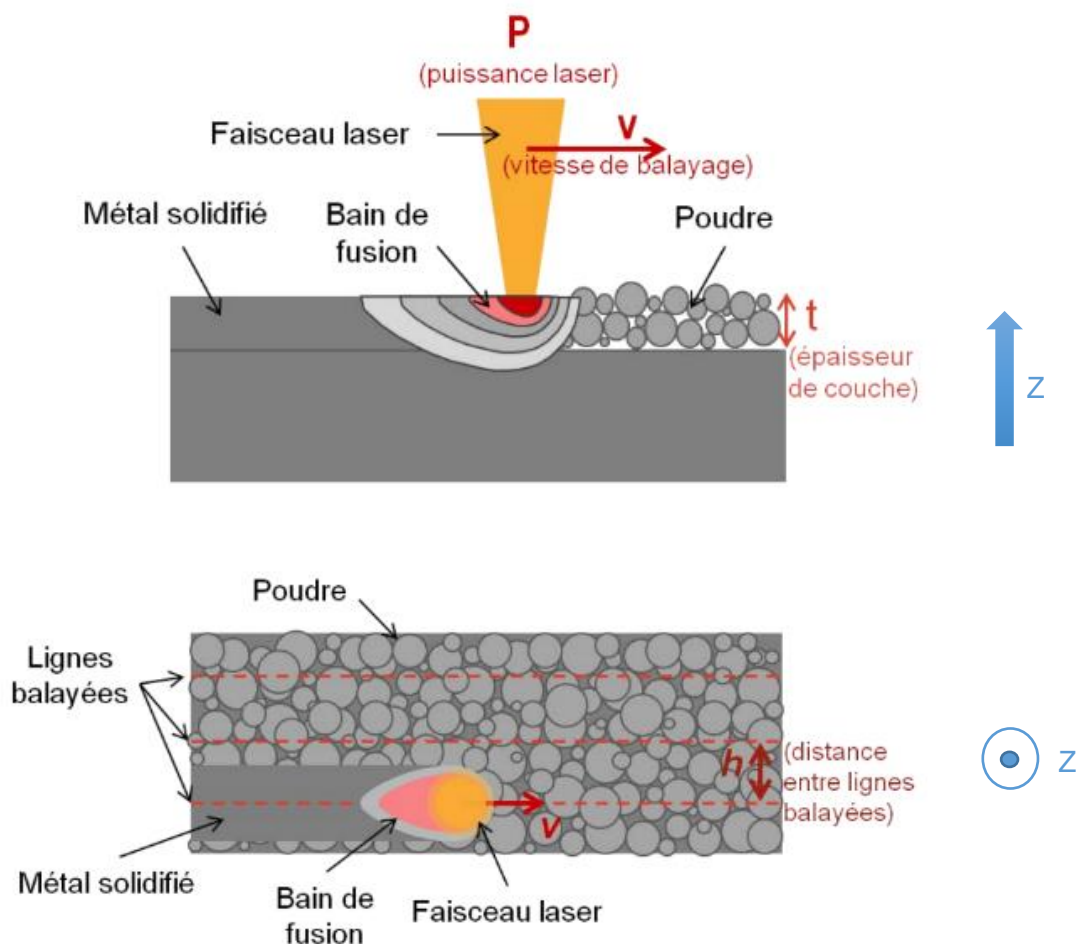


Figure 2-5 Différents paramètres d'impression [14]

Paramètres imposés par la machine et le contexte (Figure 2-5) :

- La **longueur d'onde** du laser et ses spécificités propres [6].
- L'**épaisseur de couche (t)** : généralement fixée par la granulométrie de la poudre, elle n'est pas modifiée durant toute une procédure sur la même machine et avec le même matériau. Elle est exprimée en micromètres. Des couches plus épaisses réduisent le temps de fabrication mais nécessitent plus d'énergie et génèrent une rugosité plus importante de la pièce [12].

Paramètres optimisables et facilement ajustables (Figure 2-5) :

- **Puissance du laser (P)** : c'est la puissance du faisceau laser qui fond la poudre. Pour une machine donnée, elle est souvent exprimée en pourcentage de la puissance maximale du laser, mais lors de la comparaison avec d'autres résultats elle doit être retransformée en valeur intrinsèque en Watt.
- **Vitesse de balayage (v)** : c'est la vitesse à laquelle le laser se déplace pour fusionner la matière; elle est exprimée en millimètres par seconde. Conjointement à la puissance, elle permet de contrôler la quantité d'énergie fournie à la poudre.
- **Distance entre deux cordons - hatching (h)** : c'est la distance entre deux traits de laser adjacents; elle est exprimée en micromètres. Elle assure le chevauchement des cordons voisins d'une couche et donc la cohésion entre eux.

L'ensemble de ces paramètres peut être regroupé en deux variables de densité d'énergie permettant de comparer différentes impressions :

Densité d'énergie volumique : *Volumic Energy Density (VED)* [7] [10] :

Représentation de l'énergie globale qui est transmise à un volume de matière par le laser. Elle s'exprime en J/mm³

$$VED = \frac{P}{vht}$$

VED : densité d'énergie volumique
P : puissance du laser
v : vitesse de balayage
h : distance entre cordons
t : épaisseur de couche

Cette variable augmente avec l'augmentation de la puissance du laser (**P**), la diminution de la vitesse de balayage (**v**) ou de la distance entre deux cordons (**h**). La hauteur de couche (**t**) est le plus souvent fixée, mais son augmentation mènerait à une diminution de densité d'énergie volumique.

Densité d'énergie linéique : *Track Energy Density (TED)* [13] :

Représentation de l'énergie moyenne qui est transmise sur une longueur d'impression. Elle s'exprime en J/m

$$TED = \frac{P}{v}$$

TED : densité d'énergie linéique
P : puissance du laser
v : vitesse de balayage

Cette variable ne prend pas en compte la distance entre les cordons ni l'épaisseur de couche. Elle permet donc de comparer uniquement les différentes stratégies de balayage pour un cordon donné, mais pas pour l'ensemble de la pièce. Elle augmente avec l'augmentation de la puissance et la diminution de la vitesse.

Ces deux variables ont une très grande influence sur la qualité d'impression et permettent de définir la bonne fenêtre de paramètres.

Elles doivent être suffisamment élevées pour assurer une fusion de l'ensemble des particules de poudre et une refusion partielle de la couche précédente, afin que la pièce finale soit dense [14], mais limitées afin d'éviter la surfusion et l'évaporation de matière.

Stratégie de lasage :

Il existe différentes stratégies pour déterminer le chemin que doit parcourir le laser (Figure 2-6). Deux zones sont à considérer :

- **Le cœur de la matière :**

Le chemin du laser doit être défini pour fusionner la matière. La solution la plus simple est de parcourir la longueur de la pièce avec des cordons parallèles mais cette technique rend la pièce finale extrêmement anisotrope. La solution la plus utilisée actuellement par les programmes "slicer", est une division de la pièce en ilots (formes géométriques, généralement carrées ou hexagonales) placés aléatoirement sur une couche et variant de couche en couche. Le parcours du laser (lignes parallèles) dans les ilots est lui-même aléatoire [15].

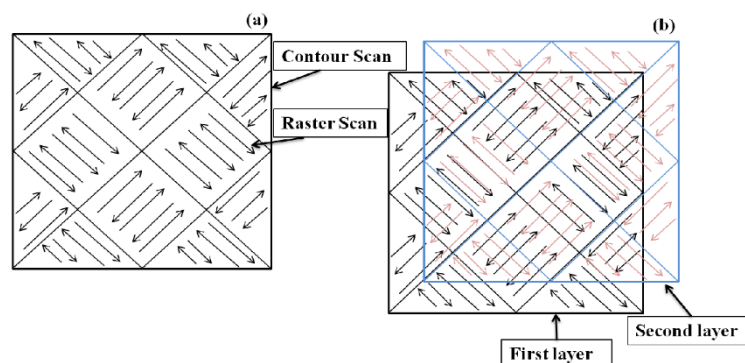


Figure 2-6 : différentes stratégies de lasage : a) ilots et contour d'une couche, b) Alternance des couches [15]

- **Les contours de la pièce :**

Deux options sont possibles pour réaliser les contours de la pièce :

- Le bord de la pièce est simplement la limite de l'arrêt de l'impression de l'ilot de matière. Cette technique est souvent utilisée pour les échantillons afin de déterminer les propriétés de l'impression.
- Un contour est imprimé spécifiquement ; il est tracé par le laser avant de procéder au remplissage par ilots.

Poncelet et al. [13] ont montré que laser le contour avant le cœur de la matière améliore significativement l'état de surface de la pièce.

2.1.4 Matériau : AlSi10Mg

Le matériau utilisé pour cette étude est l'alliage d'aluminium AlSi10Mg. Il s'agit d'un alliage hypoeutectique (Figure 2-7). Sa proximité avec l'eutectique aluminium/silicium influe significativement sur sa ductilité et sa résistance mais le rend difficile à usiner [16].

Il est principalement utilisé pour les procédés de moulage et très demandé dans l'industrie aérospatiale et automobile pour sa faible masse, son faible coefficient de dilatation thermique et ses bonnes propriétés mécaniques.

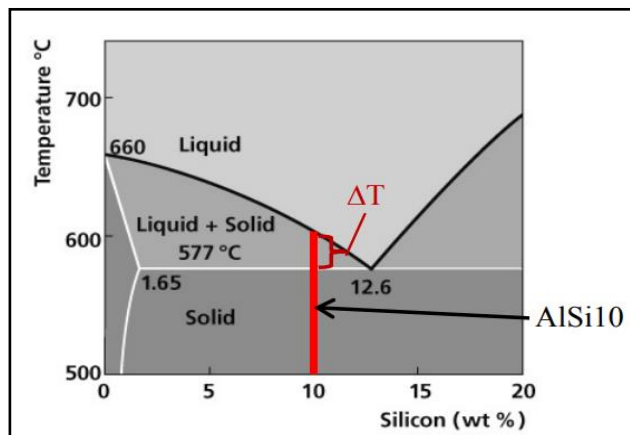


Figure 2-7 : Diagramme de phases des alliages Al-Si

C'est l'un des alliages d'aluminium les plus utilisés et étudiés en SLM.

Hormis l'aluminium, cet alliage est composé d'environ 10 % de silicium et de moins de 1 % de chacun des matériaux suivants : magnésium, fer, cuivre, nickel, zinc, ... Ces quantités varient selon les fabricants.

2.1.5 Fabrication par SLM à base de l'AlSi10Mg

L'impression de l'AlSi10Mg par Fusion Sélective par Laser permet, avec des paramètres optimisés, d'obtenir des densités relatives très élevées jusque 99,8 % [17]. Cependant il y a toujours présence de porosités et leur nombre augmente significativement lorsqu'on s'éloigne des paramètres optimaux.

La densité relative est le rapport de la masse volumique de l'échantillon par rapport à celle de la matière pleine, l'inverse de la fraction de porosités.

Si la distance inter-cordons (h) est trop grande, il n'y a pas de chevauchement suffisant des cordons sur toute l'épaisseur de la couche et des porosités inter-couche apparaissent [18]. A l'inverse, une distance inter-cordons trop petite induit un chevauchement trop important des cordons et donc une accumulation de chaleur qui facilite l'apparition de défauts [19].

Quand les paramètres sont trop froids (VED et TED basses), il y a une discontinuité dans le balayage. De la poudre pourtant sélectionnée n'est pas fondue et des porosités apparaissent entre les couches et les cordons.

Quand les paramètres sont trop chauds (VED et TED élevée), il y a apparition d'une surface instable des bains de fusion, ce qui entraîne la formation de pores inter-couches.

On peut dès lors déterminer des valeurs de VED qui définissent la meilleure fenêtre de paramètres; Pei et al. [11] la situent entre 75 et 94 J/mm³ et les valeurs optimales des paramètres de Zhao et al. [9] donnent une VED de 52 J/mm³.

Sur un graphique de vitesse en fonction de la puissance, cette fenêtre d'utilisation est la zone 3 de la Figure 2-8.

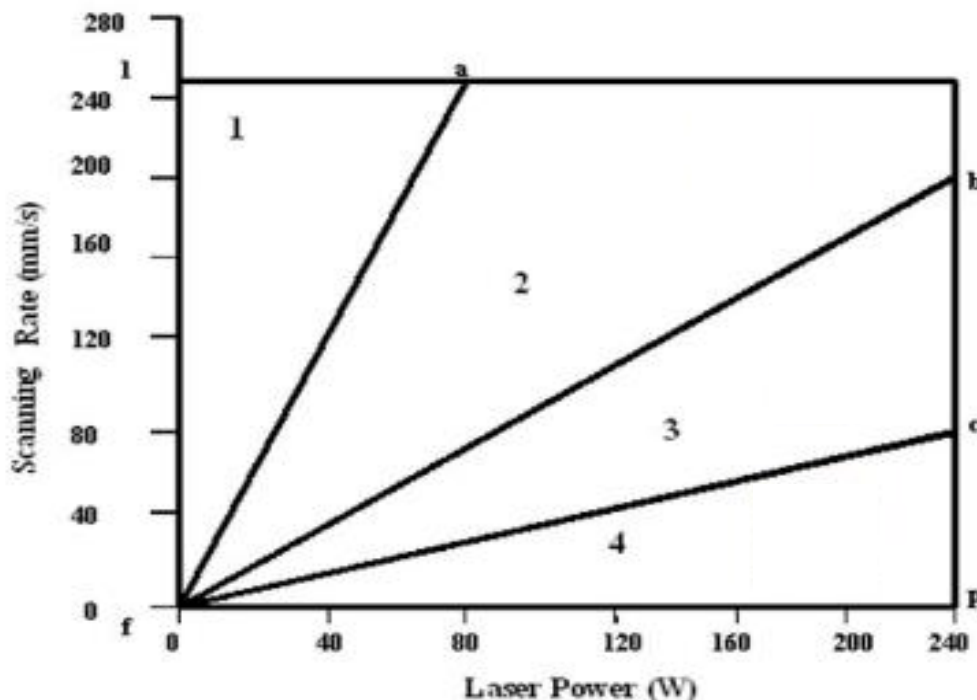


Figure 2-8 : Fenêtre de paramètres : (1) pas de fusion, (2) fusion insuffisante, (3) Bonne fenêtre de paramètres, (4) surfusion (keyhole) [42]

Pei et al. [11] observent des porosités sphériques et irrégulières d'un diamètre inférieur à 20 μm dans le matériau. L'évolution de la densité de leurs échantillons et la morphologie des porosités qui en découle sont représentées à la Figure 2-9.

Sur ces images, on voit très clairement qu'une diminution de la densité relative augmente le volume total des porosités mais également leur taille.

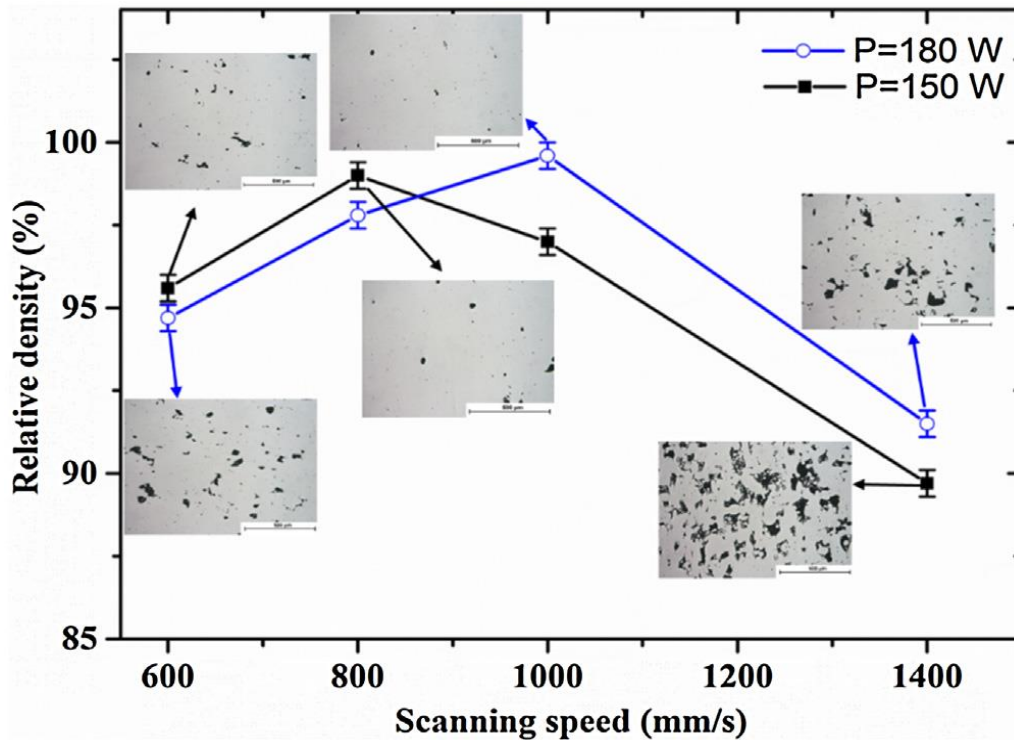


Figure 2-9 : Evolution de la densité en fonction des paramètres d'impression [11]

Toujours sur la Figure 2-9, on observe un maximum de densité relative pour des vitesses moyennes de la fourchette étudiée par Pei et al. [11]. Par contre aucune tendance ne ressort de leurs résultats entre puissance et densité relative.

Xiong et al. [20] observent que les porosités se situent toutes sur les frontières des bains de fusion.

Des porosités irrégulières peuvent apparaître à cause d'une contamination par des oxydes ou de l'hydrogène; on les appelle alors défauts (Figure 2-10).

Sur cette figure, on observe également que, pour une puissance donnée, l'augmentation de la vitesse augmente fortement la présence de porosités sphériques. A l'inverse, l'augmentation de la puissance pour une vitesse donnée diminue la présence de porosité.

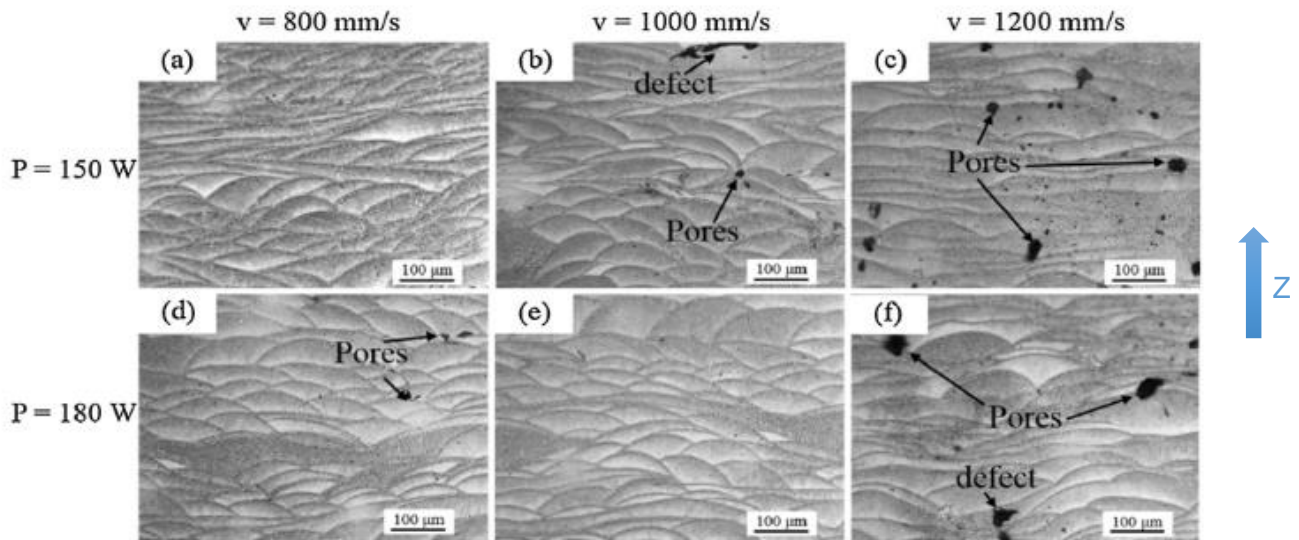


Figure 2-10 : Morphologie typique d'échantillons d'AlSi10Mg imprimés par SLM pour différents paramètres [11]

La microstructure d'AlSi10Mg imprimée par SLM n'est pas homogène; en effet le procédé de fabrication couche par couche et les bains de fusion jointifs des différents cordons voisins rendent la microstructure hétérogène et comparable à celle obtenue en soudure [21].

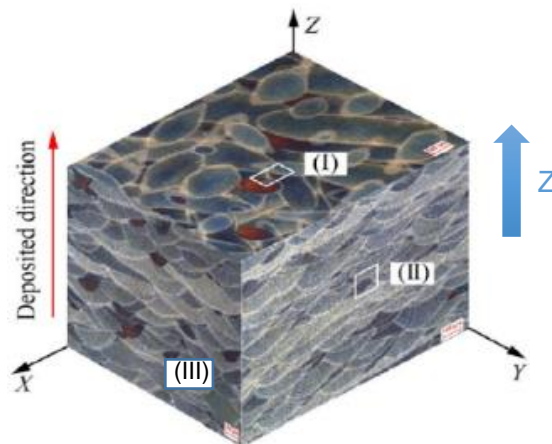


Figure 2-11 : Représentation des trois coupes d'une impression SLM [22]

Dans une coupe perpendiculaire aux bains de fusion (coupes II & III de la Figure 2-11), on observe systématiquement trois zones de microstructures distinctes aux frontières des bains de fusion (Figure 2-12).

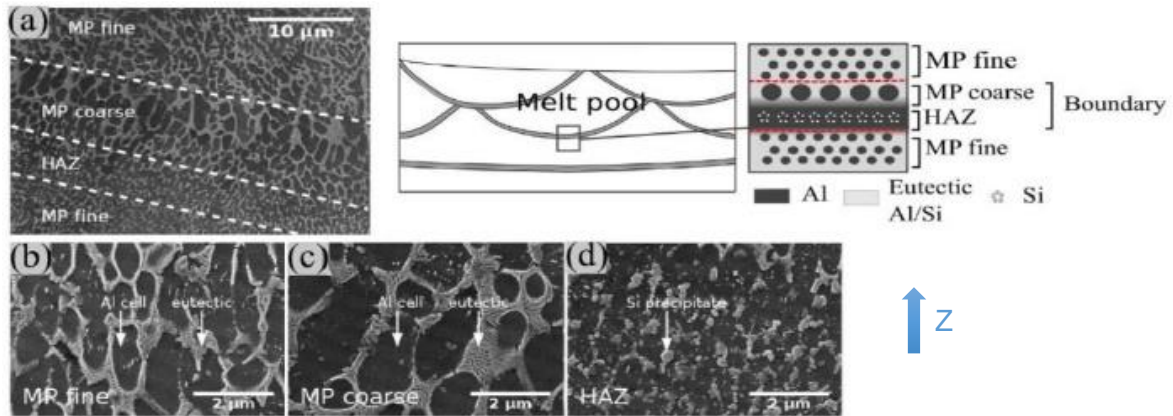


Figure 2-12 : Microstructure des frontières des bains de fusion (vues en coupe) : (a) trois différentes zones, (b) région fine, (c) région grossière, (d) zone affectée thermiquement [21]

Zone Affectée Thermiquement (*Heat Affected Zone (HAZ)*) :

Zone limite des bains de fusion, épaisse de maximum quelques micromètres [22]. Cette zone déjà solidifiée de la couche précédente reçoit de la chaleur mais à une température inférieure à celle de fusion (du solidus) et subit donc l'équivalent d'un traitement thermique [23]. À la suite de ce traitement, le silicium devient plus soluble à l'état solide et se globularise. Le réseau de silicium qui est présent dans les régions fines et grossières devient discontinu, mais on peut toujours deviner la géométrie des cellules d'origine [23].

Région grossière (*MP coarse*) :

Zone de la couche précédente et du cordon voisin déjà solidifiés qui subit des températures comprises entre le solidus et le liquidus [23]. Les cellules d'aluminium y sont plus grandes et irrégulières et ne croissent pas selon une direction privilégiée. Sa largeur (en réalité son épaisseur) peut aller jusque 10 µm et dépend fortement des paramètres (P et v) utilisés [22].

Région fine (*MP fine*) :

Région présente au cœur des bains de fusion, cette microstructure représente la plus grande partie du volume de l'échantillon. C'est une microstructure très fine où les cellules d'aluminium sont très petites. Depuis la frontière de cette zone jusqu'à la HAZ de la couche suivante, la microstructure se raffine de plus en plus [23].

Ces trois zones sont toujours présentes, mais les paramètres d'impression influent énormément sur leur taille et leur morphologie ainsi que sur la forme et le nombre de porosités [11].

2.1.6 Propriétés mécaniques de l'AlSi10Mg fabriqué par SLM

Lors des essais de traction, la rupture dans l'AlSi10Mg imprimé par SLM survient par fissuration du réseau de silicium et décohésion des cellules d'aluminium [9].

La résistance à la traction est fortement influencée par les paramètres d'impression (par exemple la vitesse de balayage comme montré par Pei et al. [11] et illustré à la Figure 2-13) mais également par les porosités induites par ce choix des paramètres.

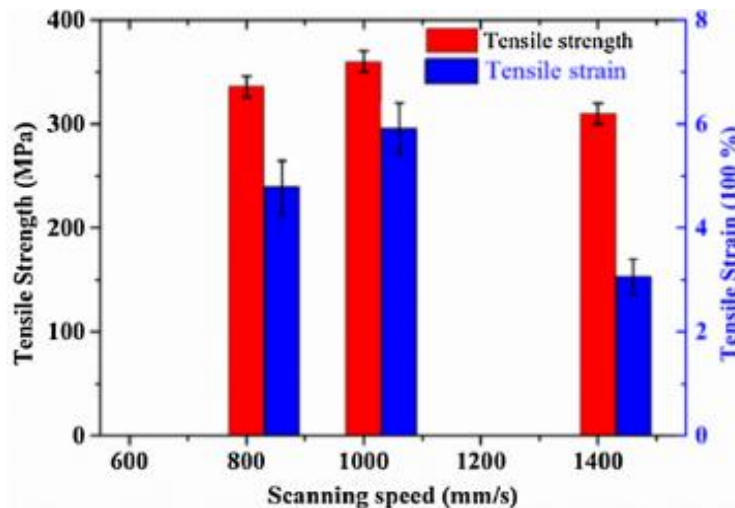


Figure 2-13 : Influence des paramètres d'impression sur la résistance à la traction

L'élongation à la traction varie beaucoup selon le sens d'impression des échantillons et donc selon le sens d'application des charges pour une pièce complexe. Le comportement élastique est assez semblable, que la traction soit effectuée sur une éprouvette imprimée horizontalement ou verticalement. Par contre la résistance à la rupture et l'élongation dans la partie ductile varient fortement selon l'orientation.

Delahaye et al. [21], Xiong et al. [20] et la majorité de la littérature montrent que les valeurs d'élongation ductile, de limite d'élasticité et de contrainte à la rupture sont plus élevées pour la traction horizontale que verticale.

Lors d'une traction à 45° ces valeurs sont intermédiaires. Chen et al. [22] montrent eux l'inverse, mais soupçonnent une fragilité due aux porosités de sous-fusion dans leurs échantillons. On peut également étudier des angles de traction plus aléatoires.

Dans la majorité des cas, les résultats s'améliorent lorsqu'on s'approche de l'horizontalité, mais il est difficile de tirer une conclusion plus précise de la littérature.

Delahaye et al. [21] ont étudié le lien entre les différentes zones thermiquement affectées de la microstructure et les mécanismes de rupture. Pour ce faire, ils ont volontairement fabriqué des échantillons avec des paramètres éloignés de l'optimal afin d'obtenir une grande zone affectée thermiquement (HAZ) et pouvoir y observer les mécanismes de rupture.

Il en ressort que la rupture survient préférentiellement à la frontière des bains de fusion et plus spécifiquement dans la HAZ. En effet, les cupules qu'ils ont observées sur les surfaces de rupture sont de la taille de la microstructure de la HAZ. Les précipités de silicium y sont plus grands, facilitant la germination des cavités à leur frontière et le réseau de silicium y est déjà discontinu. La présence et la largeur de la HAZ sont donc déterminantes dans la résistance à la traction et découlent directement des paramètres d'impression.

Les différentes valeurs des propriétés mécaniques issues de la littérature sont reprises d'après leur source, dans le tableau de la Figure 2-14 :

Limite d'élasticité à 0.2 % [MPa]	Contrainte à la rupture [MPa]	Déformation à la rupture [%]	Orientation de la traction	Source
210	310	1.7	Verticale (grande HAZ)	[21]
240	460	6	Verticale	[24]
270	460	9	Horizontale	[24]
190	310	13.5	Verticale	[22]
190	320	11	Horizontale	[22]
287	525	11	Horizontale	[9]
250	360	5.8	Horizontale	[11]
190	370	4.1	Verticale	[20]
220	360	7	Horizontale	[20]
180	350	5.8	45°	[20]
290	480	7.6	Verticale	[12]
290	450	7.4	40° de l'horizontale	[12]
290	430	5.5	12.5° de l'horizontale	[12]

Figure 2-14 : Revue bibliographie des propriétés mécaniques de l'AlSi10Mg fabriqué par SLM

Il apparait évident qu'il faut optimiser les paramètres de fabrication pour le matériau et la machine, mais également pour la pièce à imprimer. En effet, Pei et al. [11] ont montré qu'appliquer les paramètres optimisés par d'autres ne leur donnait pas satisfaction.

On peut encore noter que de nombreux traitements thermomécaniques peuvent être effectués après l'impression, afin d'améliorer la ductilité des matériaux. Ils permettent généralement d'augmenter grandement l'élongation à la rupture mais diminuent fortement les propriétés élastiques et la contrainte admissible à la rupture. Ils font l'objet de nombreuses études et permettent, ou permettront à moyen terme, d'éviter certaines contraintes liées à la SLM. Ils ne sont pas étudiés dans le cadre de ce projet et ne seront donc pas d'avantage détaillés ici [9].

2.2 Etude topologique

L'optimisation topologique permet, au moyen d'outils numériques, de déterminer itérativement la distribution de matière optimale dans un volume. Pour permettre cette répartition, il faut spécifier les différents chargements, mais aussi les conditions aux frontières et les fixations imposées [25]. De manière générale, on peut voir cette méthode comme un rognage de la matière selon des contraintes et des objectifs fixés [26].

L'objectif est toujours de minimiser ou de maximiser une variable (ou un ensemble de variables). Le résultat de l'optimisation topologique est un volume numérique qui doit généralement être retravaillé par le concepteur pour obtenir une pièce finale réalisable.

L'optimisation topologique permet de se détacher de toute contrainte de fabrication et surtout des idées préconçues ou historiques dont le concepteur se sépare difficilement. Elle est donc en parfaite adéquation avec la fabrication additive, les pièces résultantes pouvant, à propriétés équivalentes, être sensiblement allégées (jusqu'à 70 % de gain de poids [27]).

2.2.1 Etapes

Cette section est grandement inspirée de la formation et des notes du Professeur Duysinx [28] et de l'article de Guanghui Shi [27].

L'étude se fait au départ d'un domaine de conception : c'est le plus grand volume permis qui peut être imposé par un cahier des charges ou par l'ancienne géométrie de la pièce (Figure 2-15 a). Dans un premier temps, cette zone doit être contrainte le moins possible.

Par la suite on impose les zones où un volume de matière minimum (points d'ancrage) ou à l'inverse un espace vide (trous de fixation, passage des boulons...) sont nécessaires (Figure 2-15 b). Ces zones non-optimisables sont fixées pendant toute l'étude.

Dans ce volume, on définit un maillage afin de pouvoir le simuler numériquement. Comme dans toute étude numérique, la qualité, la finesse, la régularité et, si nécessaire, la symétrie du maillage sont très importantes pour obtenir un résultat final satisfaisant.

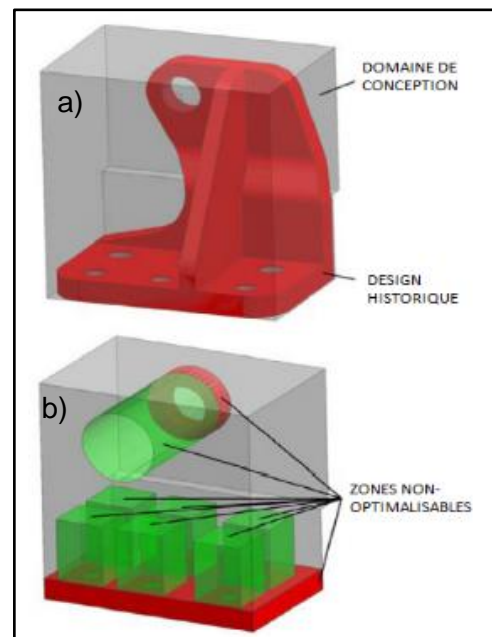


Figure 2-15 : domaine de conception :
 a) définition au départ de la pièce initiale,
 b) définition des zones non-optimisables, traduit de [27]

L'étape suivante consiste à définir les sollicitations que va subir la pièce et à localiser leurs points d'application. Les principales sollicitations sont les contraintes mécaniques (fixation, mouvements imposés...) et les charges (forces, torsions...); mais on peut également optimiser à partir des contraintes thermiques ou vibratoires.

Il faut au maximum décomposer les différents cas de charges afin de pouvoir vérifier leur implication individuelle, indépendamment de la résultante des charges combinées.

On observe à la Figure 2-16 qu'ajouter deux cas de charges modifie complètement la topologie et ne prend pas en compte l'application des forces seules.

Leur position est généralement fixée en fonction des points du maillage.

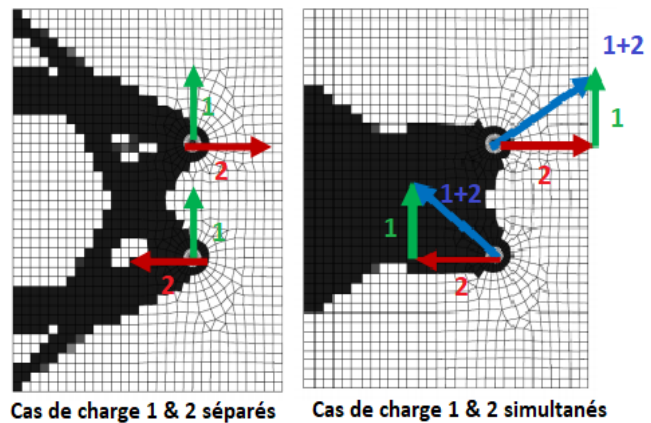


Figure 2-16 : Définition des cas de charge [28]

L'étude topologique consiste ensuite à placer une quantité de matière donnée (fraction du volume de conception) et à déterminer si chacune des cellules du maillage est composée de matière ou de vide, de façon à minimiser ou maximiser la variable d'optimisation.

La solution brute de l'optimisation est donc une définition du remplissage de chacune des cellules du maillage prédéfini.

2.2.2 Point de vue numérique

L'optimisation topologique peut, intrinsèquement, être vue comme un problème binaire; en effet la cellule du maillage est soit vide (0) soit pleine (1). Mais, numériquement parlant, un problème binaire est très difficile à faire converger [28].

D'un point de vue numérique, le problème binaire ($X \in \{0,1\}$) est remplacé par une approximation continue qui considère la densité d'une cellule du maillage comme une variable ($X \in [0,1]$). Ceci permet d'utiliser des méthodes à gradients [29].

Cette approximation implique d'homogénéiser (fixer une valeur) et d'interpoler mathématiquement les propriétés du matériau pour chaque fraction volumique (x) de matière. Cette méthode est lourde et désuète pour les pièces usinées ou moulées, mais est largement utilisée pour les composites où la densité de fibres a une grande influence, pas forcément linéaire, sur les propriétés du matériau. Elle prend tout son sens depuis l'apparition des structures en treillis (latices) imprimées en 3D.

Dans le but d'obtenir une solution qui se rapproche des valeurs discrètes, il faut pondérer la continuité des propriétés au moyen de méthodes de pénalisation, la plus connue étant la méthode SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization).

2.2.3 Méthode SIMP

Cette méthode, développée en 1989 par Bendsoe [30], permet de pénaliser les densités moyennes pour tendre vers la solution binaire tout en profitant d'une continuité numérique.

Si x est la fraction volumique de matière pour la cellule du maillage considérée et E^0 le module de Young de la matière pleine, alors le facteur de pénalisation p est un nombre entier tel que le module pour une fraction donnée est [29] :

$$E^* = x^p E^0$$

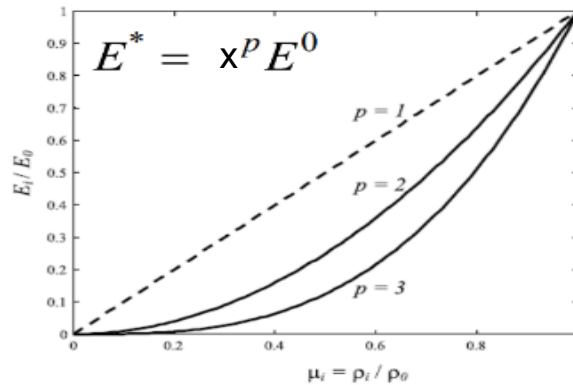


Figure 2-17 : Méthode SIMP de pénalisation

Ce principe s'applique à toutes les autres propriétés du matériau.

La valeur usuelle de p est de l'ordre de 3.

Si le matériau doit absolument être dense, pour le moulage ou l'usinage, on choisira une pénalisation plus élevée (4 ou plus) mais on prend le risque de voir apparaître des optimaux locaux qui mènent à des problèmes de convergence du modèle numérique.

Par contre, dans le cas de composites ou en impression 3D, si la mise en œuvre autorise des densités de matière différentes dans la même pièce, on peut diminuer la pénalisation (1.5 ou 2) [28].

Il est également possible, pour des modèles très complexes qui ont des difficultés à converger, de commencer avec une pénalisation très faible et de l'augmenter au fil des itérations quand le modèle numérique gagne en stabilité.

La méthode SIMP est actuellement utilisée dans 90% des études topologiques [28] mais il en existe d'autres : RAMP, SINH,...

2.2.4 Variable d'optimisation

Le but de la topologie est de maximiser ou d'au moins atteindre un niveau de performance mécanique donné. Dans la majorité des cas, la minimisation de la compliance est utilisée, mais on peut également, par exemple, utiliser les fréquences propres ou l'épaisseur des parois de la pièce [27].

La compliance est le travail des chargements extérieurs; elle peut être vue comme l'inverse de la raideur. A l'équilibre elle représente l'énergie de déformation de la pièce. On peut encore l'imaginer comme le déplacement sous charge dans un cas simple [28].

La minimisation de la compliance est privilégiée à d'autres variables plus intuitives, car sa dérivée (et donc la sensibilité) est facilement calculable.

2.2.5 Instabilités numériques

Dans tous les cas, deux instabilités numériques peuvent apparaître lors de l'optimisation topologique [29] :

- Structure en damier (*checkerboard*) :

Alternance de cellules du maillage vides et pleines (Figure 2-18). Cette instabilité survient lorsque le programme souhaite remplir une zone à 50%.

Au lieu de remplir toutes les cellules à 50% ou d'en remplir différemment, il privilégie l'alternance vide/plein, mais il ne s'agit pas d'un agencement réaliste pour une pièce finale.

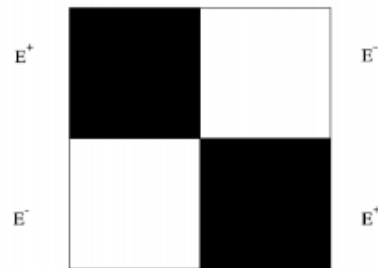


Figure 2-18 : Structure en damier : cellule pleine en noir et vide en blanc [28]

- Dépendance du maillage :

Le choix du maillage ne devrait, en théorie, pas influencer le résultat, mais certaines instabilités numériques modifient la topologie de la pièce lorsque le maillage est raffiné (Figure 2-19). Ici on passe d'une demi-roue à 4 barreaux à une à 5 barreaux (dont deux doubles).

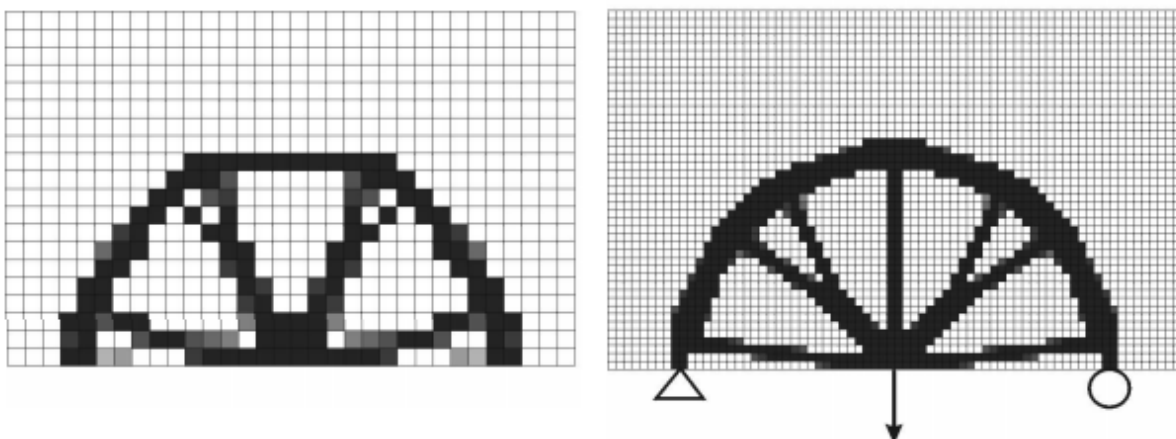


Figure 2-19 : Dépendance du maillage [28]

Afin de limiter ces instabilités, on peut utiliser une méthode basique : le limiteur de périmètre total de la structure, proposé en 1994 par Haber et al. [30]. Le calcul du périmètre est facile et peu coûteux numériquement, mais la borne supérieure du périmètre est assez compliquée à déterminer [29].

Une méthode plus élaborée consiste à introduire des filtres (section 2.2.6)

2.2.6 Filtres

Le filtre le plus répandu est le filtre de sensibilité proposé en 1994 par Sigmund [30], qui consiste à lisser la dérivée de la densité en moyennant ses valeurs sur un rayon donné afin de limiter le damier (Figure 2-20). Ce rayon est appelé "zone de moyennage".

La zone de moyennage peut être définie de manière intrinsèque, en grandeur réelle, mais la plupart des logiciels continuent à la définir en fonction d'un nombre d'éléments ou de couches du maillage, ce qui présente l'inconvénient de rendre les paramètres du filtre dépendants du maillage.

Les méthodes de filtres permettent cependant, par rapport à d'autres, de limiter la dépendance à la définition du maillage, mais elles rendent l'image plus "floue" en faisant apparaître des densités intermédiaires. Certains filtres appliquent les dérivées aux éléments du maillage, d'autres à ses nœuds, ce qui permet de redonner directement du poids à des éléments vides [29].

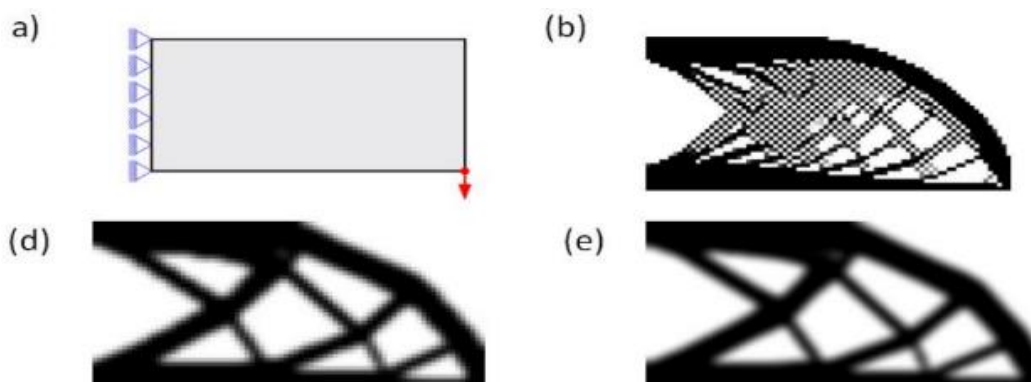


Figure 2-20 : Action des filtres : a) domaine de conception, b) étude topologique sans filtre (présence de beaucoup de damiers), c) filtrage de faible rayon, d) filtrage de rayon large

En 2014 Guest et al. [28] proposent un filtre appelé *Heaviside* qui permet de se rapprocher au maximum de la solution binaire et de supprimer l'effet "flou" de la Figure 2-20.

Pour se faire ils transforment la dérivée de la densité moyenne sur un rayon donné ($\hat{\rho}$) en une valeur pénalisée ($\tilde{\rho}$) au moyen d'un paramètre (β).

Si β vaut 1 on se retrouve dans le cas d'un filtre simple qui attribue la valeur moyenne d'un rayon donné à toutes les cellules qui le composent. Si β tend vers l'infini, dans le cas où une seule cellule de la zone a une densité non nulle, toute la zone sera composée de matière pleine. Les valeurs intermédiaires de β font tendre les valeurs moyennes de densité vers un extrême (Figure 2-21).

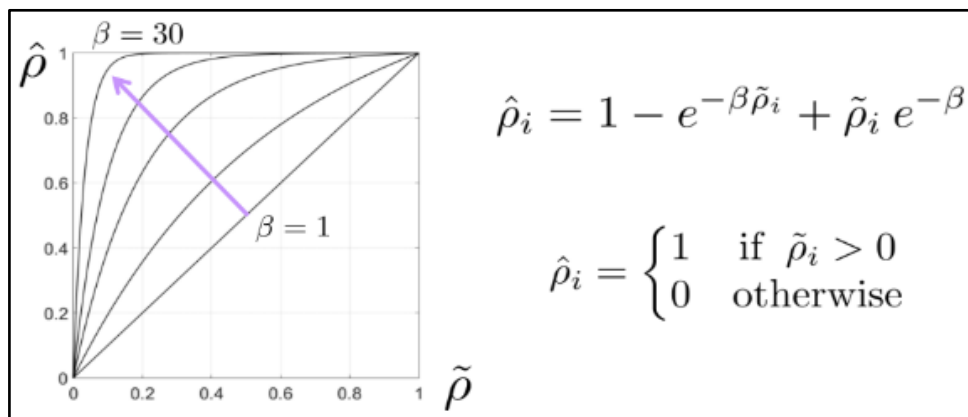


Figure 2-21 : Filtre Heaviside [28]

2.2.7 Boucle de conception, apport d'expertise, finalisation du design

Le résultat de l'optimisation topologique est une forme très organique qui, même une fois lissée (Figure 2-22), nécessite un apport d'expertise pour obtenir une pièce apte à être mise en production.

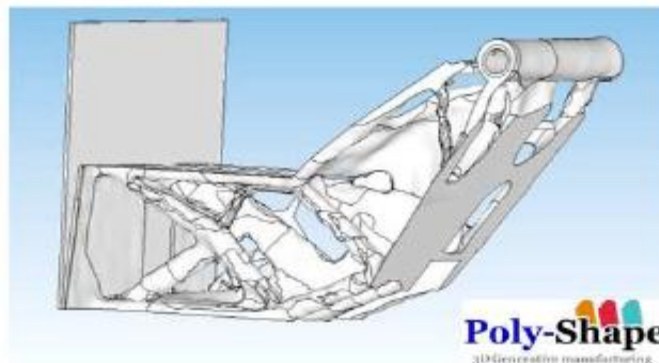


Figure 2-22 : Résultat topologique lissé [25]

Plusieurs possibilités d'études et d'améliorations peuvent être envisagées pour finaliser le design :

- Ajustement du paramètre de pénalisation.
- Ajustement des filtres.
- Modification du pourcentage de matière dans le domaine de conception afin de tendre vers une structure plaque plutôt que poutre ou inversement [28].
- Test de résistance aux contraintes après les premiers résultats : il peut conduire à une réduction du pourcentage de matière si la pièce résiste bien en tout point, ou à une augmentation si la structure est trop faible ou si elle présente des sur-contraintes.

Une fois l'optimisation topologique validée, la pièce peut être exportée au format STL et directement imprimée par fabrication additive pour en obtenir un premier aperçu.

Cependant, pour obtenir le design définitif, la pièce devra systématiquement être convertie ou complètement redessinée en CAO afin d'y apporter une expertise ingénieur et d'y intégrer les contraintes de fabrication [25] :

- Ajustement des épaisseurs ou volumes de matière minimum imposés par le mode de fabrication.
- Epuration des surfaces irrégulières.
- Ajout des congés ou autres liaisons entre différentes parties de la pièce. En effet, l'optimisation topologique considère une répartition statique des chargements et une réaction purement élastique, mais ne prend pas en compte la résistance à la fatigue, par exemple.
- Suppression des cavités fermées.

Si l'on applique ceci à la pièce de la Figure 2-22, on obtient la pièce de la Figure 2-23 qui peut être considérée comme aboutie après vérification des contraintes statiques et dynamiques.

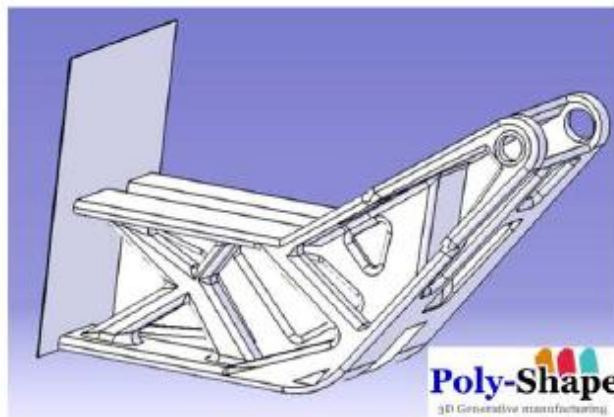


Figure 2-23 : Pièce reconstruite et rendue réaliste par CAO

3 Choix et caractéristiques de la pièce

La pièce choisie pour mener cette étude est un taquet d'amarrage pour voilier. Cette pièce représente "un cas d'école" technologique accessible dans le présent contexte (voir ci-dessous), même s'il apparaît d'emblée évident qu'il ne serait pas économiquement rentable de la fabriquer en petite série.

Critères du choix de la pièce :

- **Taille de la pièce** : elle est limitée par la zone d'impression de la machine de fabrication additive utilisée (140 x 140 x 100 mm³ (L x l x h)).
- **Nécessité d'une telle étude** : la pièce sélectionnée doit avoir un intérêt à être fabriquée de manière additive; à priori elle doit nécessiter une réduction de masse et/ou une géométrie complexe.
- **Géométrie** : elle doit pouvoir nécessiter une optimisation topologique.
- **Détermination des cas de charge** : ils doivent être connus ou définissables aisément tant en direction qu'en intensité.
- **AlSi10Mg** : La pièce doit être compatible avec l'utilisation de cet alliage d'aluminium classique en additive manufacturing.
- **Secteur nautique** : ma volonté était de travailler sur une pièce utile à ma passion : la voile.

Description de la pièce :

Un **taquet d'amarrage** permet l'amarrage du bateau au ponton. L'amarre, cordage reliant le ponton et le bateau, est nouée sur le taquet au moyen d'un nœud de taquet.



Figure 3-1 : Différentes géométries de taquets [45] [43] [46]

Comme le montre la Figure 3-1, il existe de nombreuses géométries différentes de taquets d'amarrage, mais elles ont en commun :

- Un minimum de deux trous pour faire passer les vis permettant de fixer le taquet au pont du bateau.
- Un pied central qui reprend la plus grande partie des efforts
- Deux "ailes" supérieures autour desquelles le nœud est fixé.

Ils sont habituellement fabriqués en inox ou en fonte d'aluminium. Certains modèles très légers (pour des tous petits bateaux ou de l'écolage) sont en plastique, mais leur résistance est très réduite.

Il y a deux types de chargements distincts sur le taquet :

- Le chargement radial au pied du taquet : c'est le chargement le plus important. Il sera divisé en 4 cas de charge, un selon chaque direction principale (longitudinale et transversale dans chaque sens)
- Un chargement vertical en arrachage sur les ailes du taquet : il sera arbitrairement et par expérience fixé à 10% du chargement radial.

En fonction de la zone d'impression de la machine SLM et des proportions habituelles d'un taquet, le domaine de conception maximal est fixé à : 25 mm de haut, 120 mm de long et 20 mm de large.

On s'oriente d'emblée vers une géométrie à 2 trous de fixation, car la présence de 4 trous impose un élargissement de l'embase par rapport aux ailes, qui nécessiterait une utilisation massive de support lors de la fabrication additive, et ce quel que soit le sens d'impression.

La charge de rupture d'un taquet n'est pas reprise dans les caractéristiques "commerciales". On dimensionne donc le taquet en fonction de la charge maximale susceptible de lui être transmise par l'amarre.

Pour cette taille de taquet, de par la configuration, on fixe le diamètre maximum de cordage à 10 mm.

Le diamètre des amarres est lié à la taille et au poids du bateau, selon une grille usuelle disponible chez les accastilleurs. Comme l'indique la source [31], l'usage de ce taquet sera donc limité à des petits bateaux de maximum 8 mètres et pesant moins d'une tonne.

Détermination de la charge appliquée au taquet en vue du dimensionnement :

Les cordages spécifiques dédiés à l'amarrage (amarres) présentent des caractéristiques différentes des autres cordages du bateau (drisses, écoutes). Ils sont plus élastiques, résistent mieux à l'abrasion mais présentent une charge de rupture plus faible.

La charge de rupture pour des amarres de diamètre 10 mm de très bonne qualité peut atteindre 35 000 N [27]. Usuellement il est conseillé en nautisme de ne pas dépasser une charge de travail de 50% de celle de rupture. De nouvelles normes préconisent même 20 % [32].

De plus, on tient compte dans le calcul de la charge susceptible d'être supportée par un cordage, que la présence d'un nœud réduit localement la "solidité" de 50%.

L'éternel débat sur les pontons est de savoir si le terme "solidité" s'applique à la charge de rupture ou de travail, mais comme ce débat s'écarte ici du sujet principal, on prendra comme hypothèse arbitraire que la charge maximale avant rupture du nœud, se situe à la moitié d'une charge intermédiaire, à savoir :

$$CMR = 50\% \frac{CR + CT}{2} = \frac{35\,000 + 17\,500}{4} \approx 13\,000\,N$$

Où CMR représente la charge maximale avant la rupture du nœud, CR la charge de rupture et CT la charge de travail du cordage.

On considère cette valeur comme étant la charge maximale susceptible d'être transmise au taquet par le cordage en usage statique normal,.

Il faut encore tenir compte de l'effet de choc en cas de vagues violentes.

Il semble donc raisonnable de plafonner la charge radiale maximale de rupture du taquet à 40 000 N, soit environ 15% de plus que la charge de rupture d'une amarre très haut de gamme dans une zone sans nœud (... et il y a toujours présence d'un nœud qui fera office de « fusible »...). La charge de dimensionnement verticale sur les "ailes" vaudra donc 4 000 N (Figure 3-2).

D'une manière générale, le taquet ne peut pas être exagérément surdimensionné, car il fait lui-même office de « fusible » pour ne pas arracher le pont du bateau.



Figure 3-2 : Schéma de principe des chargements : en rouge force radiale sur le pied (40 000 N) et en bleu force verticale sur les ailes (4 000 N)

4 Matériel et méthode

Cette section présente le dispositif et les procédures expérimentales de l'étude en quatre parties distinctes :

- Infrastructure d'impression
- Fabrication et préparation des échantillons de test des paramètres
- Caractérisation des échantillons
- Optimisation topologique

4.1 Infrastructure d'impression

4.1.1 Machine SLM

La machine SLM utilisée est celle du pôle IMAP de l'institut iMMC de l'Université Catholique de Louvain. Il s'agit d'une ProX® DMP 200 de la marque 3D System représentée à la Figure 4-1 (fiche technique dans l'annexe 1) [33].



Figure 4-1: Imprimante ProX DMP 200 et ses bombones d'argon

Caractéristiques principales de la machine :

- Zone d'impression : 140 x 140 x 100 mm³ (L x l x h),
- Longueur d'onde du laser : 1070 nm
- Puissance maximale du laser : 273.6 W (puissance théorique de 300 W).
- Atmosphère inerte assurée par de l'argon. La pression d'entrée de l'argon dans la machine est de 5 bars.
- Taux d'oxygène dans la machine maintenu en dessous de 500 ppm.

4.1.2 Poudre

- La poudre utilisée est un alliage d'aluminium, de silicium et de magnésium : AlSi10Mg.
- La poudre neuve est la poudre "size type 4" de TLS Technik ®.
- La granulométrie de la poudre est comprise entre 15 et 53 µm et sa composition est reprise dans le tableau de la Figure 4-2.

AlSi10Mg	Al	Si	Mg	Fe	Ti	Sn	Mn
% pds	Balance	9-11	0.20-0.45	≤ 0.55	≤ 0.15	≤ 0.10	≤ 0.10

Figure 4-2 : Composition de la poudre [34]

La fiche technique complète de la poudre est disponible dans l'annexe 2.

La majorité du temps, la poudre utilisée est recyclée car, à l'impression, une grande partie de la poudre présente sur le plateau n'est pas fusionnée et est récupérée. La procédure de recyclage est un tamisage effectué en 2 étapes :

- Avec une tamiseuse semi-automatique Retsch® VS 1000 (Figure 4-3) équipée d'un tamis de 112 µm.
- Avec une tamiseuse automatique, la PX box® de 3D Systems® (Figure 4-4) équipée d'un tamis de 75 µm.

La poudre recyclée présente des caractéristiques proches de la poudre neuve.



Figure 4-3 : Tamiseuse semi-automatique



Figure 4-4 : Px BOX

4.1.3 Séparation et découpe des pièces imprimées

Une fois l'impression terminée, comme les pièces ont fusionné avec le plateau de fabrication, elles en sont séparées par électro-érosion, appelée EDM pour *Electrical Discharge Machining*. La découpe se fait sous eau à l'aide d'un fil sous tension qui n'entre pas en contact avec le métal. C'est le courant qui le parcourt qui découpe la pièce en créant un arc entre les deux.

La machine utilisée est la *GF Agie Charmilles Cut 20P*® (Figure 4-6 & Figure 4-5)



Figure 4-6 : EDM - vue d'ensemble de la machine [48]

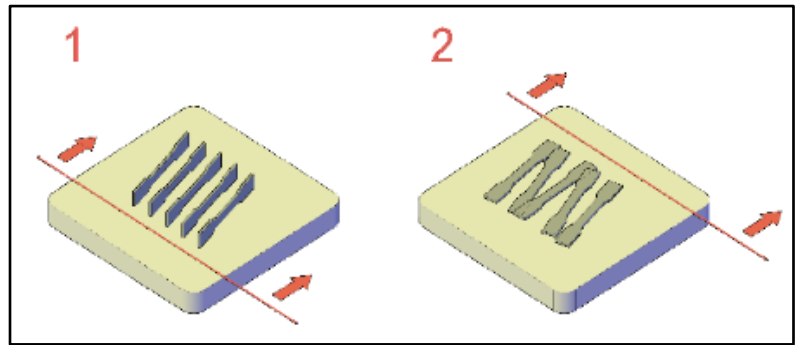


Figure 4-5 : Séparation des échantillons du plateau de fabrication par EDM

4.2 Fabrication des échantillons

Afin de déterminer les propriétés des microstructures et d'effectuer des essais de traction, 4 séries d'échantillons sont imprimées. Chaque série constitue un "batch", désignant l'ensemble des pièces du plateau imprimées lors d'une même séquence.

Les pièces peuvent être imprimées avec différents paramètres (h , P , v) car le programme "slicer" permet de faire varier les paramètres de chaque pièce en les adaptant lors du passage d'une pièce à l'autre dans la même couche. La stratégie de lasage consiste en une juxtaposition d'ilots hexagonaux (voir section 2.1.3). Les impressions sont effectuées sans contour et l'épaisseur des couches est fixée à 30 μm .

Les autres paramètres varient selon l'échantillon :

- Distance inter-cordon : $h = 75$ ou $100 \mu\text{m}$
- Puissance : $P =$ de 75 à 100 % de la puissance maximale (273.6 W)
- Vitesse de balayage : $v =$ de 600 à 1800 mm/s

Le premier batch est réalisé avec des cubes afin de pouvoir mesurer facilement la densité et observer la microstructure. Il permet de cibler les paramètres les plus appropriés pour la réalisation des éprouvettes de traction (les trois batch suivants).

Chaque batch est référencé par une identification composée du nom de la machine (X200) et de la date de l'impression (année, mois, jour).

4.2.1 Cubes pour la mesure de densité et l'observation de la microstructure

Ce batch (X200-191008) comprend 34 cubes de 10 mm de côté (Figure 4-7).

Le but étant d'étudier les paramètres d'impression, ceux-ci varient pour chaque cube (h , P , v).

L'annexe 3 reprend les paramètres de chacun des cubes du batch.

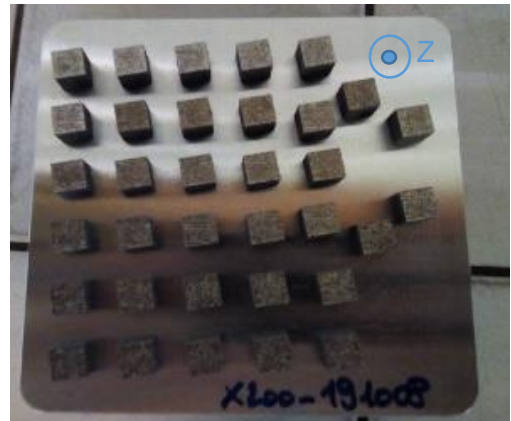


Figure 4-7 : Batch X200-191008 sorti de machine

4.2.2 Plaques pour grandes éprouvettes de traction horizontales

Ce batch (X200-191021) comprend 24 plaques rectangulaires (Figure 4-8) dans lesquelles des éprouvettes de traction seront découpées par EDM selon les dimensions et l'orientation de la Figure 4-9. L'épaisseur des plaques et donc des éprouvettes est de 1.5 mm.

Deux cubes de contrôle sont également imprimés pour vérifier la répétabilité entre les différents batch.

Il y a 8 sets de paramètres différents (pour chacun desquels 3 plaques sont imprimées); le détail des paramètres de chacun des sets est repris dans l'annexe 4.



Figure 4-8 : Batch X200-191021 sorti de machine

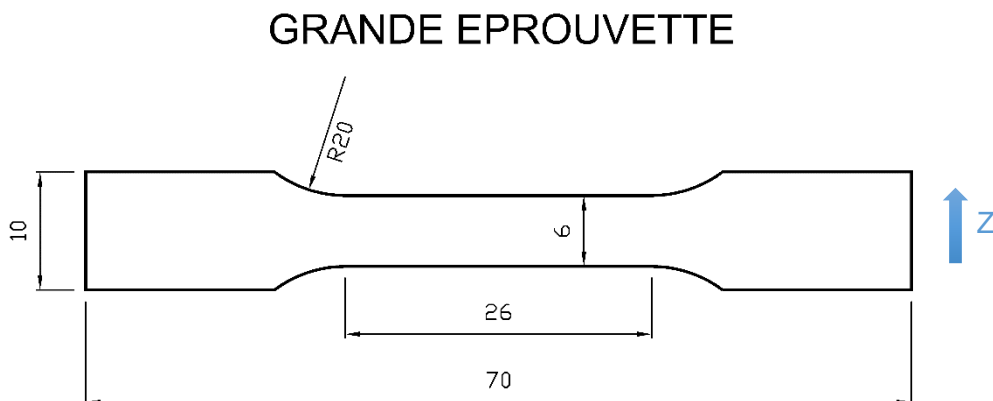


Figure 4-9 : Epreuve pour les batch X200-191021 & 22 (en mm)

4.2.3 Grandes éprouvettes de traction horizontales

Ce batch (X200-191022) est constitué de 24 éprouvettes de traction "préformées" (Figure 4-10).

Les paramètres d'impression sont les mêmes que pour le batch X200-191021 et sont détaillés dans l'annexe 5.

Les formes et dimensions des éprouvettes sont les mêmes que celles découpées dans le batch précédent et illustrées à la Figure 4-9 de la page précédente. L'épaisseur des plaques, et donc des éprouvettes est de 1.5 mm.

Dans le bas des éprouvettes, un support en treillis est ajouté pour joindre le plateau de fabrication.



Figure 4-10 : Batch X200-191022 sorti de machine

Le but de ce batch est de réduire le temps de découpe des échantillons, l'utilisation de la machine EDM et le temps d'intervention d'un technicien. En effet, les éprouvettes étant imprimées sur du support en treillis, elles sont séparables du plateau à l'aide d'une pince. Il faut cependant comparer les résultats de ce batch avec ceux du précédent pour valider cette méthode de mise en œuvre.

4.2.4 Eprouvettes de tractions verticales et à 45°

Pour ce batch (X200-191205), des plaques rectangulaires sont imprimées afin d'y découper de petites éprouvettes de traction par EDM (Figure 4-11). L'épaisseur des plaques et donc des éprouvettes est de 1 mm.

L'annexe 6 reprend les paramètres d'impression de ce batch.



Figure 4-11 : Batch X200-191205 sorti de machine

La Figure 4-12 illustre les dimensions et l'orientation de découpe des éprouvettes :

- (a) 6 plaques étroites : découpe de 4 éprouvettes de traction verticales (par plaque)
- (b) 6 plaques larges : découpe de 4 éprouvettes de traction à 45° (par plaque)
- (c) 3 petites plaques : découpe d'une éprouvette de traction à 45°
- (d) 3 éprouvettes de traction préformées et imprimées à 45° (qui doivent simplement être séparées de leur support)

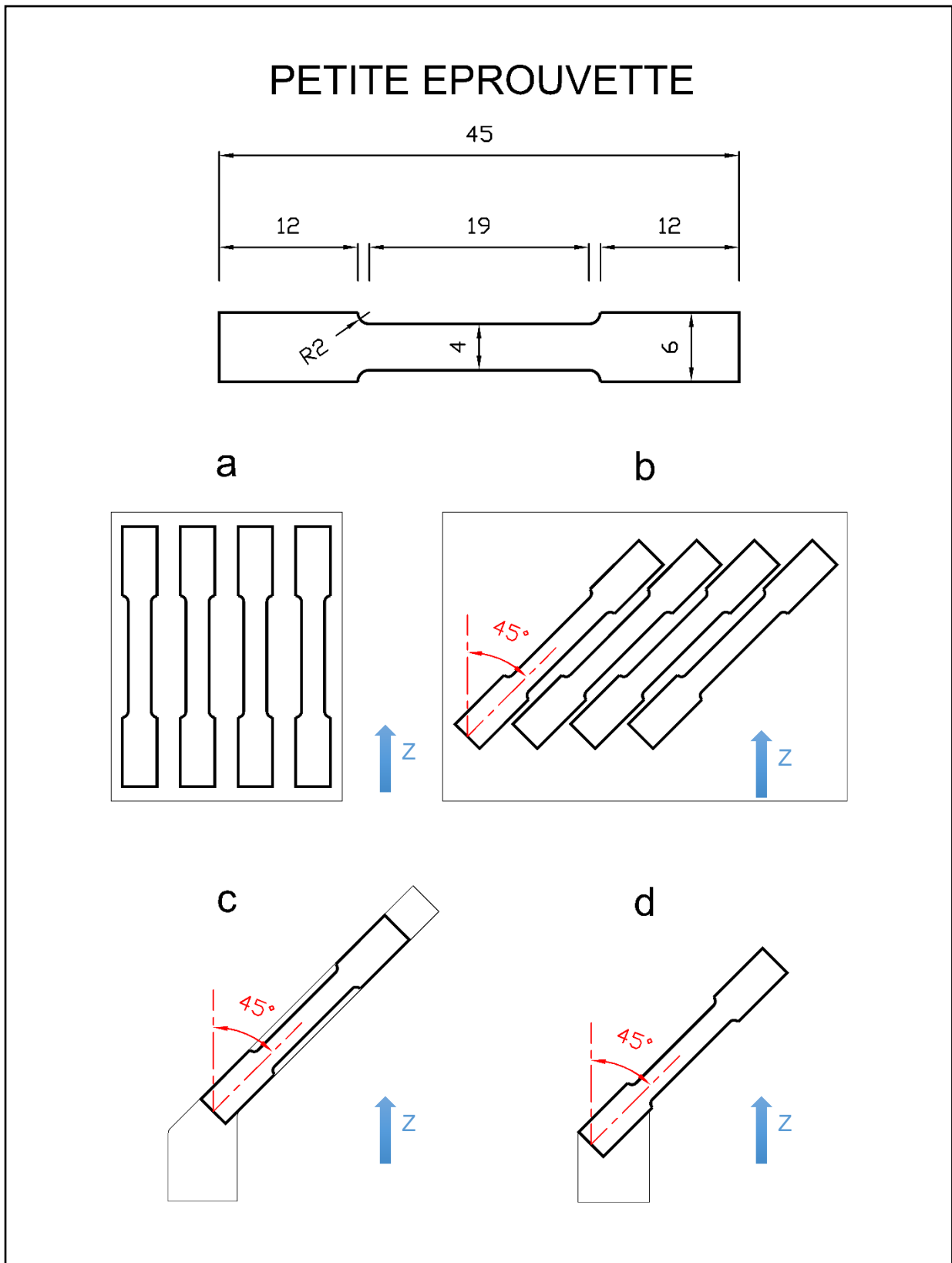


Figure 4-12 : Plans de découpe des éprouvettes du batch X200-191205 (en mm)
 (a) plaques étroites, éprouvettes verticales – (b) plaques larges, éprouvettes à 45°- (c)
 petites plaques, éprouvettes uniques à 45° - (d) éprouvettes uniques à 45°

4.3 Caractérisation des échantillons

4.3.1 Mesure de densité

La mesure de densité est effectuée sur les cubes du batch X200-191008, au moyen de la "méthode des trois mesures", également appelée méthode d'Archimède, et grandement inspirée des sources [11] [35] [36].

Elle consiste à peser 3 fois l'échantillon :

- **Sec** : après une nuit dans un dessiccateur
- **Immergé dans un liquide** : image de la poussée d'Archimède
- **Humide** : juste sorti du liquide, les cavités ouvertes sont encore remplies de liquide.

La masse volumique du solide est calculée à l'aide de sa masse sèche et de son volume qui est déduit par immersion dans un liquide dont la masse volumique est connue (ici de l'éthanol), en application du principe d'Archimède.

La mesure de la masse du solide humide (juste sorti du liquide) permet de déterminer la fraction volumique des porosités ouvertes.

En comparant la masse volumique de l'échantillon avec la masse volumique intrinsèque du matériau dont il est constitué, on obtient sa densité relative et donc sa fraction de porosités fermées.

Dans le cas présent, les porosités ouvertes ne sont pas étudiées et les mesures des masses sèches et des masses humides sont suffisantes; elles sont effectuées à l'aide d'une balance électronique *Mettler AE 200*® (Figure 4-13) d'une précision de 10^{-4} gramme équipée d'un accessoire de mesure des densités (Figure 4-14).



Figure 4-13 : Balance *Mettler AE 200*® [39]



Figure 4-14 : Accessoire de mesure des densités [40]

Les différentes masses :

- **Masse sèche (m_{sec}) :** Masse du solide après une nuit dans un dessiccateur.
- **Masse immergée (m_{im}) :** Masse résultante de l'objet suspendu dans de l'éthanol, qui permet de déduire sa poussée d'Archimède, et donc son V_{tot} (voir ci-dessous).

Les différents volumes :

- **Volume solide (V_{sol}) :** Volume effectif de la matière à l'exclusion de toute cavité.
- **Volume porosités fermées (V_{PF}) :** Volume des cavités à l'intérieur du solide.
- **Volume total (V_{tot}) :** Somme des deux volumes précédents, donc en excluant les porosités ouvertes.

Calcul de la masse volumique du fluide (ρ_{fl}) :

Il est fondamental de disposer d'une valeur instantanée extrêmement précise de la masse volumique de l'éthanol tout au long de la séquence de mesure de densité.

Pour mesurer la masse volumique de l'éthanol, on utilise un poids dont le volume total est connu avec exactitude. Ce poids est pesé à sec (m^*_{sec}) et ensuite immergé (m^*_{im}) dans l'éthanol dans les conditions de pression et de température de la future mesure. La masse immergée correspond à la masse sèche dont on déduit la différence entre la poussée d'Archimède et la masse du volume d'air déplacé¹. La poussée d'Archimède représente la masse du volume d'éthanol déplacé par le volume total du poids :

$$m^*_{im} = m^*_{sec} - (\rho_{fl} - \rho_{air})V_{tot}$$

Et on peut donc isoler la masse volumique de l'éthanol pour ces conditions :

$$\rho_{fl} = \frac{m^*_{sec} - m^*_{im}}{V_{tot}} + \rho_{air}$$

La température ambiante de la pièce, et donc celle de l'éthanol dans lequel les mesures d'Archimède sont effectuées, évolue au cours de la mesure des différents cubes.

Comme il n'est pas judicieux de mesurer ρ_{fl} entre chaque mesure de cubes, une mesure de la masse volumique de l'éthanol a été effectuée au début et une autre à la fin de la séquence de prises de mesure.

Puisque les échantillons ont été mesurés à l'affilée et au même rythme, la densité du fluide utilisée pour chaque échantillon est donc une évolution linéaire entre les deux valeurs mesurées.

¹ $\rho_{air} = 0.0012$ [g/cm³]

Calcul de la masse volumique réelle du solide ($\rho_{réel}$) :

La masse volumique réelle est le rapport entre la masse sèche et le volume total. Pour être rigoureux il faut, ici aussi, tenir compte de l'air déplacé lors des pesées :

$$\rho_{réel} = \frac{m_{sec}}{V_{tot}} + \rho_{air}$$

On peut définir la masse immergée comme :

$$m_{im} = m_{sec} - (\rho_{eau} - \rho_{air}) V_{tot}$$

Et donc l'expression finale de la masse volumique du solide (porosités fermées comprises) devient :

$$\rho_{réel} = (\rho_{fl} - \rho_{air}) \frac{m_{sec}}{m_{sec} - m_{im}} + \rho_{air}$$

Calcul de la densité relative de l'échantillon (ρ_{rel}) :

La densité relative est le rapport entre la masse volumique réelle de l'échantillon ($\rho_{réel}$) et celle de la poudre d'impression (dans notre cas $\rho_{pou} = 2.68 \text{ g/cm}^3$)

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{réel}}{\rho_{pou}}$$

4.3.2 Microstructure

Les porosités et la microstructure sont observées au microscope à balayage électronique - *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dans les cubes du batch X200-191008, qui sont découpés, enrobés et polis.

Préparation et polissage :

- **Découpe du cube :**

Afin d'observer le cœur de l'échantillon, pour éviter tout effet de bord, le cube est coupé en deux parallèlement à la direction de fabrication (Figure 4-15), au moyen d'une micro-tronçonneuse lubrifiée par un liquide de coupe.

Les demi-cubes sont alors enrobés dans une résine conductrice en carbone pour faciliter le polissage et l'observation au microscope (Figure 4-16).

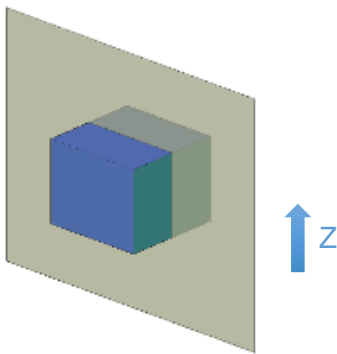


Figure 4-15 : Découpe des cubes

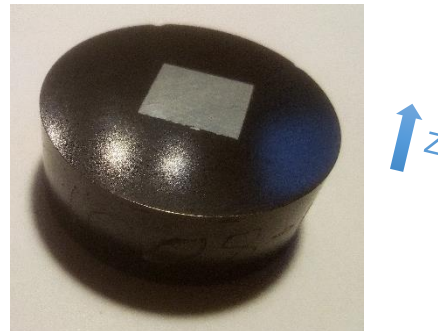


Figure 4-16 : Demi-cube enrobé

- **Polissage :**

La surface à observer est, dans un premier temps, dégrossie avec du papier SiC (papier de verre) sur une plaque tournante (pression appliquée manuellement) en affinant le grain de manière incrémentale de 80 à 1200. Ensuite l'échantillon est poli avec de la poussière de diamant de 1 μm sur une plaque tournante (pression appliquée mécaniquement) et finalement un polissage chimique est effectué pendant 15 minutes avec un agent chimique (OPS).

- **Attaque chimique :**

Pour l'observation des microstructures au SEM, l'échantillon subit une attaque à l'acide fluoridrique (HF dilué à 0.5 % dans de l'eau ultra pure) pendant 5 secondes pour faire ressortir le réseau de Silicium.

Parallèlement, sur certains échantillons, une attaque est réalisée avec le réactif de Keller (composition : 95.5 % H_2O - 2.5 % HNO_3 - 1.5 % HO - 0.5 % HF) pendant 40 secondes. Elle permet d'attaquer le matériau et de faire ressortir les différentes microstructures avec des colorations différentes. L'observation peut ici s'effectuer au microscope optique.

Observations microscopiques :

Les observations microscopiques sont effectuées soit au microscope optique, soit avec le microscope à balayage électronique (**Scanning Electron Microscopy, SEM**) du pôle IMAP de l'UCLouvain.

Il s'agit d'un GEMINI ULTRA 500 de Carl Zeiss AG ® (Figure 4-17). La tension du faisceau d'électron est fixée à 15 kV en mode "high current", l'ouverture à 120 μm et le détecteur à électrons secondaires (SE2) est utilisé.



Figure 4-17 : SEM Ultra 500 [38]

Observation des zones thermiquement affectées :

On observe la microstructure, l'agencement et la largeur des trois zones thermiques des bains de fusion. On sélectionne une limite de bain de fusion, puis les largeurs de la zone affectée thermiquement (HAZ) et de la zone grossière sont mesurées en plusieurs endroits perpendiculairement à la frontière du bain de fusion.

Délimitation des zones (Figure 4-18) :

- La HAZ débute à la frontière du bain de fusion; c'est la zone où le réseau de silicium (en gris clair sur la Figure 4-18) est fractionné.
- En direction du cœur du bain de fusion, la zone grossière commence là où la HAZ s'arrête et est arbitrairement limitée au premier front de gros grains allongés, la frontière avec la zone fine étant difficile à déterminer.
- Dans la zone fine, la microstructure s'affine progressivement vers le cœur du bain de fusion.

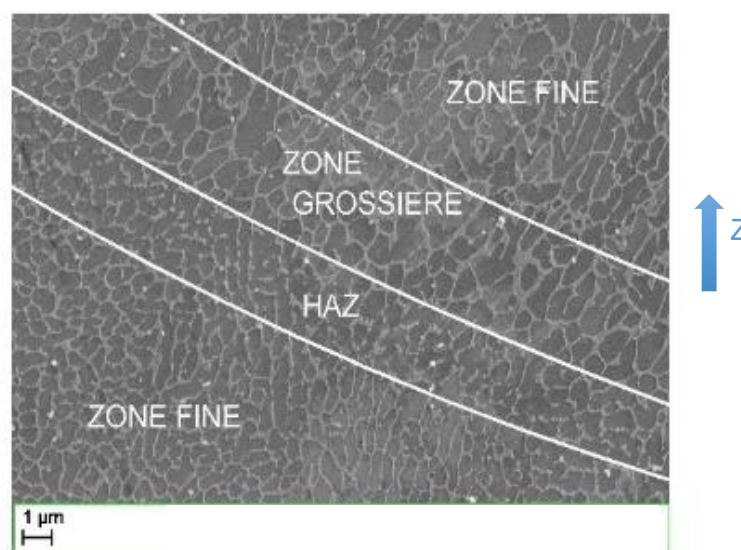


Figure 4-18 : SEM : Observation des différentes zones thermiquement affectées

Observation des porosités :

Via le SEM, les porosités sont d'abord observées de manière globale pour déterminer leurs nombre, occurrence et forme (Figure 4-19). On observe ensuite de manière plus précise la microstructure autour des porosités pour comprendre leur origine.

Afin de déterminer la position des porosités par rapport aux bains de fusion, les échantillons attaqués avec le réactif de Keller sont observés au microscope optique (Figure 4-20).

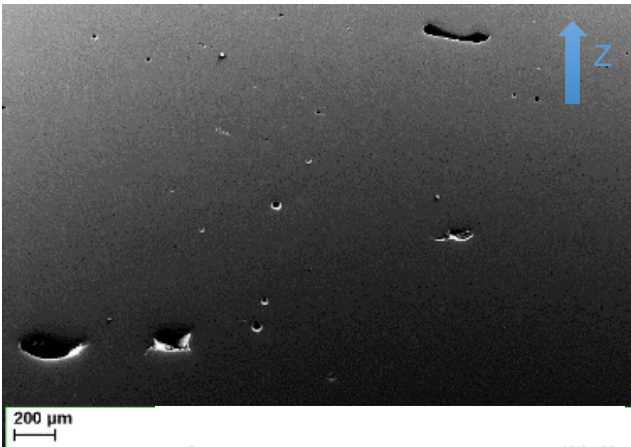


Figure 4-19 : SEM - Vue d'ensemble des porosités



Figure 4-20 : Optique - Bains de fusion et porosités après une attaque au réactif de Keller

4.3.3 Essais de traction

Les essais de traction s'effectuent sur 3 types d'éprouvettes :

- Eprouvettes imprimées horizontalement (direction de traction perpendiculaire à Z).
- Eprouvettes imprimées verticalement (direction de traction parallèle à Z).
- Eprouvettes imprimées à 45° (traction à 45° de Z)

Mesures :

Les orientations d'impression et le design des éprouvettes sont repris à la section 4.2.

Les 96 essais de traction sont effectués sur la machine de traction de 50 kN de l'iMMC avec le même montage et les mêmes paramètres (Figure 4-21 & Figure 4-22) :

- Mors Intron®
- Extensomètres
- Précharge de 10 N
- Déplacement des mors fixé à 1mm/min.



Figure 4-21 : Machine de traction

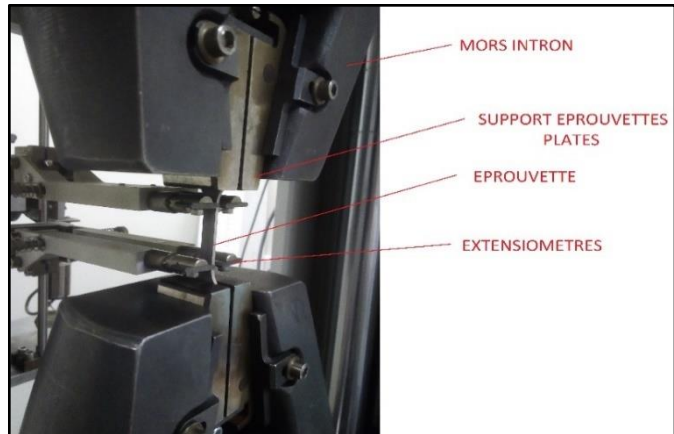


Figure 4-22 : Détail des mors

Mesure des propriétés mécaniques sur les courbes de traction :

L'ensemble des courbes de traction de cette étude affiche la contrainte ingénieur (σ) en fonction de la déformation ingénieur (ϵ), c'est-à-dire :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad \& \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Où F est la force appliquée par la machine, S_0 la section initiale de l'éprouvette, ΔL l'élongation mesurée par les extensomètres et L_0 la distance initiale entre les extensomètres.

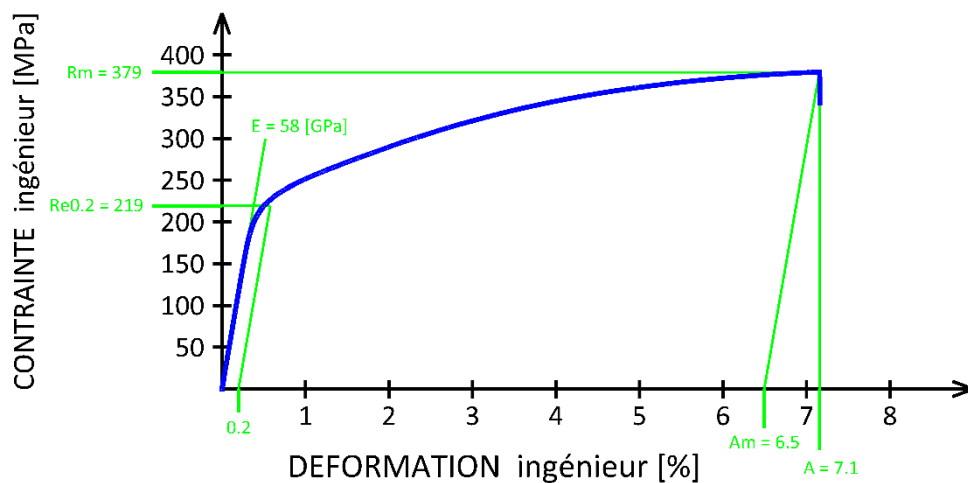


Figure 4-23 : Mesure type des propriétés mécaniques sur les courbes de traction

Sur la courbe ainsi obtenue (Figure 4-23), on mesure 5 propriétés mécaniques :

- **Le module de Young (E)** : C'est la pente de la droite de la partie élastique de la courbe de traction (exprimé en GPa)
- **La limite d'élasticité ($Re_{0.2}$)** : C'est la contrainte au moment de la transition élastique/plastique, comme ce point est difficilement estimable, on mesure la limite à 0.2 % de l'élongation (valeur typique pour les métaux). Elle est exprimée en MPa.

- **Contrainte à la rupture (R_m)** : c'est la valeur de la contrainte au moment de la rupture de l'échantillon (exprimée en MPa).
- **Elongation totale (A)** : c'est la valeur d'élongation au moment de la rupture de l'échantillon (exprimée en %).
- **Elongation plastique (A_m)** : c'est la valeur de l'élongation qui a été induite par plasticité (en enlevant le retour élastique) au moment de la rupture de l'échantillon (exprimée en %).

Observation des faciès de rupture des éprouvettes :

Les faciès de rupture des éprouvettes de traction sont observés au SEM, d'abord de façon générale (Figure 4-24) ensuite plus précisément autour des zones d'intérêt (cavités marquantes, changement de plan de fissuration, ...).

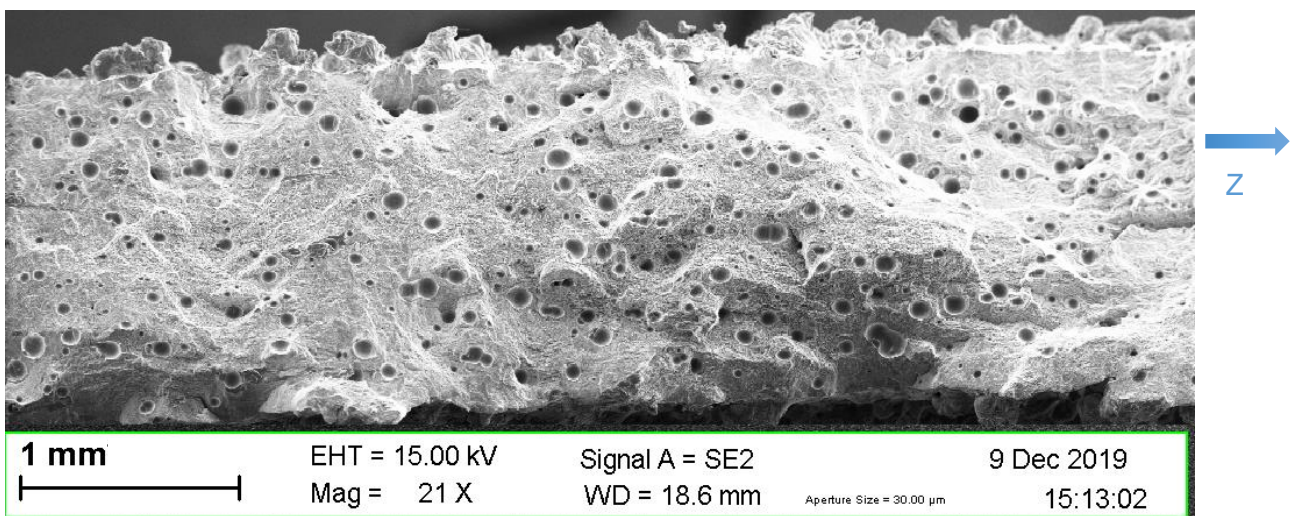


Figure 4-24 : Vue macroscopique d'un faciès de rupture

4.4 Optimisation Topologique

Parallèlement à la caractérisation des paramètres d'impression, on effectue l'optimisation topologique du taquet d'amarrage.

Le programme utilisé pour l'étude topologique est la partie TOPOL de l'Environnement Solver SAMSEF de NX produit par Siemens ®.

4.4.1 Définition du domaine de conception et maillage

La zone maximum de conception du taquet ($25 \times 120 \times 20 \text{ mm}^3$) ne peut pas être définie comme domaine de conception; en effet elle ne permettrait pas de faire apparaître la forme en "T" des deux ailes.

Le domaine de conception est composé d'une plaque de 3 mm, du pied du taquet de 12 mm de haut et de la partie supérieure haute de 12 mm, constituée des 2 ailes et d'une partie centrale qui les relie au pied (Figure 4-25).

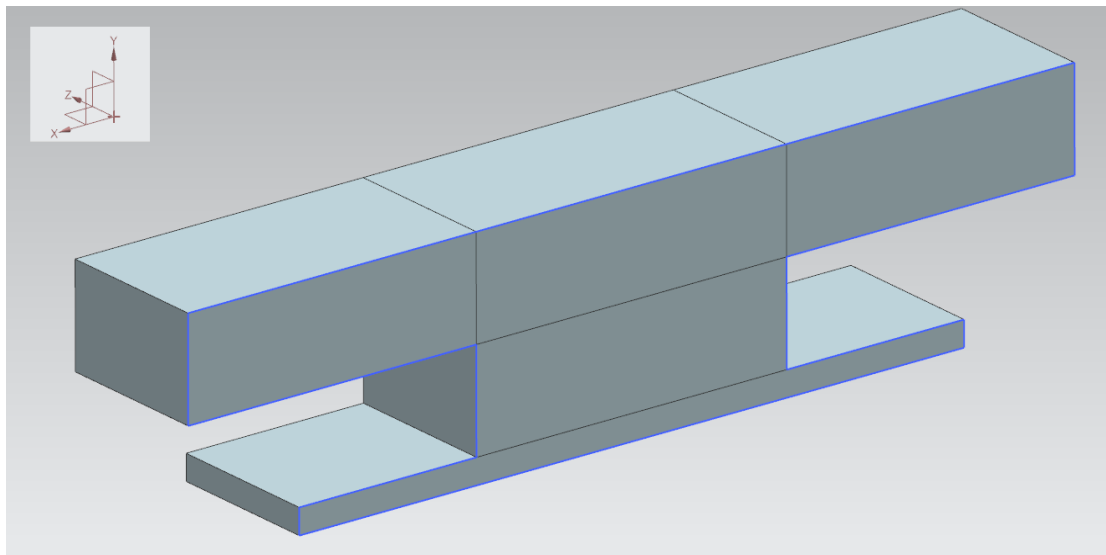


Figure 4-25 : Domaine de conception

Le domaine est divisé en plusieurs blocs (lignes noires à la Figure 4-25). Ceci permet d'assurer une symétrie et une régularité du maillage. Si le maillage était défini sur la pièce complète, des irrégularités apparaîtraient au niveau de la liaison entre le pied et les ailes du taquet.

Mais une fois le maillage généré, celui-ci est unifié pour optimiser la pièce en tant qu'entité solide.

Un maillage assez grossier est défini dans un premier temps afin d'accélérer les calculs pendant la sélection des paramètres de l'optimisation topologique. Le maillage définitif est composé de cubes de 1 mm de côté et est parfaitement symétrique selon les deux plans verticaux (Figure 4-26). C'est un compromis entre précision et temps de simulation.

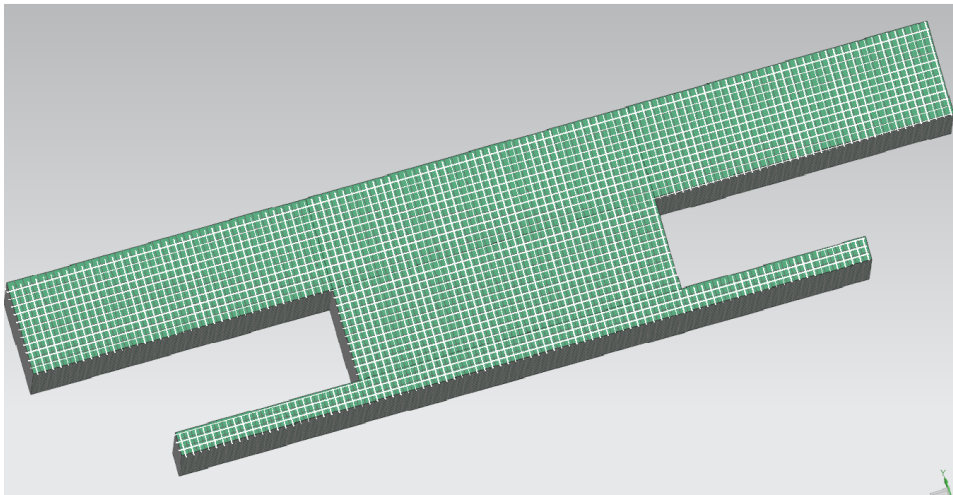


Figure 4-26 : Maillage définitif

4.4.2 Points fixes et chargement

On impose un déplacement nul au bas de la plaque inférieure (partie fixe ancrée au pont du bateau)

Il y a 5 cas de charge différents appliqués chacun sur une surface. Le repère orthogonal est orienté dans le sens de l'impression et non selon la logique d'utilisation de la pièce.

1. Sur les ailes, dans la direction verticale (+Y, 4 000 N)
2. Sur le pied du taquet, de manière longitudinale (-X, 40 000 N)
3. Sur le pied du taquet, de manière longitudinale (+X, 40 000 N)
4. Sur le pied du taquet, de manière transversale (+Z, 40 000 N)
5. Sur le pied du taquet, de manière transversale (-Z, 40 000 N)

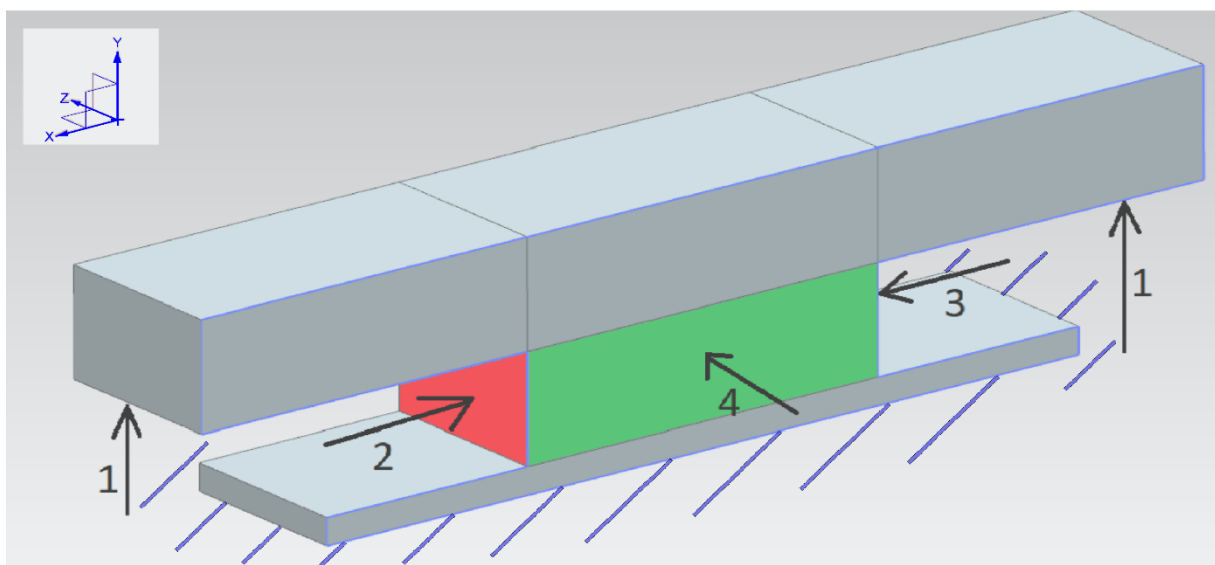


Figure 4-27 : Application des cas de charge et des contraintes

Pour les simulations numériques, le cas de charge n°1 (vertical) est toujours présent mais les 4 autres sont appliqués séparément.

Avant de démarrer l'optimisation topologique, il est intéressant de lancer une étude statique des différentes simulations afin de vérifier les cas de charge.

4.4.3 Paramètres de simulation

Durant l'étude topologique, un certain nombre de paramètres ont été adaptés (soit fixés ici, soit ajustés pendant l'étude) :

- Symétrie : Elle est imposée selon les deux plans verticaux.
- La fraction volumique : La fraction du domaine de conception à remplir de matière est ajustée entre 20 et 70 %.
- Le facteur de pénalisation : la méthode d'interpolation utilisée est la méthode SIMP et le facteur de pénalisation est ajusté.
- Zone de moyennage du filtre : le filtre utilisé est linéaire mais comme plusieurs filtres ont été testés, afin de les comparer, le rayon de moyennage est exprimé en nombre de couches de maillage (tous les filtres ne proposent pas les mesures intrinsèques pour qualifier le rayon de moyennage).

Les éléments du maillage utilisés pour moyenner la valeur d'un élément sont donc ceux qui dans toutes les directions, se trouvent inclus dans le rayon de moyennage qui entoure l'élément visé.

On utilisera ici 2 couches d'éléments, soit 2mm, en considérant comme négligeable pour le filtre la marge de précision de la machine SLM qui est usuellement fixée à 2 épaisseurs de couches de poudre, soit 60 μm . Le critère de la zone d'action du filtre sera donc physique, conceptuel et harmonieux pour l'œil humain

5 Résultats

Cette section présente les différents résultats des expériences.

Les cubes sont imprimés avec 30 sets de paramètres différents; sur ces 30 sets seulement 8 seront sélectionnés pour les essais de traction et les études plus approfondies, après l'analyse de leur densité relative en fonction de la VED (pour rappel : $VED = P/vht$).

Afin de permettre un suivi de la comparaison des résultats entre les expériences effectuées sur les différents types d'échantillons, les échantillons des 8 sets de paramètres sélectionnés sont identifiés par une forme géométrique qui leur est assignée jusqu'à la fin de la section 6 "Discussion". (Figure 5-1)

N° échantillon	6	9	10	14	19	24	28	30
Inter-cordons [μm]	75	75	75	75	75	75	75	100
Puissance [%]	75	75	80	80	90	100	100	85
Vitesse [mm/s]	600	1200	800	1600	800	1000	1800	1200
VED [J/mm^3]	152	76	122	61	137	122	68	65
LOGO	●	■	★	■	▲	★	▲	●

Figure 5-1 : Identification des échantillons principaux issus du batch X200-191008

5.1 Mesure de densité relative des cubes

Le graphique de la Figure 5-2 présente les densités relatives des 30 sets de paramètres différents des cubes du batch X200-191008 obtenus par la méthode d'Archimède (méthode expliquée dans la section 4.3.1).

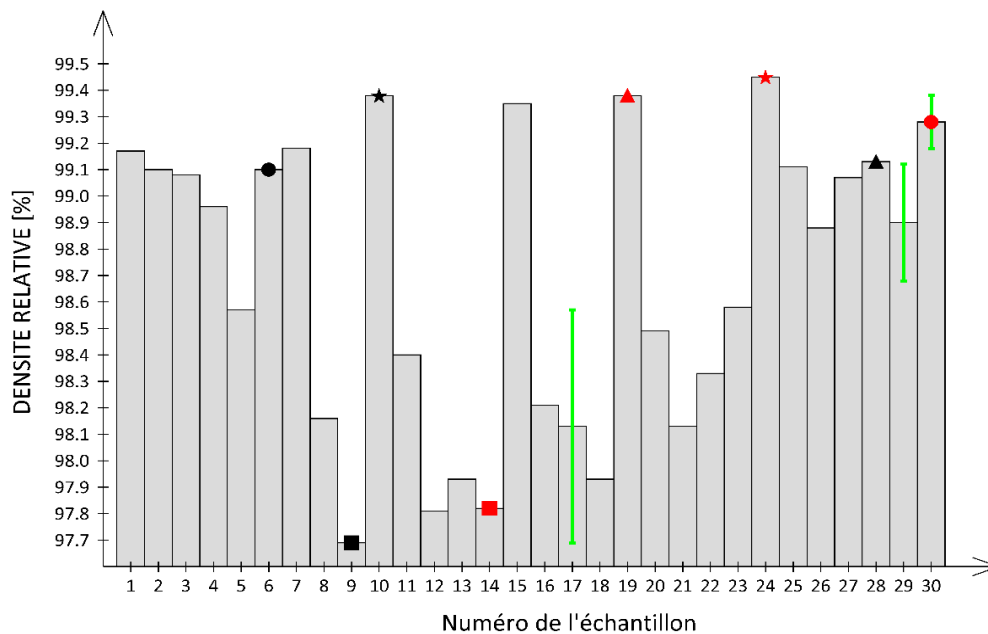


Figure 5-2 : Mesure de densité des cubes du batch X200-191008

Les barres d'erreurs (en vert) ne sont visibles que lorsque deux échantillons identiques ont été imprimés et mesurés. L'erreur est assez faible pour les échantillons 9 et 30, acceptable pour les échantillons 29 mais très grande pour les échantillons 17.

On peut y observer des densités relatives entre 97,7 et 99,5 %.

L'annexe 3 reprend les valeurs des masses, des volumes et des densités nécessaires à la méthode d'Archimède, ainsi que les valeurs exactes de la densité relative de chaque échantillon.

Afin de comparer les 30 sets de paramètres, ils sont classés sur le graphique de la Figure 5-3 en fonction de leur VED (Densité d'énergie volumique) pour une vitesse de balayage donnée.

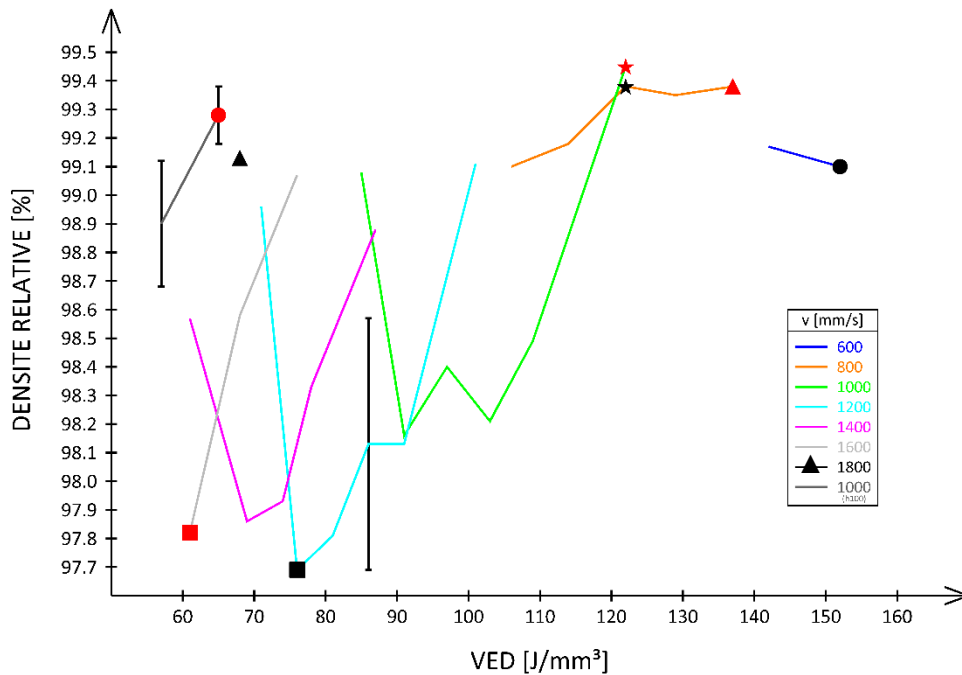


Figure 5-3 : Densité relative en fonction de la VED pour une vitesse de balayage donnée

On observe que les courbes établies sur base de nombreux échantillons ont une tendance en forme de "U" qui présente deux maximums de densité relative (à faible et à haute VED). Il ne ressort donc pas de tendance évidente permettant la sélection d'une VED optimale pour maximiser la densité relative.

Les 8 sets de paramètres des échantillons étudiés plus en profondeur sont choisis de manière à représenter les points importants de la courbe de tendance : deux maximums et un minimum et ce pour des vitesses et des puissances différentes (voir Figure 5-3).

5.2 Microstructure

5.2.1 Porosités

L'observation globale de la population des porosités des 8 cubes échantillons permet d'avoir une idée de leur nombre et de leur morphologie. Les images SEM sont reprises dans le tableau ci-dessous (Figure 5-4) en fonction de la densité relative.

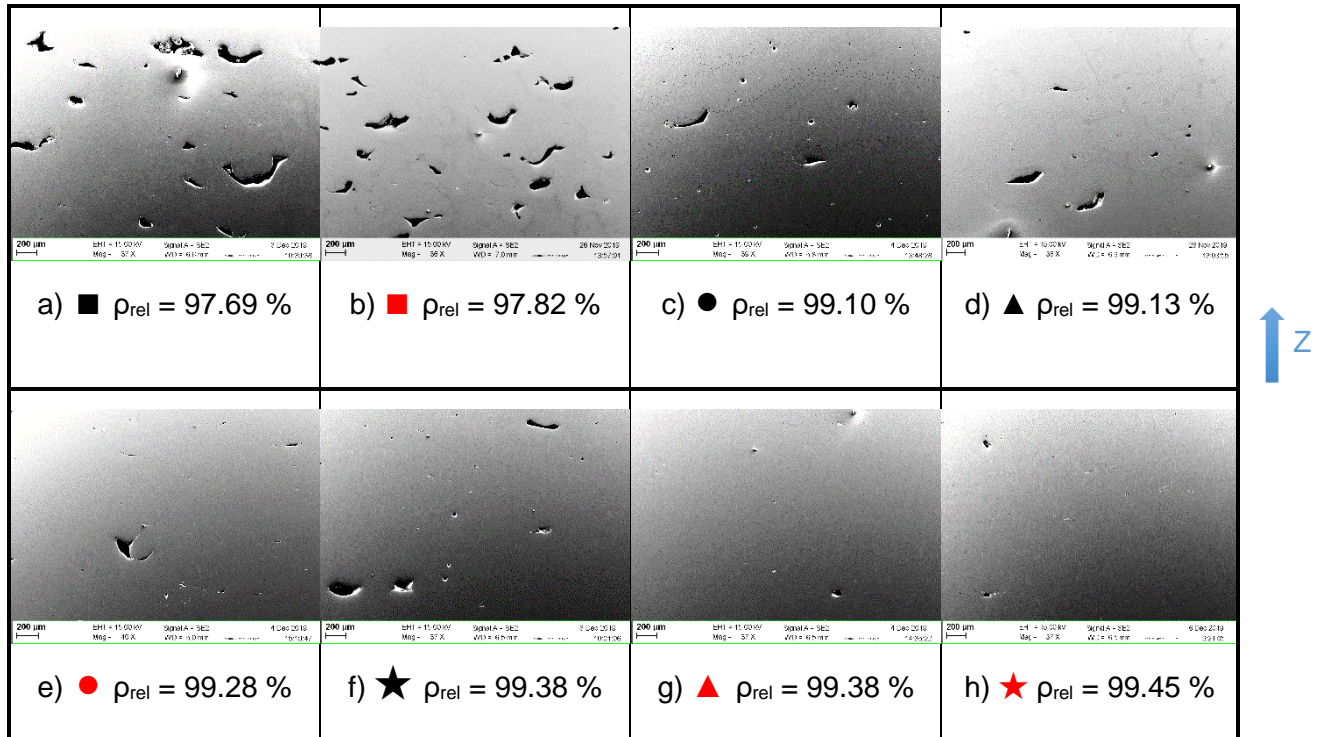


Figure 5-4 : Vue générale des porosités des différents échantillons en fonction de la densité relative
 - numéros des échantillons : a) 9A, b) 14, c) 6, d) 28, e) 30, f) 10, g) 19, h) 24

On remarque que le nombre mais aussi la taille des porosités diminue avec l'augmentation de la densité relative.

On observe deux types de morphologie des porosités dans les échantillons (Figure 5-5) :

- Des porosités sphériques de diamètre généralement inférieur à $30 \mu\text{m}$ et présentes dans tous les échantillons en quantité variable.
- Des porosités de forme irrégulière dont l'occurrence et la taille diminuent nettement avec l'augmentation de la densité.

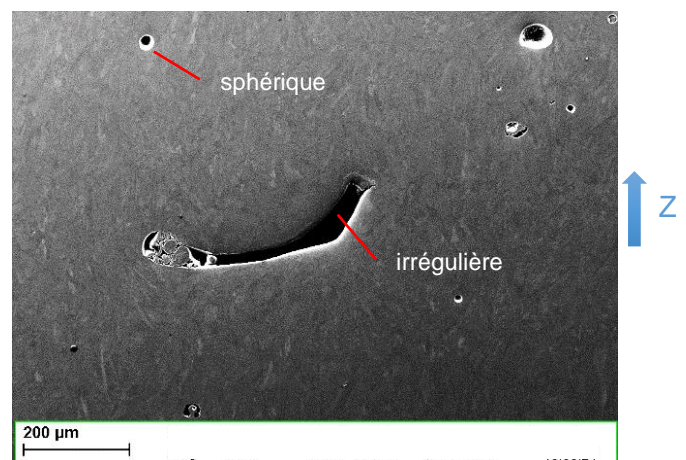


Figure 5-5 : Morphologie des porosités (échantillon 6 ●) – zoom de la Figure 5-4 (c)

5.2.2 Zones thermiquement affectées

Lors de l'observation de la microstructure des huit échantillons sélectionnés, les trois zones thermiquement affectées (décrites dans la section 2.1.5) sont systématiquement visibles dans chaque échantillon.

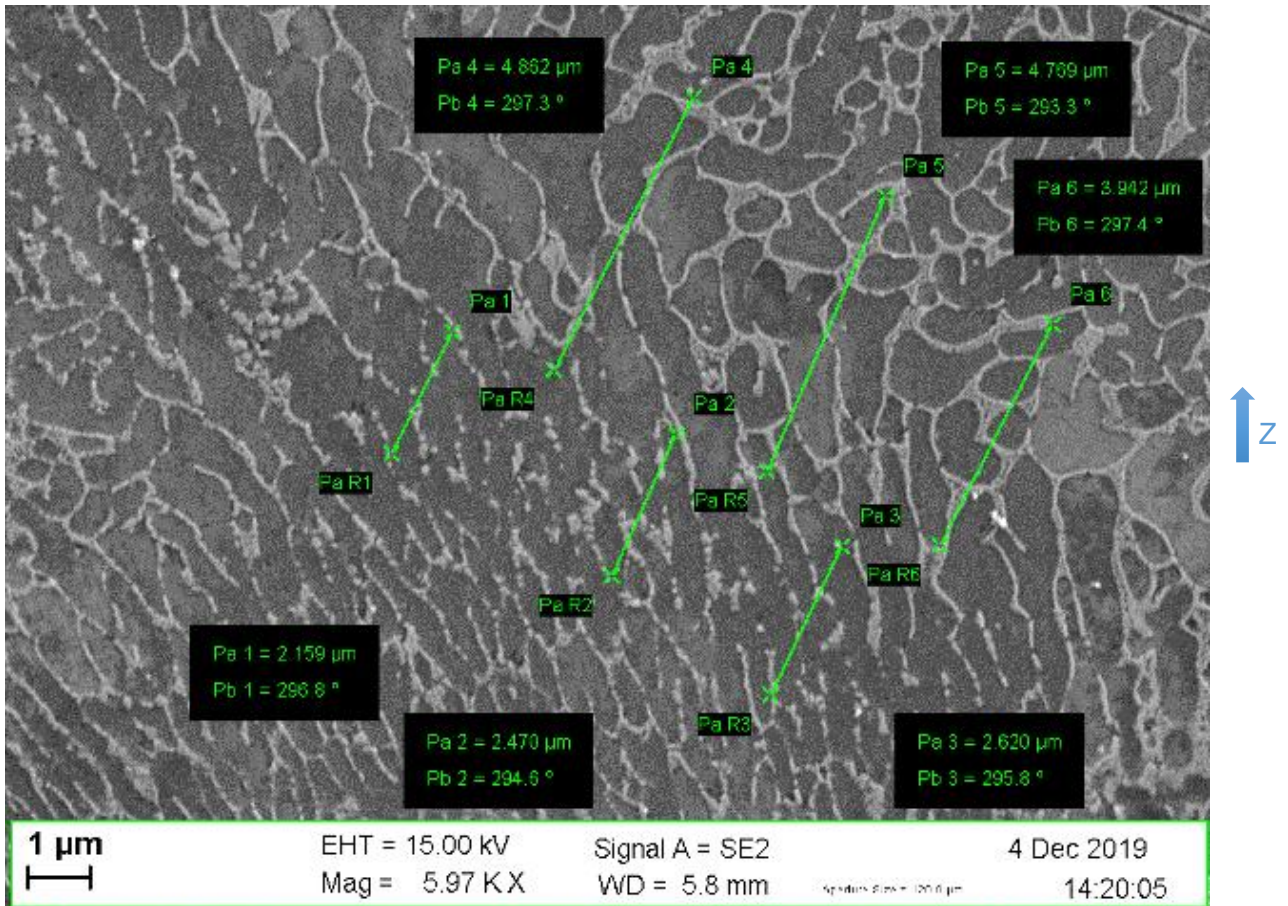


Figure 5-6 : SEM : Observation des différentes zones thermiquement affectées (échantillon 6 ●)

Les zones thermiquement affectées sont observées selon la méthode expliquée à la section 4.3.2 et illustrées à la Figure 5-6 pour les deux zones de frontière des bains de fusion (HAZ et zone grossière). Les largeurs de ces deux zones sont reprises pour chacun des 8 échantillons dans le tableau de la Figure 5-7 ci-dessous.

# Ech		HAZ [μm]	Reg. Grossière [μm]
9A	■	1.32 ± 0.14	3.53 ± 0.82
14	■	1.44 ± 0.48	3.49 ± 0.95
10	★	1.57 ± 0.54	3.52 ± 0.58
24	★	1.61 ± 0.73	3.25 ± 1.58
30B	●	1.69 ± 0.32	3.77 ± 0.30
19	▲	1.80 ± 0.57	3.91 ± 0.56
28	▲	1.93 ± 0.60	4.04 ± 1.30
6	●	2.07 ± 0.42	3.51 ± 0.81

Figure 5-7 : Tailles des zones thermiquement affectées, classées par taille de HAZ

On peut également représenter ces largeurs de zones graphiquement en fonction de la VED (Figure 5-8) afin de les comparer. :

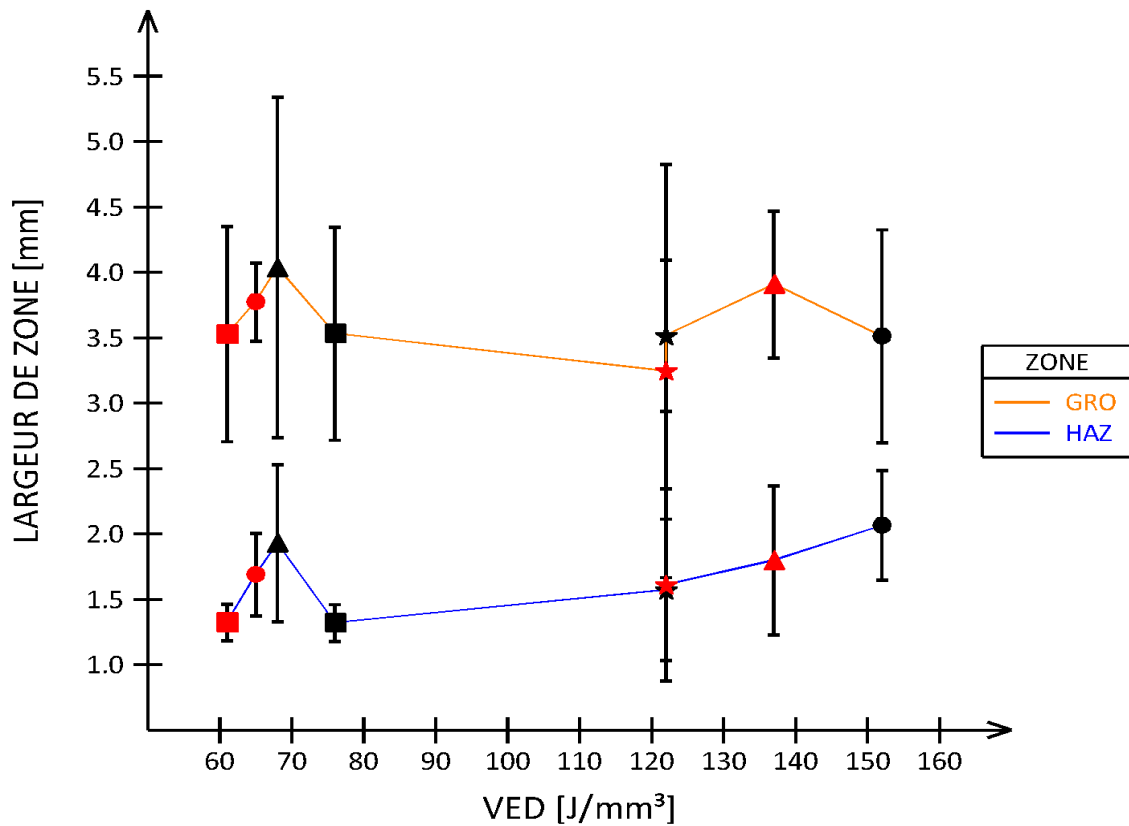


Figure 5-8 : Evolutions des largeurs de zones thermiquement affectées en fonction de la VED : "GRO" pour zone grossière et "HAZ" pour zone affectée thermiquement

Il n'apparaît aucun lien direct entre les largeurs des deux zones, et la densité d'énergie volumique (VED). De plus, les plages d'erreur (représentées par les barres d'erreur) sont très grandes comparées à la différence entre les valeurs moyennes des différents échantillons.

5.3 Essais de traction

Les premiers essais de traction sont menés à l'aide des éprouvettes réalisées dans les batch X200-191021 et X200-191022 (section 4.2).

Au total de ces deux batch, 48 éprouvettes ont été imprimées, qui peuvent être classifiées comme suit : 8 sets de paramètres d'impression différents, avec pour chaque set, 3 éprouvettes imprimées "en forme" et 3 éprouvettes à usiner par EDM dans des plaques imprimées.

Le graphique de la Figure 5-9 montre, à titre d'exemple, la distribution de la répétabilité des résultats pour les 6 éprouvettes de l'un des huit sets (\blacktriangle $h=75\mu\text{m}$, $P=100\%$ et $V=1800\text{mm/s}$).

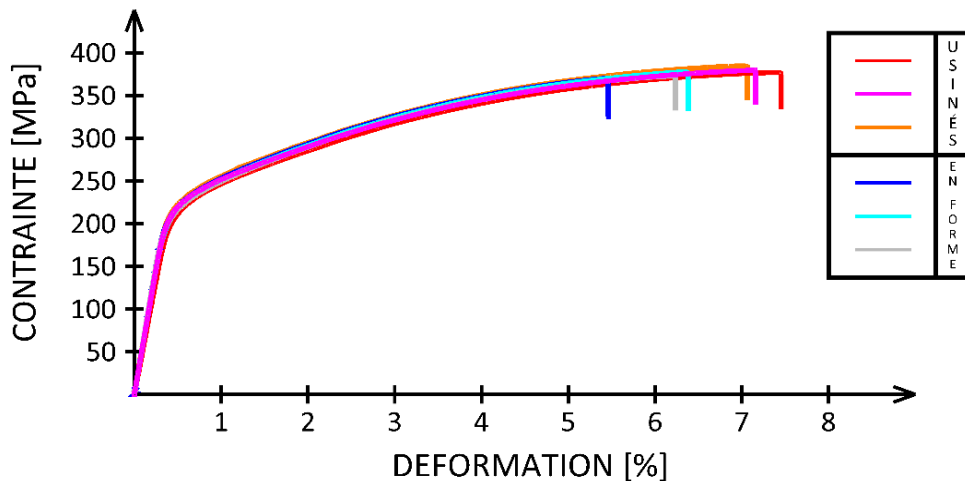


Figure 5-9 : Essais de traction des éprouvettes horizontales. Set de paramètres : \blacktriangle $h=75\mu\text{m}$, $P=100\%$, $V=1800\text{mm/s}$

La partie élastique de la courbe est parfaitement répétée entre les différentes éprouvettes, le comportement ductile est également très semblable, mais la contrainte et surtout l'élongation à la rupture diffère entre les échantillons.

En effet les éprouvettes directement imprimées "en forme" ont tendance à casser plus tôt. On peut donner deux explications (Figure 5-10):

- La surface supérieure est brute de fabrication.
- Dans le bas de l'éprouvette, les supports sont retirés à la pince, puis les résidus de support sont enlevés à la *Dremel*® et la surface est améliorée à la ponceuse à bande.

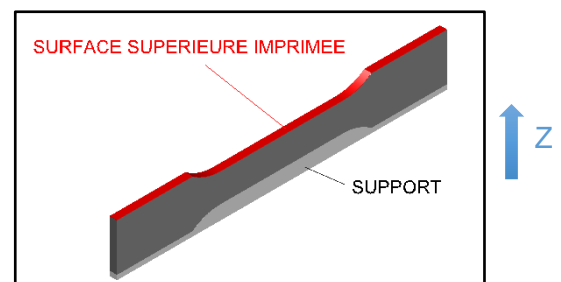


Figure 5-10 : Epruvettes imprimées "en forme"

Dans les deux cas, des défauts de surface peuvent faciliter l'amorce de rupture.

Pour les éprouvettes usinées, il y a une petite variation du point de rupture entre elles, mais beaucoup moins marquée que pour les éprouvettes imprimées.

Pour effectuer la comparaison entre les 8 sets de paramètres, on sélectionne la courbe la plus représentative parmi les 3 courbes des éprouvettes usinées de chacun des sets (les éprouvettes imprimées "en forme" présentant systématiquement de moins bonnes propriétés). Dans le graphe de la Figure 5-9 il s'agit de la courbe magenta.

Les 8 courbes résultantes sont comparées sur le graphique de la Figure 5-11.

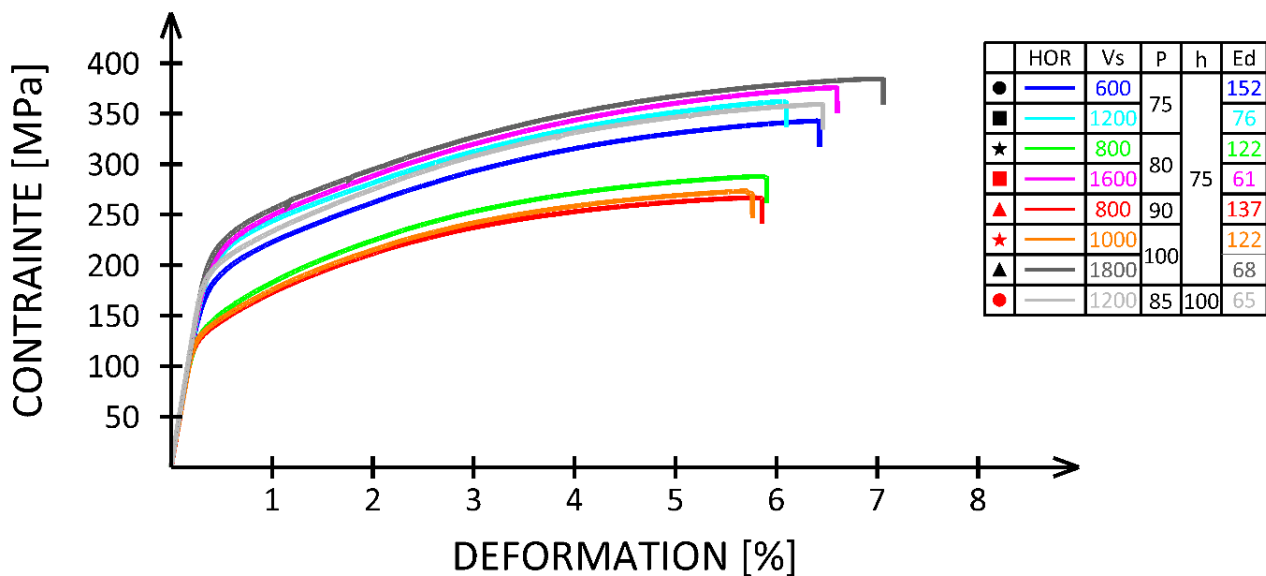


Figure 5-11 : Courbes de traction des éprouvettes horizontales pour les 8 sets différents

De manière générale, le module de la partie élastique est constant pour tous les sets de paramètres. On peut isoler trois courbes (★, ▲, ★) dont la limite d'élasticité et les propriétés ductiles (contrainte et élongation à la rupture) sont faibles; elles sont caractérisées par des paramètres chauds ($VED > 120 \text{ J/mm}^3$).

Inversement les paramètres froids ($VED < 80 \text{ J/mm}^3$) ont de meilleures propriétés tant élastiques que ductiles (■, ■, ▲, ●).

Un seul set de paramètres dénote de cette logique (●), avec les paramètres les plus chauds ($VED = 152 \text{ J/mm}^3$); il présente quand même de bonnes propriétés élastiques et ductiles.

De ces 8 sets de paramètres, 6 sont sélectionnés pour imprimer des éprouvettes verticales et à 45° (batch X200-191205, section 4.2).

En effet les courbes ★, ▲, ★ présentent des propriétés moins intéressantes mais similaires. La courbe ▲ sera donc la seule retenue parmi les trois.

Dans ce qui suit, les résultats des essais de traction sur les éprouvettes verticales et à 45° du batch X200191205 (section 4.2.4) sont ajoutés à ceux des éprouvettes horizontales.

Afin de comparer l'ensemble des essais, le tableau de la Figure 5-12 reprend les valeurs des propriétés mécaniques et la Figure 5-13 (page 54) le visuel des courbes de traction.

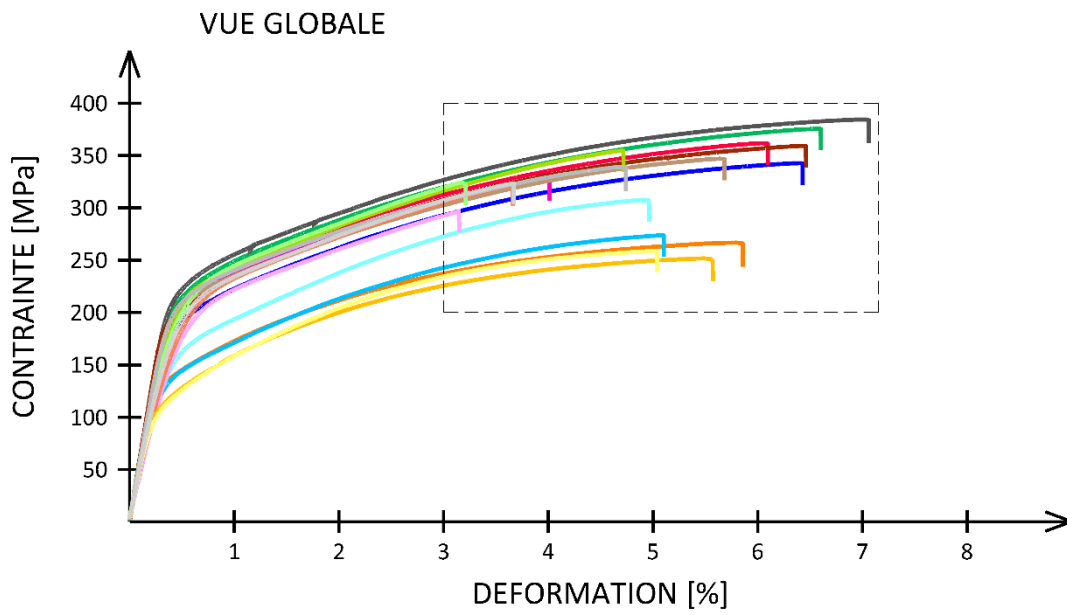
L'élongation plastique (A_m) n'est pas reprise dans ce tableau car elle suit exactement la même tendance que l'élongation totale (A), le module de Young étant très semblable d'une courbe à l'autre.

VED [J/mm ³]	HORIZONTALE			45°			VERTICALE		
	Re 0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Re 0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Re 0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
61 ■	231±8	381±13	6.90±0.61	217±5	336±23	3.73±0.82	220±7	311±11	2.66±0.45
65 ●	207±6	365±5	6.67±0.38	216±5	342±8	4.82±0.62	215±5	336±23	3.73±0.82
68 ▲	226±4	379±3	7.17±0.21	214±2	311±33	3.00±1.31	207±5	297±22	2.81±0.62
76 ■	217±6	366±6	6.40±0.52	213±9	303±32	2.79±1.02	207±12	275±36	2.31±0.87
122 ★	184±16	340±21	7.23±0.60	-	-	-	-	-	-
122 ★	140±18	290±18	6.37±0.81	-	-	-	-	-	-
137 ▲	140±6	269±10	6.03±0.40	123±1	248±3	5.01±0.4	131±15	261±11	4.64±0.29
152 ●	184±14	336±15	6.67±0.64	148±13	275±12	4.81±0.25	158±19	289±16	4.41±0.67

Figure 5-12 : Valeurs moyennes des propriétés mécaniques pour les trois directions d'impression

De manière générale, pour tous les sets de paramètres, les propriétés mécaniques en fonction de l'angle d'impression sont meilleures pour des éprouvettes horizontales, moyennes pour celles à 45° et faibles pour les éprouvettes verticales.

On peut nuancer par le fait que les éprouvettes à 45° ont systématiquement une meilleure contrainte à la rupture (Rm) que les éprouvettes verticales, mais généralement une elongation totale à la rupture (A) inférieure. Les propriétés mécaniques des différents sets de paramètres seront discutées dans la section 6.1.



	HOR	45°	VER	Vs	P	h	Ed
●	—	—	—	600	75	75	152
■	—	—	—	1200	80		76
■	—	—	—	1600	80	75	61
▲	—	—	—	800	90	75	137
▲	—	—	—	1800	100	75	68
●	—	—	—	1200	85	100	65

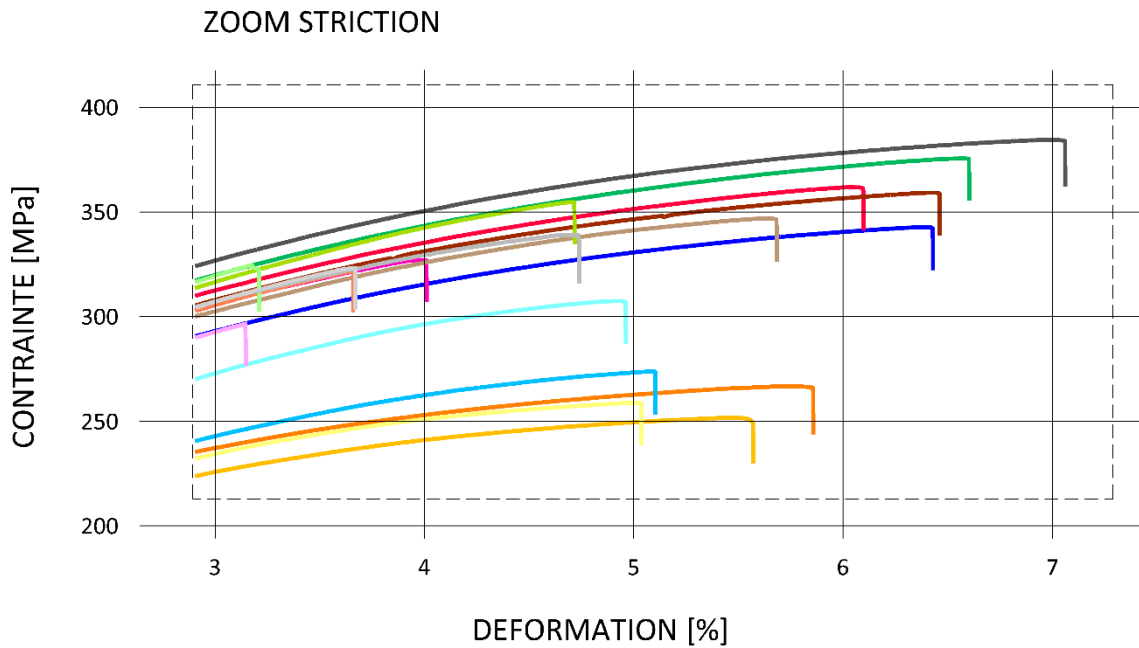


Figure 5-13 : Courbes de traction des 6 sets de paramètres et pour les trois directions

5.4 Optimisation Topologique

Afin d'obtenir le design pour l'impression du taquet, le choix des paramètres de l'optimisation topologique (facteur de pénalisation, fraction volumique, ...) doit être affiné dans le domaine de conception, avec le maillage définis dans la section 4.4.1.

5.4.1 Facteur de pénalisation

Pour l'application de la méthode SIMP (Section 2.2.3), on fixe comme hypothèse de départ une valeur typique de 3 pour le facteur de pénalisation.

Cette valeur sera maintenue car il s'avère que le modèle converge correctement et la fabrication additive permet de gérer les densités moyennes qui apparaissent.

5.4.2 Détermination de la fraction volumique

Plusieurs fractions volumiques de matière ont été comparées (Figure 5-14) :

- Remplissage à 30 % : Le pied est très massif et les ailes quasiment totalement évidées. Sans même réaliser de vérification de résistance statique au chargement, intuitivement les ailes ne pourront pas supporter le nœud.
- Remplissage à 50 % : Le pied est quasiment plein et les ailes commencent à se remplir; on visualise les zones où la matière est nécessaire.
- Remplissage à 70 % : La pièce entière devient très massive et on commence à perdre l'intérêt de l'optimisation topologique.

Dans tous les cas la plaque de fixation est fortement réduite mais, elle pourra être allongée par la suite.

Au vu de la comparaison ci-dessus, le choix se porte sur un remplissage à 50 % du volume de conception.

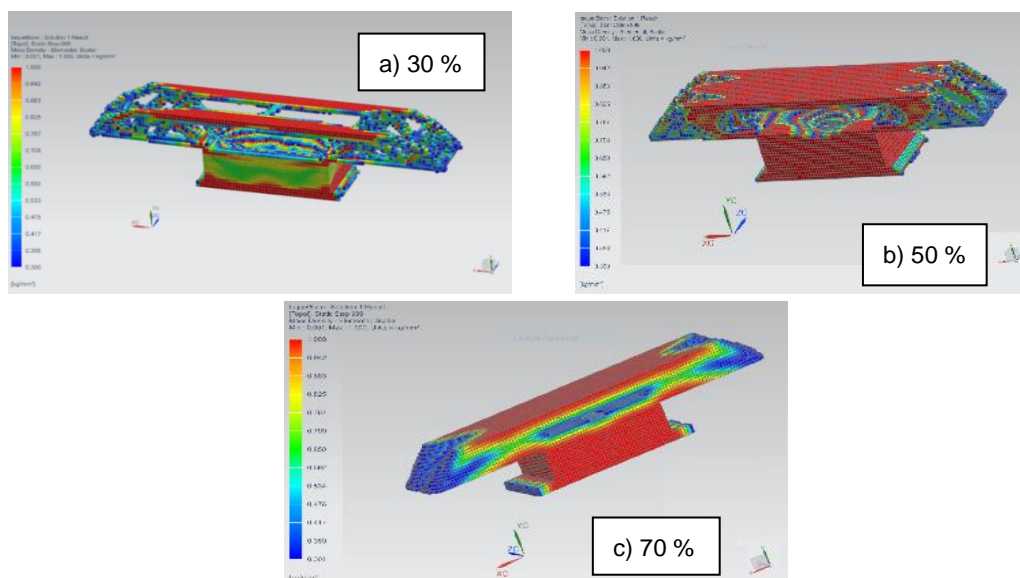


Figure 5-14 : Comparaison des différentes fractions volumiques : a) 30 %, b) 50 %, c) 70 %

5.4.3 Paramètres de l'optimisation topologique retenue

Les paramètres finaux sélectionnés pour l'optimisation topologique sont repris ci-dessous et à la Figure 5-15 :

- Interpolation : SIMP
- Facteur de pénalisation : 3
- Symétrie selon les deux plans verticaux (le programme parle en normales au plan de symétrie)
- Filtre linéaire : sur 2 couches
- Remplissage du domaine de conception : 50 %

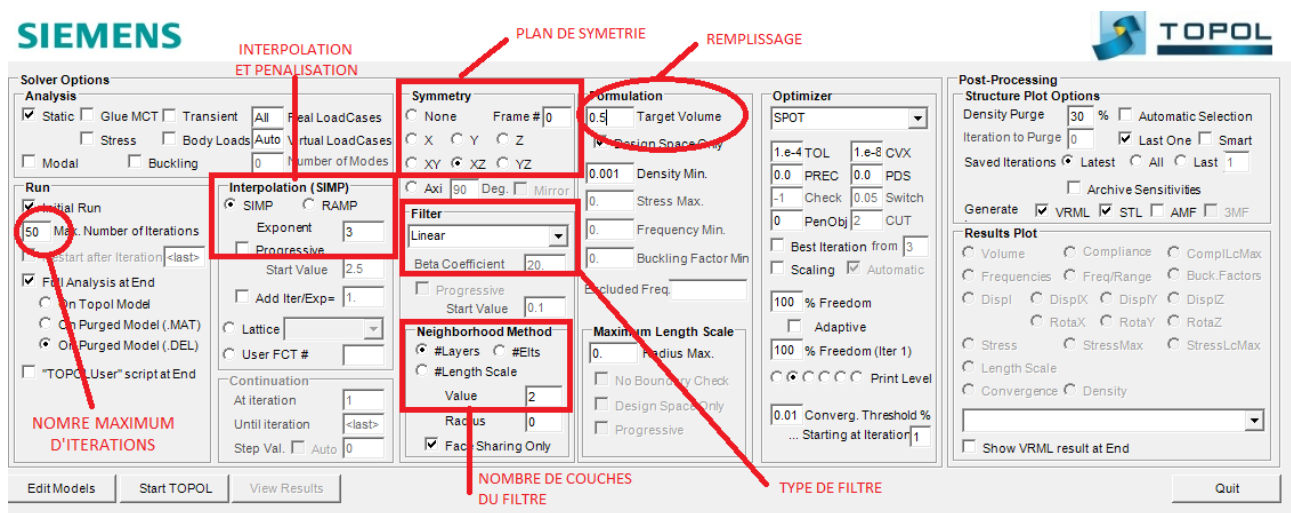


Figure 5-15 : Paramètres TOPOL

5.4.4 Topologie finale

Après une petite centaine d'itérations, le programme converge. Le résultat brut de l'étude topologique est présenté à la Figure 5-16.

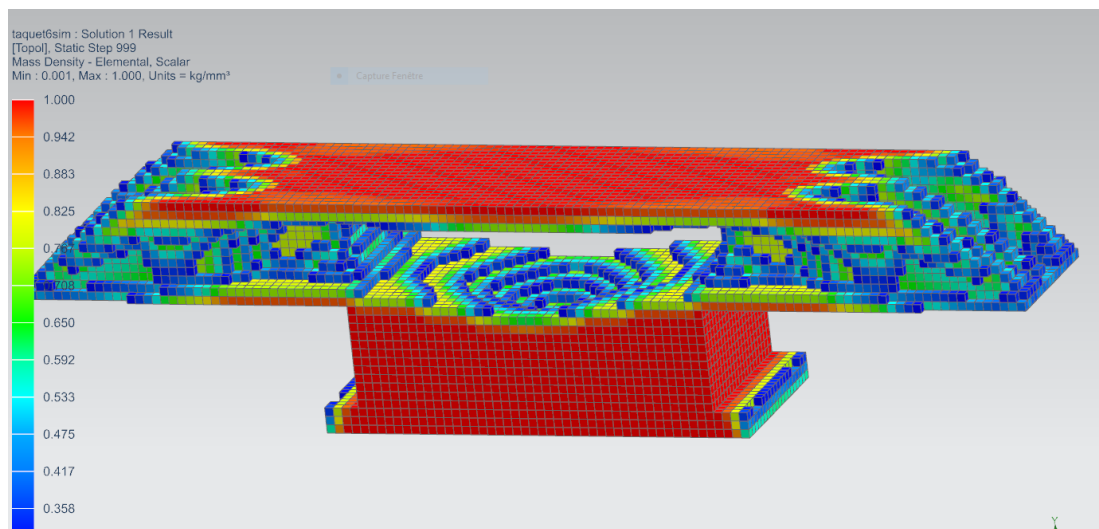


Figure 5-16 : Résultat brut de l'optimisation topologique

Ce résultat très brut et cubique (suivant le maillage) est difficilement interprétable directement, mais le programme propose une étude statique des différents cas de charges, basée sur ce résultat.

A titre d'exemple, la Figure 5-17 représente la contrainte de Von Mises sur la topologie brute pour le pire chargement, le chargement longitudinal en +X (les autres chargements sont disponible dans l'annexe 10).

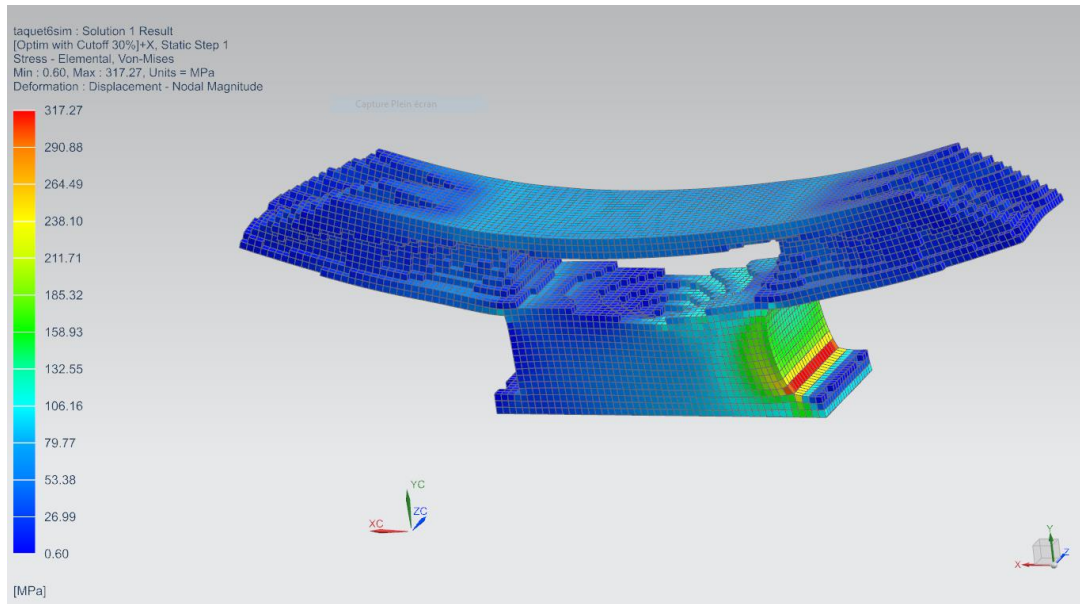


Figure 5-17 : Contrainte de Von Mises sur la topologie brute pour le chargement longitudinal en +X

On observe que la contrainte maximum atteinte est de 317 MPa et est localisée sur une seule rangée du maillage. Cette valeur est tout à fait réaliste pour le matériau sachant que des congés vont être ajoutés et que le maillage est peu raffiné.

A l'aide du programme d'optimisation, le modèle retenu est lissé afin de générer un aperçu plus réaliste du résultat topologique (Figure 5-18).

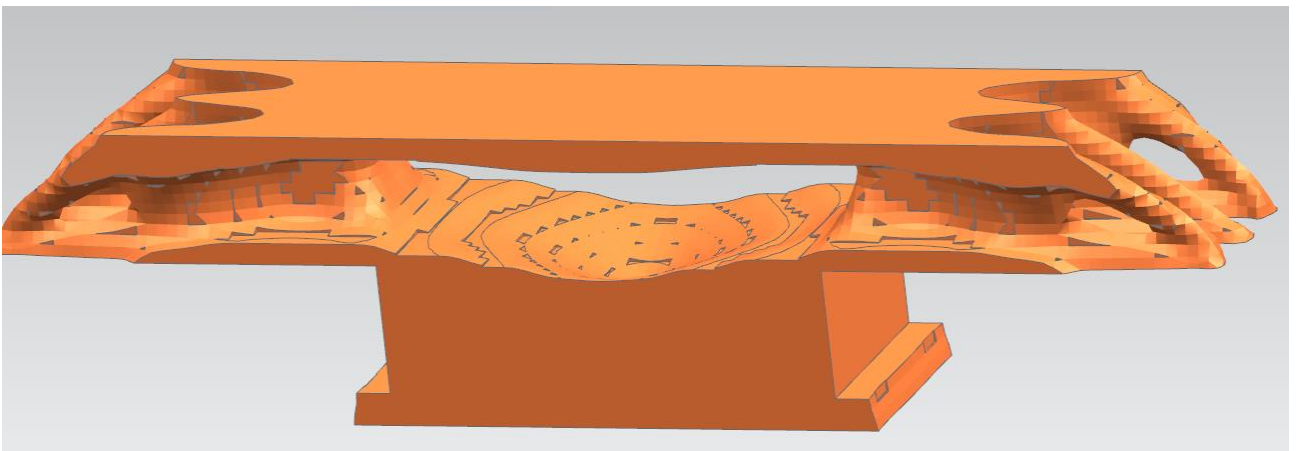


Figure 5-18 : Résultat topologique lissé

Ce rendu lissé sera le point de départ de l'étude CAO du taquet final, présentée dans la discussion (section 6.4).

6 Discussion

Cette discussion a pour but, dans un premier temps, d'étayer la réflexion des résultats obtenus sur les cubes et les éprouvettes de traction, afin de choisir les paramètres (p , v , h) d'impression SLM utilisés pour réaliser la pièce finale.

Pour ce faire, on évaluera les résultats des tests effectués selon plusieurs critères de qualité (densité, porosité, réaction à la traction), afin de dégager les tendances générales de l'influence des paramètres d'impression et de cibler les sets qui y répondent le mieux.

Il va évidemment falloir trancher avec bon sens entre les antagonismes, car aucun set ne pourra être optimal pour chacun de ces critères.

Ensuite la discussion permettra de définir un design définitif pour le taquet, au départ de l'optimisation topologique et des impératifs de fabrication et d'usage.

Finalement on caractérisera (en traction, porosité, qualité, ...) les 4 taquets réalisés avec les 2 sets de paramètres choisis, sur base des réflexions précédentes.

6.1 Influence des paramètres SLM sur la densité relative et la porosité

6.1.1 Influence de la vitesse et de la puissance sur la densité relative

Dans la section 5 "Résultats", les valeurs de densités relatives mesurées sont comprises entre 97.7% et 99.5%. Ces valeurs se situent dans la fourchette haute de la littérature [17], mais elles sont directement liées à la masse volumique de la poudre d'AlSi10Mg communiquée par le fournisseur (qui est ici utilisée comme référence).

Ceci a donc une influence pour la comparaison par rapport à la littérature, mais aucune influence sur la comparaison des résultats au sein de l'étude. Toutes les mesures ont été effectuées selon le même mode opératoire (voir section 4.3.1) et avec les mêmes valeurs de référence.

Vitesse :

Dans la section 5 "Résultats", la densité relative a été présentée en fonction de la VED (pour rappel, $VED = P/vht$) et pour une vitesse donnée (le graphique est repris ci-dessous à la Figure 6-1). On y voit clairement apparaître un minimum et deux maximums de densité relative.

Cependant la VED (pour une épaisseur et une distance inter-cordon données) résulte de la conjonction vitesse/puissance. Afin d'établir une relation directe entre la puissance et la densité relative, pour une vitesse donnée, on peut observer le graphique de la Figure 6-2.

Ces deux graphiques mettent en évidence la tendance en "U" pour la plupart des vitesses et font apparaître, un maximum pour des faibles VED/puissances (paramètres froids), un maximum de densité pour des grands VED/puissances (paramètres chauds) et un minimum pour les valeurs moyennes.

Pour une vitesse de 600 et 800 mm/s (courbes bleue foncée et orange) cette relation est moins mise en évidence, mais on peut imaginer qu'en observant des échantillons plus chauds ou plus froids (en rajoutant des points sur la courbe) on verrait apparaître cette courbe.

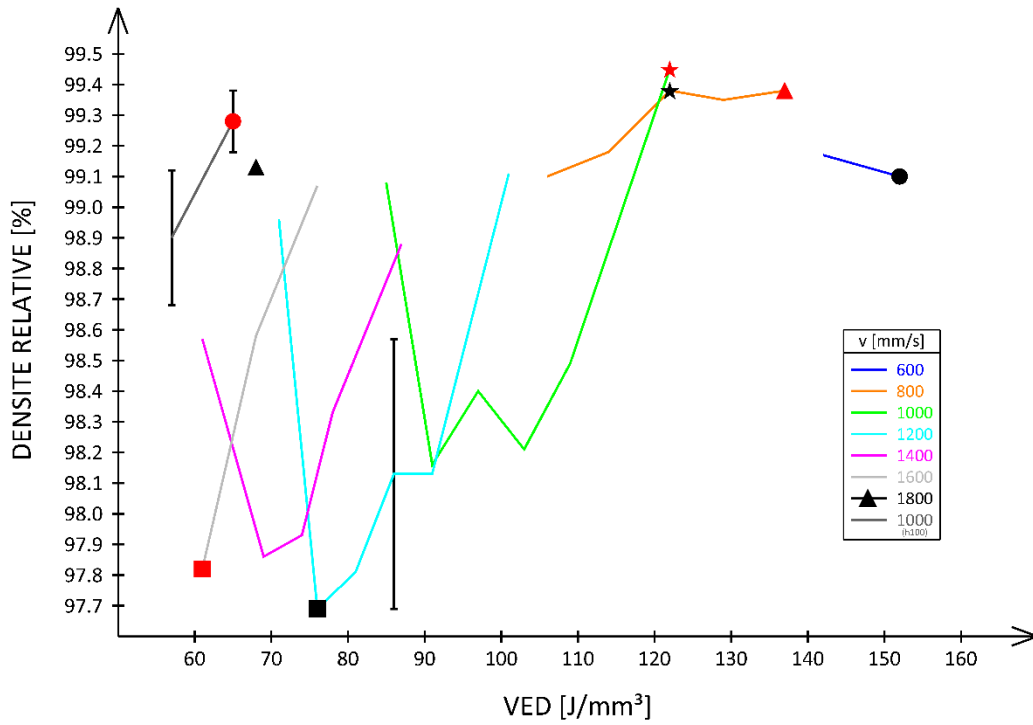


Figure 6-1 : Evolution de la densité relative en fonction de la VED pour une vitesse donnée

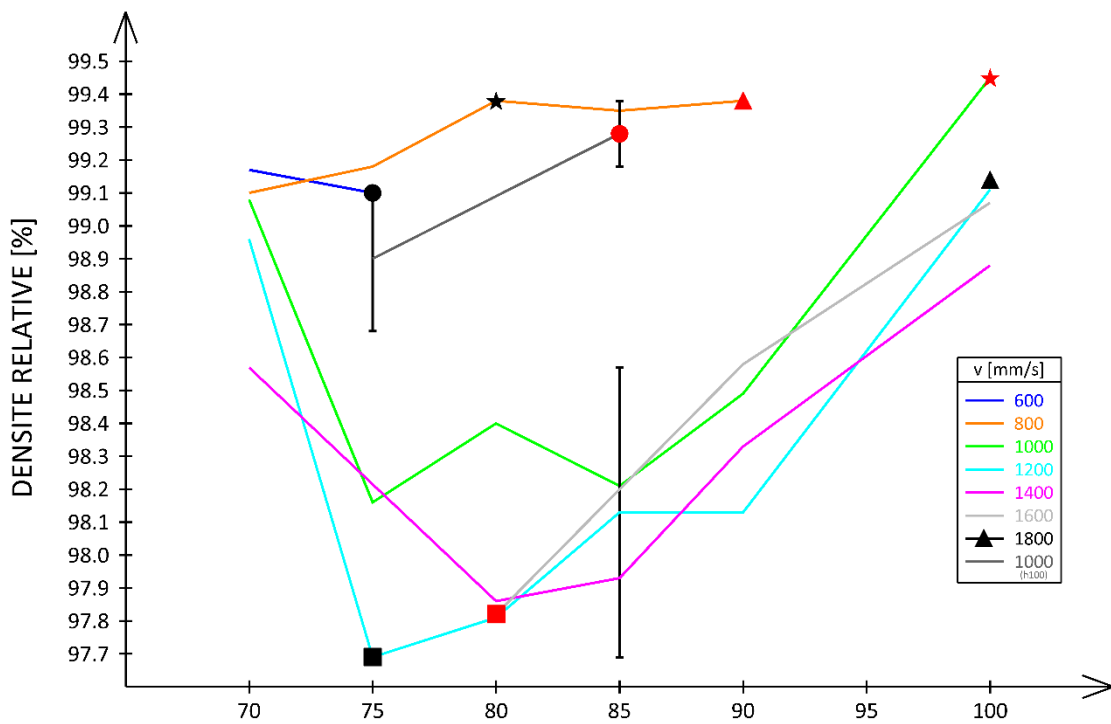


Figure 6-2 : Evolution de la densité relative en fonction de la puissance pour une vitesse donnée

Puissance :

Selon le même principe, on peut également montrer les liens qui lient les paramètres pour une puissance donnée, soit en fonction de la VED (Figure 6-3) soit en fonction de la vitesse (Figure 6-4).

Sur les deux graphiques la tendance en "U" est moins marquée; même si un minimum apparaît pour des puissances moyennes, un maximum beaucoup plus marqué apparaît pour les sets de paramètres chauds (VED élevée et vitesse basse). La courbe pour une puissance de 70% (en bleu foncé) dénote en revanche, car elle ne présente pas vraiment de minimum pour des paramètres intermédiaires. On peut imaginer qu'en imprimant à cette puissance avec des vitesses plus rapides (plus froid) ce minimum apparaîtrait.

Paramètres optimaux :

Au vu des liens entre la densité relative et les paramètres d'impression établis ci-dessus, il n'y a pas de tendance évidente pour la sélection des paramètres optimaux. On peut tout de même, pour les trois cas étudiés, mettre en évidence quelques points et comparer avec la littérature :

- **Vitesse fixée** : il y a deux plages de puissance qui optimisent la densité pour une vitesse donnée : autour de 70% et autour de 100% de la puissance maximale, correspondant respectivement à 190 W et 270 W. Cette observation est contre-intuitive et en contradiction avec la définition de la fenêtre d'impression de la Figure 2-8 (section 2.1.5).
- **Puissance fixée** : les vitesses qui maximisent la densité sont assez dispersées mais se situent entre 600 et 1000 mm/s. On obtient bien une fourchette avec la fenêtre d'impression de la Figure 2-8 comme attendue et obtenue par Pei et al. [11] (section 2.1.5). La fourchette de vitesse qui maximise leurs densités relatives est plus étroite (800 à 1000 mm/s) mais proche de celle de cette étude.
- **VED (ou TED) fixée** : il est plus difficile de donner une plage de valeurs optimales. Elles dépendent grandement des paramètres choisis et présentent en plus deux maximums. On aurait tendance, au vu des graphiques, à éliminer les valeurs moyennes d'une VED entre 70 J/mm³ et 100 J/mm³ et d'une TED entre 160 J/m et 240 J/m. Cette observation n'est pas relayée dans la littérature, mais on retrouve généralement une fourchette de VED pour la fenêtre d'utilisation.

Pei et al. [11] situent leurs paramètres optimaux pour une VED comprise entre 75 et 94 J/mm³, qui est ici dans la "fourchette de mauvaise densité". Même si la VED est censée prendre en compte tous les paramètres, le fait que leur épaisseur de couche et leur distance inter-cordons soient différentes a également un impact.

Les valeurs optimales des paramètres de Zhao et al. [9] donnent une VED de 52 J/mm³ qui peut, elle, correspondre aux maximums froids de cette étude.

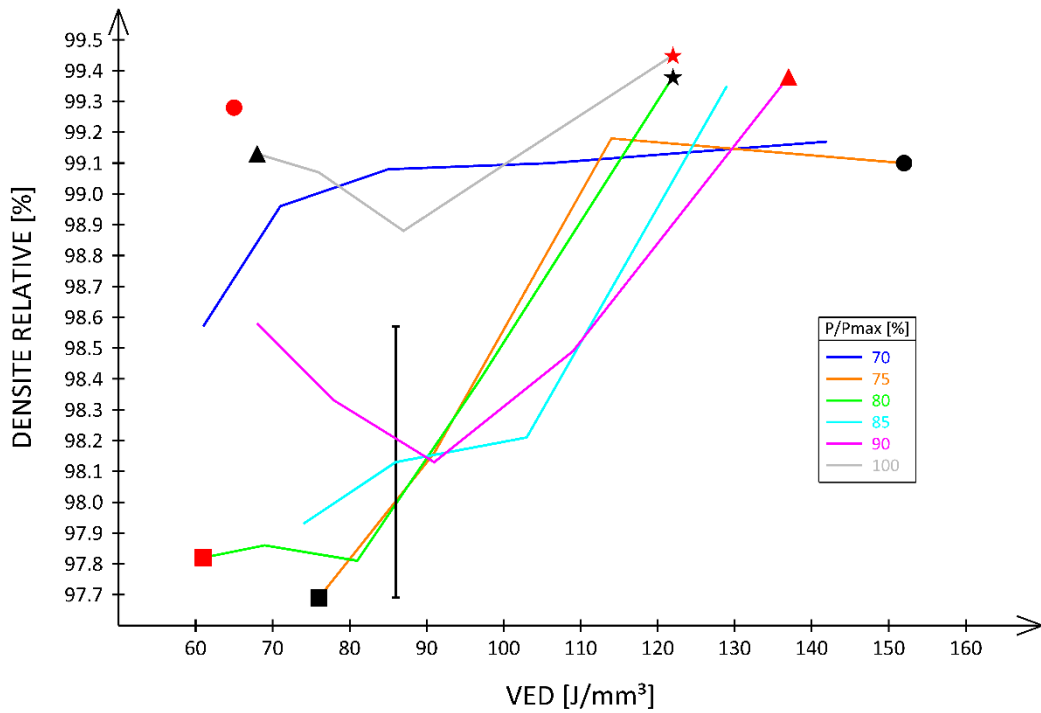


Figure 6-3 : Evolution de la densité relative en fonction de la VED pour une puissance donnée

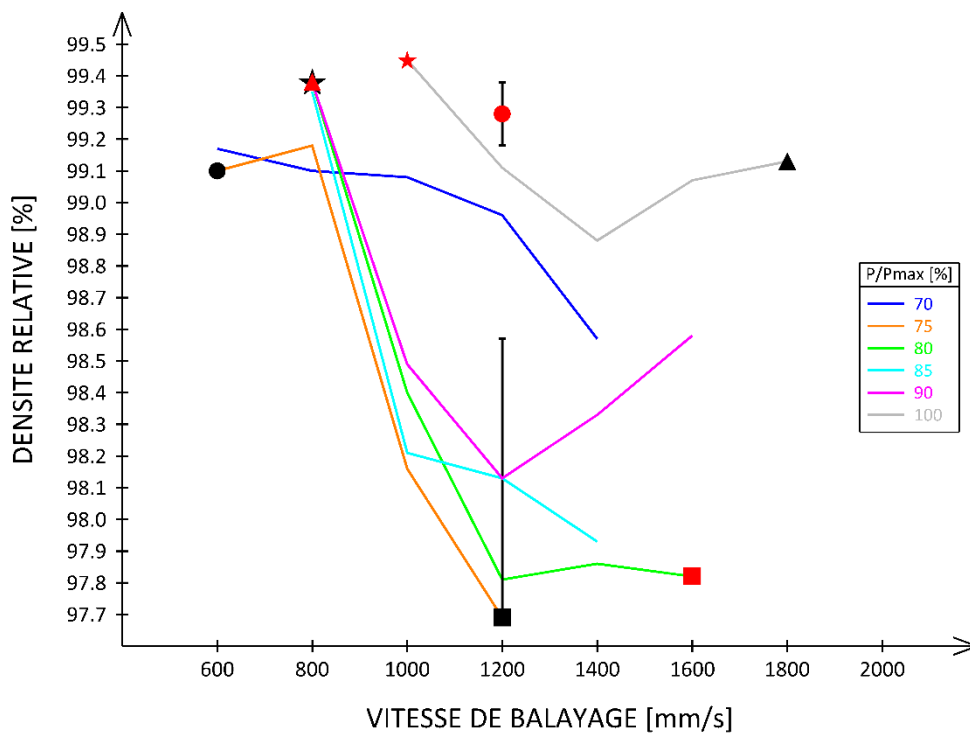


Figure 6-4 : Evolution de la densité relative en fonction de la vitesse de balayage pour une puissance donnée

6.1.2 Influence de la distance inter-cordons sur la densité relative

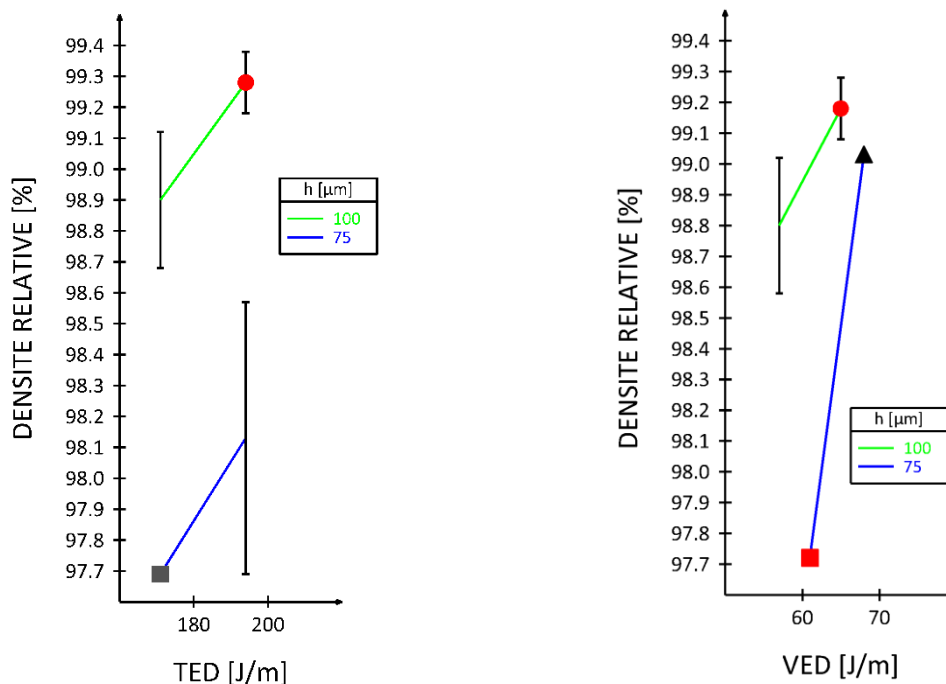
On peut maintenant s'intéresser aux distances inter-cordons (h) en comparant deux valeurs de $75\ \mu\text{m}$ et $100\ \mu\text{m}$ (Figure 6-5).

Pour une TED donnée (a), tous les autres paramètres étant identiques, les échantillons qui présentent une distance inter-cordons plus grande sont plus denses.

La VED dépend de la distance inter-cordons. Pour comparer deux échantillons de même VED en faisant varier la distance inter-cordons, il faut donc également modifier la vitesse et/ou la puissance. On obtient ainsi que, pour une VED donnée (b), une distance inter-cordons plus grande augmente également la densité, mais de façon beaucoup moins marquée lorsque la VED augmente.

Comme le suggèrent Ataee et al. [19], la distance inter-cordons de $75\ \mu\text{m}$ induit dans ce cas une configuration trop chaude et crée une accumulation de chaleur et des porosités qui détériorent la densité relative.

Un des sets de paramètres avec une distance inter-cordons de $100\ \mu\text{m}$ (●) est donc conservé pour la suite des comparaisons.



(a) Comparaison des distances inter-cordons (h) pour une TED donnée

(b) Comparaison des distances inter-cordons (h) pour une VED donnée

Figure 6-5 : Comparaison des distances inter-cordons

6.1.3 Influence des paramètres sur les porosités

Quatre échantillons de différentes VED subissent une attaque au réactif de Keller, puis sont observés au microscope optique. Ceci permet de localiser les porosités par rapport aux bains de fusion et de déterminer l'origine et l'influence des porosités.

Sur une même image, les différences de couleurs correspondent à différentes échelles de microstructure :

- Les zones plus fines (par exemple les frontières des bains) sont plus claires
- Les zones plus grossières sont plus foncées
- Les zones noires sont les porosités (ou défauts).

Après analyse, les images seront comparées avec la littérature.

▲ : VED = 68 J/mm³ (h=75 μm, P=100 %, v=1800 mm/s) (Figure 6-6)

- Paramètres relativement froids
- Densité relative assez bonne (99.13 %)
- Microstructure peu régulière

On observe quelques porosités sphériques ($\pm 10 \mu\text{m}$ de diamètre) mais surtout de gros défauts de la taille de plusieurs bains de fusion ($\pm 300 \mu\text{m}$ de long) qui influencent la microstructure et sont certainement dus à de la sous-fusion.



Figure 6-6 : Bains de fusion et porosités, image optique de l'échantillon (▲) attaqué au réactif de Keller

■ : VED = 76 J/mm³ (h=75 μm, P=75 %, v=1200 mm/s) (Figure 6-7)

- Paramètres assez froids
- Densité relative la plus basse (97,69 %)
- Microstructure très irrégulière et fortement influencée par les défauts

A l'exception de quelques porosités sphériques (toujours de l'ordre de $10 \mu\text{m}$) on observe de gros défauts de la taille de plusieurs bains de fusion (qui sont proches de $400 \mu\text{m}$ de large) qui influencent énormément la microstructure et laissent penser à de la sous-fusion.



Figure 6-7 : Bains de fusion et porosités, image optique de l'échantillon (■) attaqué au réactif de Keller

▲ : VED = 137 J/mm³ (h=75 μm, P=90 %, v=800 mm/s) (Figure 6-8)

- Paramètres relativement chauds
- Densité relative très bonne (99.38 %)
- Microstructure assez régulière

On observe de petites porosités sphériques disposées aléatoirement et une seule porosité de taille plus importante qui fait penser à une bulle d'hydrogène.



Figure 6-8 : Bains de fusion et porosités, image optique de l'échantillon (▲) attaqué au réactif de Keller

● : VED = 152 J/mm³ (h=75 μm, P=75 %, v=600 mm/s) (Figure 6-9)

- Paramètres les plus chauds
- Densité relative assez bonne (99.10 %)
- Microstructure assez régulière

On observe un plus grand nombre de porosités sphériques, du même type que dans les échantillons précédents ($\pm 10 \mu\text{m}$) disposées de manière aléatoire. Des porosités plus grandes (de l'ordre de $30 \mu\text{m}$) sont systématiquement présentes dans le bas des bains de fusion. Elles sont donc certainement dues à un excès de puissance mais ne peuvent pas être qualifiées de "key-hole" à proprement parlé, car elles ne déforment pas les bains de fusion. Les rares gros défauts (de l'ordre de $300 \mu\text{m}$ de large) sont donc certainement dus à des imperfections de la poudre ou à la présence d'oxydes ou d'hydrogène.



Figure 6-9 : Bains de fusion et porosités, image optique de l'échantillon (●) attaqué au réactif de Keller

Tant ci-dessus que dans la section 5 "Résultats" on observe la présence de porosités sphériques plus petites que $20 \mu\text{m}$ pour tous les sets de paramètres, ce qui est en accord complet avec la littérature (section 2.1.5).

De plus, il apparaît des défauts aléatoires qui varient en nombre et morphologie en fonction des paramètres. Et comme Xiong et al. [20] le montrent, les petites porosités sphériques se trouvent sur les frontières des bains de fusion.

6.1.4 Lien entre porosités et densité relative

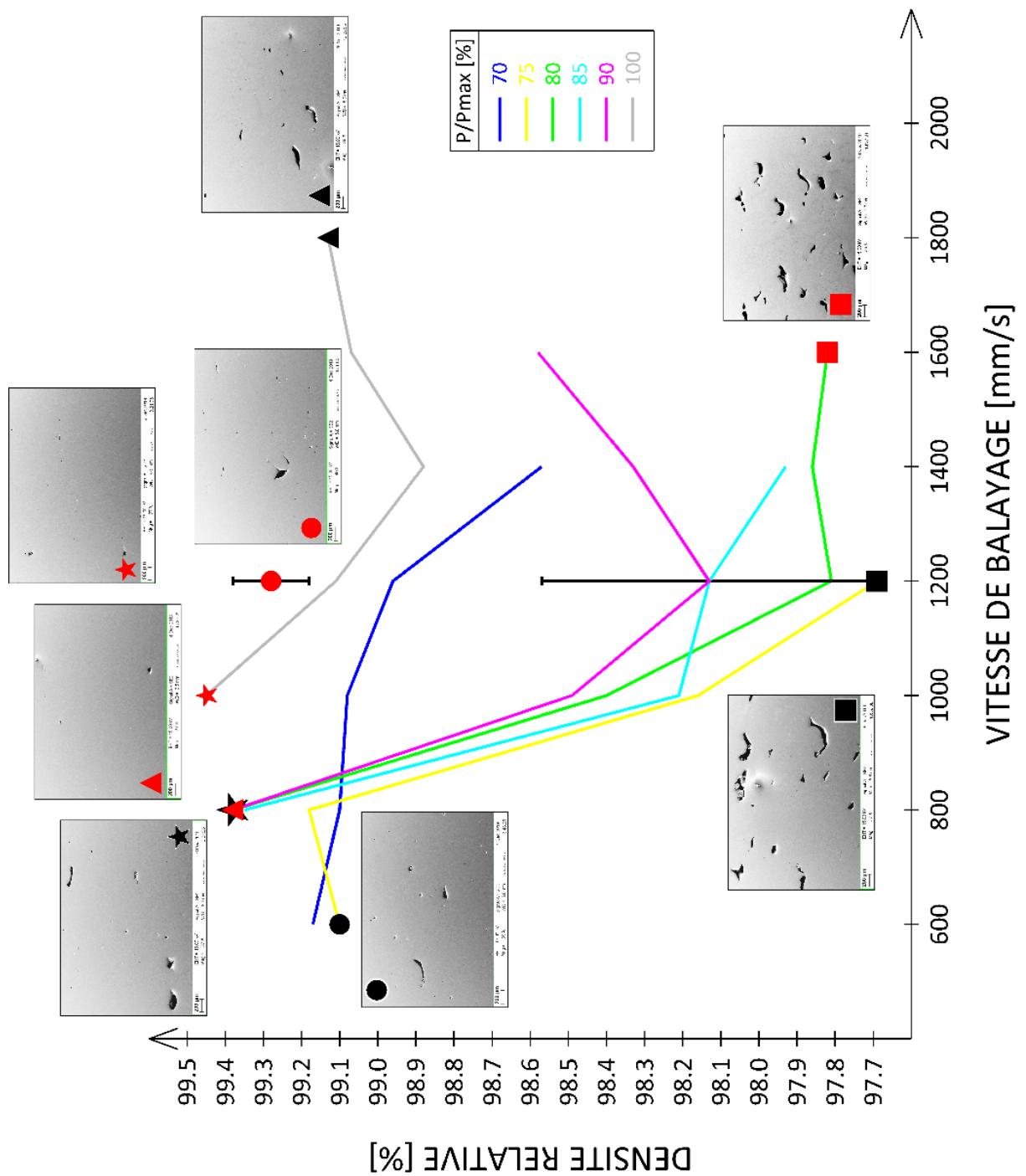


Figure 6-10 : Evolution de la densité relative en fonction de la vitesse de balayage et influence sur la porosité, inspiré de [11]

Le graphe de la Figure 6-10 représente le lien entre la densité et la vitesse de balayage. Il est inspiré de celui de Pei et al. [11] présenté dans la section 2.1.5 et repris ci-dessous (Figure 6-11).

Des images représentatives de la porosité de chacun des 8 sets retenus sont reliées aux points caractéristiques des courbes.

De manière plus marquée qu'en observant simplement les valeurs de densité relative (6.1.1), les échantillons qui présentent le minimum de porosités (et donc le maximum de densité relative) se situent dans une fourchette moyenne de vitesse de 800 à 1000 mm/s pour une puissance donnée.

Pour une densité donnée, plus la vitesse augmente, plus les porosités ont tendance à grandir et à s'allonger.

Comparaison des 2 graphes des Figure 6-10 et Figure 6-11

On note au préalable plusieurs différences dans les paramètres d'impression :

	Pei et al. [11]	Cette Etude
Epaisseur de couche	40 μm	50 μm
Distance inter-cordons	50 μm	75 et 100 μm
Puissance	150-180 W	190 W (70%) – 270 W (100%)

Mais toutes ces différences n'empêchent pas la comparaison des deux graphes :

- Comme noté précédemment (section 6.1.1) les 2 courbes ont une allure très différente, due de toute évidence à la différence des paramètres exposée ci-dessus.
- Une vitesse trop rapide fait apparaître de gros défauts de sous-fusion sur les deux graphiques
- Une vitesse trop lente fait également apparaître de nouveaux défauts, dus probablement à l'accumulation de chaleur dans ce cas-ci.
- Les échantillons qui présentent le moins de porosité se situent dans la même fourchette de vitesses (800-1000 mm/s).

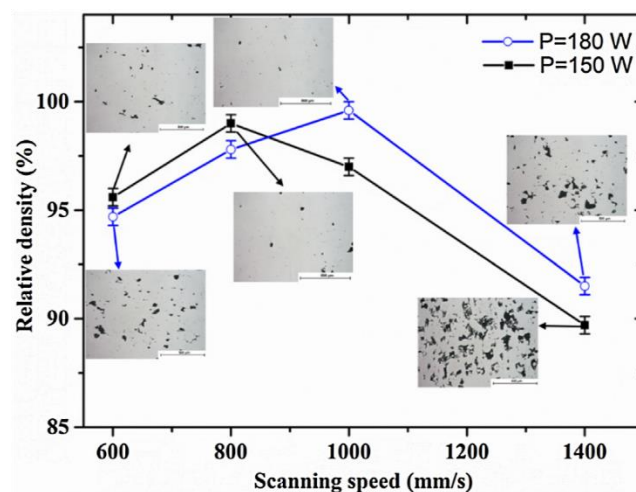


Figure 6-11 : Reproduction de la Figure 2-9 : Evolution de la densité en fonction des paramètres d'impression [11]

Si on se base sur l'avancement actuel de la discussion et plus précisément sur le graphique de la Figure 6-10, on est tenté de sélectionner comme paramètres optimaux les sets ▲ et ★.

Cependant, on remarquera dans ce qui suit que les tests en traction sont en contradiction avec ce premier choix.

6.2 Analyse des essais de traction

6.2.1 Mesure de la section effective

Afin de comparer les résultats de traction de cette étude avec ceux de la littérature, il faut utiliser les mêmes standards.

Une mesure de la section de l'éprouvette à l'aide d'un pied à coulisse est ici peu pertinente. En effet, ce type de mesure tient compte de la dimension hors-tout (toutes rugosités comprises) et ne permet donc pas d'obtenir une image de la section réelle de chargement, celle qui subit effectivement les contraintes lors des essais de traction.

Une mesure au comparateur optique permet de mesurer l'épaisseur effective.

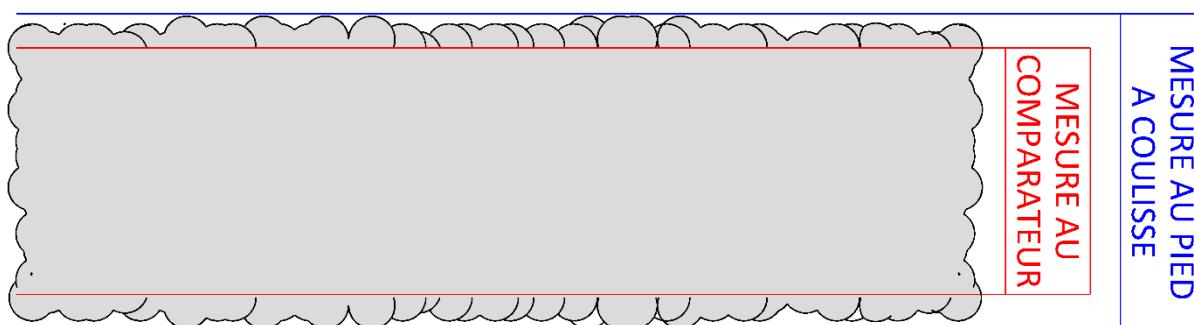


Figure 6-12 Epaisseur d'éprouvette au pied à coulisse vs au comparateur

Après la mesure de quelques échantillons au comparateur optique, il ressort que la différence de largeur entre la mesure au comparateur et celle au pied à coulisse est négligeable tant pour les éprouvettes découpées par EDM (ce qui semble logique) que celles imprimées "en forme".

En revanche l'épaisseur mesurée au comparateur est en moyenne 10% inférieure à celle mesurée au pied à coulisse; en effet dans cette direction, la proportion relative des rugosités est sensiblement plus importante (Figure 6-12).

Ceci conduit à une surface de traction 10% plus petite et des mesures de contrainte 10% plus élevées. Cette différence n'a que peu d'influence sur les comparaisons au sein de cette étude mais est très importante pour la comparaison avec la littérature.

6.2.2 Explication du module de Young

Le module d'élasticité influence la valeur de la limite d'élasticité ($Re_{0.2}$) et de l'élongation plastique (A_m), tous deux dépendants de sa pente.

Le module d'élasticité mesuré sur les courbes de traction réalisées avec des extensomètres n'est pas fiable. Pour le déterminer avec précision, il faudrait utiliser des jauges de traction de surface.

Une autre solution consiste à utiliser le module de Young du matériau (69 GPa) pour effectuer la mesure.

Après comparaison des valeurs de la limite d'élasticité sur les différentes éprouvettes horizontales de traction (valeurs dans l'annexe 10), il s'avère que le choix du module de Young retenu n'a pas d'influence sur la comparaison des différentes éprouvettes.

6.2.3 Comparaison avec la littérature

Avant de comparer les différents points de rupture, il faut noter que dans la littérature beaucoup d'éprouvettes sont cylindriques et non plates, ce qui peut influencer le résultat.

De plus, même si les données sélectionnées dans les articles sont celles qui correspondent à des éprouvettes sorties de fabrication (équivalentes à celles de cette étude), beaucoup d'éprouvettes sont polies ou imprimées dans une atmosphère chauffée, ce qui peut améliorer significativement leurs propriétés mécaniques.

La Figure 6-13 reprend le meilleur point de rupture pour chacune des orientations, avec les épaisseurs ramenées à une surface réelle ainsi que quelques valeurs de la littérature issues de la section 2.1.6.

Les numéros sur le graphe correspondent à la référence de la source dans la bibliographie.

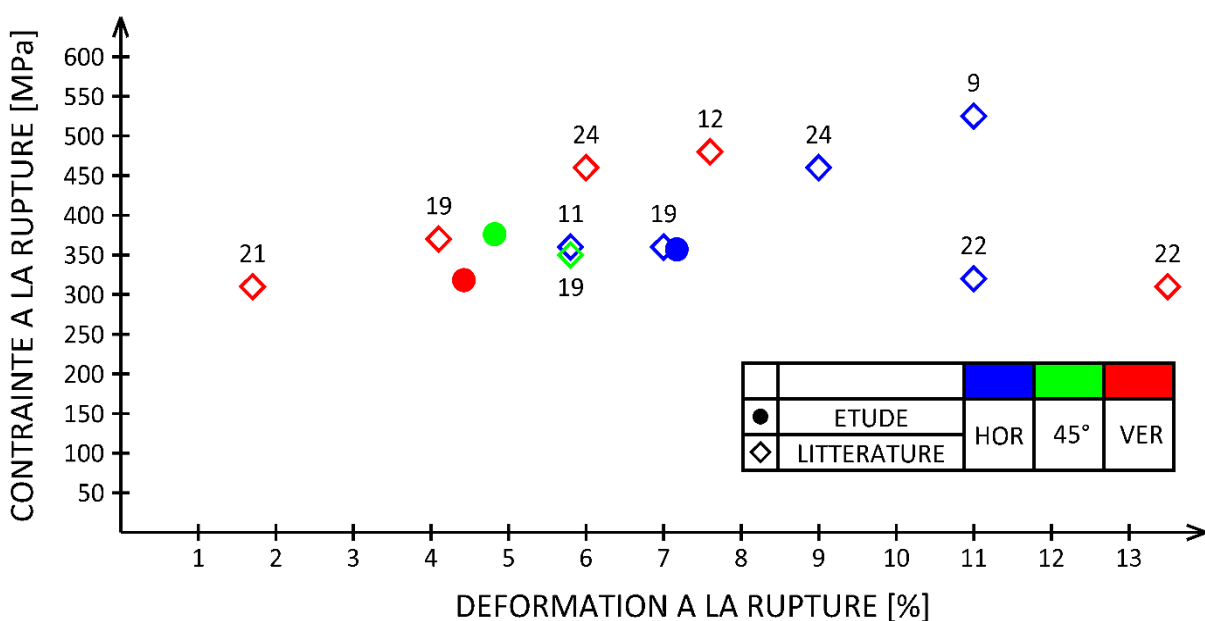


Figure 6-13 : Points de rupture de la littérature et de cette étude

Pour la traction sur des éprouvettes horizontales, on obtient une élongation dans la moyenne des valeurs disponibles et une contrainte à la rupture dans la fourchette basse.

Pour l'éprouvettes à 45°, l'élongation est proche et même légèrement meilleure que la seule comparaison disponible; en revanche pour l'éprouvette verticale, tant la contrainte que la déformation à la rupture sont situées dans le bas de la fourchette de la littérature.

Sachant que les éprouvettes de cette étude sont plates, non polies et fabriquées sans atmosphère ou plateau chauffé, les résultats sont corrects. En effet, chacun de ces paramètres, ici défavorables, influence les propriétés mécaniques.

6.2.4 Entrée en striction

Au vu des écarts type parfois assez importants et surtout des grandes différences entre les éprouvettes horizontales imprimées "en forme" et celles découpées, il est intéressant de vérifier si la rupture survient après l'entrée en striction ou si elle a lieu prématurément, due à des défauts.

Si la striction est atteinte on peut affirmer avoir atteint le point de rupture intrinsèque du matériau et avoir consommé toute la plasticité de celui-ci.

Pour cela il faut vérifier si le critère de Considère est atteint, c'est-à-dire si :

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$$

Sur les graphiques qui suivent, la dérivée de la contrainte en fonction de la déformation est obtenue en moyennant sur 10 points de la courbe de traction (chaque point rouge représente 10 points de la courbe de traction) et la ligne verte illustre le critère de Considère (pente de 1).

Pour la première comparaison, on étudie trois éprouvettes imprimées horizontalement avec le même set de paramètres (●, h = 75 μm, P = 75 % et v = 600 mm/s). On choisit deux éprouvettes usinées qui présentent, en termes de propriétés mécaniques, des caractéristiques extrêmes (la meilleure et la pire), ainsi que l'éprouvette imprimée "en forme" la plus défavorable.

La meilleure éprouvette usinée (Figure 6-14) dépasse franchement le critère de Considère; l'éprouvette est donc bien entrée en striction. La contrainte correspondante au point d'intersection de la "courbe" (ensemble des points rouges) et de la droite de Considère (en vert) vaut 320 MPa et correspond à la résistance maximale du matériaux pour ces paramètres d'impression et cette direction (et pour cette géométrie d'impression).

La pire éprouvette usinée (Figure 6-15) casse précisément au moment d'entrer en striction. Sa contrainte de rupture correspond donc à la résistance du matériau et vaut 350 MPa. Cette valeur, très différente entre les deux éprouvettes, est due à la zone élastique. En effet leurs zones plastiques sont très semblables mais leur limite d'élasticité a un écart de 30 MPa (entre 170 et 200 MPa). Ceci peut être dû à un problème de mesure (glissement dans les mors, extensomètres, ...) ou à des petites différences dans la microstructure.

L'éprouvette imprimée "en forme" (Figure 6-16) casse bien avant le critère de Considère et, comme soupçonné dans la section 5.3 des Résultats, les éprouvettes imprimées "en forme" cassent à cause de défauts de surface et non aux limites intrinsèques de matériau (ou de sa mise en œuvre dans ce cas-ci).

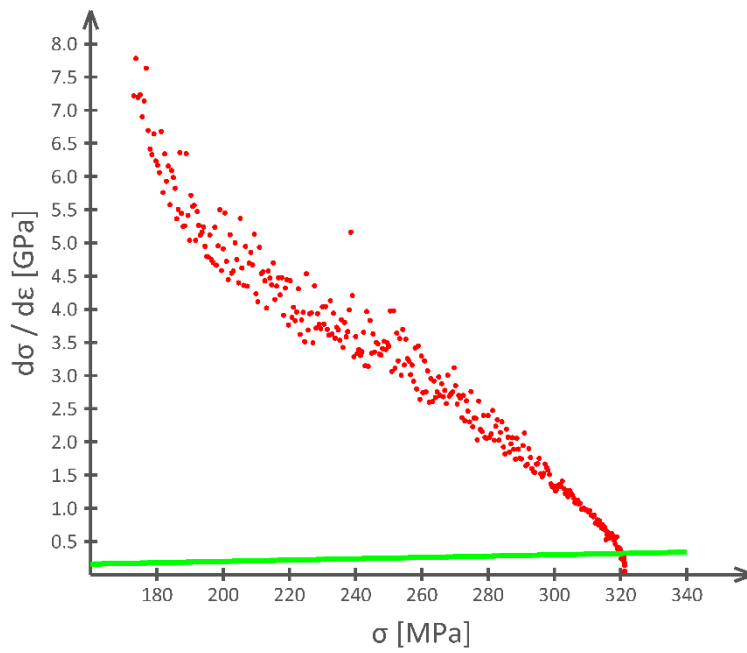


Figure 6-14 : Meilleure éprouvette usinée imprimée horizontalement avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 75 \%$ et $v = 600 \text{ mm/s}$ ●

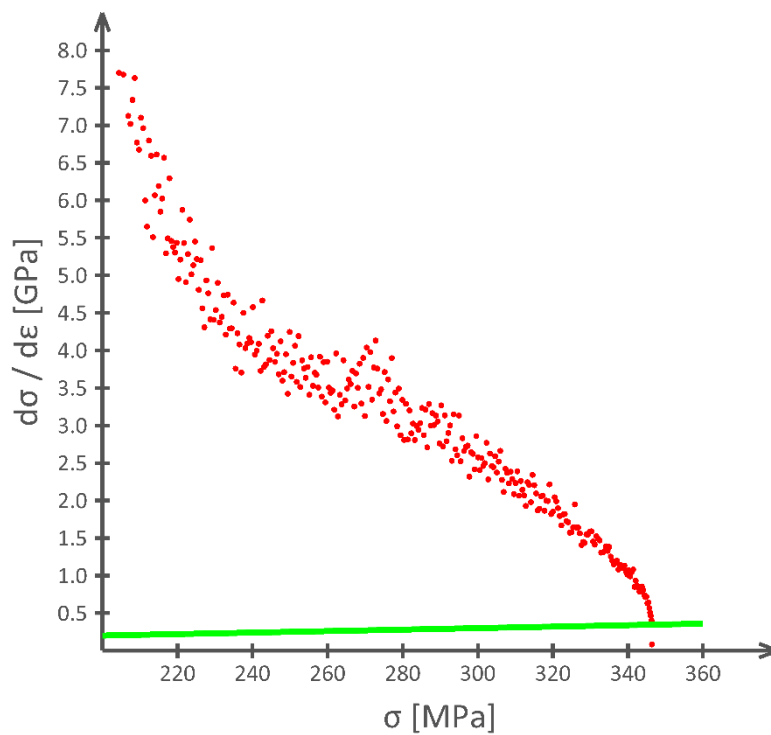


Figure 6-15 : Pire éprouvette usinée imprimée horizontalement avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 75 \%$ et $v = 600 \text{ mm/s}$ ●

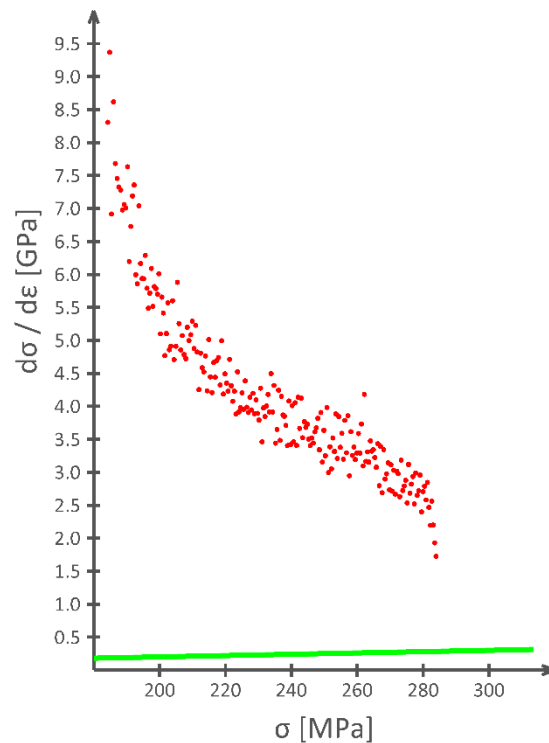


Figure 6-16 : Pire éprouvette imprimée horizontalement "en forme" avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 75 \%$ et $v = 600 \text{ mm/s}$ ●

Ensuite, on peut comparer trois éprouvettes imprimées avec le même set de paramètres (▲, $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$ et $v = 1800 \text{ mm/s}$), une de chaque orientation et présentant de grandes différences de propriétés mécaniques en fonction de l'orientation d'impression (horizontale, à 45° et verticale).

L'éprouvette horizontale (Figure 6-17) dépasse franchement le critère de Considère; l'éprouvette est donc bien rentrée en striction. La contrainte au point d'intersection de la "courbe" (ensemble des points rouges) et de la droite de Considère (en vert) vaut 375 MPa et correspond à la résistance maximale du matériaux pour ces paramètres d'impression et cette direction (et pour cette géométrie d'impression).

L'éprouvette à 45° (Figure 6-18) semble casser avant le critère de Considère (les derniers points sont tellement espacés et peu nombreux qu'ils doivent être mesurés pendant la ruine). Ce sera donc fort probablement l'orientation des porosités et des bains de fusion qui rendrait ces éprouvettes plus fragiles et donc pas la matière intrinsèque.

L'éprouvette verticale (Figure 6-19) casse largement avant le critère de Considère et ne fait que renforcer les premières conclusions obtenues pour les éprouvettes à 45° .

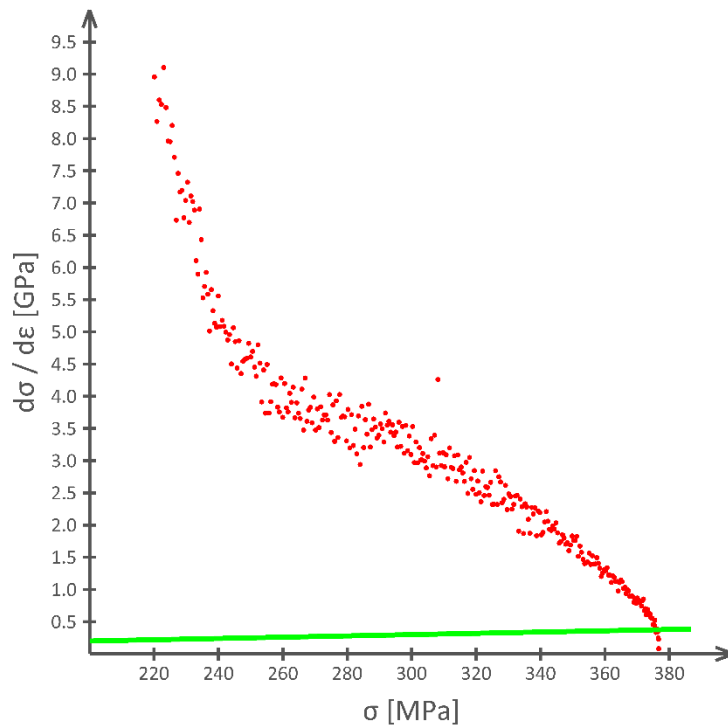


Figure 6-17 : Eprouvette imprimée horizontalement avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$ et $v = 1800 \text{ mm/s}$ ▲

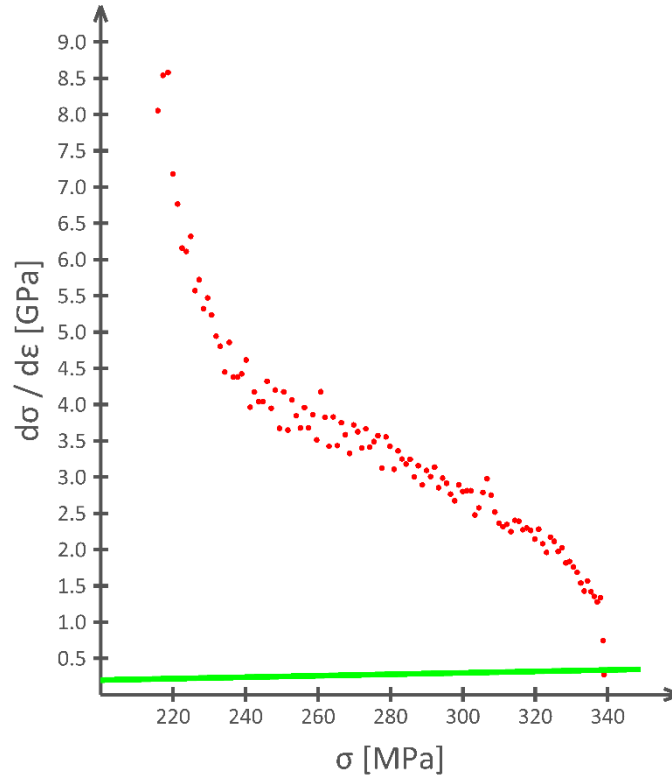


Figure 6-18: Eprouvette imprimée à 45° avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$ et $v = 1800 \text{ mm/s}$ ▲

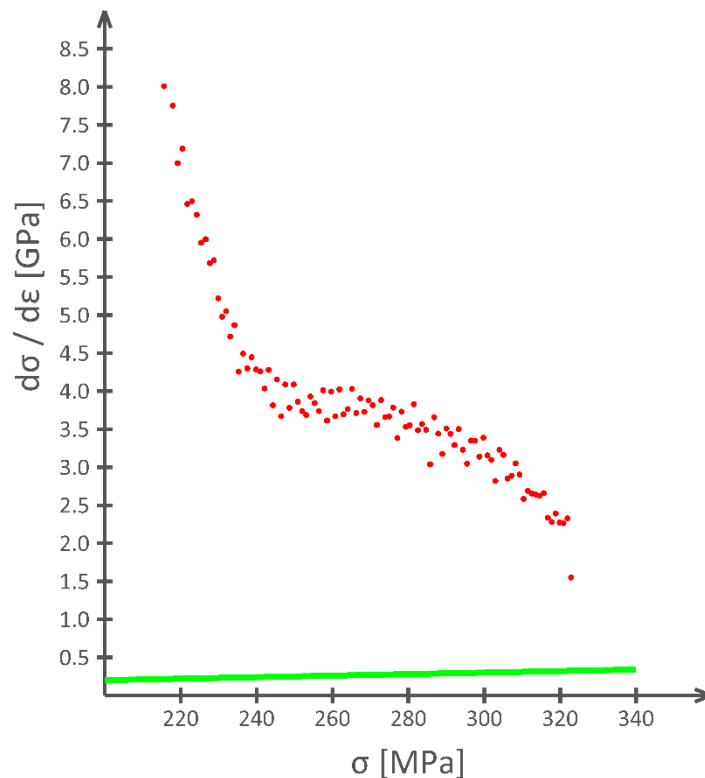


Figure 6-19 : Epreuve imprimée verticalement avec $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$ et $v = 1800 \text{ mm/s}$ ▲

6.2.5 Faciès de rupture

Les surfaces de rupture appelées faciès sont observées au microscope à balayage électronique.

C'est la première observation qui met en évidence un problème de répétabilité de la microstructure et des porosités pour des rapports surface/volume d'impression différents, ici les cubes et les éprouvettes et plus tard les différentes zones du taquet.

En effet, comme constaté dans la suite de cette discussion, la densité relative mesurée sur les cubes diffère de celle observée sur les éprouvettes de traction, ce qui influe bien évidemment sur les caractéristiques des porosités.

On n'observe aucune différence notable entre les faciès des différentes orientations pour un set de paramètres donné. En revanche ils varient fortement entre les différents sets de paramètres; deux cas extrêmes sont sélectionnés :

- ▲, $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$ et $v = 1800 \text{ mm/s}$:

Ce set de paramètres présente de très bonnes propriétés mécaniques mais de grandes porosités allongées dans les cubes échantillons.

Sur le faciès de rupture (Figure 6-20), les porosités allongées n'apparaissent plus du tout; au contraire la surface présente une grande uniformité de matière. On observe cependant quelques porosités sphériques au cœur de l'éprouvette, mais beaucoup moins que dans le cube imprimé avec les mêmes paramètres.

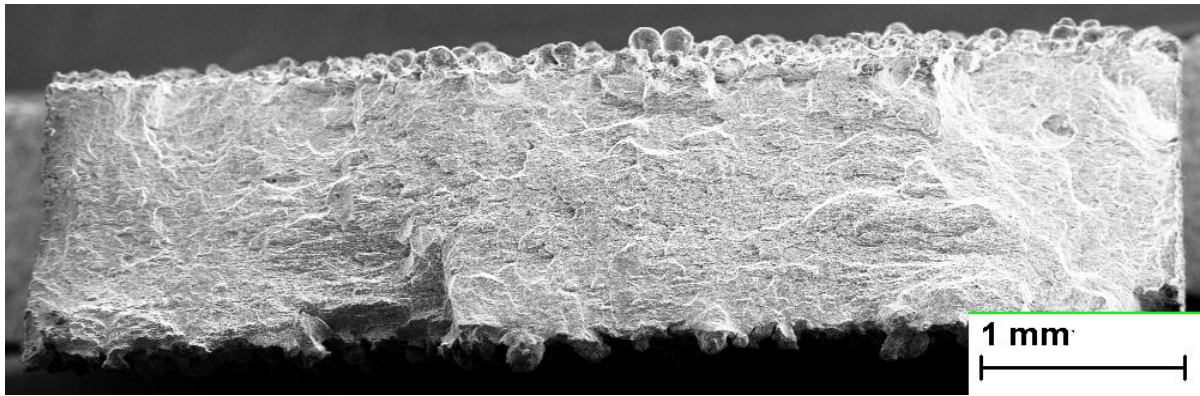


Figure 6-20 : Faciès de rupture de l'éprouvette horizontale ▲

- ▲, $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 90 \%$ et $v = 800 \text{ mm/s}$:

Ce set de paramètres présente, à l'inverse, des propriétés mécaniques très médiocres mais l'observation du cube échantillon de mêmes paramètres révèle très peu de porosités.

Le faciès présente ici énormément de porosités sphériques (Figure 6-21) qui ne correspondent pas à l'observation du cube échantillon de mêmes paramètres.

De manière générale, lors de l'observation des faciès de rupture, on peut observer un plus grand nombre de porosités que sur une éprouvette non tirée de mêmes paramètres. En effet la rupture est privilégiée le long des frontières des porosités et le faciès met dès lors en évidence de nombreuses porosités qui appartiennent à plusieurs couches.

L'observation des éprouvettes non tirées n'a malheureusement pas été effectuée, mais l'explication ci-dessus ne peut pas être la seule raison de l'énorme différence de porosité par rapport au cube échantillon de mêmes paramètres.

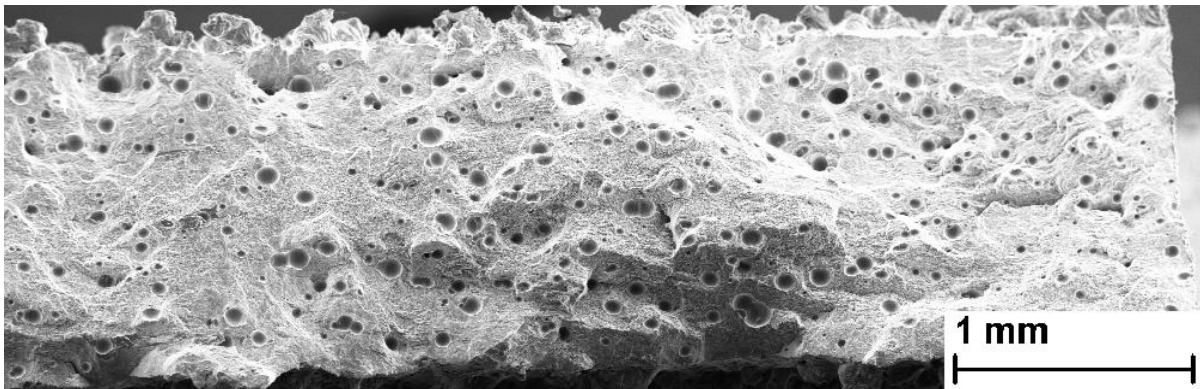


Figure 6-21 : Faciès de rupture de l'éprouvette horizontale ▲

L'observation de ces deux faciès pose une grande interrogation quant à la pertinence de la répétabilité de la microstructure pour des pièces de géométries différentes (ici le cube et les éprouvettes)... Cette hypothèse sera approfondie dans la section suivante (6.3.2) et même confirmée lors de l'observation de la pièce finale.

6.3 Lien entre microstructure, densité relative et essais de traction

6.3.1 Largeur de zone

Delahaye et al. [21] ont observé une rupture préférentielle dans la zone affectée thermiquement (section 2.1.6) et ouvrent l'hypothèse d'un lien direct entre l'accroissement de la HAZ et la diminution des propriétés mécaniques en traction. Pour vérifier cette hypothèse, on sélectionne trois sets de paramètres :

- $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 75 \%$, $v = 600 \text{ mm/s}$ (●) : cube qui présente la plus grande HAZ
- $h = 100 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$, $v = 1000 \text{ mm/s}$ (★) : cube qui présente une HAZ moyenne
- $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 75 \%$, $v = 1200 \text{ mm/s}$ (■) : cube qui présente la plus petite HAZ

Les courbes de traction des éprouvettes horizontales des trois sets de paramètres sont reprises à la Figure 6-22.

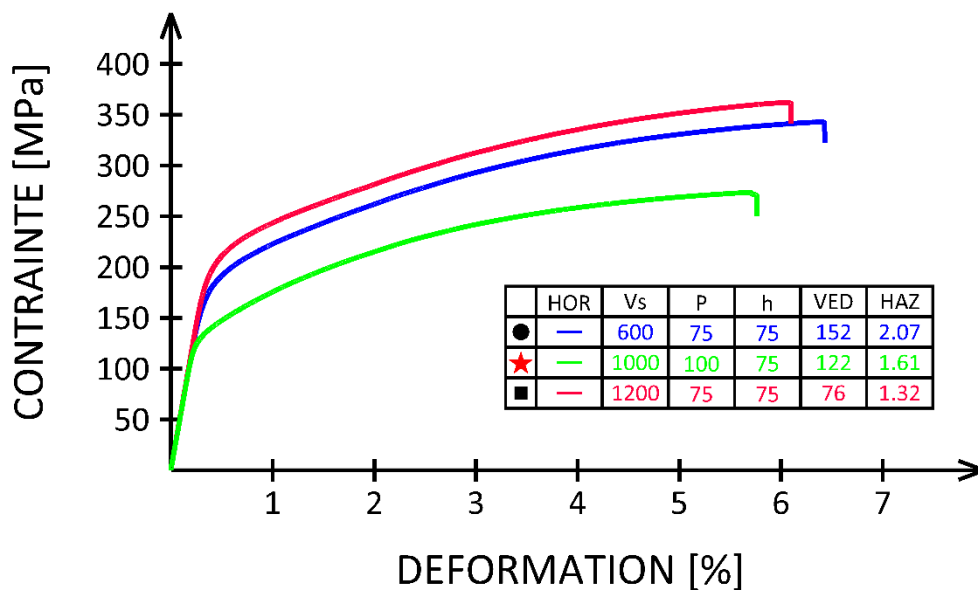


Figure 6-22 : Comparaison des propriétés mécaniques pour différentes largeurs de HAZ

Au vu des trois courbes sélectionnées (mais également de l'ensemble des sets de paramètres et des directions d'impression), il n'est pas possible d'établir une relation entre la largeur de la zone affectée thermiquement du cube et les propriétés mécaniques de l'éprouvette de même paramètres.

Il faut cependant tenir compte que les largeurs obtenues ici sont bien inférieures à celles de Delahaye et al. [21] qui imprimaient HAZ de l'ordre de $5 \mu\text{m}$.

Il n'est donc pas possible, au vu des valeurs de cette étude, de trouver une tendance marquée de l'influence de la largeur des zones thermiquement affectées (mesurée sur les cubes...) sur les propriétés mécaniques des éprouvettes.

6.3.2 Lien entre la porosité des cubes et la rupture des éprouvettes

Le tableau de la Figure 6-23, reprend les images SEM générales des porosités des cubes, ordonnées selon la valeur de la contrainte à la rupture des éprouvettes présentant les mêmes paramètres d'impression.

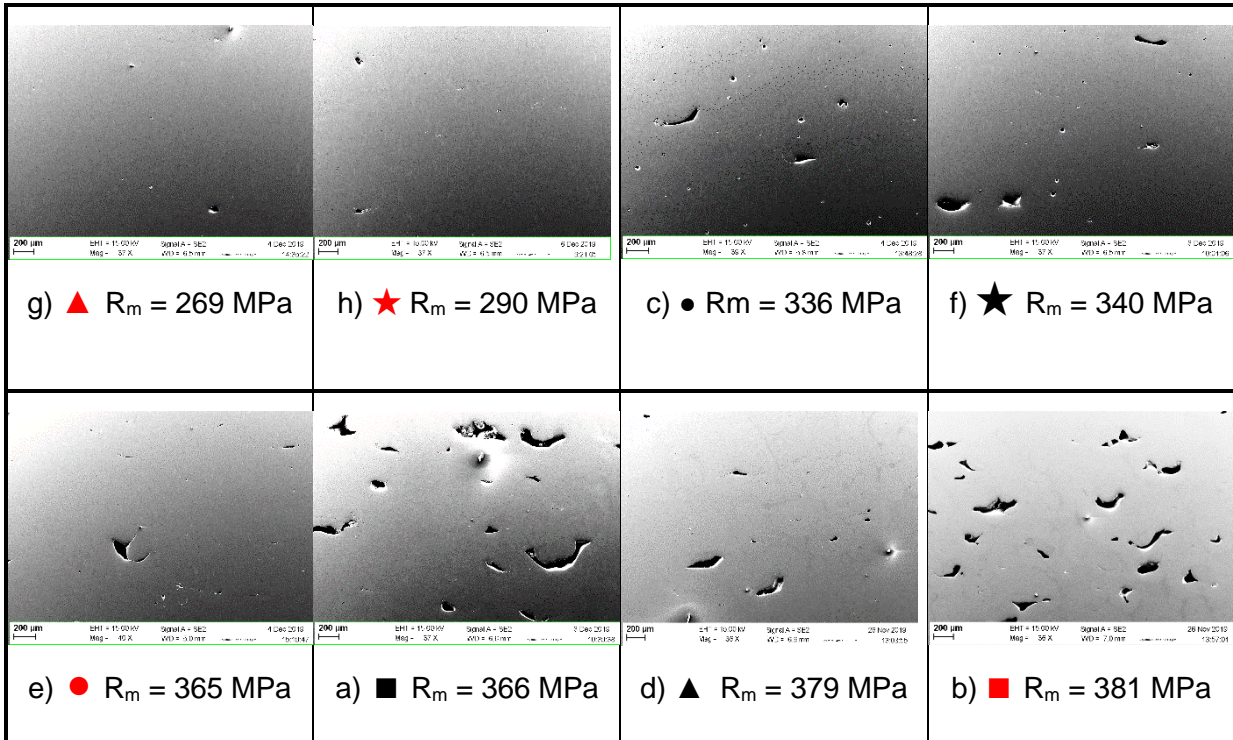


Figure 6-23 : Vue générale des porosités en fonction de la contrainte à la rupture (R_m)

On observe que les sets de paramètres qui présentaient le moins de porosités et donc la meilleure densité relative sur les cubes sont les moins bons en essais de traction.

Les meilleurs sets de paramètre en traction présentent de nombreuses porosités allongées dans leurs cubes. Mais on ne peut pas conclure qu'il y a une évolution linéaire, ni même logique, entre l'augmentation des porosités et l'amélioration des propriétés mécaniques en traction. Les échantillons présentant des propriétés moyennes (même plutôt élevées) ne suivent pas cette logique.

De plus il est contre-intuitif d'imaginer que la présence de porosités augmente les propriétés mécaniques, ce qui est contraire à la littérature qui sélectionne généralement les meilleures densités avant d'effectuer les tests de traction.

Ceci tend à confirmer l'hypothèse de la non-répétabilité de la microstructure et des porosités entre les cubes et les éprouvettes de même set de paramètres faite lors de l'observation des faciès (section 6.2.5). Ceci sera confirmé lors de l'observation de la pièce finale.

6.4 Pièce finale : Taquet d'amarrage

6.4.1 Design CAO

D'après le résultat de l'optimisation topologique (Figure 6-24 & section 5.4), on élabore la pièce par CAO afin d'obtenir un design final pour l'impression.

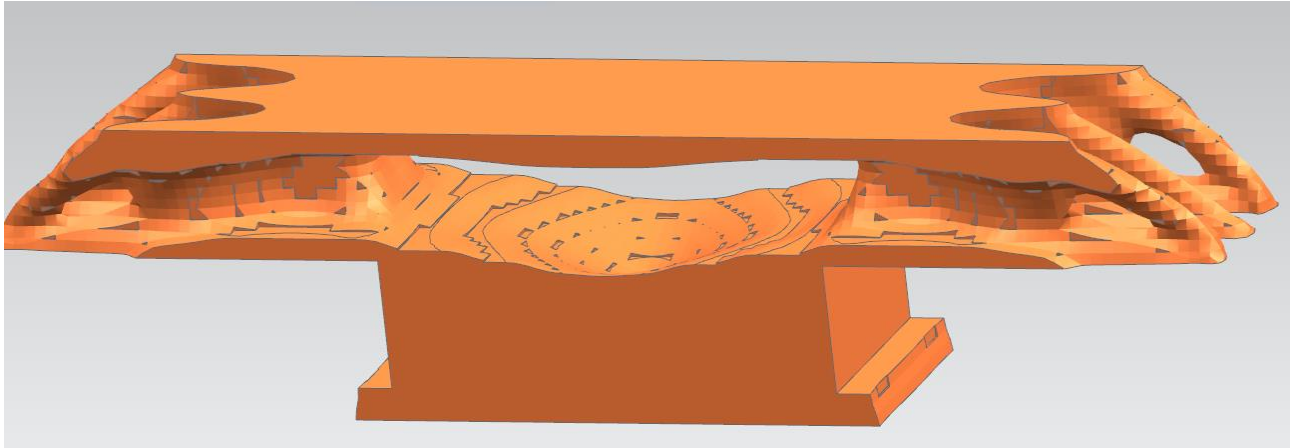


Figure 6-24 Résultat Topologique

La première étape consiste à créer, le plus fidèlement possible à l'aide d'un logiciel de CAO, une image vectorielle de la pièce (Figure 6-25). L'image vectorielle peut facilement être modifiée et est donc évolutive tout au long de la réflexion. Le logiciel de CAO pourra l'exporter au format ".STL", interprétable par le logiciel slicer.

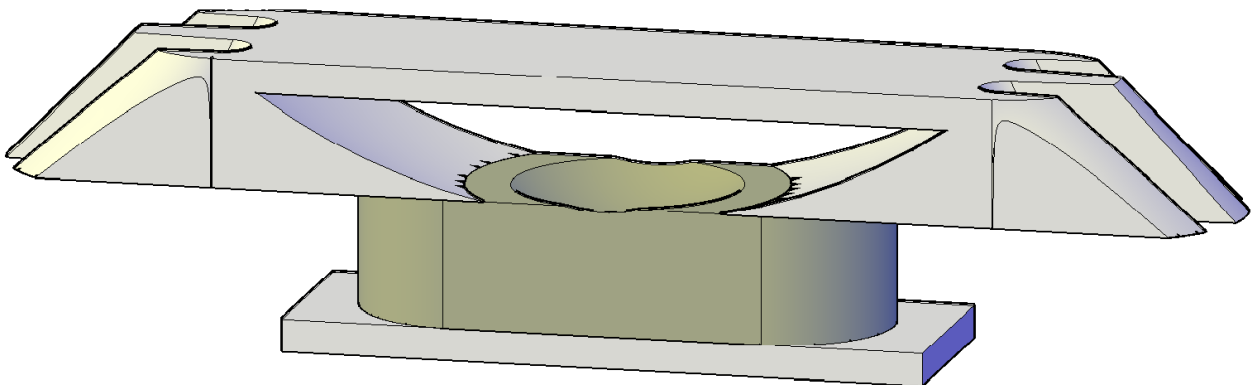


Figure 6-25 Premier modèle CAO

Le modèle de la Figure 6-25 n'est évidemment pas exploitable tel quel, mais il permet déjà de faire un premier choix : l'extrémité des ailes étant creux, on décide de le couvrir d'une peau extérieure (indispensable à l'usage) et d'y insérer des structures en treillis (latices) afin de pouvoir soutenir la peau tout en assurant une légèreté à la pièce.

La suite du développement est donc effectuée avec des extrémités d'ailes pleines (Figure 6-26) qui seront partiellement remplacées par un treillis interne dans la pièce finale.

Afin de limiter l'usage de support, on oriente l'impression de la pièce en plaçant la direction de fabrication (axe Z de la machine) dans la direction transverse au taquet.

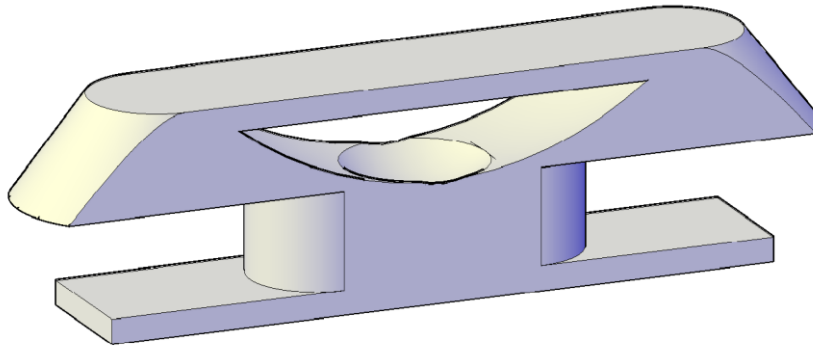


Figure 6-26 : Premier design ailes pleines

Ensuite on travaille la pièce pour améliorer sa résistance et son aspect extérieur :

- Ajout de congés à toutes les liaisons entre plans différents pour limiter la concentration de contraintes.
- Arrondissement des coins francs de la pièce pour une amélioration du visuel mais aussi de la sécurité lorsque la pièce sera en usage.
- Affinage et angulation des ailes du taquet : comme, d'après l'optimisation topologique, les ailes peuvent être allégées, elles sont redessinées plus élancées.

Enfin, on étudie le système de fixation de la pièce.

La base d'ancrage dans le pont se doit d'être la plus longue possible. Mais, tant pour des raisons esthétiques que pour une limitation liée à la taille de la zone d'impression, cette embase dépassera peu (en longueur) les ailes du taquet.

Les vis de fixation doivent être « à tête fraisée » afin de pouvoir être encastrées pour permettre le passage du cordage. On leur choisit une empreinte allen (6 pans creux) ou torque, par esthétique et pour assurer un démontage aisé par la suite, mais surtout pour permettre le passage de la clé (voir ci-dessous).

Leur longueur ne peut pas être limitée par la forme du taquet, car l'épaisseur du pont dans lequel il sera boulonné est inconnue et peut être très différente d'un bateau à l'autre. On leur choisit un diamètre de 6mm (filetage M6); il s'agit d'un compromis entre la matière disponible dans le pied et la volonté de maximiser le diamètre de la vis.

On adapte donc le design du taquet pour pouvoir introduire des vis, même très longues, et les serrer (Figure 6-27) :

- Un congé concave est creusé sous l'extrémité de l'aile pour laisser un passage en oblique à la vis et à sa tête.
- Le trou de fixation de la fis est ovalisé longitudinalement pour permettre d'insérer la vis inclinée.
- Un trou (diamètre 4.5 mm) est prévu dans l'aile afin de permettre le passage de la clé de serrage.

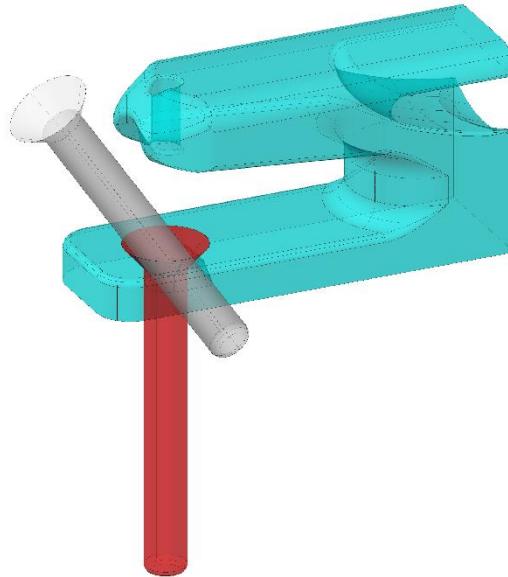


Figure 6-27 : Système de fixation du taquet

On obtient le design définitif de la pièce (Figure 6-28) :

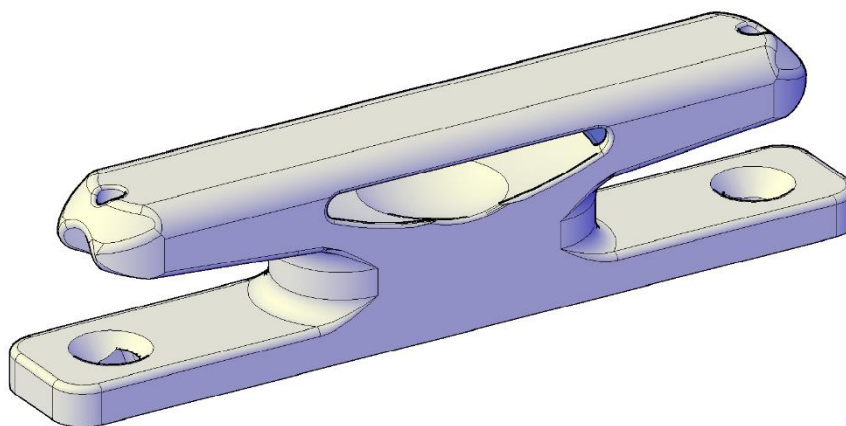


Figure 6-28 : Design définitif

Et finalement, on définit les zones qui seront remplacées par des structures en treillis (latices) dans les ailes (zones en bleu à la Figure 6-29)

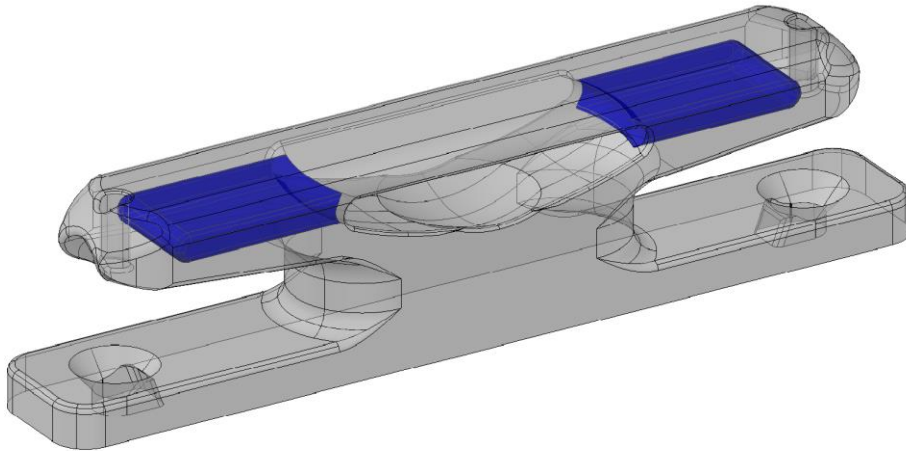


Figure 6-29 : Design définitif (en gris) avec les zones de treillis (en bleu)

6.4.2 Impression de la pièce

Pour utiliser au mieux la zone d'impression de la machine SLM et rentabiliser le batch, deux taquets sont imprimés sur le même plateau de fabrication (Figure 6-30). Ils sont imprimés avec un contour, afin d'augmenter l'état de surface (voir section 2.1.3).

Des supports pleins sont nécessaires sous toute la surface de la pièce pour permettre la découpe EDM; leur épaisseur correspond à celle du fil de coupe (0.3 mm). De plus, des supports en treillis (faciles à retirer) sont ajoutés sous les arrondis en porte-à-faux et dans les trous de fixation pour éviter leur effondrement.

Pour l'impression, via le programme "slicer", on impose un angle de 15° entre l'axe du taquet et le repère XY de la machine, afin de minimiser le "choc" lorsque le rouleau aborde les arêtes. Un choc important pourrait, dans des cas extrêmes, déformer la pièce ou la décoller du plateau de fabrication.

Dans un premier temps, on sélectionne pour la partie pleine les paramètres suivants :

- Epaisseur de couche : $t = 30 \mu\text{m}$
- Hatch : $h = 75 \mu\text{m}$
- Puissance : $P/P_{\text{max}} = 75\%$, $P = 205 \text{ W}$
- Vitesse : $v = 600 \text{ mm/s}$

Ce sont les paramètres des échantillons ●; ils sont chauds ($\text{VED} = 152 \text{ J/m}$, $\text{TED} = 342 \text{ J/mm}^3$) et ont une bonne densité relative (99.1 %) (section 5.1).

Ils présentent une bonne résistance à la traction dans les trois directions d'impression analysées. Certains échantillons sont meilleurs en traction horizontale mais leurs propriétés se détériorent fortement pour les autres directions (section 5.3).

Les cubes réalisés avec ces paramètres présentent peu de porosités et même si quelques porosités allongées apparaissent, leur nombre est assez réduit (section 5.2.1).

Il s'agit du set de paramètres pour lequel la corrélation entre porosités des cubes (faibles) et la résistance à la traction (élevée) correspond le mieux à l'intuition (section 6.3.2).

La vitesse d'impression étant très lente, le temps d'impression prévu est conséquent : 21h30 dont 9h30 de lasage pour chacun des taquets et 2h30 de mise en couche de la poudre.

La partie en treillis des ailes, qui n'est pas utile à la résistance mécanique de la pièce, est imprimée avec des paramètres plus rapides : $h = 75 \mu\text{m}$, $P = 100 \%$, $v = 1800 \text{ mm/s}$.



Figure 6-30 : Plateau de fabrication de deux taquets (1^{er} set de paramètres)

En sortie de fabrication (Figure 6-30), l'état de surface de la pièce est très granuleux.

Une fois la pièce découpée par EDM, on voit apparaître au niveau du pied un grand nombre de porosités qui laisse penser que le volume de la pièce a pu induire une forte accumulation de chaleur. Les porosités de ce set sont analysées en détail (voir section 6.4.3).

Au vu des résultats peu satisfaisants, on décide d'imprimer un autre batch de deux taquets avec un set de paramètres plus froid et plus rapide :

- Epaisseur de couche : $t = 30 \mu\text{m}$
- Hatch : $h = 75 \mu\text{m}$
- Puissance : $P/P_{\text{max}} = 100 \%$, $P = 273 \text{ W}$
- Vitesse : $v = 1800 \text{ mm/s}$

Ce sont les paramètres des échantillons ▲ ; ils sont beaucoup plus froids ($VED = 68 \text{ J/m}$, $TED = 152 \text{ J/mm}^3$) et ont la même densité relative que les paramètres précédents (99.1 %) (section 5.1).

Ils présentent une très bonne résistance à la traction dans la direction horizontale, fortement sollicitée pour le taquet, mais un peu réduite dans les deux autres directions (section 5.3).

Les échantillons réalisés avec ces paramètres présentent une grande similitude de porosités avec le set de paramètres précédent (section 5.2.1).

Les structures en treillis sont imprimées avec les mêmes paramètres que précédemment, qui se trouvent être ceux appliqués à la partie pleine de cette impression.

La vitesse d'impression étant ici fortement augmentée, le temps d'impression est sensiblement raccourci : 10h30 dont 4h de lasage pour chaque taquet et 2h30 de mise en couche de la poudre.



Figure 6-31 : Sortie de fabrication (2^{ème} set de paramètres)

En sortie de fabrication (Figure 6-31), l'état de surface est bien meilleur, même s'il reste encore très granuleux. Après la découpe EDM on observe que les porosités sont plus petites et occupent une surface moindre, ce qui induit fort probablement une meilleure densité relative.

6.4.3 Analyse des images de porosité

Un des deux taquets imprimés avec le premier set de paramètres est découpé afin d'observer les porosités au cœur de la matière. Le résultat de cette discussion conduit à choisir un set de paramètres différent pour l'impression du deuxième batch de pièces finales.

On étudie quatre faces différentes qui sont identifiées sur la Figure 6-32.

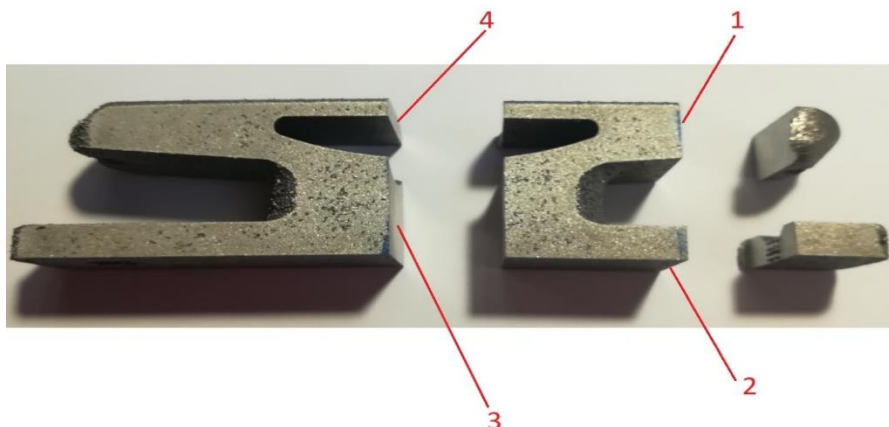


Figure 6-32 : Faces observées du taquet découpé

Les parties découpées du taquet sont enrobées dans de la résine et polies à la poudre de diamant de 1 μm suivant la méthode de la section 4.3.2, puis attaquées au réactif de Keller.

La surface 1 comprend les structures en treillis (latices).

La Figure 6-33 est une image optique de la zone en treillis de cette surface. La partie en noir est la résine conductrice en carbone et correspond donc aux vides dans la pièce. Les zones blanches sont constituées de la matière imprimée.

On voit apparaître la forme en croix des latices, mais il y a de gros manquements. En effet, tant la découpe que le polissage cassent l'extrémité des treillis.

C'est également la raison pour laquelle la zone autour des treillis de cette surface n'est pas analysée ci-dessous, car pendant le polissage la surface se raye avec les particules qui se détachent rendant l'observation au microscope compliquée.

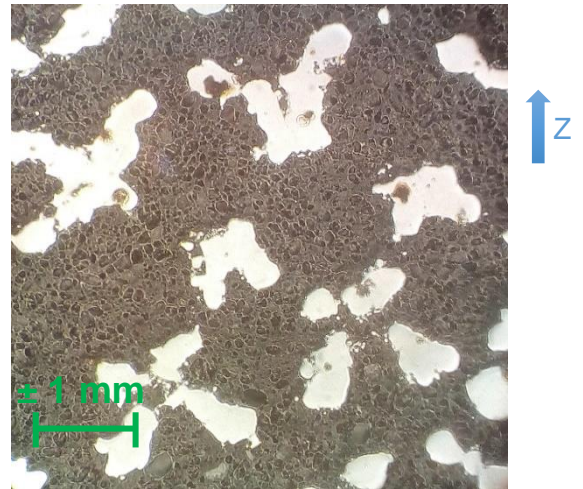


Figure 6-33 : Surface 1 : structure en treillis

La surface 3 (le pied) présente des porosités très grandes et très nombreuses (Figure 6-34), et les bains de fusion sont fortement déformés. Ces porosités sont très probablement dues à un apport de chaleur trop important; en effet elles ne sont présentes que dans la partie la plus massive de la pièce et ont une grande influence sur les bains de fusion, ce qui rappelle les "key hole".

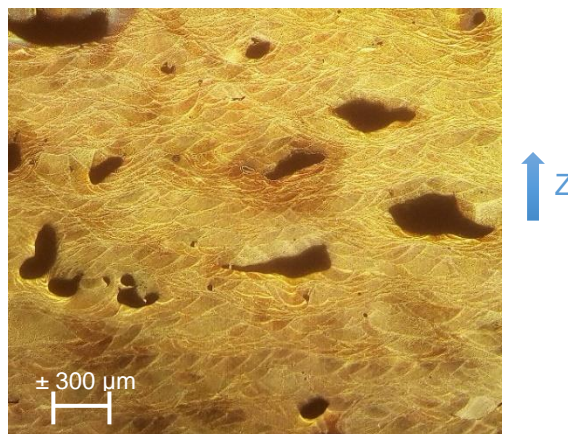


Figure 6-34 : Surface 3 : Observation des porosités dans le pied du taquet

Les surfaces 2 et 4 n'appellent pas de remarques préliminaires particulières mais leur pourcentage de porosité est étudié dans ce qui suit.

On utilise la technique d'analyse d'image pour comparer les porosités des différentes zones du taquet entre elles et par rapport au cube de mêmes paramètres. Elle consiste à contraster complètement l'image afin de faire ressortir les porosités en noir et le reste de la surface en blanc, puis mesurer le pourcentage de noir dans l'image (Figure 6-35).

Cette méthode fait donc l'hypothèse que ce pourcentage représente la fraction volumique de porosités. Les résultats sont repris dans le tableau de la Figure 6-36.

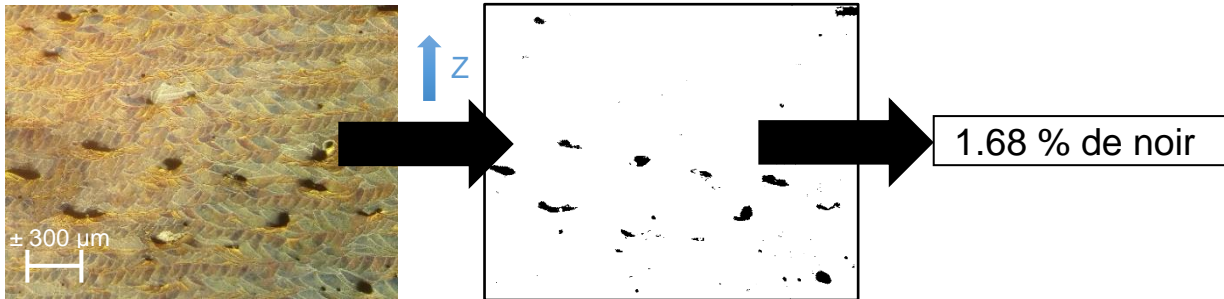


Figure 6-35 : Evaluation du volume des porosités au moyen de l'analyse d'image (surface 2)

SURFACE	ZONE	% POROSITES	DENSITE RELATIVE [%]
-	Cube échantillon	0.89	99.11
1	Pas analysé (voir plus haut)		
2	Plaque de support	1.68	98.32
3	Pied	5.55	94.5
4	Liaison supérieure	1.58	98.42

Figure 6-36 : Résultats de l'analyse d'image des porosités des zones du taquet

Afin de valider la méthode, on mesure la densité relative du cube échantillon de mêmes paramètres. La valeur obtenue par analyse d'image (99.11 %) correspond bien à celle obtenue par la méthode des trois mesures à la section 5.1 (99.10 %).

On observe que le pourcentage de porosités augmente avec les volumes de matière pleine autour de la surface observée. Ceci confirme l'hypothèse d'accumulation de chaleur et l'utilité de la deuxième impression plus froide. Cela démontre également la non-répétabilité des propriétés entre un cube échantillon et une pièce massive.

6.4.4 Vérification des cotes

Les pièces imprimées sont mesurées au pied à coulisse et comparées au fichier CAO pour vérifier la précision de fabrication (Figure 6-37).

Les trous :

Après le retrait du support hors des trous traversants à l'aide d'une chasse, on mesure les diamètres. Ils s'avèrent 10 % inférieurs à ceux du fichier.

Trois causes évidentes peuvent expliquer ceci :

- Etat de surface : il est très granuleux et donc diminue le diamètre
- Présence de résidus de support
- Affaissement des supports.

La diminution du diamètre des trous est peu contraignante. En effet, il est prévu de reforer systématiquement les trous à la perceuse lors du post-forming.

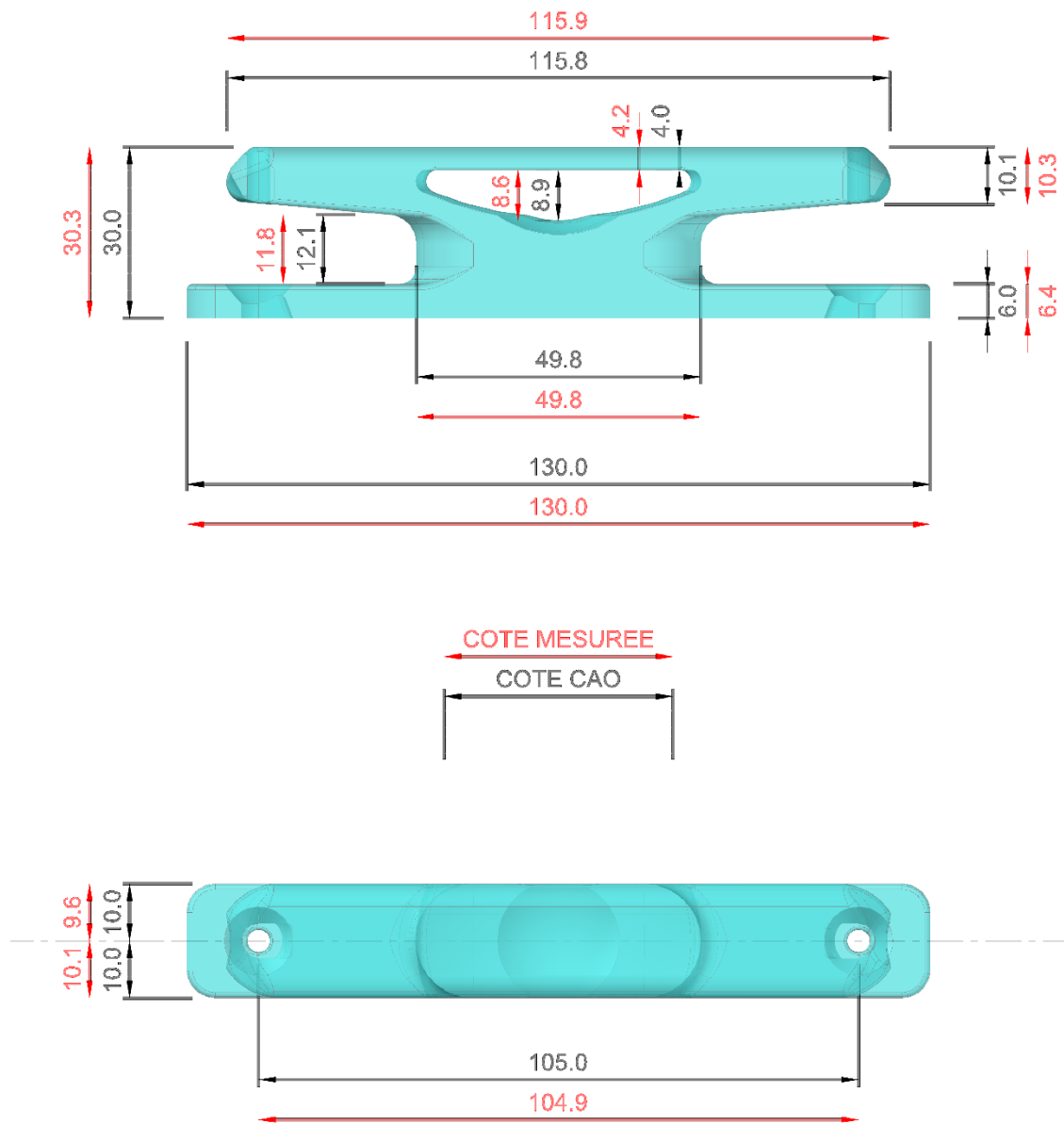


Figure 6-37 : Vérification des cotes du taquet final

On remarque une faible différence (0.1 mm) pour l'entraxe des trous. Elle peut être mise sur le compte de la manipulation de forage, mais elle reste dans la limite des tolérances usuelles entre le diamètre de perçage et le diamètre de la vis (reportée par moitié sur chaque trou).

Cotes extérieures :

On constate une sur-dimension systématique de l'ordre de 1 mm à 1.5 mm par face incluse dans la mesure, et ce indépendamment de la longueur mesurée.

Ceci est explicable par l'état de surface très granuleux et sera éliminé au meulage ou polissage de la pièce lors du post-forming. Il est intéressant de constater que le fait d'obtenir systématiquement une sur-dimension et non une sous-dimension, permet d'ajuster très précisément la pièce, si nécessaire, par un meulage adéquat.

Séparation par EDM :

On constate une dissymétrie flagrante par rapport à l'axe longitudinal (10.1 mm contre 9.6 mm) due à la séparation de la pièce du plateau par EDM.

En effet, le fil de découpe a enlevé une épaisseur de matière supérieure à son diamètre théorique, qui était pris en compte pour dimensionner l'épaisseur de support plein entre la pièce et le plateau.

Ce paramètre devra être optimisé par expérience dans la suite.

Orientation de la pièce sur le plateau :

Lors de l'impression, on a imposé un angle de 15° entre l'axe du taquet et le repère XY de la machine (section 6.4.2). Cet angle faible induit forcément une direction préférentielle d'impression.

Or on constate à la Figure 6-37 que les cotes longitudinales sont nettement plus précises que les cotes transversales (verticales dans le sens d'usage du taquet).

Il serait intéressant d'effectuer des tests afin de vérifier si la machine ne présente pas une meilleure précision pour un de ces 2 axes, et, le cas échéant, la recalibrer.

6.4.5 Test de traction

Pour vérifier le dimensionnement du taquet, on effectue des essais de traction en configuration réaliste.

La machine de traction est la 250 kN de l'iMMC, montée avec des mors hydrauliques.

Pour le montage, on boulonne le taquet sur une plaque d'acier qui est serrée dans le mors inférieur.

Par soucis de manipulation sur la machine, on utilise un cordage fin en DYNEMA® nettement plus résistant que le cordage de type amarre. Il présente une résistance à la rupture de 40 000 N pour un diamètre de 6 mm.

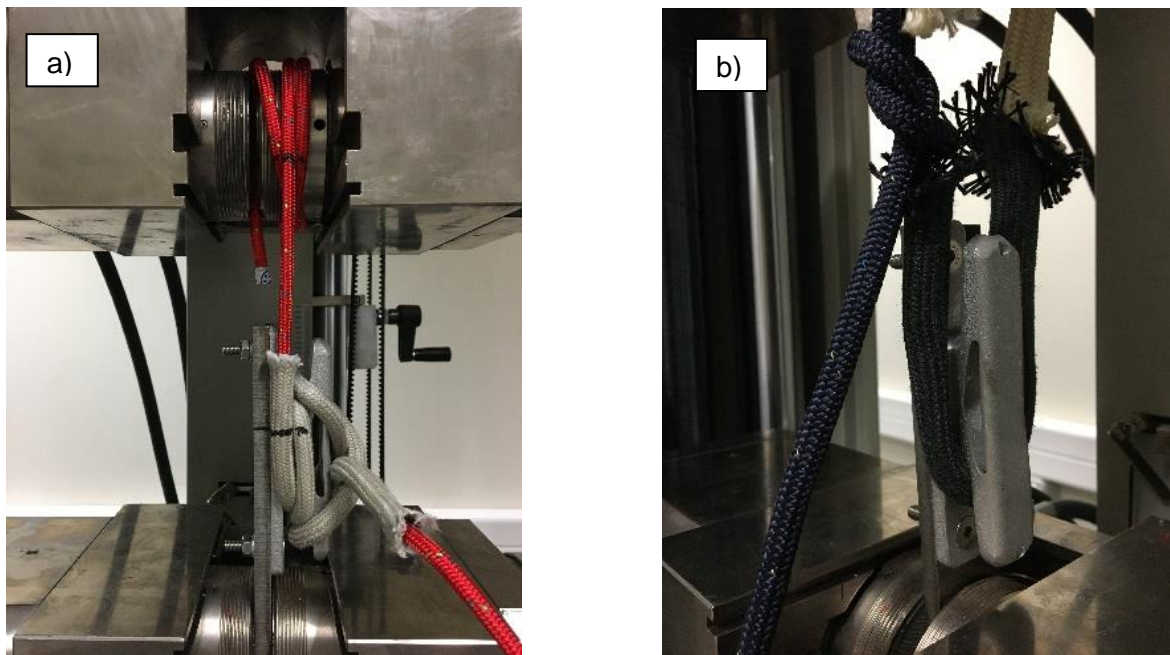


Figure 6-38 : Différents montages : a) avec surgaine, b) en boucle

Une extrémité est nouée sur le taquet; l'autre est enroulée autour du mors hydraulique avant d'être serrée entre les mâchoires (Figure 6-39 a).

Au premier essai, très rapidement (charge de 4 000 N), la gaine du cordage s'abîme sur le taquet et l'âme commence à se blesser (Figure 6-39 b).

On décide donc de repolir méticuleusement et plus profondément la zone de passage du cordage sur le taquet afin de limiter l'abrasion.

Pour le nouvel essai, la charge monte jusque 6 000 N avant de déchirer à nouveau la gaine.

L'état de surface du taquet au niveau du passage du cordage étant déjà très bon, on ajoute une surgaine anti-abrasion autour de la partie du cordage nouée sur le taquet (Figure 6-38 a). La charge atteint 9 000 N avant que la gaine du cordage (à l'intérieur de la surgaine) ne se déchire à nouveau. On en conclut donc que c'est la charge et non le frottement qui ruine la gaine du cordage.

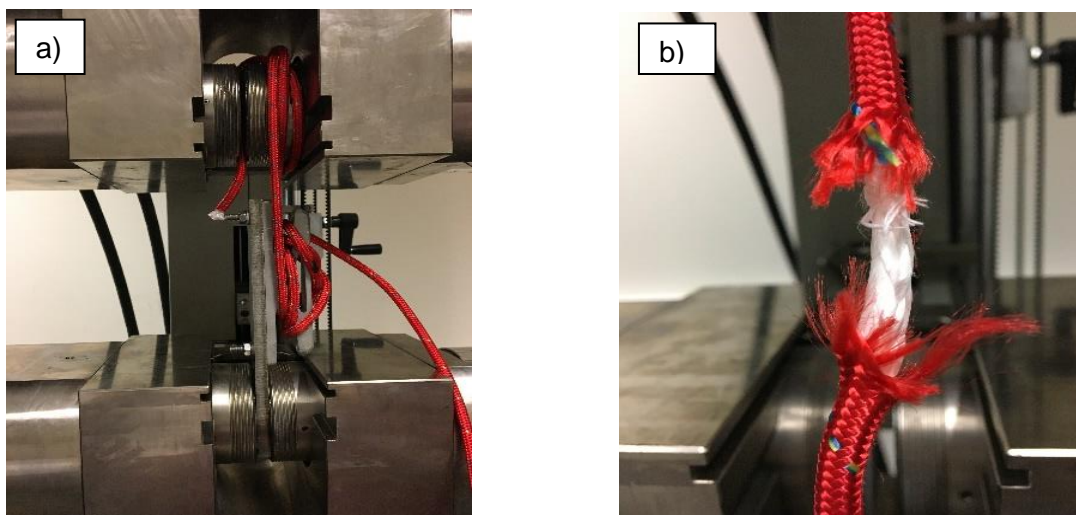


Figure 6-39 : Premier essai du montage du test de traction : a) montage initial, b) rupture de la gaine

Ce phénomène étant plutôt collatéral, on essaye de se départir des problèmes liés au cordage pour se focaliser sur le taquet.

On utilise donc pour la suite un cordage plus épais (diamètre 8 mm) avec une résistance à la rupture (théorique) plus élevée (6 Tonnes), que l'on glisse dans une surgaine au niveau du taquet et des mors. Une seule boucle fermée par un nœud plat est placée autour du taquet (Figure 6-38 b).

L'essai permet d'atteindre 12 000 N avant que l'âme du cordage ne commence à glisser dans sa gaine au niveau du nœud.

Comme le diamètre du cordage surgainé atteint (voire dépasse...) le diamètre limite de dimensionnement du taquet, une force importante est appliquée en écartement sur les ailes et déforme légèrement sa partie supérieure.

On peut conclure que le taquet résiste déjà à une charge 12 000 N, que le nœud remplit effectivement son rôle de fusible, mais que les hypothèses usuelles appliquées lors du choix des cordages sont un peu optimistes, quoique du même ordre de grandeur que les valeurs annoncées par les fabricants de cordages.

En faisant référence à la section 3, on constate que si on choisit la charge de travail pour calculer la résistance d'un nœud (plutôt que l'hypothèse moyenne entre charge de rupture et charge de travail), le calcul théorique de la résistance du nœud s'établit à :

- Pour le cordage de 6 mm : $50\% \text{ de } 40\,000 \text{ N} / 2 = 10\,000 \text{ N}$
- Pour le cordage de 8 mm : $50\% \text{ de } 60\,000 \text{ N} / 2 = 15\,000 \text{ N}$

Ces valeurs se rapprochent des valeurs obtenues lors de l'essai, respectivement 9 000 N et 12 000 N.

Cet essai valide donc la pertinence des hypothèses de départ quant au dimensionnement du taquet à l'usage. Toutefois, dans le cadre de l'étude, il nous manque un résultat important : la charge de rupture effective du taquet.

D'autres essais sont déjà programmés (... à l'aide de câbles en acier, de chaînes, ...), mais des impératifs de logistique et de calendrier ne permettent pas de les réaliser avant la clôture du présent document.

6.4.6 Etude budgétaire

La réalisation de ce taquet avait comme objectif principal d'être le fil conducteur d'une étude complète de fabrication. Avant même d'estimer les coûts de production, il paraît évident qu'une fabrication à vocation commerciale de ce type de pièce ne peut pas s'avérer rentable.

Il est cependant intéressant d'essayer de modéliser les différents coûts.

On ne prendra pas en compte ici le coût de recherche et de développement dont l'amortissement peut être dilué significativement lors d'une production en série, mais qui va s'avérer totalement prépondérant dans le cas de la fabrication de pièces uniques ou de très haute technologie (aérospatiale...).

On calculera donc le coût de fabrication (très approximatif) d'un taquet sur base du coût des machines, des consommables et de la main d'œuvre.

Le temps de post-forming (polissage et autres traitements de surface) n'est pas pris en compte.

On considère comme négligeable, à cette échelle, le coût d'occupation des locaux. Ce paramètre pourrait devenir conséquent dans le futur si la fabrication en très grandes séries conduisait à devoir créer des "fermes" d'imprimantes de plusieurs dizaines (ou centaines) de machines, puisqu'à moyen terme il n'y a pas de piste pour accélérer sensiblement le processus.

On parle ici de prix coûtant et pas de prix de vente commercial.

Utilisation des machines :

Pour la machine EDM on dispose du prix horaire d'utilisation : 70 €

Pour la machine SLM :

La machine coûte 250.000 € et on peut considérer qu'on l'amortit sur 5 ans, soit 50.000 euros par an.

On peut tabler sur une utilisation potentielle théorique maximale de 250 jours par an, 16 heures par jour (batch de jour / batch de nuit), soit 4 000 heures qu'il faut bien sûr moduler par le taux d'utilisation réel (120 %..., 80..., 50..., 30 %) qui nous conduit donc à un amortissement horaire potentiel de 10,50 € (production industrielle) à 41,70 € (recherche expérimentale).

Sans information sur le coût d'entretien, on peut raisonnablement compter annuellement 5% du prix de la machine (par ex : contrat d'entretien) soit un coût horaire qui est modulé entre 2.60 € et 10.50 €.

La puissance électrique est de 8 kVA (sans info sur le cos φ , tablons sur 0.8 soit 10kW) avec un prix moyen (pour les particuliers) du kWh de 0.20 € : 2 € réels par heure d'impression.

Soit un coût horaire très approximatif variant de 15 € à 55 € (valeur retenue ici).

Main d'œuvre technicien : (35 € par heure)

La manutention relative à l'alimentation du magasin de poudre, au chargement du plateau de fabrication, au nettoyage et déchargement de la pièce et à la vidange de la poudre résiduelle nécessite en moyenne 1 heure par batch.

La séparation des taquets au moyen de la machine EDM nécessite environ ¼ d'heure d'intervention du technicien et 1 heure machine.

Consommables :

Le kilo de poudre coûte 50 €.

L'argon coûte 7,35 € le m³ normal.

Totaux :

Le tableau de la Figure 6-40 reprend ces différents coûts pour deux taquets (impression d'un batch) :

Manipulation	Coût unitaire	Quantité	Total (pour deux taquets)
Machine SLM	55 €	10h30	577.5 €
Poudre AISi10Mg	50 € / kg	240 g	12 €
Argon	7,35 € / m ³	3.5 m ³	25.73 €
Découpe EDM	70 €	1h	70 €
TECHNICIEN	35 € / h	1,25	43,75 €

Figure 6-40 : Coûts de production

Le coût total pour deux taquets est donc d'environ 730 € et finalement le **prix unitaire est de 365 €**, à comparer au prix de commercialisation des taquets, de 20 € à 50 € pour les modèles basiques et pouvant monter à une centaine d'euros pour des modèles haut de gamme.

Le facteur 4 à 8 entre le prix de réalisation d'un taquet SLM et le prix de vente de pièces équivalentes est encore élevé mais ne semble pas insurmontable. En effet la technologie est en constante évolution et tend à diminuer le prix des machines, le temps d'impression et la nécessité d'intervention humaine pendant le processus.

Au final, même si la commercialisation de taquets d'amarrage de bateau imprimé par SLM ne semble pas imminente, cette technique apparaît tout à fait réaliste pour des pièces plus performantes et plus valorisables.

7 Conclusion

L'étude et la réalisation du processus complet de conception et de fabrication d'un taquet par SLM fut globalement concluante.

Depuis la réalisation d'échantillons pour analyser les paramètres jusqu'à l'impression et la caractérisation du taquet définitif, en passant par l'optimisation topologique et la conception de la pièce, on peut considérer qu'un mode opératoire, certes perfectible, a pris forme.

Plusieurs études préalables réalisées notamment à L'UCLouvain ont orienté le choix des différentes options.

On retiendra l'influence prépondérante du choix des paramètres d'impression (principalement vitesse de balayage, puissance du laser et distance inter-cordons) sur la qualité de la pièce finale mais également la complexité à établir des tendances claires entre les paramètres et les propriétés de la pièce imprimée.

La comparaison des cubes et des éprouvettes de traction soulève beaucoup de questions; en effet les résultats sont parfois étonnants, contre-intuitifs et même contradictoires pour un même set de paramètres en fonction de la masse des pièces (ou du rapport surface/volume).

On notera également que la moins bonne résistance des pièces "en forme" par rapport aux pièces découpée mérite d'être étudiée (et peut-être résolue...), car la vocation ultime du procédé est quand-même de produire des pièces les plus "finalisées" possible.


L'optimisation topologique a permis de ressortir un design de taquet inhabituel, mais la géométrie choisie a montré son bien-fondé, puisqu'il a résisté à un essai de charge usuelle. L'essai a parallèlement prouvé que les hypothèses retenues pour définir les cas de charge étaient cohérentes, puisque les cordages ont sensiblement réagi dans le sens de la théorie.

Un petit regret... Au vu des résultats plutôt imprévus de la répétabilité entre les cubes et les éprouvettes, une caractérisation de la microstructure sur des plaques de même rapport surface/volume que les éprouvettes aurait permis d'établir un lien plus réaliste entre propriétés mécaniques et physiques. L'impression d'échantillons de volume plus important avant l'impression du taquet aurait mieux guidé la sélection de ses paramètres d'impression.

La continuité de ce projet passe certainement par une implication plus importante de l'optimisation topologique. En effet, elle n'a malheureusement pas pu être réitérée après les tests de solidité sur la pièce finale, alors que, même sans avoir "détruit" la pièce, on sent intuitivement que l'on pourrait encore diminuer les quantités de matière au niveau du pied massif du taquet. Il serait également nécessaire de renforcer la partie supérieure qui lie les deux ailes en reconsidérant la proportion de la charge verticale sur les ailes par rapport à la charge radiale sur le pied.





Un essai est prévu pour tenter d'atteindre la rupture du taquet en le sollicitant à l'aide d'un câble ou d'une chaîne. Il est programmé entre la remise du présent rapport et sa défense orale lors de laquelle les nouveaux résultats seront présentés.

A. Annexe 1: Fiche Technique de la machine [33]



Direct Metal Printers

Metal Additive Manufacturing with the DMP printer series *

	DMP Flex 100	ProX [®] DMP 200	ProX [®] DMP 300	ProX [®] DMP 320
Specifications				
Laser Power Type ¹	100 W/Fiber laser	300 W/Fiber laser	500 W/Fiber laser ⁴	500 W/Fiber laser ⁴
Laser Wavelength	1070 nm	1070 nm	1070 nm	1070 nm
Build Volume (X x Y x Z) ²	3.94 x 3.94 x 3.15 in (100 x 100 x 80 mm)	5.51 x 5.51 x 3.94 in (140 x 140 x 100 mm)	9.84 x 9.84 x 12.01 in (250 x 250 x 300 mm)	10.82 x 10.82 x 14.96 in (275 x 275 x 380 mm)
Layer Thickness		10µm - 100µm Preset: 30	10µm - 100µm Preset: 40 µm	10µm - 100µm Preset: 30 and 60 µm
LaserForm [®] metal alloy choices with developed print parameters:	LaserForm CoCr (B) LaserForm 17-4PH (B) LaserForm CoCr (C)	LaserForm CoCr (B) LaserForm 17-4PH (B) LaserForm Maraging Steel LaserForm AISI12 (B)	LaserForm CoCr (B) LaserForm 17-4PH (B) LaserForm Maraging Steel (B) LaserForm AISI12 (B)	LaserForm Ti Gr1 (A) ³ LaserForm Ti Gr5 (A) ³ LaserForm Ti Gr23 (A) ³ LaserForm AISI10Mg (A) ³ LaserForm Ni625 (A) ³ LaserForm Ni718 (A) ³ LaserForm 17-4PH (A) ³ LaserForm CoCr75 (A) ³ LaserForm 316L (A) ³ LaserForm Maraging Steel (A) ³
Material Deposition	Roller	Roller	Roller	Scraper
Repeatability		x=20 µm, y=20 µm, z=20 µm	x=20 µm, y=20 µm, z=20 µm	x=20 µm, y=20 µm, z=20 µm
Minimum Feature Size		x=100 µm, y=100 µm, z=20 µm	x=100 µm, y=100 µm, z=20 µm	100 µm
Typical Accuracy	± 0.1-0.2% with ± 50 µm minimum	± 0.1-0.2% with ± 50 µm minimum	± 0.1-0.2% with ± 50 µm minimum	± 0.1-0.2% with ± 50 µm minimum
Space Requirements				
Dimensions, uncrated (WxDxH)	48 x 68 x 83 in (121 x 172 x 210 cm)	48 x 59 x 77 in (120 x 150 x 195 cm)	95 x 87 x 95 in (240 x 220 x 240 cm)	93 x 91 x 91 in (235 x 230 x 230 cm)
Weight, uncrated	1300 kg (2870 lbs)	Approx. 1500 kg (3300 lbs)	Approx. 5000 kg (11000 lbs)	Approx. 4700 kg (10500 lbs)
Facility Requirements				
Electrical Requirements	230 V / 2.7 KVA / single phase	400 V / 8 KVA / 3 phase	400 V / 15 KVA / 3 phase	400V / 10 KVA / 3 phase
Compressed Air Requirements	6-8 bar	6-8 bar	6-8 bar	4-8 bar
Gas Requirements	Nitrogen or Argon, 6-8 bar	Nitrogen or Argon, 6-8 bar	Nitrogen or Argon, 6-8 bar	Argon, 1.5-4 bar
Water Cooling	Not required, air cooling included	Chiller included in printer	Chiller included in printer	Chiller supplied with printer
Control System and Software				
Software Tools	3DXpert [™] all-in-one	3DXpert [™] all-in-one	3DXpert [™] all-in-one	3DXpert [™] all-in-one
Control Software	PX Control V3	PX Control V2	PX Control V2	DMP Software suite
Operating System	Windows 7	Windows 7	Windows 7	Windows 7, 64 bit
Input Data File Formats	All CAD formats, e.g. IGES, STEP, STL, native	All CAD formats, e.g. IGES, STEP, STL, native	All CAD formats, e.g. IGES, STEP, STL, native	All CAD formats, e.g. IGES, STEP, STL, native
Network Type and Protocol	Ethernet 1 Gbps, RJ-45 Plus	Ethernet 1 Gbps, RJ-45 Plus	Ethernet 1 Gbps, RJ-45 Plus	Ethernet 1 Gbps, RJ-45 plus
Accessories				
Recycling System	Optional external system	Optional external system	Automatic	Optional external system
Optional Accessories				Optional secondary module for fast material exchange
Handling				
Material Loading	Manual	Semiautomatic	Automatic	Manual
Interchangeable Build Modules	No	No	No	Yes
Certification	CE marked	CE marked, TÜV	CE marked, TÜV	CE marked, TÜV

¹ Maximum available part size using standard build plate ² Set up A ³ Set up B ⁴ Maximum laser power at powder layer is typical 450W for 500W lasers
⁵ Lasers embedded in Class 1 laser products

www.3dsystems.com

Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may vary according to product application, operating conditions, material combined with, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.
 © 2018 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. 3D Systems, the 3D Systems logo, ProX and LaserForm are registered trademarks and 3DXpert is a trademark of 3D Systems, Inc.

06-18

* retranscription claire à la page suivante

ProX® DMP 200	
Specifications	
Laser Power Type ²	300 W/Fiber laser
Laser Wavelength	1070 nm
Build Volume (X x Y x Z) ³	5.51 x 5.51 x 3.94 in (140 x 140 x 100 mm)
Layer Thickness	10 µm - 100 µm Preset: 30
LaserForm® metal alloy choices with developed print parameters :	LaserForm CoCr (B) LaserForm 17-4PH (B) LaserForm Maraging Steel (B) LaserForm AlSi12 (B)
Material Deposition	Roller
Repeatability	x=20 µm, y=20 µm, z=20 µm
Minimum Feature Size	x=100 µm, y=100 µm, z=20 µm
Typical Accuracy	± 0.1- 0.2 % with ± 50 µm minimum
Space Requirements	
Dimensions, uncrated (WxDxH)	48 x 59 x 77 in (120 x 150 x 195 cm)
Weight uncrated	Approx. 1500 kg (3300 lbs)
Facility Requirements	
Electrical Requirements	400 V / 8 KVA / 3 phase
Compressed Air Requirements	6-8 bar
Gas Requirements	Nitrogen or Argon, 6-8 bar
Water Cooling	Chiller included in printer
Control System and Software	
Software Tools	3DXpert™ all-in-one software solution for metal additive manufacturing - DMP Dental for dental applications
Control Software	PX Control V2
Operating System	Windows 7
Input data File Formats	All CAD formats, e.g. IGES, STEP, STL, native read formats incl PMI data, all Mesh formats
Network Type and Protocol	Ethernet 1 Gbps, RJ-45 Plug
Accessories	
Recycling System	Optional external system
OPtional Accessories	
Handling	
Material Loading	Semiautomatic
Interchangeable Build Modules	No
Certification	
Certification	CE marked, TUV

² Lasers embedded in Class 1 laser products

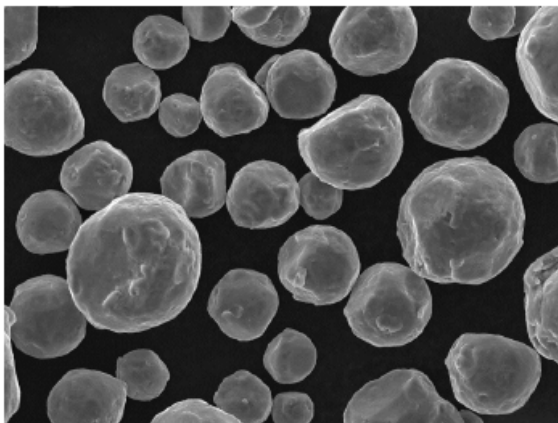
³ Maximum available part size using standard build plate

B. Annexe 2 : Fiche technique de la poudre [34]



Aluminum Powder

based alloys cover a wide range of additive manufacturing applications. AlSi10Mg (EN AC 4300) is one of the most common and standardized aluminum alloys used for all sectors because it exhibits a good balance of mechanical properties. For fine structure printing with respect to surface roughness, the fine grainsize of 15-53 (Size 4) is the perfect choice. Coarser powder (20-63) with less fines, allows for increased printing speeds at the cost of surface quality. Each application may require a best fit material not covered with the market standard, there we have the flexibility to adjust your powder to your needs.



Chemical Composition	
AlSi10Mg	(wt %)
Al	Bal.
Si	9.0-11.0
Mg	0.20-0.45
Fe	≤ 0.55
Ti	≤ 0.15
Sn	≤ 0.10
Mn	≤ 0.10
Cu, Ni, Se, Pb	≤ 0.05
O	≤ 0.08
H	≤ 0.05
Other	≤ 0.05
Other, Total	≤ 0.15

- Spherical Aluminum Powder for Additive Manufacturing
- Particle Size Engineered for Laser Beam Melting (LBM), Electron Beam Melting (EBM), and Metal Injection Molding (MIM)
- Rigorous Quality Testing to AS9100 "D"

Powder Characteristics								
Laser Particle Size Analysis (µm)					Powder Properties		Applications	
Size Type	E.G.S.*	d ₁₀	d ₅₀	d ₉₀	Flow	AD	LBM Coarse	LBM Fine
2	20-63	25-35	40-50	60-65	< 20 s/50g	> 1.3 g/cm ³	X	X
3	10-63	17-21	36-41	57-62	--	1.1 g/cm ³	(X)	X
4	15-53	13-16	30-35	45-53	--	1.1 g/cm ³	(X)	X
Individual		customize to your needs			your request		your application	

*Estimated Grain Size (E.G.S.)

C. Annexe 3 : Batch X200-191008

# ECHANTILLON	#	h [µm]	P/Pmax [-]	Vs [mm/s]	TED [J/m]	VED [J/mm³]	Masse sèche [g]	Masse humide [g]			P _{flux} [g/cm³]	P _{réel} [g/cm³]	Densité relative [%]
								Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3			
								Moyenne					
CUBES - 5 DERNIÈRES COUCHES DOUBLE LASÉES - SIMPLE TRACK SUR LE DESSUS													
X200-191008-1		75	70	600	319.20	141.87	2.4431	1.7169	1.7167	1.7167	0.7910	2.6576	99.17
X200-191008-2	2	75	70	800	239.40	106.40	2.4339	1.7097	1.7100	1.7099	0.7909	2.6559	99.10
X200-191008-3	3	75	70	1000	191.52	85.12	2.4199	1.6998	1.7002	1.6997	0.7909	2.6553	99.08
X200-191008-4	4	75	70	1200	159.60	70.93	2.4172	1.6970	1.6971	1.6974	0.7908	2.6521	98.96
X200-191008-5	5	75	70	1400	136.80	60.80	2.4003	1.6826	1.6825	1.6824	0.7908	2.6416	98.57
X200-191008-6	6	●	75	600	342.00	152.00	2.4436	1.7168	1.7167	1.7169	0.7908	2.6559	99.10
X200-191008-7	7		75	800	256.50	114.00	2.4085	1.6930	1.6927	1.6926	0.7907	2.6581	99.18
X200-191008-8	8		75	1000	205.20	91.20	2.3938	1.6746	1.6751	1.6755	0.7907	2.6307	98.16
X200-191008-9A	9A	■	75	1200	171.00	76.00	2.3634	1.6503	1.6504	1.6506	0.7907	2.6182	97.69
X200-191008-9B	9B		75	1200	171.00	76.00	2.3379	1.6322	1.6325	1.6329	0.7906	2.6177	97.68
X200-191008-10	10	★	75	800	273.60	121.60	2.4173	1.7003	1.7007	1.7005	0.7906	2.6633	99.38
X200-191008-11	11		75	800	218.88	97.28	2.3707	1.6607	1.6607	1.6608	0.7906	2.6370	98.40
X200-191008-12	12		75	800	182.40	81.07	2.3148	1.6173	1.6175	1.6176	0.7905	2.6214	97.81
X200-191008-13	13		75	800	156.34	69.49	2.3261	1.6255	1.6260	1.6257	0.7905	2.6227	97.86
X200-191008-14	14	■	75	800	136.80	60.80	2.3277	1.6266	1.6265	1.6266	0.7905	2.6215	97.82
X200-191008-15	15		75	850	290.70	129.20	2.4080	1.6940	1.6939	1.6938	0.7904	2.6625	99.35
X200-191008-16	16		75	850	232.56	103.36	2.3317	1.6319	1.6323	1.6325	0.7904	2.6320	98.21
X200-191008-17A	17A		75	850	193.80	86.13	2.2978	1.6058	1.6058	1.6057	0.7904	2.6215	97.82
X200-191008-17B	17B		75	850	193.80	86.13	2.3111	1.6192	1.6195	1.6198	0.7903	2.6382	98.44
X200-191008-18	18		75	850	166.11	73.83	2.3345	1.6323	1.6322	1.6323	0.7903	2.6244	97.93
X200-191008-19	19	▲	75	800	307.80	136.80	2.4018	1.6899	1.6899	1.6900	0.7902	2.6634	99.38
X200-191008-20	20		75	900	246.24	109.44	2.3560	1.6512	1.6515	1.6516	0.7902	2.6396	98.49
X200-191008-21	21		75	900	205.20	91.20	2.3443	1.6407	1.6408	1.6406	0.7902	2.6300	98.13
X200-191008-22	22		75	900	175.89	78.17	2.3583	1.6521	1.6518	1.6519	0.7901	2.6352	98.33
X200-191008-23	23		75	900	153.90	68.40	2.3599	1.6546	1.6548	1.6552	0.7901	2.6418	98.58
X200-191008-24	24	★	75	1000	273.60	121.60	2.4215	1.7042	1.7044	1.7048	0.7901	2.6653	99.45
X200-191008-25	25		75	1000	228.00	101.33	2.3880	1.6782	1.6786	1.6786	0.7900	2.6561	99.11
X200-191008-26	26		75	1000	195.43	86.86	2.3688	1.6632	1.6635	1.6634	0.7900	2.6499	98.88
X200-191008-27	27	▲	75	1000	171.00	76.00	2.3656	1.6626	1.6622	1.6627	0.7900	2.6550	99.07
X200-191008-28	28	▲	75	1000	152.00	67.56	2.3622	1.6603	1.6607	1.6608	0.7899	2.6568	99.13
X200-191008-29A	29A		100	75	171.00	57.00	2.3556	1.6532	1.6533	1.6532	0.7899	2.6463	98.74
X200-191008-29B	29B		100	75	171.00	57.00	2.3679	1.6640	1.6638	1.6645	0.7899	2.6546	99.05
X200-191008-30A	30A		100	85	193.80	64.60	2.3636	1.6620	1.6623	1.6624	0.7898	2.6589	99.21
X200-191008-30B	30B	●	100	85	193.80	64.60	2.3752	1.6716	1.6714	1.6713	0.7898	2.6627	99.35

MASSE VOLUMIQUE DU FLUIDE DE MESURE	MESURE	Masse sèche [g]	MASSE IMERGEE [g]				V [cm ³]	ρ _{air} [g/cm ³]	ρ _{fluide} [g/cm ³]
			Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne			
	DEBUT	30.5063	22.6147	22.6154	22.62	22.6153	9.9918	0.0012	0.7910
	FIN	30.5064	22.6347	22.6236	22.62	22.6270	9.9918	0.0012	0.7898

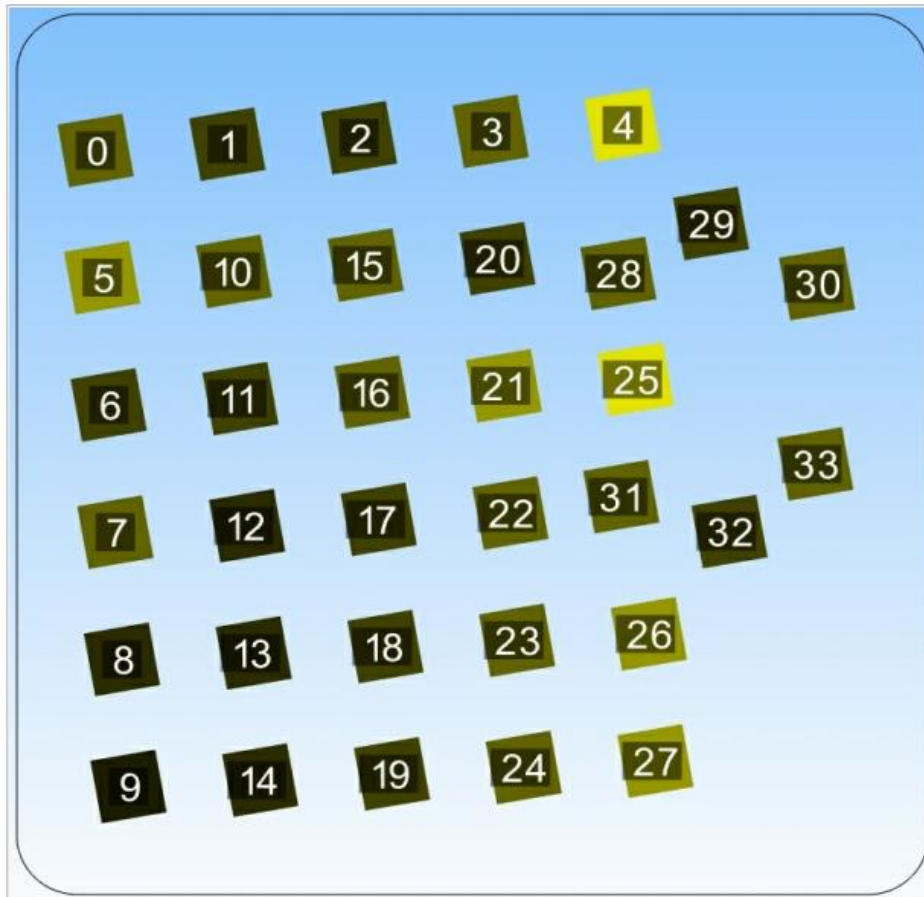
10/01/2020

X200-191008.FAB3.htm



BDSYSTEMS™

Rapport : X200-191008.FAB3



Résumé

Nombre d'objets tranchés	34
Base utilisée	ProX200_PS2585-18_A04.db
Temps total de fabrication	5h : 44min : 33s
Temps unitaire de mise en couche	10 s
Estimation du volume fritté (mm ³)	33966
Estimation de la hauteur de poudre (piston d'alimentation, mm)	29.9

10/01/2020

X200-191008.FAB3.htm

id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)
0	Cube (#1)(70-600)	0h : 14min :44s	0.00	10.00	999
1	Cube (#2)(70-800)	0h : 11min :12s	0.00	10.00	999
2	Cube (#3)(70-1000)	0h : 9min :25s	0.00	10.00	999
3	Cube (#4)(70-1200)	0h : 7min :52s	0.00	10.00	999
4	Cube (#5)(70-1400)	0h : 7min :5s	0.00	10.00	999
5	Cube (#6)(75-600)	0h : 14min :49s	0.00	10.00	999
6	Cube (#7)(80-800)	0h : 11min :18s	0.00	10.00	999
7	Cube (#8)(85-800)	0h : 11min :13s	0.00	10.00	999
8	Cube (#9)(90-800)	0h : 11min :14s	0.00	10.00	999
9	Cube (#10)(100-1000)	0h : 9min :23s	0.00	10.00	999
10	Cube (#11)(75-800)	0h : 11min :11s	0.00	10.00	999
11	Cube (#12)(80-1000)	0h : 9min :20s	0.00	10.00	999
12	Cube (#13)(85-1000)	0h : 9min :23s	0.00	10.00	999
13	Cube (#14)(90-1000)	0h : 9min :17s	0.00	10.00	999
14	Cube (#15)(100-1200)	0h : 7min :53s	0.00	10.00	999
15	Cube (#16)(75-1000)	0h : 9min :19s	0.00	10.00	999
16	Cube (#17)(80-1200)	0h : 7min :52s	0.00	10.00	999
17	Cube (#18)(85-1200)	0h : 7min :51s	0.00	10.00	999
18	Cube (#19)(90-1200)	0h : 7min :56s	0.00	10.00	999
19	Cube (#20)(100-1400)	0h : 7min :4s	0.00	10.00	999
20	Cube (#21)(75-1200)	0h : 7min :57s	0.00	10.00	999
21	Cube (#22)(80-1400)	0h : 7min :4s	0.00	10.00	999
22	Cube (#23)(85-1400)	0h : 6min :57s	0.00	10.00	999
23	Cube (#24)(90-1400)	0h : 6min :59s	0.00	10.00	999
24	Cube (#25)(100-1600)	0h : 6min :24s	0.00	10.00	999
25	Cube (#27)(80-1600)	0h : 6min :18s	0.00	10.00	999
26	Cube (#29)(90-1600)	0h : 6min :23s	0.00	10.00	999
27	Cube (#30)(100-1800)	0h : 5min :46s	0.00	10.00	999
28	Cube (#26)(75-1200-h100)	0h : 6min :0s	0.00	10.00	999
29	Cube (#28)(75-1200)	0h : 7min :52s	0.00	10.00	999
30	Cube (#31)(75-1200-h100)	0h : 6min :2s	0.00	10.00	999
31	Cube (#32)(85-1200-h100)	0h : 5min :57s	0.00	10.00	999
32	Cube (#33)(85-1200)	0h : 8min :1s	0.00	10.00	999
33	Cube (#34)(85-1200-h100)	0h : 6min :2s	0.00	10.00	999
id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)

D. Annexe 4 : Batch X200-191021

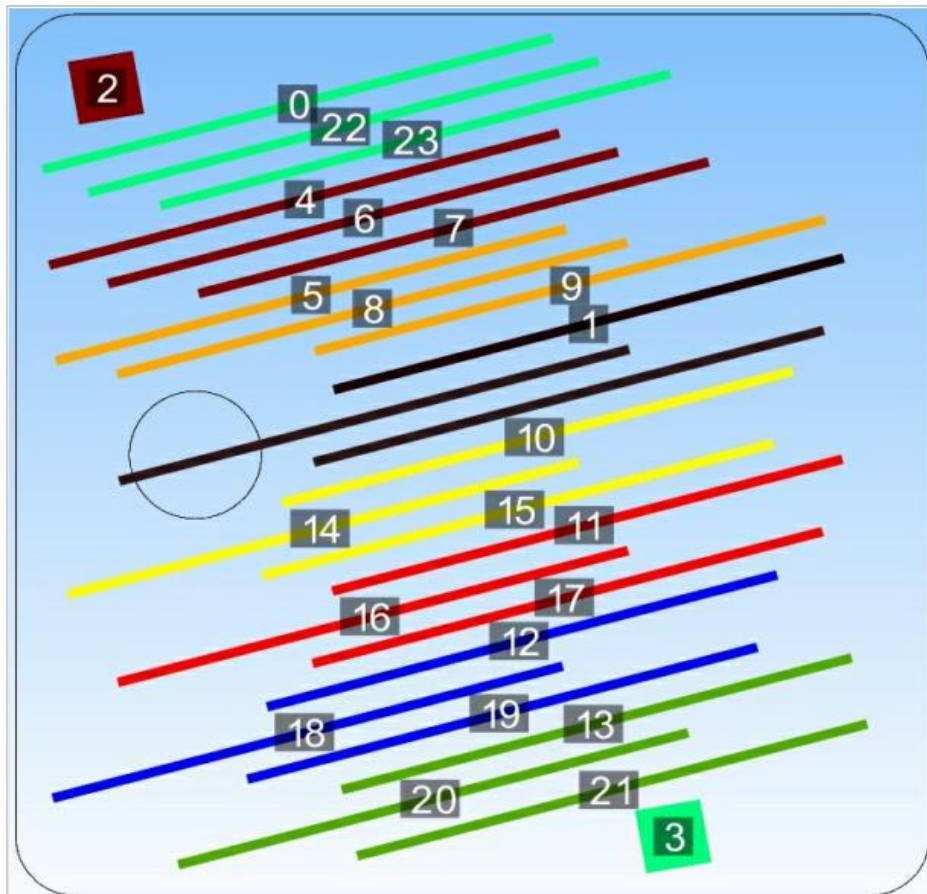
DEUXIEME BATCH - X200-191021								
# ECHANTILLON	#	Réf BATCH 1	Forme	h	P/Pmax [%]	Vs [mm/s]	TED [J/m]	VED [J/mm ³]
				[μm]				
PLAQUE POUR USINAGE EPROUVETTES DE TRACTION + 2 CUBES								
X200-191021-1	1	●	Plaque	75	75	600	342.00	152.00
X200-191021-2	2	●	Plaque	75	75	600	342.00	152.00
X200-191021-3	3	●	Plaque	75	75	600	342.00	152.00
X200-191021-4	4	■	Plaque	75	75	1200	171.00	76.00
X200-191021-5	5	■	Plaque	75	75	1200	171.00	76.00
X200-191021-6	6	■	Plaque	75	75	1200	171.00	76.00
X200-191021-7	7	★	Plaque	75	80	800	273.60	121.60
X200-191021-8	8	★	Plaque	75	80	800	273.60	121.60
X200-191021-9	9	★	Plaque	75	80	800	273.60	121.60
X200-191021-10	10	■	Plaque	75	80	1600	136.80	60.80
X200-191021-11	11	■	Plaque	75	80	1600	136.80	60.80
X200-191021-12	12	■	Plaque	75	80	1600	136.80	60.80
X200-191021-13	13	▲	Plaque	75	90	800	307.80	136.80
X200-191021-14	14	▲	Plaque	75	90	800	307.80	136.80
X200-191021-15	15	▲	Plaque	75	90	800	307.80	136.80
X200-191021-16	16	★	Plaque	75	100	1000	273.60	121.60
X200-191021-17	17	★	Plaque	75	100	1000	273.60	121.60
X200-191021-18	18	★	Plaque	75	100	1000	273.60	121.60
X200-191021-19	19	▲	Plaque	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191021-20	20	▲	Plaque	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191021-21	21	▲	Plaque	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191021-22	22	●	Plaque	100	85	1200	193.80	64.60
X200-191021-23	23	●	Plaque	100	85	1200	193.80	64.60
X200-191021-24	24	●	Plaque	100	85	1200	193.80	64.60
X200-191021-25	25	★	Cube	75	100	1000	273.60	121.60
X200-191021-26	26	●	Cube	100	85	1200	193.80	64.60

10/01/2020

X200-191021.FAB3.htm



Rapport : X200-191021.FAB3



Résumé

Nombre d'objets tranchés	24 (2 clones)
Base utilisée	ProX200_PS2585-18_A04.db
Temps total de fabrication	7h : 33min : 9s
Temps unitaire de mise en couche	10 s
Estimation du volume fritté (mm ³)	5374
Estimation de la hauteur de poudre (piston d'alimentation, mm)	36

10/01/2020

X200-191021.FAB3.htm

id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)
0	Cube (#1)(P85-v1200-h100-t30)	0h : 10min :34s	0.00	12.00	219
1	Cube (#2)(P90-v800-h75-t30)(2 clones)	0h : 18min :35s	0.00	12.00	219
2	Cube (#3)(P100-v1000-h75-t30)	0h : 9min :19s	0.00	10.00	59
3	Cube (#4)(P85-v1200-h100-t30)	0h : 5min :58s	0.00	10.00	59
4	Cube (#5)(P100-v1000-h75-t30)	0h : 15min :58s	0.00	12.00	219
5	Cube (#6)(P80-v800-h75-t30)	0h : 18min :40s	0.00	12.00	219
6	Cube (#7)(P100-v1000-h75-t30)	0h : 15min :55s	0.00	12.00	219
7	Cube (#8)(P100-v1000-h75-t30)	0h : 15min :51s	0.00	12.00	219
8	Cube (#9)(P80-v800-h75-t30)	0h : 18min :36s	0.00	12.00	219
9	Cube (#10)(P80-v800-h75-t30)	0h : 18min :34s	0.00	12.00	219
10	Cube (#11)(P75-v600-h75-t30)	0h : 23min :38s	0.00	12.00	219
11	Cube (#12)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 10min :51s	0.00	12.00	219
12	Cube (#13)(P80-v1600-h75-t30)	0h : 11min :41s	0.00	12.00	219
13	Cube (#14)(P75-v1200-h75-t30)	0h : 13min :46s	0.00	12.00	219
14	Cube (#15)(P75-v600-h75-t30)	0h : 23min :45s	0.00	12.00	219
15	Cube (#16)(P75-v600-h75-t30)	0h : 23min :38s	0.00	12.00	219
16	Cube (#17)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 10min :54s	0.00	12.00	219
17	Cube (#18)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 10min :54s	0.00	12.00	219
18	Cube (#19)(P80-v1600-h75-t30)	0h : 11min :48s	0.00	12.00	219
19	Cube (#20)(P80-v1600-h75-t30)	0h : 11min :40s	0.00	12.00	219
20	Cube (#21)(P75-v1200-h75-t30)	0h : 13min :53s	0.00	12.00	219
21	Cube (#22)(P75-v1200-h75-t30)	0h : 13min :51s	0.00	12.00	219
22	Cube (#23)(P85-v1200-h100-t30)	0h : 10min :29s	0.00	12.00	219
23	Cube (#24)(P85-v1200-h100-t30)	0h : 10min :31s	0.00	12.00	219
id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)

E. Annexe 5 : Batch X200-191022

TROISIEME BATCH - X200-191022								
# ECHANTILLON	#	Réf BATCH 1	Forme	h	P/Pmax [%]	Vs [mm/s]	TED [J/m]	VED [J/mm ³]
				[μm]				
PLAQUE POUR USINAGE EPROUVETTES DE TRACTION								
X200-191022-1	1	●	Plaque	75	75	600	342.00	152.00
X200-191022-2	2	●	Plaque	75	75	600	342.00	152.00
X200-191022-3	3	●	Plaque	75	75	600	342.00	152.00
X200-191022-4	4	■	Plaque	75	75	1200	171.00	76.00
X200-191022-5	5	■	Plaque	75	75	1200	171.00	76.00
X200-191022-6	6	■	Plaque	75	75	1200	171.00	76.00
X200-191022-7	7	★	Plaque	75	80	800	273.60	121.60
X200-191022-8	8	★	Plaque	75	80	800	273.60	121.60
X200-191022-9	9	★	Plaque	75	80	800	273.60	121.60
X200-191022-10	10	■	Plaque	75	80	1600	136.80	60.80
X200-191022-11	11	■	Plaque	75	80	1600	136.80	60.80
X200-191022-12	12	■	Plaque	75	80	1600	136.80	60.80
X200-191022-13	13	▲	Plaque	75	90	800	307.80	136.80
X200-191022-14	14	▲	Plaque	75	90	800	307.80	136.80
X200-191022-15	15	▲	Plaque	75	90	800	307.80	136.80
X200-191022-16	16	★	Plaque	75	100	1000	273.60	121.60
X200-191022-17	17	★	Plaque	75	100	1000	273.60	121.60
X200-191022-18	18	★	Plaque	75	100	1000	273.60	121.60
X200-191022-19	19	▲	Plaque	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191022-20	20	▲	Plaque	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191022-21	21	▲	Plaque	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191022-22	22	●	Plaque	100	85	1200	193.80	64.60
X200-191022-23	23	●	Plaque	100	85	1200	193.80	64.60
X200-191022-24	24	●	Plaque	100	85	1200	193.80	64.60

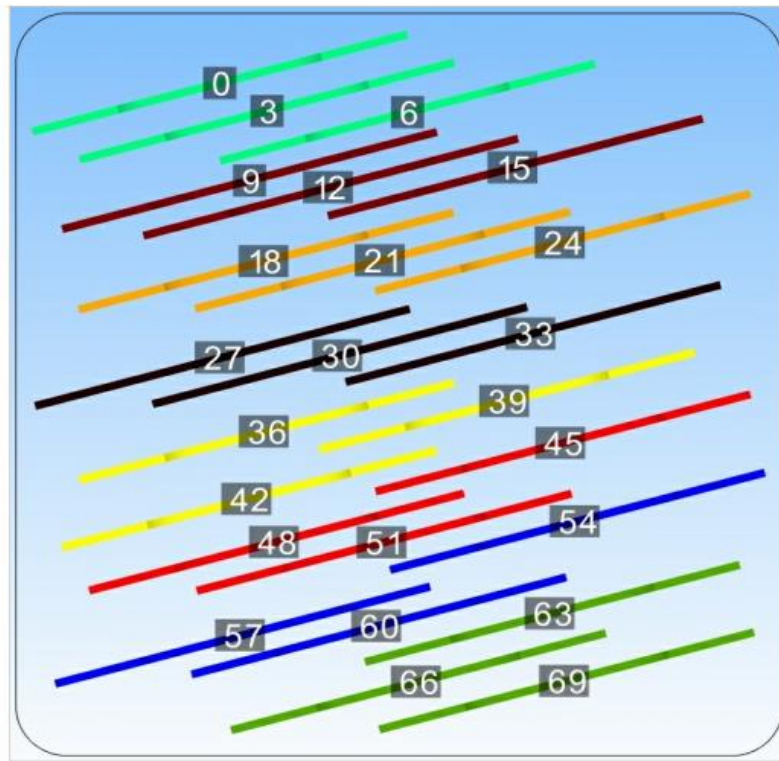
10/01/2020

X200-191022.FAB3.htm



3D SYSTEMS

Rapport : X200-191022.FAB3



Résumé

Nombre d'objets tranchés	24
Base utilisée	ProX200_PS2585-18_A04.db
Temps total de fabrication	5h : 27min : 45s
Temps unitaire de mise en couche	10 s
Estimation du volume fritté (mm ³)	21720
Estimation de la hauteur de poudre (piston d'alimentation, mm)	33

file:///X:/Imprimantes 3D System/Batch/X200-191022 éprouvettes traction TFE Manon/X200-191022_folder/X200-191022.FAB3.htm

1/3

10/01/2020

X200-191022.FAB3.htm

id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm³)
0	Eprouvette traction plate ep 1(P85-v1200-h100-t30)	0h : 6min :22s	1.00	11.00	845
1	Eprouvette traction plate ep 1_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
2	Eprouvette traction plate ep 1_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 1min :0s	0.00	3.10	38
3	Eprouvette traction plate ep 1 (#1)(P85-v1200-h100-t30)	0h : 6min :21s	1.00	11.00	845
4	Eprouvette traction plate ep 1 (#1)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
5	Eprouvette traction plate ep 1 (#1)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
6	Eprouvette traction plate ep 1 (#2)(P85-v1200-h100-t30)	0h : 6min :19s	1.00	11.00	845
7	Eprouvette traction plate ep 1 (#2)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
8	Eprouvette traction plate ep 1 (#2)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
9	Eprouvette traction plate ep 1 (#3)(P100-v1000-h75-t30)	0h : 9min :28s	1.00	11.00	845
10	Eprouvette traction plate ep 1 (#3)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
11	Eprouvette traction plate ep 1 (#3)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
12	Eprouvette traction plate ep 1 (#4)(P100-v1000-h75-t30)	0h : 9min :23s	1.00	11.00	845
13	Eprouvette traction plate ep 1 (#4)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
14	Eprouvette traction plate ep 1 (#4)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
15	Eprouvette traction plate ep 1 (#5)(P100-v1000-h75-t30)	0h : 9min :25s	1.00	11.00	845
16	Eprouvette traction plate ep 1 (#5)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
17	Eprouvette traction plate ep 1 (#5)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
18	Eprouvette traction plate ep 1 (#6)(P80-v800-h75-t30)	0h : 11min :3s	1.00	11.00	845
19	Eprouvette traction plate ep 1 (#6)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
20	Eprouvette traction plate ep 1 (#6)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
21	Eprouvette traction plate ep 1 (#7)(P80-v800-h75-t30)	0h : 11min :6s	1.00	11.00	845
22	Eprouvette traction plate ep 1 (#7)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
23	Eprouvette traction plate ep 1 (#7)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
24	Eprouvette traction plate ep 1 (#8)(P80-v800-h75-t30)	0h : 11min :3s	1.00	11.00	845
25	Eprouvette traction plate ep 1 (#8)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
26	Eprouvette traction plate ep 1 (#8)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
27	Eprouvette traction plate ep 1 (#9)(P90-v800-h75-t30)	0h : 11min :3s	1.00	11.00	845
28	Eprouvette traction plate ep 1 (#9)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
29	Eprouvette traction plate ep 1 (#9)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
30	Eprouvette traction plate ep 1 (#10)(P90-v800-h75-t30)	0h : 11min :1s	1.00	11.00	845
31	Eprouvette traction plate ep 1 (#10)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
32	Eprouvette traction plate ep 1 (#10)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
33	Eprouvette traction plate ep 1 (#11)(P90-v800-h75-t30)	0h : 11min :4s	1.00	11.00	845
34	Eprouvette traction plate ep 1 (#11)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
35	Eprouvette traction plate ep 1 (#11)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
36	Eprouvette traction plate ep 1 (#12)(P75-v600-h75-t30)	0h : 14min :8s	1.00	11.00	845
37	Eprouvette traction plate ep 1 (#12)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
38	Eprouvette traction plate ep 1 (#12)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
39	Eprouvette traction plate ep 1 (#13)(P75-v600-h75-t30)	0h : 14min :5s	1.00	11.00	845
40	Eprouvette traction plate ep 1 (#13)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
41	Eprouvette traction plate ep 1 (#13)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
42	Eprouvette traction plate ep 1 (#14)(P75-v600-h75-t30)	0h : 14min :8s	1.00	11.00	845

id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm³)
----	-------	-------------------	-----------	-----------	---------------------

file:///X:/Imprimantes 3D System/Batch/X200-191022 éprouvettes traction TFE Manon/X200-191022_folder/X200-191022.FAB3.htm

2/3

10/01/2020

X200-191022.FAB3.htm

id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)
43	Eprouvette traction plate ep 1 (#14)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
44	Eprouvette traction plate ep 1 (#14)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
45	Eprouvette traction plate ep 1 (#15)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 6min :26s	1.00	11.00	845
46	Eprouvette traction plate ep 1 (#15)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
47	Eprouvette traction plate ep 1 (#15)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
48	Eprouvette traction plate ep 1 (#16)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 6min :29s	1.00	11.00	845
49	Eprouvette traction plate ep 1 (#16)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
50	Eprouvette traction plate ep 1 (#16)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
51	Eprouvette traction plate ep 1 (#17)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 6min :30s	1.00	11.00	845
52	Eprouvette traction plate ep 1 (#17)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :54s	0.00	3.10	22
53	Eprouvette traction plate ep 1 (#17)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
54	Eprouvette traction plate ep 1 (#18)(P80-v1600-h75-t30)	0h : 7min :0s	1.00	11.00	845
55	Eprouvette traction plate ep 1 (#18)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
56	Eprouvette traction plate ep 1 (#18)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
57	Eprouvette traction plate ep 1 (#19)(P80-v1600-h75-t30)	0h : 7min :4s	1.00	11.00	845
58	Eprouvette traction plate ep 1 (#19)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
59	Eprouvette traction plate ep 1 (#19)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 1min :0s	0.00	3.10	38
60	Eprouvette traction plate ep 1 (#20)(P80-v1600-h75-t30)	0h : 6min :59s	1.00	11.00	845
61	Eprouvette traction plate ep 1 (#20)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
62	Eprouvette traction plate ep 1 (#20)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
63	Eprouvette traction plate ep 1 (#21)(P75-v1200-h75-t30)	0h : 8min :12s	1.00	11.00	845
64	Eprouvette traction plate ep 1 (#21)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
65	Eprouvette traction plate ep 1 (#21)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
66	Eprouvette traction plate ep 1 (#22)(P75-v1200-h75-t30)	0h : 8min :14s	1.00	11.00	845
67	Eprouvette traction plate ep 1 (#22)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
68	Eprouvette traction plate ep 1 (#22)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
69	Eprouvette traction plate ep 1 (#23)(P75-v1200-h75-t30)	0h : 8min :13s	1.00	11.00	845
70	Eprouvette traction plate ep 1 (#23)_Support - Blade(Support - Blade)	0h : 0min :55s	0.00	3.10	22
71	Eprouvette traction plate ep 1 (#23)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 0min :59s	0.00	3.10	38
id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)

F. Annexe 6 : Batch X200-191205

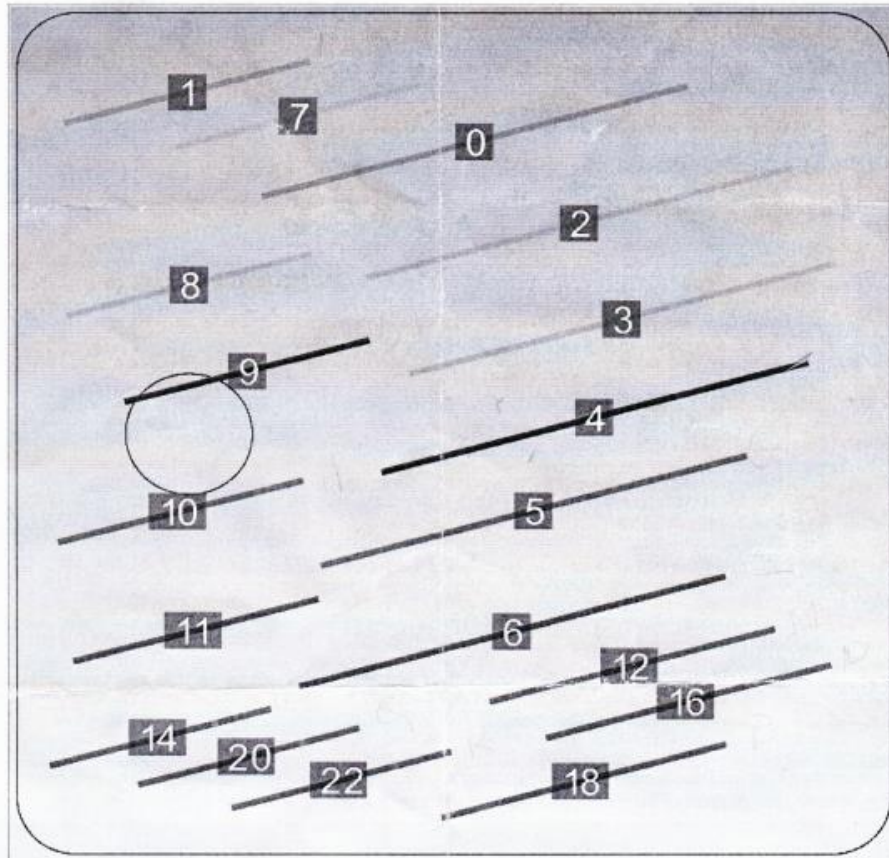
QUATRIEME BATCH - X200-191205								
# ECHANTILLON	#	Réf BATCH 1	Orientation Eprouvette	h [μm]	P/Pmax [%]	Vs [mm/s]	TED [J/m]	VED [J/mm ³]
PLAQUE POUR USINAGE EPROUVETTES DE TRACTION								
X200-191205-A	1-4	●	45°	75	75	600	342.00	152.00
X200-191205-B	5-8	●	verticale	75	75	600	342.00	152.00
X200-191205-C	9-12	■	45°	75	75	1200	171.00	76.00
X200-191205-D	13-16	■	verticale	75	75	1200	171.00	76.00
X200-191205-E	17-20	●	45°	100	75	1200	171.00	57.00
X200-191205-F	21-24	●	verticale	100	75	1200	171.00	57.00
X200-191205-G	25-28	■	45°	75	80	1600	136.80	60.80
X200-191205-H	29-32	■	verticale	75	80	1600	136.80	60.80
X200-191205-I	33-36	▲	45°	75	90	800	307.80	136.80
X200-191205-J	37-40	▲	verticale	75	90	800	307.80	136.80
X200-191205-K	41-44	▲	45°	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191205-L	45-48	▲	verticale	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191205-M	49	▲	45°	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191205-N	50	▲	45°	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191205-O	51	▲	45°	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191205-P	52	▲	45°	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191205-Q	53	▲	45°	75	100	1800	152.00	67.56
X200-191205-R	54	▲	45°	75	100	1800	152.00	67.56

06/12/2019

X200-191205.FAB3.htm



Rapport : X200-191205.FAB3



Résumé

Nombre d'objets tranchés	18
Base utilisée	ProX200_PS2585-18_A04.db
Temps total de fabrication	11h : 20min : 43s
Temps unitaire de mise en couche	10 s
Estimation du volume fritté (mm ³)	8825
Estimation de la hauteur de poudre (piston d'alimentation, mm)	150

06/12/2019

X200-191205.FAB3.htm

id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)
0	Cube (#2)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 30min :41s	0.00	50.00	724
1	Cube (#1)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 17min :44s	0.00	50.00	418
2	Cube (#3)(P75-v1200-h100-t30)	0h : 28min :44s	0.00	50.00	723
3	Cube (#4)(P75-v1200-h75-t30)	0h : 37min :12s	0.00	50.00	724
4	Cube (#5)(P75-v600-h75-t30)	1h : 2min :8s	0.00	50.00	724
5	Cube (#6)(P80-v1600-h75-t30)	0h : 32min :41s	0.00	50.00	724
6	Cube (#7)(P90-v800-h75-t30)	0h : 49min :27s	0.00	50.00	724
7	Cube (#8)(P75-v1200-h100-t30)	0h : 16min :9s	0.00	50.00	418
8	Cube (#9)(P75-v1200-h75-t30)	0h : 21min :38s	0.00	50.00	418
9	Cube (#10)(P75-v600-h75-t30)	0h : 35min :48s	0.00	50.00	418
10	Cube (#11)(P80-v1600-h75-t30)	0h : 18min :26s	0.00	50.00	418
11	Cube (#12)(P90-v800-h75-t30)	0h : 28min :22s	0.00	50.00	418
12	Cube (#13)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 3min :22s	3.00	49.67	85
13	Cube (#13)_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 0min :54s	0.00	15.43	135
14	EPROUVETTES_45X6X1(P100-v1800-h75-t30)	0h : 2min :16s	13.00	49.06	228
15	EPROUVETTES_45X6X1_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 1min :26s	0.00	21.49	210
16	Cube (#14)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 3min :25s	3.00	49.67	85
17	Cube (#14)_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 0min :55s	0.00	15.43	135
18	Cube (#15)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 3min :26s	3.00	49.67	85
19	Cube (#15)_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 0min :55s	0.00	15.43	135
20	EPROUVETTES_45X6X1 (#1)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 2min :14s	13.00	49.06	228
21	EPROUVETTES_45X6X1 (#1)_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 1min :22s	0.00	21.49	210
22	EPROUVETTES_45X6X1 (#2)(P100-v1800-h75-t30)	0h : 2min :14s	13.00	49.06	228
23	EPROUVETTES_45X6X1 (#2)_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 1min :24s	0.00	21.49	210
id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)

G. Annexe 7 : BATCH X200-191212

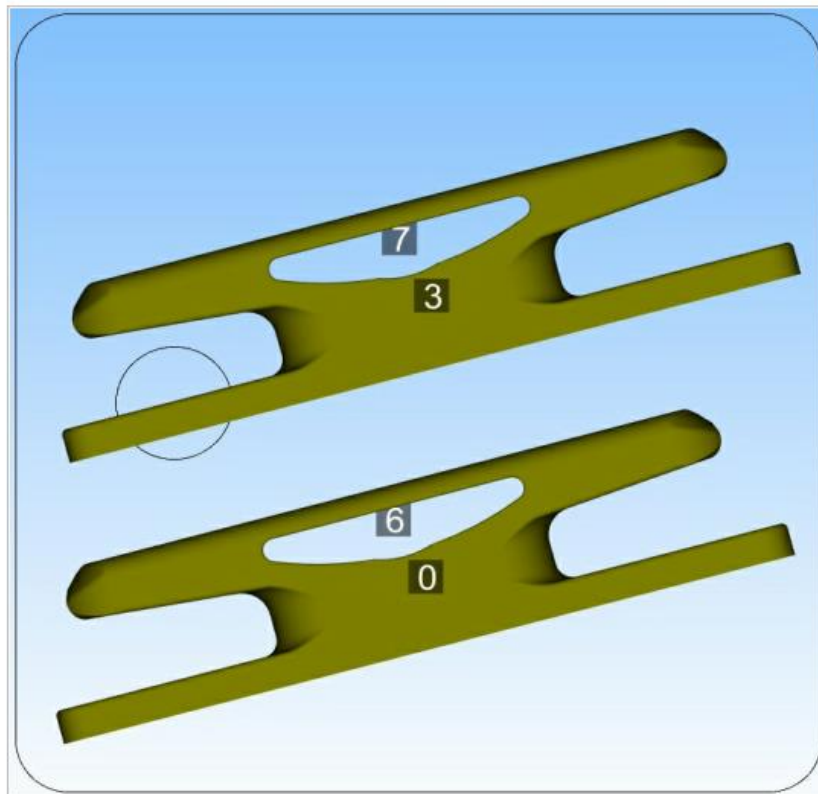
10/01/2020

X200-191212.FAB3.htm



3DSYSTEMS

Rapport : X200-191212.FAB3



Résumé

Nombre d'objets tranchés	4
Base utilisée	ProX200_PS2585-18_A04.db
Temps total de fabrication	21h : 47min : 18s
Temps unitaire de mise en couche	10 s
Estimation du volume fritté (mm ³)	87298
Estimation de la hauteur de poudre (piston d'alimentation, mm)	60.9

10/01/2020

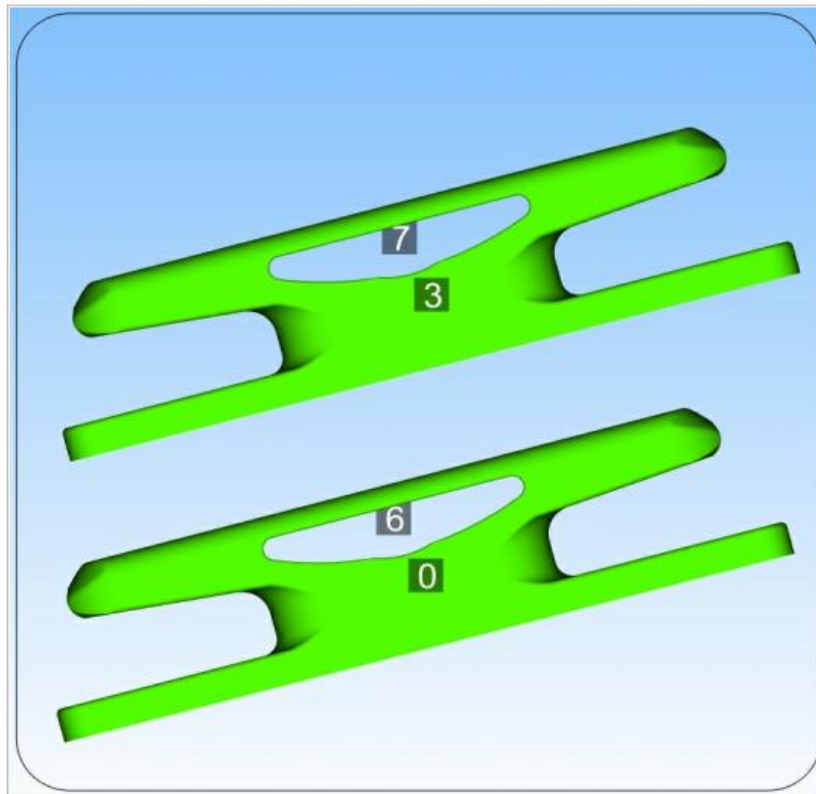
X200-191212.FAB3.htm

id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)
0	TAQUET_PIECE_BULK(Bulk-75-600)	9h : 38min :21s	0.30	20.30	40034
1	TAQUET_PIECE_BULK_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 1min :56s	0.00	0.85	515
2	TAQUET_PIECE_BULK_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 3min :8s	0.00	13.48	130
3	TAQUET_PIECE_BULK (#1)(Bulk-75-600)	9h : 38min :21s	0.30	20.30	40034
4	TAQUET_PIECE_BULK (#1)_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 1min :56s	0.00	0.85	515
5	TAQUET_PIECE_BULK (#1)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 3min :8s	0.00	13.48	130
6	TAQUET_PIECES_LATICE.stl (#1)(Lattice-100-1800)	0h : 13min :49s	2.30	18.30	2970
7	TAQUET_PIECES_LATICE.stl (#2)(Lattice-100-1800)	0h : 13min :49s	2.30	18.30	2970
id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)

H. Annexe 8 : BATCH X200-191218

10/01/2020

X200-191218.FAB3.htm

**Rapport : X200-191218.FAB3****Résumé**

Nombre d'objets tranchés	4
Base utilisée	ProX200_PS2585-18_A04.db
Temps total de fabrication	10h : 17min : 39s
Temps unitaire de mise en couche	10 s
Estimation du volume fritté (mm ³)	87298
Estimation de la hauteur de poudre (piston d'alimentation, mm)	60.9

10/01/2020

X200-191218.FAB3.htm

id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)
0	TAQUET_PIECE_BULK(Bulk-100-1800)	3h : 53min :32s	0.30	20.30	40034
1	TAQUET_PIECE_BULK_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 1min :56s	0.00	0.85	515
2	TAQUET_PIECE_BULK_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 3min :8s	0.00	13.48	130
3	TAQUET_PIECE_BULK (#1)(Bulk-100-1800)	3h : 53min :31s	0.30	20.30	40034
4	TAQUET_PIECE_BULK (#1)_Support - Filled(Support - Filled)	0h : 1min :56s	0.00	0.85	515
5	TAQUET_PIECE_BULK (#1)_Support - Grid(Support - Grid)	0h : 3min :8s	0.00	13.48	130
6	TAQUET_PIECES_LATICE.stl (#1)(Lattice-100-1800)	0h : 13min :49s	2.30	18.30	2970
7	TAQUET_PIECES_LATICE.stl (#2)(Lattice-100-1800)	0h : 13min :49s	2.30	18.30	2970
id	Objet	Temps de frittage	Zmin (mm)	Zmax (mm)	Volume estimé (mm ³)

I. Annexe 9 : Propriétés Mécaniques

1) Eprouvettes HORIZONTALES

ECH	Dir	VED [J/mm ³]	Limite élastique Re0.2 [Mpa]						Re0.2 MOYEN	Re0.2 ECART TYPE
			172	174	174	182	197	204		
●	HOR	152	172	174	174	182	197	204	184	14
■	HOR	76	209	212	216	220	222	225	217	6
★	HOR	122	170	172	173	182	198	209	184	16
■	HOR	61	223	225	226	231	237	244	231	8
▲	HOR	137	129	139	139	141	142	149	140	6
★	HOR	122	122	125	127	144	154	165	140	18
▲	HOR	68	219	224	225	226	229	232	226	4
●	HOR	65	201	200	205	208	212	215	207	6

ECH	Dir	Contrainte rupture Rm [Mpa]			Rm MOYEN	Rm ECART TYPE
		349	340	320		
●	HOR	349	340	320	336	15
■	HOR	366	361	372	366	6
★	HOR	342	319	360	340	21
■	HOR	372	375	395	381	13
▲	HOR	266	260	280	269	10
★	HOR	275	286	310	290	18
▲	HOR	379	382	376	379	3
●	HOR	359	369	367	365	5

ECH	Dir	VED [J/mm ³]	Elongation plastique rupture Am [%]			Am MOYEN	Am ECART TYPE	Elongation totale rupture A [%]			A MOYEN	A ECART TYPE
			5.5	5.8	6.8			6.2	6.4	7.4		
●	HOR	152	5.5	5.8	6.8	6.0	0.7	6.2	6.4	7.4	6.7	0.6
■	HOR	76	5.5	5.5	6.3	5.8	0.5	6.1	6.1	7.0	6.4	0.5
★	HOR	122	6.0	6.7	7.1	6.6	0.6	6.6	7.3	7.8	7.2	0.6
■	HOR	61	5.9	5.9	6.9	6.2	0.6	6.5	6.6	7.6	6.9	0.6
▲	HOR	137	5.4	5.3	6.0	5.6	0.4	5.8	5.8	6.5	6.0	0.4
★	HOR	122	5.3	5.5	6.8	5.9	0.8	5.8	6.0	7.3	6.4	0.8
▲	HOR	68	6.5	6.4	6.8	6.6	0.2	7.1	7.0	7.4	7.2	0.2
●	HOR	65	5.9	5.9	6.4	6.1	0.3	6.5	6.4	7.1	6.7	0.4

2) Eprouvettes à 45 ° et Verticales

ECH	Dir	VED [J/mm ³]	Limite élastique Re0.2 [Mpa]				Re0.2 MOYEN	Re0.2 ECART TYPE	Contrainte rupture Rm [Mpa]				Rm MOYEN	Rm ECART TYPE
			137	141	146	166			262	269	273	290		
●	45	152	137	141	146	166	148	13	262	269	273	290	275	12
●	VER	152	138	147	167	181	158	19	271	278	289	307	289	16
■	45	76	199	217	217	219	213	9	261	280	321	327	303	32
■	VER	76	196	198	213	220	207	12	226	296	299	300	275	36
■	45	61	210	217	221	221	217	5	305	325	348	355	336	23
■	VER	61	211	220	220	227	220	7	298	304	313	323	311	11
▲	45	137	122	123	124	124	123	1	245	249	249	251	248	3
▲	VER	137	116	124	131	151	131	15	250	258	258	275	261	11
▲	45	68	212	213	214	217	214	2	269	286	325	339	311	33
▲	VER	68	201	206	209	213	207	5	269	294	298	323	297	22
●	45	57	209	215	219	220	216	5	332	335	347	347	342	8
●	VER	57	207	215	218	219	215	5	305	325	348	355	336	23

ECH	Dir	VED [J/mm ³]	Elongation plastique rupture Am [%]				Am MOYEN	Am ECART TYPE	Elongation totale rupture A [%]				A MOYEN	A ECART TYPE
			3.99	4.13	4.48	4.51			4.62	4.71	5.07	5.10		
●	45	152	3.99	4.13	4.48	4.51	4.21	0.26	4.62	4.71	5.07	5.10	4.81	0.25
●	VER	152	2.90	4.18	4.23	4.31	3.80	0.67	3.51	4.77	4.81	4.96	4.41	0.67
■	45	76	1.63	1.66	3.25	3.36	2.22	0.96	2.18	2.19	3.89	4.01	2.79	1.02
■	VER	76	0.63	1.95	2.03	2.48	1.69	0.80	1.14	2.63	2.70	3.15	2.31	0.87
■	45	61	2.39	2.92	3.82	4.05	3.12	0.78	2.96	3.52	4.47	4.71	3.73	0.82
■	VER	61	1.70	1.87	2.48	2.54	2.04	0.43	2.30	2.48	3.11	3.19	2.66	0.45
▲	45	137	4.22	4.27	4.60	5.07	4.52	0.39	4.70	4.77	5.10	5.57	5.01	0.40
▲	VER	137	3.79	3.91	3.96	4.46	4.05	0.30	4.40	4.47	4.54	5.04	4.64	0.29
▲	45	68	1.41	1.90	3.26	4.16	2.49	1.26	1.87	2.39	3.81	4.74	3.00	1.31
▲	VER	68	1.69	1.91	2.16	3.00	2.20	0.57	2.24	2.51	2.77	3.67	2.81	0.62
●	45	57	3.67	3.86	4.40	5.04	4.19	0.62	4.31	4.48	5.01	5.68	4.82	0.62
●	VER	57	2.42	2.95	3.86	4.09	3.15	0.78	2.96	3.52	4.47	4.72	3.73	0.82

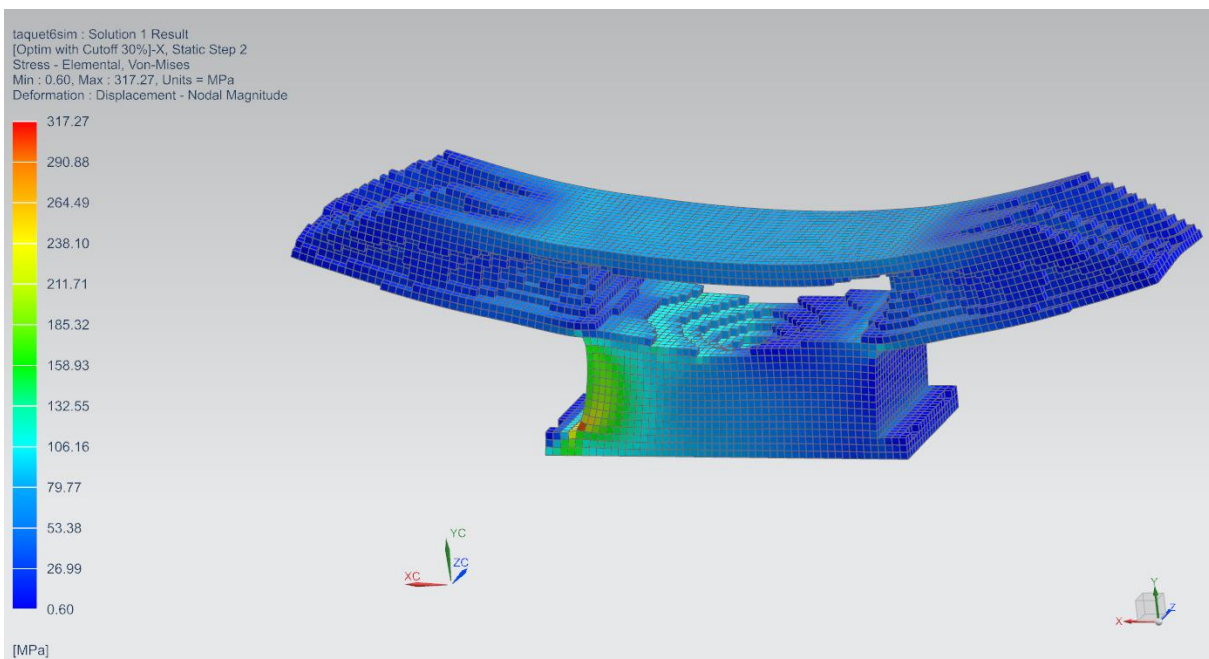
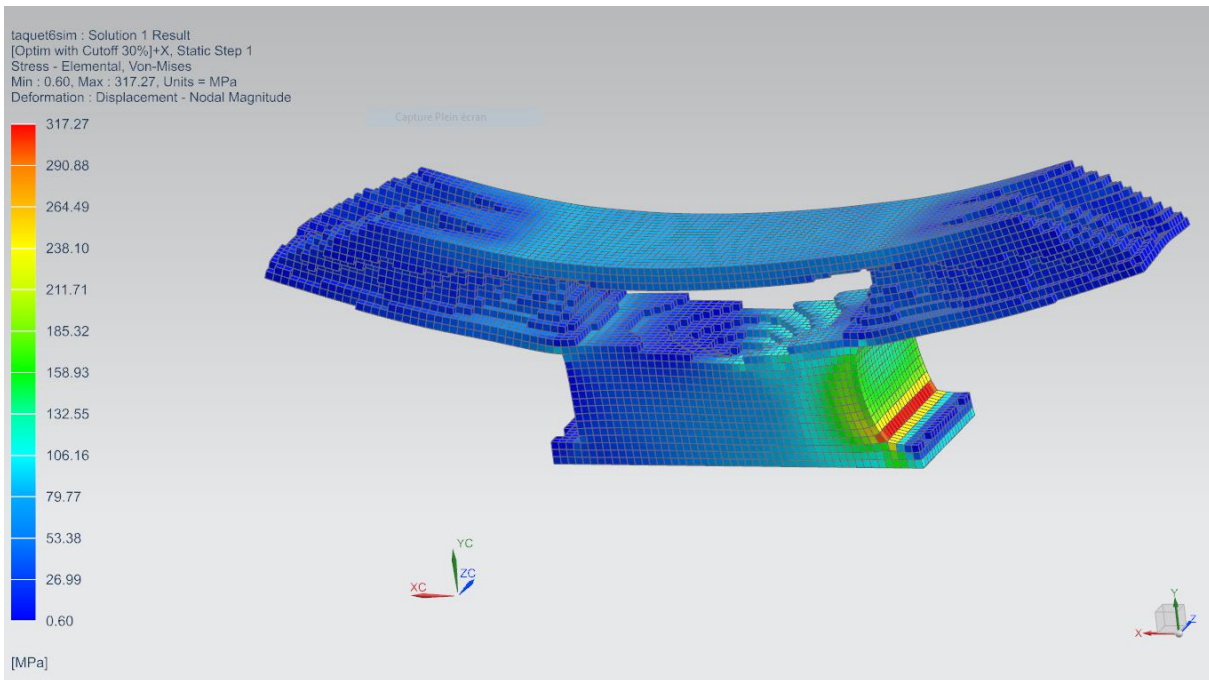
J. Annexe 10 : Comparaison entre le module de Young mesuré et réel

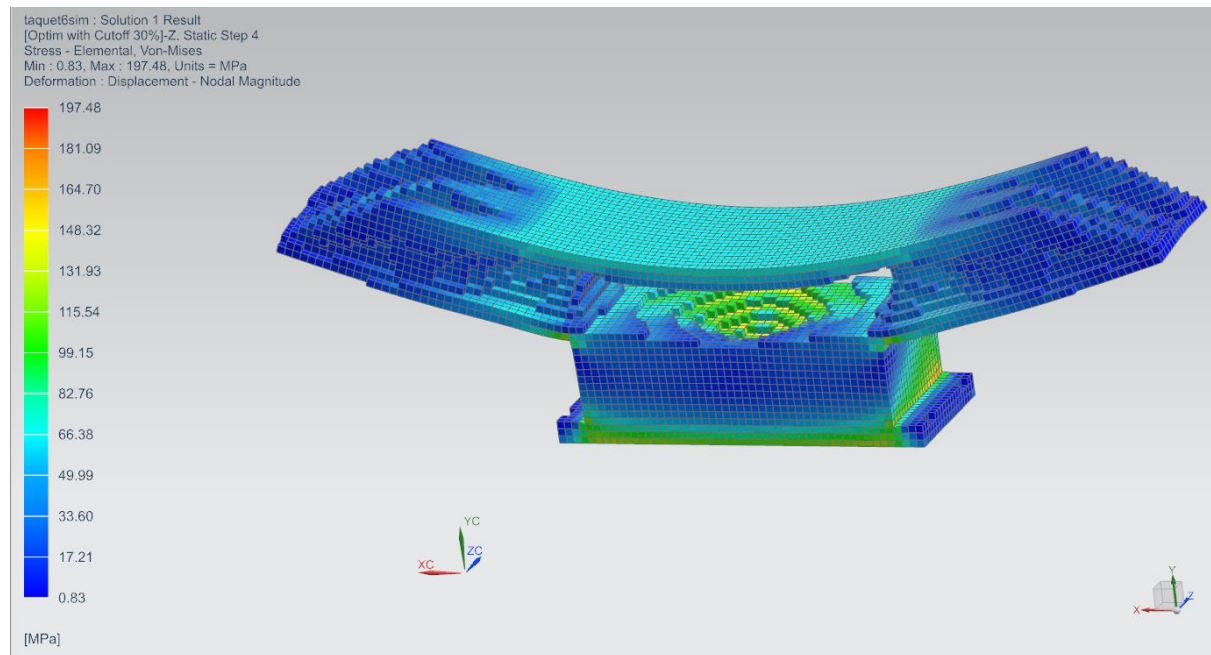
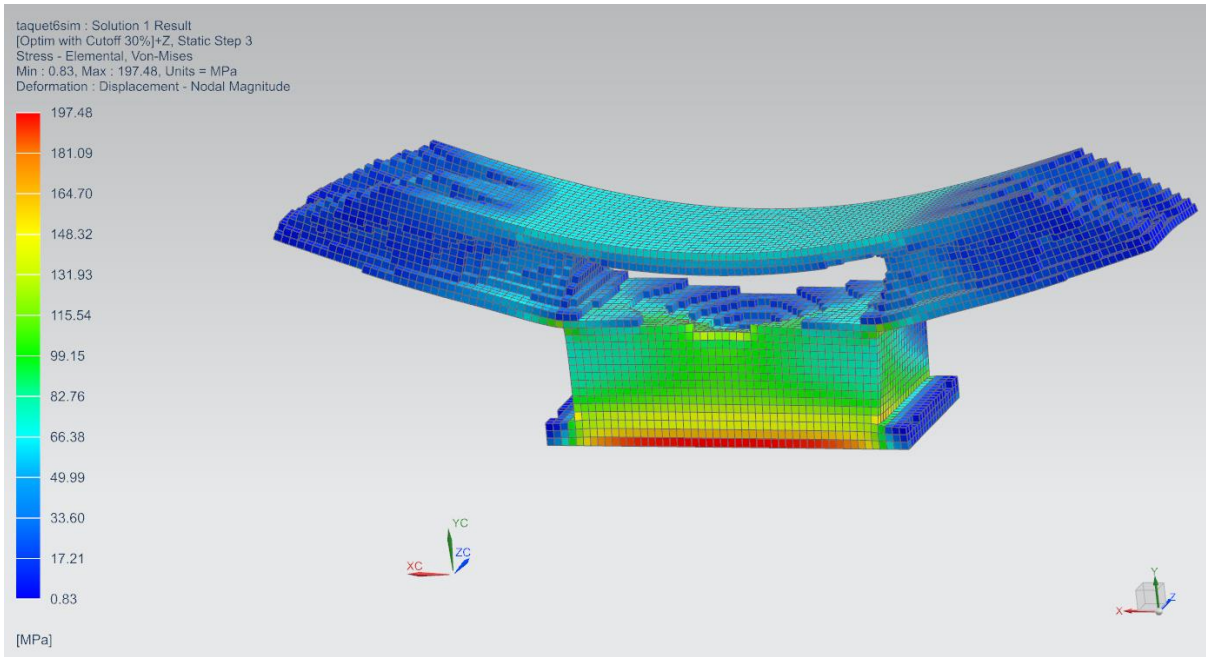
ECH	Dir	VED	E mesuré	E réel	Re0.2		Re0.2 REEL
					MOYEN	ECART TYPE	
					[Mpa]		
		[J/mm ³]	[Gpa]	[Gpa]	[Mpa]		[Mpa]
▲	HOR	137	54	69	140	6	139
★	HOR	122	57	69	140	18	139
●	HOR	152	54	69	184	14	163
★	HOR	122	55	69	184	16	163
●	HOR	65	59	69	207	6	195
■	HOR	76	57	69	217	6	202
▲	HOR	68	58	69	226	4	211
■	HOR	61	57	69	231	8	216

K. Annexe 11 : Largeur de zones

ECHANTILLON 6 ●										MOYENNE	ECART TYPE
HAZ [μm]	1.499	2.352	2.390	2.159	2.470	2.620	1.815	1.674	1.608	2.065	0.420
COARSE [μm]	3.276	3.147	2.945	4.862	4.769	3.942	2.762	2.999	2.899	3.511	0.814
ECHANTILLON 9A ■										MOYENNE	ECART TYPE
HAZ [μm]	1.412	1.338	1.356	1.144	1.350	1.583	1.197	1.158	1.369	1.323	0.139
COARSE [μm]	2.161	2.672	2.787	3.292	3.991	4.026	4.049	4.382	4.384	3.527	0.822
ECHANTILLON 10 ★										MOYENNE	ECART TYPE
HAZ [μm]	1.809	1.961	2.408	0.8893	1.085	1.054	1.200	1.601	2.139	1.572	0.541
COARSE [μm]	4.495	4.035	3.778	2.875	2.875	2.817	3.655	3.700	3.425	3.517	0.578
ECHANTILLON 14 ■										MOYENNE	ECART TYPE
HAZ [μm]	0.938	1.009	1.206	1.049	1.189	1.562	1.689	2.050	2.247	1.438	0.475
COARSE [μm]	2.791	2.667	2.296	3.141	3.154	3.277	4.583	4.789	4.668	3.485	0.945
ECHANTILLON 19 ▲										MOYENNE	ECART TYPE
HAZ [μm]	1.280	1.301	1.870	1.218	1.541	1.548	2.165	2.408	2.854	1.798	0.571
COARSE [μm]	3.474	3.958	3.435	3.508	3.655	3.723	4.166	4.002	5.240	3.907	0.562
ECHANTILLON 24 ★										MOYENNE	ECART TYPE
HAZ [μm]	2.443	2.573	2.601	0.7149	1.305	1.215	1.478	1.301	0.871	1.611	0.734
COARSE [μm]	5.449	5.636	4.844	2.057	2.020	2.120	2.427	2.721	1.936	3.246	1.580
ECHANTILLON 28 ▲										MOYENNE	ECART TYPE
HAZ [μm]	1.995	1.880	2.220	2.507	2.624	2.501	1.023	1.122	1.501	1.930	0.601
COARSE [μm]	6.017	5.618	5.473	3.556	3.646	3.571	2.861	2.689	2.898	4.037	1.303
ECHANTILLON 30B ●										MOYENNE	ECART TYPE
HAZ [μm]	1.295	1.493	1.200	1.797	1.766	1.710	1.742	2.122	2.078	1.689	0.315
COARSE [μm]	3.391	3.284	3.632	3.742	4.035	3.966	3.752	3.975	4.176	3.773	0.299

L. Annexe 12 : Contrainte de Von Mises sur la topologie brute





Bibliographie

- [1] Norme ISO, «ISO/ASTM 52900:2015(fr) Fabrication additive — Principes généraux — Terminologie,» 2015. [En ligne]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:fr>. [Accès le Décembre 2019].
- [2] K. Rajaguru, T. Karthikeyan et V. Vijayan, «Additive manufacturing – State of art,» *Materials Today Processing*, 3 août 2019.
- [3] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Dominguez, M. del Mar Espinosa et M. Dominguez, «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects,» décembre 2019. [En ligne]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/complexity/2019/9656938/>. [Accès le 2019].
- [4] A. Simar, «"Metal additive manufacturing" Cours 6-7 du cours "Advance manufacturing technology",» 2019.
- [5] S. Ford et M. Despieisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges,» *Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1573-1587, 20 Novembre 2016.
- [6] L.-C. Zhang et H. Attar, «Selective Laser Melting of Titanium Alloys and Titanium Matrix Composites for Biomedical Applications: A Review,» *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS*, vol. 18, n° 14, pp. 463-475, 2016.
- [7] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk et C. Emmelmann, «Additive manufacturing of metals,» *Acta Materialia*, vol. 117, pp. 371-392, 15 Septembre 2016.
- [8] L. A. Dobrzanski, A. D. Dobrzanska-Danikiewicz, A. Achtelek-Franczak, L. B. Dobrzanski, M. Szinfler et T. G. Gawel, «Porous Selective Laser Melted Ti and Ti6Al4V Materials for Medical Applications,» March 2017. [En ligne]. Available: https://www.researchgate.net/publication/315865387_Porous_Selective_Laser_Melted_Ti_and_Ti6Al4V_Materials_for_Medical_Applications.
- [9] L. Zhao, J. G. S. Macias, L. Ding, H. Idrissi et A. Simar, «Damage mechanisms in selective laser melted AlSi10Mg under as built and different post-treatment conditions,» *Materials Science & Engineering A*, vol. 764, p. 138210, 2019.
- [10] J. Gheysen, «Premier aperçu de la fabrication additive de nouveaux alliages de titane beta métastables,» Mémoire : UCLouvain, 2018.
- [11] W. Pei, W. Zhengying, C. Zhen, D. Jun, H. Yuyang, L. Junfeng et Z. Yatong, «The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting : single track, densification, microstructure and mechanical behavior,» *Applied Surface Science*, vol. 408, pp. 38-50, 2017.
- [12] M. Marteleur et C. van der Rest , «Scientific report of the UCL activities in the Aerostream project,» Décembre 2017.
- [13] O. Poncelet, M. Marteleur, C. Van de rest, J. Adiren, J. Adrien, S. Dancette, P. J. Jacques et A. Simar, «Addressing the impact of process parameters on vertical roughness and hardness of AlSi10Mg SLM thin walls,» 2019 (under review).
- [14] M. Fischer, «Elaboration in situ d'alliages de titane et de structures architecturées par fabrication additive : application aux dispositifs médicaux implantables,» Génie des procédés. Université de Lorraine, 2017.
- [15] N. Read, W. Wang, K. Essa et M. M. Attallah, «Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development,» *Materials and design*, vol. 65, pp. 417-424, 2015.
- [16] K. Zygula, B. Nosek, H. Pasiowiec et N. Szysiak, «Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique,» *World Scientific News*, vol. 104, pp. 462-472, 2018.
- [17] A. Majeed, Y. Zhang, J. Lv, T. Peng, Z. Atta et A. Ahmed, «Investigation of T4 and T6 heat treatment influences on relative density and,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 139, p. 106194, 2019.

Bibliographie

- [18] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr et B. Stucker, «Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes,» *Additive manufacturing*, Vols. %1 sur %21-4, pp. 87-98, 2014.
- [19] A. Ataei, Y. Li, G. Song et C. Wen, «Metal scaffolds processed by electron beam melting for biomedical applications,» *Metallic foam bone*, pp. 83-110, 2017.
- [20] Z. H. Xiong, S. L. Liu, Y. Shi, Y. F. Yang et R. D. Misra, «Role of melt pool boundary condition in determining the mechanical properties of selective laser melting AlSi10Mg alloy,» *Material Science & Engineering A*, Vols. %1 sur %2740-741, pp. 148-156, 2019.
- [21] J. Delahaye, J. Tchoufang Tchouindjang, J. Lecomte-Beckers, O. Rigo, A. M. Habraken et A. Mertens, «Influence of Si precipitates on fracture mechanisms of AlSi10Mg parts processed by Selective Laser Melting,» *Acta Materialia*, vol. 175, pp. 160-170, 2019.
- [22] J. Chen, W. Hou, X. Wang, S. Chu et Z. Yang, «Microstructure, porosity and mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg,» *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019.
- [23] X. Liu, C. Zhao, X. Zhou, Z. Shen et W. Liu, «Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy,» *Material and Design*, vol. 168, p. 107677, 2019.
- [24] GPI : prototype and manufacturing service, «EOS Aluminium AlSi10Mg : data Sheet,» 2014. [En ligne]. Available: https://gpiprototype.com/pdf/EOS_Aluminium_AlSi10Mg_en.pdf. [Accès le Décembre 2019].
- [25] P.-T. Doutre, T. H. Vo, P. Marin, F. Pourroy, G. Prudhomme et F. Vignat, «Optimisation topologique : outil clé pour la conception de pièces produites par fabrication additive ?,» chez *14e Colloque National AIP-Priméca*, La Plagne (73), 31 Mars - 02 Avril 2015.
- [26] L. Allouache et J. Van Rhijn, «Optimisation Topologique, la conception mécanique du futur est là,» *Techno sans frontière*, vol. Technologie 203, pp. 18-21, Mai-Juin 2016.
- [27] S. G. e. al., «An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing,» *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019.
- [28] P. Duysinx, «Design with topology optimization,» ULiège, 2019.
- [29] F. Mitjana, «Optimisation Topologique de structures sous contraintes de flambage,» *Mathématiques générales [math. GM] Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*, 2018.
- [30] M. P. Bendsoe et O. Sigmund, *Topology optimization : theory, methods and application*, pages 300 - 320.
- [31] «USHIP,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.uship.fr/catalogue-uship-2018>.
- [32] Meyer-Sansboeuf, «Les critères à examiner pour bien choisir votre drisse,» Février 2019. [En ligne]. Available: <http://www.meyer-sansboeuf.com/>. [Accès le Décembre 2019].
- [33] 3D SYSTEM, «Direct Metal Printers,» 2018. [En ligne]. Available: <https://fr.3dsystems.com/sites/default/files/2018-06/3d-systems-dmp-tech-specs-us-a4-2018-06-26-web.pdf>. [Accès le Décembre 2019].
- [34] TLS Technik, «Data Sheet - Aluminium Poudre,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.tls-technik.de/en/products/aluminum-powder.html>. [Accès le Décembre 2019].
- [35] Mettler-Toledo GmbH, «Easy Density Determination for Consistent Plastics Quality,» Avril 2016. [En ligne]. Available: https://www.mt.com/be/fr/home/library/applications/laboratory-weighing/easy_density_determination.html. [Accès le Décembre 2019].
- [36] J. Gheysen, «User guide Archimedes method,» 4 octobre 2019.
- [37] Agence pour le Développement Économique et Culturel Nord-Sud, «L'impression tridimensionnelle,» 3 Septembre 2015. [En ligne]. Available: <https://www.adecns.fr/limpression-3d-nl62/>. [Accès le Décembre 2019].
- [38] Evisa, «Instrument Database : Carl Zeiss AG - ULTRA 55,» 2003. [En ligne]. Available: <http://www.speciation.net/Database/Instruments/Carl-Zeiss-AG/ULTRA-55-;i675>. [Accès le Décembre 2019].

-
- [39] Marshall Scientific, «Mettler Toledo AE200 Analytical Balance,» [En ligne]. Available: <https://www.marshallscientific.com/Mettler-Toledo-AE-200-Analytical-Balance-p/me-ae200.htm>. [Accès le Décembre 2019].
- [40] Axxes, «Jeu pour la détermination de la densité,» [En ligne]. Available: <https://www.axess-industries.com/pesage/balances-de-laboratoire/jeu-pour-la-determination-de-la-densite-p-105121>. [Accès le Décembre 2019].
- [41] ABL Technology, «2010 Agie Charmilles Cut 20P Charmilles,» [En ligne]. Available: http://www.abltechnology.com/en/machines/EDM_Machines/CNC/2010_Agie_Charmilles_Cut_20P_Charmilles_EID111980.
- [42] E. O. Olakanmi, R. F. Cochrane et K. W. Dalgarno, «A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties,» *Progress in Materials Sciences*, vol. 74, pp. 401-477, 2015.
- [43] «SVB,» [En ligne]. Available: <https://www.svb-marine.fr/fr/taquet-d-amarrage-inox-antwerpen.html>.
- [44] «Orange Marine,» [En ligne]. Available: <https://www.orange-marine.com/taquets-d-amarrage/5141-taquet-polyamide.html>.
- [45] «Matériel Bateau.com,» [En ligne]. Available: <https://materielbateau.com/taquet-coinceur-asymetrique-alu-125-mm/11847.html>.
- [46] «ProShip,» [En ligne]. Available: https://www.proship.fr/5203-large_default/taquet-nylon-noir-165mm-par-10.jpg.
- [47] C. Hoynant, «Matelotage : prenez le noeud de taquet par le bon but,» *Voile Magazine*, 15 Février 2019.
- [48] MarcuS Machinery, «AgieCharmilles CUT 30 P,» [En ligne]. Available: <http://www.marcusmachinery.com/products/gf-machining-solutions/category/26/product/63>. [Accès le Décembre 2019].

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl