

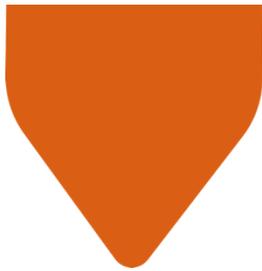
**Interreg**



**Sudoe**

**ADDITool**

European Regional Development Fund



## D.2.2.1. Rapport sur les résultats de FAM

## SOMMAIRE

INTRODUCTION .....	3
OBJECTIF .....	3
DESCRIPTION .....	3
RÉSULTATS .....	4
<b>Pilote FR1-LAUAK</b> .....	4
<b>Pilote PT1-MOLDETIPO</b> .....	24
<b>Pilote SP1-MEUPE/INESPASA</b> .....	27
<b>Pilote FR2-SOMOCAP</b> .....	36
<b>Pilote PT2-VIDRIMOLDE</b> .....	52

## INTRODUCTION

Le Work Package 2 (WP2) du projet ADDITool avec le titre : *Transfert des technologies de FAM vers le secteur de l'outillage* propose de développer et de fabriquer 5 pilotes afin de les transférer vers les PME du secteur de l'outillage dans l'espace SUDOE. Dans l'activité 2.2 : *Fabrication, post-traitement et caractérisation des démonstrateurs*, tous les partenaires ont travaillé ensemble pour développer 5 pilotes.

Tous les résultats, conclusions et recommandations obtenus sont expliqués ci-dessous.

## OBJECTIF

L'objectif principal de ce document est de compiler les résultats obtenus dans cette phase de recherche industrielle du projet ADDITool en suivant les informations détaillées dans le rapport D.1.3.1. Ensemble d'études de cas de chaque pilote.

## DESCRIPTION

Au cours de cette tâche, 5 projets pilotes ont été développés conformément aux termes de référence définis dans l'activité 1.3. Chaque pilote a été dirigé par différents centres technologiques et utilise différentes technologies et matériaux afin de couvrir différents intérêts industriels. Un rapprochement entre les centres et diverses technologies a été effectué afin de développer des projets pilotes intéressants pour le transfert vers les PME. Les résultats sont résumés dans les étapes suivantes : fabrication, post-traitement et caractérisation.

Le tableau 1 détaille les pilotes sélectionnées, les participants et le chef de file de chaque projet pilote.

*Table 1. Pilotes, cas d'utilisation proposant l'entreprise, le responsable et les participants de chaque pilote.*

Participants	FR1 LAUAK	PT1 MOLDETIPO	SP1 MEUPE/INESPASA	FR2 SOMOCAP	PT2 VIDRIMOLDE
ESTIA	<b>LEADER</b>				
CEIT					
LORTEK				<b>LEADER</b>	
UPV/EHU					
CATEC			<b>LEADER</b>		
IPLEIRA		<b>LEADER</b>			<b>LEADER</b>
CEFAMOL					
ENIT					

# RÉSULTATS

## Pilote FR1-LAUAK

### DED WIRE LASER

Avant de fabriquer la pièce, il était important de développer tous les paramètres de fabrication du 15CDV6 avec la technologie DED Wire Laser en tenant compte au moins des éléments suivants :

- Puissance Laser
- Vitesse du fil
- Vitesse de déplacement

Mais également :

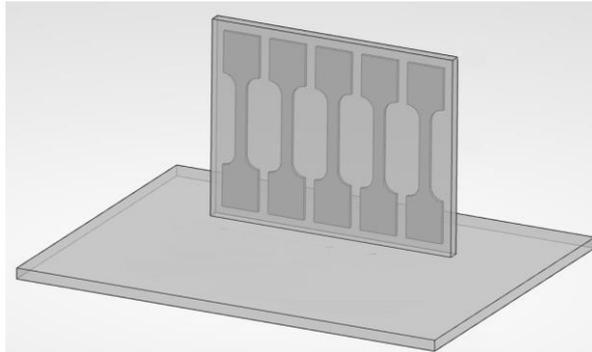
- Densité massique d'énergie (DME)
- Densité surfacique d'énergie (DSE)
- Densité linéique d'énergie (DLE)

SUIVI D'ESSAI - PRECITEC												
Date	04/05/22		Opérateur(s)		VP	PS	PD					
Heure	11:40		Machine		COMAU		Matériau		15CDV6			
Número fiche	22XX		Densité (g/cm3)		8,12							
Número d'affaire/projet	ADDITool		Diamètre fil (mm)		1,2							
Número substrat	/		Dimension substrat (mm)		150x150x5							
Référence matière	/		Dimension pièce (mm)		/							
Préparation du substrat			Sablage		Inertage (PPM O2)		Début essais		/			
Objectif			Recherche de paramètres procédé pour le 15CDV6		Distance focale (couronne/substrat)		105 mm		Résultats			
Opération de vérification			Centrage laser/fil		Oui	Répartition de puissance		Oui	Redresseur		Non	
Référence	Type (cordon, mur, bloc, pièce)	Puissance laser		Vitesse robot		Vitesse fil		Delta_z	Delta_xy	Temporisation	Observations et commentaires	Validation (OK, NOK)
		W	mm/min	m/s	m/min	kg/h	mm	mm	s			
ADDITool_C1	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	1,50	0,83	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar et distance retract : 3mm	OK
ADDITool_C2	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2	1,10	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar et distance retract : 4mm DEFAUT : pas de retract et fil sorti du redresseur santé CORDON : largeur variable	NOK
ADDITool_C3	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2,00	1,10	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar et distance 4mm. Rajout d'une tempo 0,2s entre wireStop et laserStop	OK
ADDITool_C4	Cordon de 50mm	3000	1250	0,021	2,00	1,10	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar + distance 4 mm + tempo 0,2s DEFAUT : variation largeur cordon	OK
ADDITool_C5	Cordon de 50mm	3000	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar + distance 4 mm + tempo 0,2s DEFAUT : boule. Fil trop bas au départ.	NOK
ADDITool_C6	Cordon de 50mm	3000	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	pression argon : 0,3 bar + distance 4 mm + tempo 0,2s DEFAUT : trop d'apport de fil	NOK
ADDITool_C7	Cordon de 50mm	3500	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +16,6% légère boule sur la fin et légères irrégularités dans le cordon	OK
ADDITool_C8	Cordon de 50mm	3750	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +25%	OK
ADDITool_C9	Cordon de 50mm	4000	1250	0,021	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + C4 avec augmentation puissance laser +33,3%	OK
ADDITool_C10	Cordon de 50mm	4000	1500	0,025	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s	OK
ADDITool_C11	Cordon de 50mm	5000	1500	0,025	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s + 1000W de puissance en +	OK
ADDITool_C12	Cordon de 50mm	5500	1500	0,025	2,50	1,38	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm + retour à vitesse robot 1500 mm/s + 1500W de puissance en +	OK
ADDITool_C13	Cordon de 50mm	5500	1500	0,025	4,00	2,20	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm DEFAUT : apport de fil trop important, pliage du fil en amont des galets redresseurs	NOK
ADDITool_MF1	Mur fin	3000	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	paramétrie C3 DEFAUT : fil bloqué dans le dévidoir	NOK
ADDITool_MF2	Mur fin	3000	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	paramétrie C3 mur très insatisfaisant sans raison valable	NOK
ADDITool_C14	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2,00	1,10	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm paramétrie C3 pas de tir. Laser non prêt	NOK
ADDITool_C15	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2,00	1,10	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm paramétrie C3 pas de tir. Laser non prêt	NOK
ADDITool_C16	Cordon de 50mm	3000	1500	0,025	2,00	1,10	/	/	/	/	argon : 0,3 + dist 4mm paramétrie C3 parfait	OK
ADDITool_MF3	Mur fin	3000	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	paramétrie C3 DEFAUT : boule sur fil à mi-cordon à la 3 ème couche	NOK
ADDITool_MF4	Mur fin	3000	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	paramétrie C3 DEFAUT : boule sur fil à la 2ème couche	NOK
ADDITool_MF5	Mur fin	2500	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	diminution de la puissance laser DEFAUT : goutte fil a cause du redresseur	NOK
ADDITool_MF6	Mur fin	2750	1500	0,025	2,00	1,10	0,50	/	/	/	augmentation puissance laser DEFAUT : goutte	NOK

Figure 1 : Recherche des paramètres

Cette première étape permet de trouver le meilleur cordon de soudure pour fabriquer la pièce ainsi que les 4 murs pour la caractérisation. Voici pour information les dimensions des murs de caractérisation dans lesquels seront prélevés des éprouvettes :

- 115 x 15 x 95mm
- 80 x 20 x 100mm
- 100 x 20 x 90mm
- 85 x 25 x 50mm



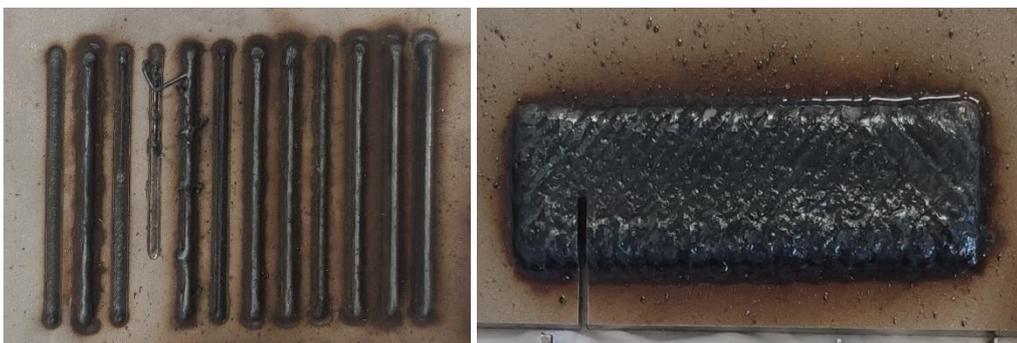
*Figure 2 : Exemple de mur de caractérisation*

La caractérisation fournira les données suivantes :

- Gradient de microstructure du haut vers le bas
- Dureté
- Propriétés de traction dans l'orientation verticale
- Propriétés de traction dans l'orientation horizontale
- Etc.

Tous les résultats des essais micro structurels et mécaniques sont disponibles dans le rapport D.2.1.1 : Rapport des matériaux pour la FAM.

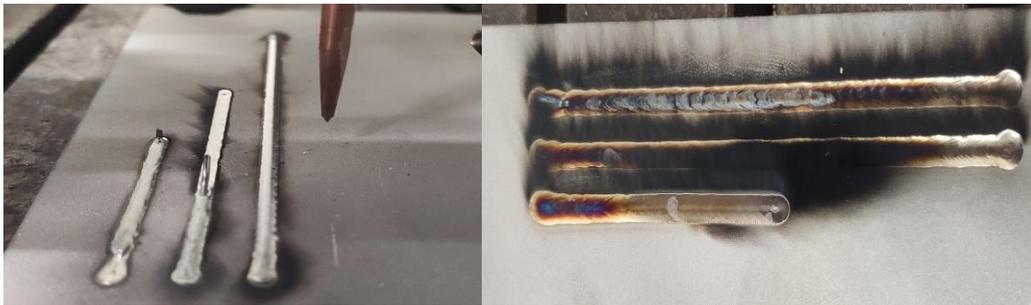
Durant la phase de recherche de paramètres, des modifications matérielles ont dû être effectuées. En effet, le matériau 15CDV6 peut avoir beaucoup de problèmes d'oxydation et générer beaucoup de projections même avec une technologie laser. Une modification de la tête PRECITEC et du système d'inertage local a été effectué afin de protéger le bain de fusion.



*Figure 3 : Exemple d'oxydation*

L'effet de l'inertage (local et global) a un effet conséquent sur le dépôt et sur les paramètres de fabrication. Plus l'inertage est efficace, plus le matériau a tendance à réfléchir le laser (absorption plus faible) et plus la puissance doit être augmentée pour compenser.

Cependant, avec une puissance laser trop élevée, une sublimation peut se produire et créer des fumées qui peuvent être contaminantes à la fois pour la pièce mais également pour l'effecteur (endommagement des optiques notamment et perte de l'efficacité globale du système, avec un risque lié au laser). Cependant, il est important voire nécessaire de trouver les limites du procédé et de trouver la meilleure "fenêtre de tir".

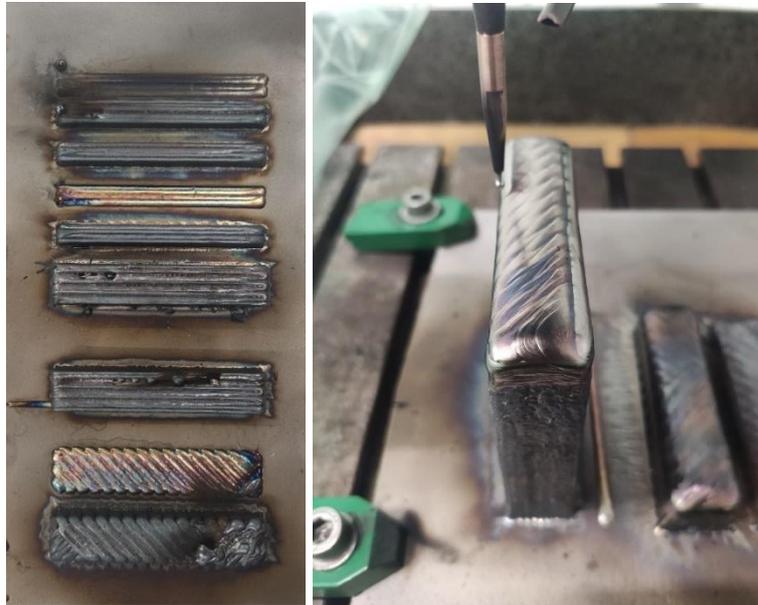


*Figure 4 : Sublimation du matériau*

En termes de dépôt, la stratégie de la génération des trajectoires influence grandement l'aspect géométrique mais également la microstructure.

Pour cette fabrication, afin d'éviter d'avoir des porosités ou des défauts de surface, différentes stratégies ont été développées et testées :

- 0° Aller/Retour longitudinal
- +45°/-45° avec contournage
- +45°/-45° sans contournage
- -135°/+120°/-45°/+60°/45°/-60°/135°/-120° sans contournage pour éviter des défauts de surface



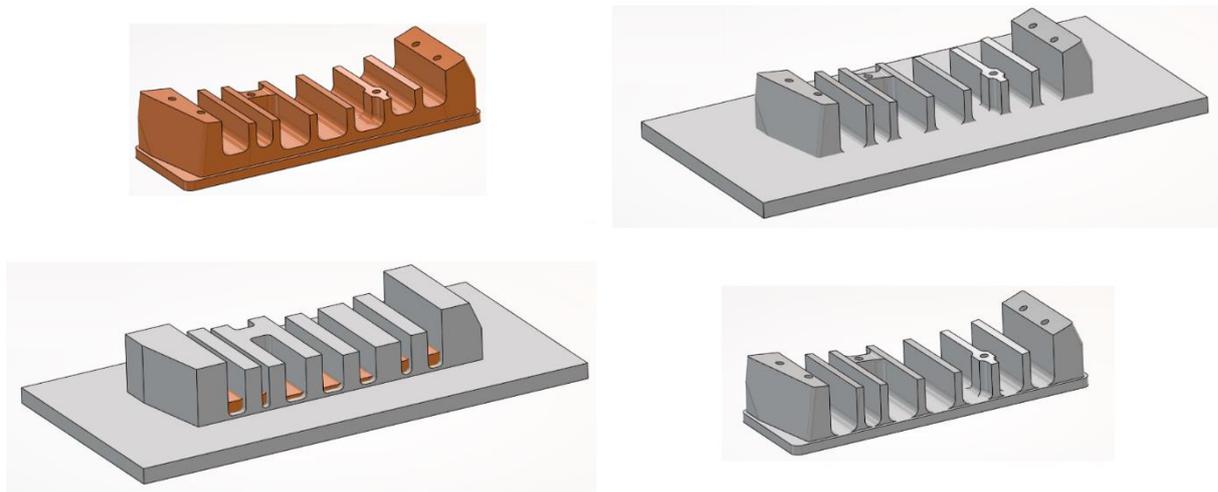
*Figure 5 : Influence de la stratégie de déposition*

Le contournage peut être un problème dans l'obtention d'une surface homogène sur le dessus et dans le respect de la distance buse/pièce sur l'ensemble de la hauteur. Une mauvaise programmation entre le contournage et le remplissage crée une différence de hauteur, conduisant inévitablement à un arrêt du process avec en cause une perte de la distance buse/pièce.



*Figure 6 : Exemple sans contournage*

Une fois tous les paramètres définis, un brut de fabrication a été effectué pour créer une pièce Near Net Shape dans laquelle pourra être incluse la pièce finale (en usinage).



*Figure 7 : Near Net Shape*

La fabrication de cette pièce a été réalisée avec les moyens suivants :

- Robot COMAU NJ165 – Commande Siemens SINUMERIK 840D
- PRECITEC CoaxPrinter
- Fil SelectArc 15CDV6 – Diamètre D1.2mm.



*Figure 8 : Fabrication du NNS avec le procédé DED Wire Laser*

Une fois la fabrication terminée, un scan 3D a été effectué pour voir les différences entre la CAO et le brut réel. Le scan 3D a été réalisé avant et après traitement thermique pour permettre une analyse des déformations en cours de traitement.

Le TT effectué était un détensionnement à 400°C pendant 8h.

- Écart maximal entre la CAO et le NNS : 1,8 mm
- Écart maximal entre le NNS avant et après le TT : 0,204 mm

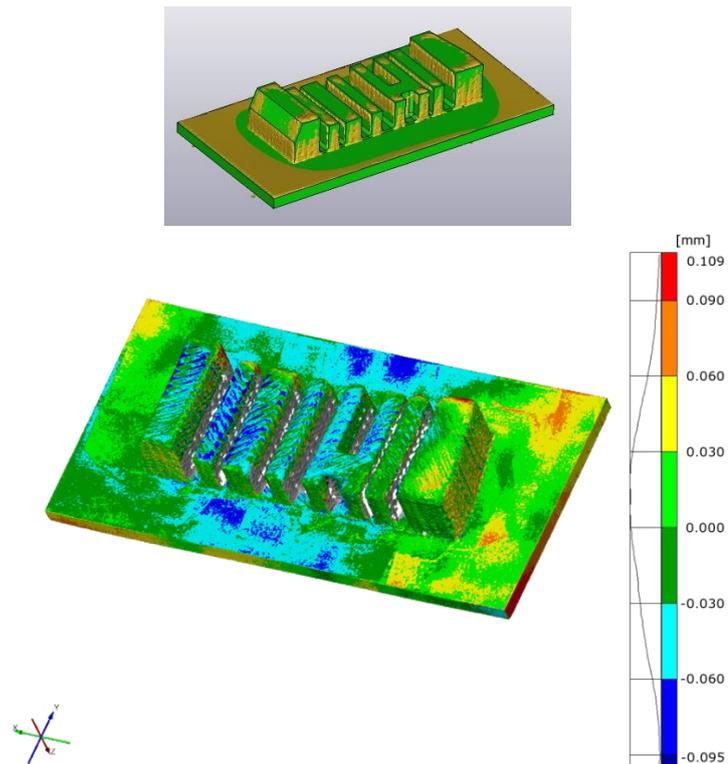


Figure 9 : Scan 3D

L'écart avant et après TT, même s'il est faible (0,2 mm), prouve qu'une relaxation des contraintes a bien eu lieu dans la pièce et que l'usinage se fera sans risque de fissuration.

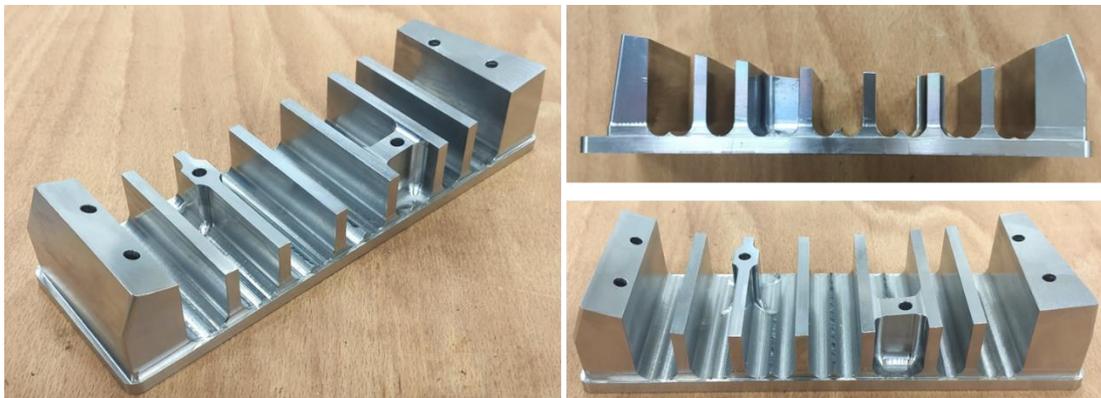


Figure 10 : Usinage de la pièce DED Wire Laser

Enfin, la pièce étant terminée, la dernière phase a été le contrôle et les essais fonctionnels sur cet outillage.

Quelques points restent en dehors des tolérances initiales du fait de quelques non-respect des cotes (usinage assuré en sous-traitance) mais largement acceptables par la société LAUAK, la définition des tolérances étant volontairement très serrée.

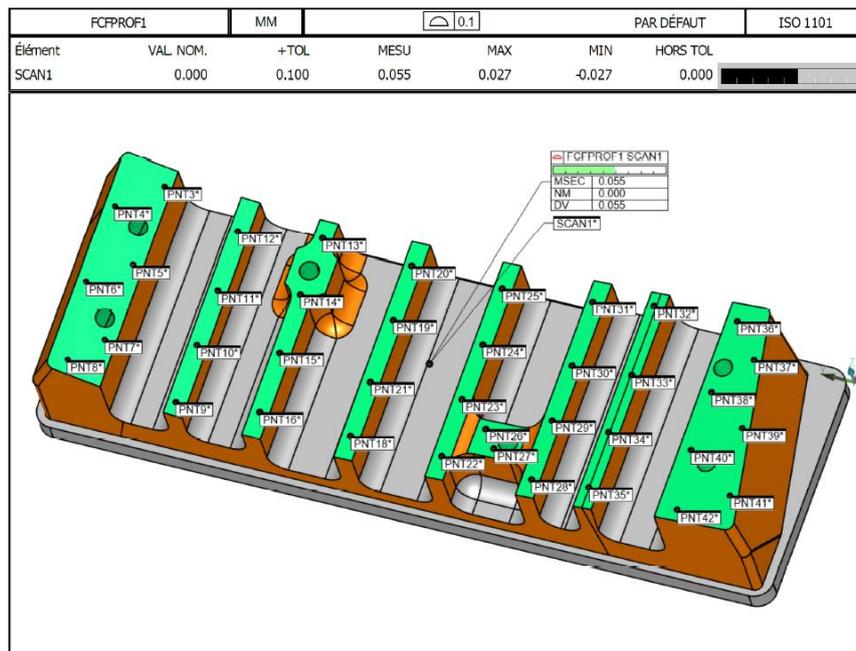


Figure 11 : Contrôle et tests par LAUAK

La pièce est maintenant fonctionnelle et utilisée par la société LAUAK.

### DED WIRE ARC (WAAM)

La fabrication a été réalisée avec les moyens suivants :

- Robot Fanuc
- Poste de soudage CMT Fronius
- Fil SelectArc 15CDV6 – Diamètre D1.2mm.

La méthode suivante a été appliquée pour élaborer les stratégies de fabrication de la pièce par DED Wire Arc :

- Optimisation des paramètres de soudage à l'arc avec le matériau 15CDV6. La santé matière et la géométrie des cordons de soudure ont été vérifiées.

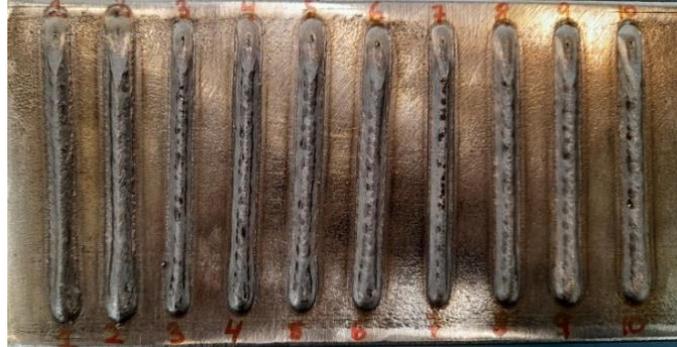


Figure 12. Cordons de soudure unitaires et section transversale.

Les paramètres sélectionnés pour la fabrication des murs sont indiqués dans le tableau suivant :

Table 2. Paramètres sélectionnés pour la fabrication des murs.

Vrobot (cm/min)	Vfil (m/min)	Courant (A)	Voltage (V)
40	6,2	200	15,5

Deux mouvements robot différents ont été utilisés afin de sélectionner celui qui permet d'obtenir l'épaisseur requise (>6 mm) : superposition de cordons et trajectoire circulaire. L'usinage de la surface a été effectué pour analyser comment, en enlevant le moins de matière possible, l'épaisseur de paroi requise peut être obtenue.

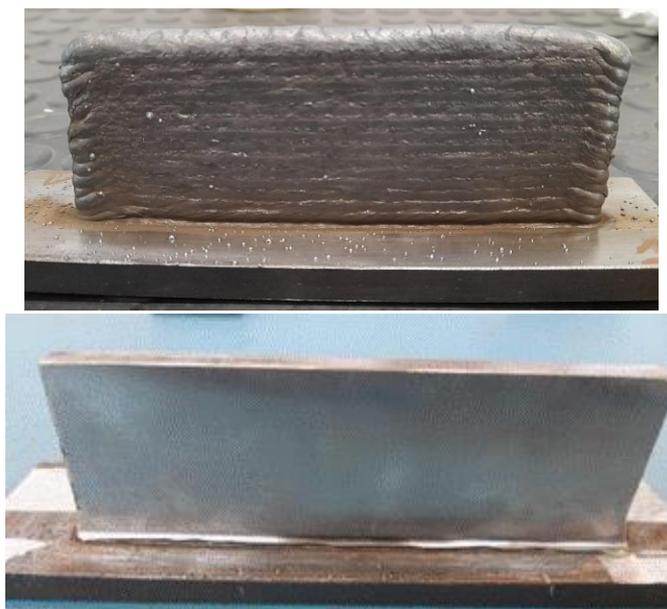


Figure 13 : Parois NNS avant et après usinage des surfaces

- Après la caractérisation de la microstructure et des propriétés mécaniques, la stratégie circulaire a été sélectionnée car elle a permis d'obtenir une microstructure homogène dans toute la paroi.

Un grand mur a été réalisé pour analyser les propriétés mécaniques dans les deux orientations.



Figure 14 : Mur fabriqué

- Reconception de la pièce avec des surépaisseurs (1 mm de chaque côté des parois) en tenant compte de la matière qui doit être enlevée par usinage.

L'objectif principal étant de réduire autant que possible la quantité de matériau déposé, les parois ont donc été descendues jusqu'au substrat et deux longerons ont été ajoutés pour éviter les distorsions sur chaque bord de la pièce.

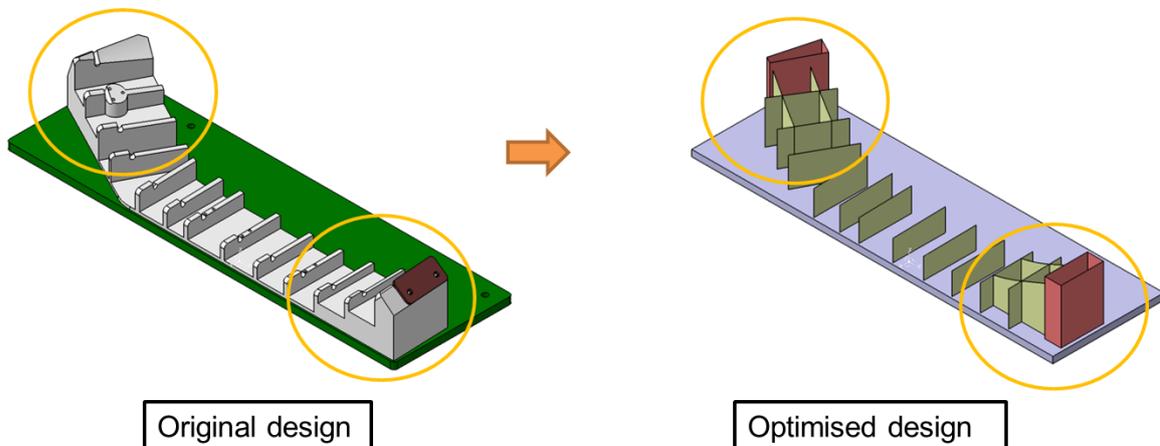


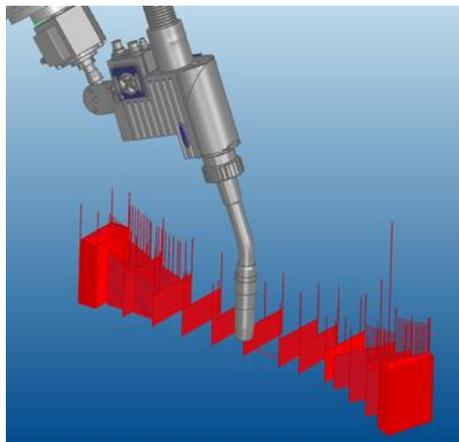
Figure 15 : Design original et reconception optimisée pour le WAAM

Des croisements ont été fabriqués pour optimiser l'intersection entre les murs.



*Figure 16 : Fabrication des croix - optimisation de la stratégie*

- Programmation des trajectoires robotisées avec des oscillations pour réduire les distorsions. La séquence de fabrication a été pensée de manière à homogénéiser la chaleur dans la pièce.



*Figure 17 : Simulation de la génération des trajectoires pour la fabrication*

- Effectuer des simulations thermiques et de distorsion pour définir le temps de pause entre les couches ainsi que les trajectoires pour optimiser la stratégie de fabrication et ainsi réduire les distorsions en cours de fabrication.

Le temps de pause choisi entre les couches a été variable tout au long de la croissance de la pièce afin d'éviter l'accumulation de chaleur. Au fur et à mesure que l'on monte en hauteur, le temps de pause doit être augmenté pour garantir une température limite de la pièce inférieure à 150 °C.

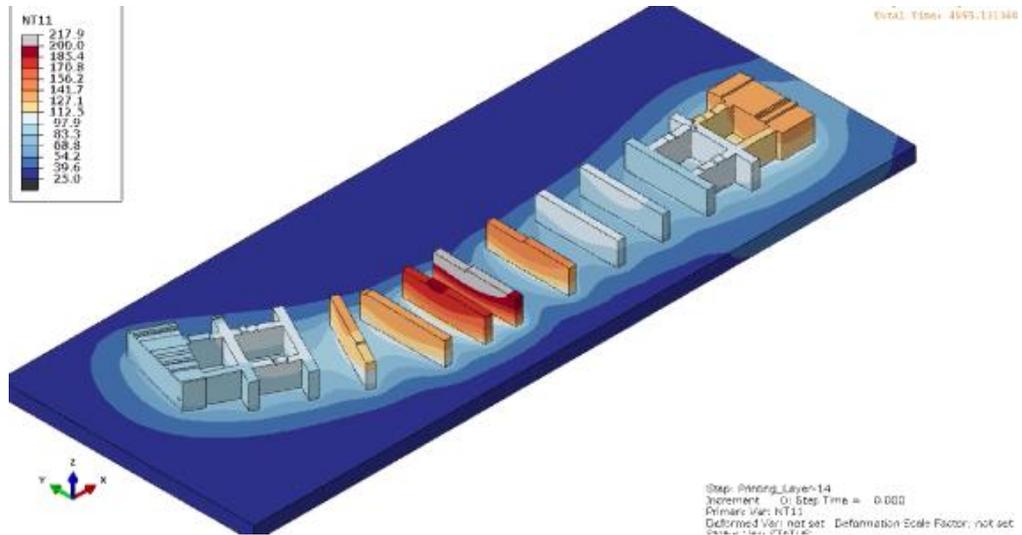


Figure 18 : Simulation de la température après le dépôt de chaque couche.

La déformation attendue montre comment la pièce doit être usinée pour répondre aux exigences dimensionnelles.

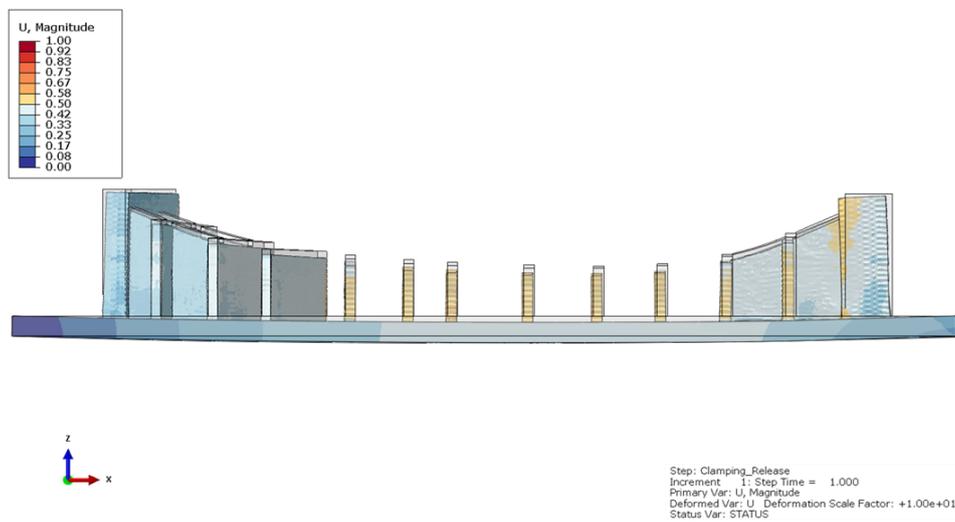


Figure 19 : Simulation de distorsion après le retrait du bridage

- Conception du bridage. Des pinces en forme de L et boulonnées ont été utilisées de chaque côté du substrat.

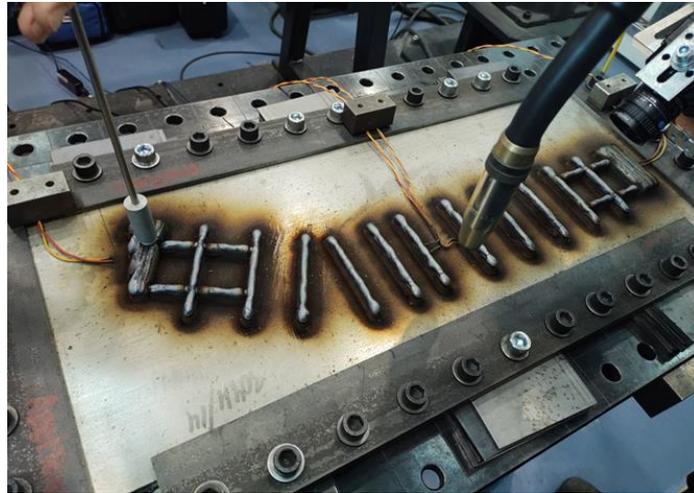


Figure 20 : Fabrication du démonstrateur et suivi de la température

- La fabrication de la pièce a été réalisée avec la technologie CMT et un bras robotisé. Le substrat est une tôle d'acier 304L de 650 x 250 x 14mm.

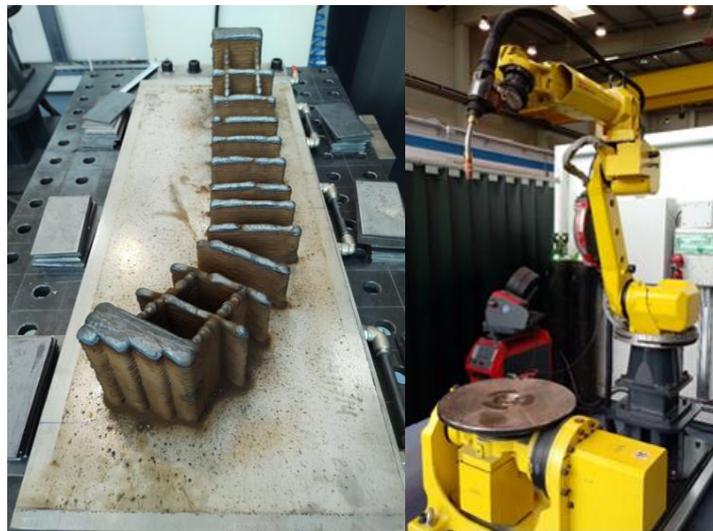


Figure 21 : Pièce fabriquée avec une technologie robotisée (WAAM)

- Monitoring de la température générale de la pièce ainsi que du bain de fusion.

4 thermocouples de type K ont été fixés au substrat et un thermocouple de contact a été utilisé pour contrôler la température au sommet des parois entre chaque dépôt de couche et comparer les valeurs avec les résultats de la simulation.

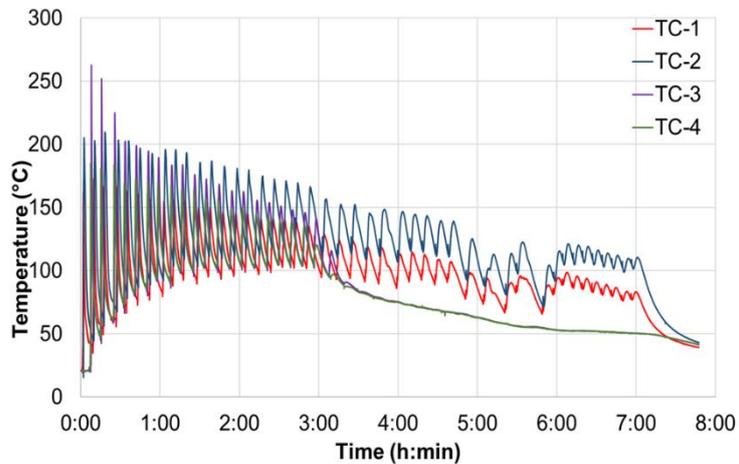


Figure 22 : Enregistrement des températures obtenues à partir des thermocouples de type K du substrat

- Analyse dimensionnelle et ajustement optimal après la fabrication.

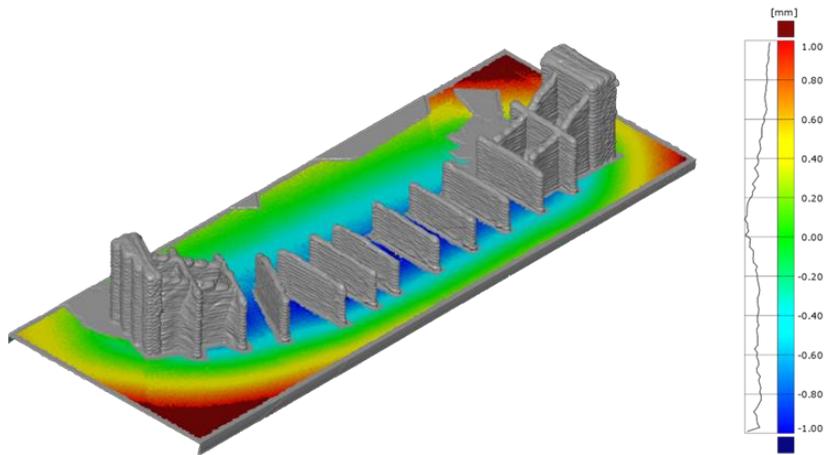


Figure 23 : Meilleur ajustement de la distorsion subie par le substrat

- Usinage de la pièce. Au cours de l'usinage, de nouvelles déformations sont apparues en raison des contraintes résiduelles.



Figure 24 : Usinage des zones critiques du démonstrateur

- L'analyse dimensionnelle après l'usinage et l'ajustement optimal des surfaces critiques ont été effectués.

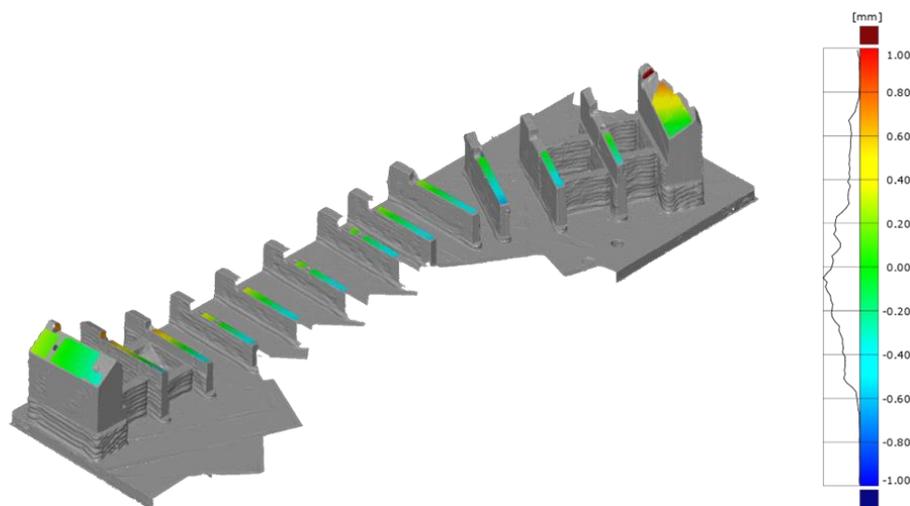
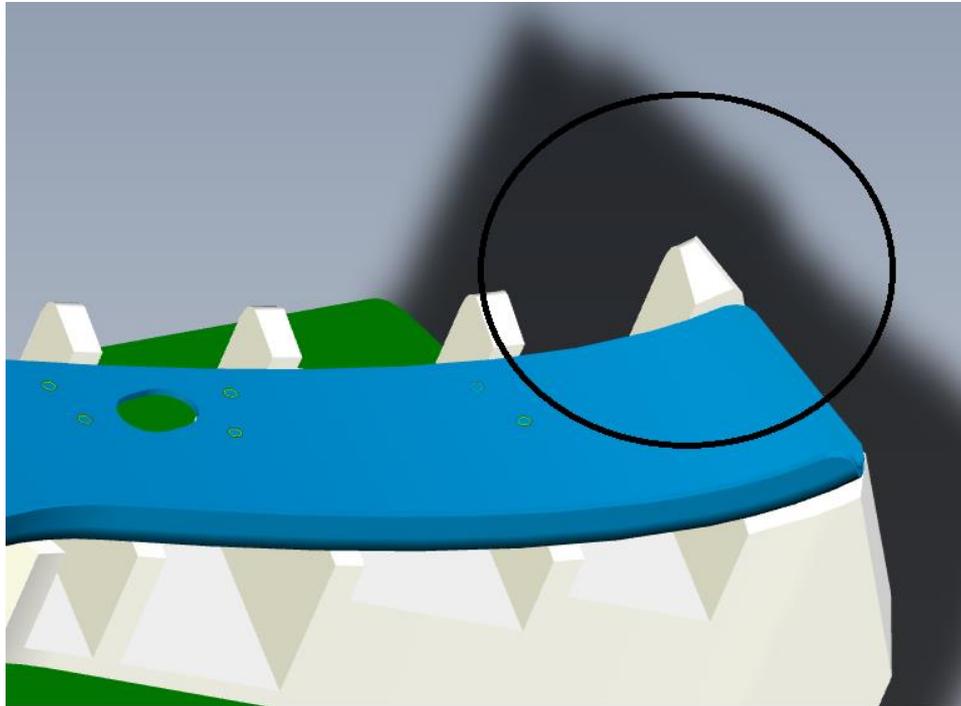


Figure 25 : Ajustement des zones critiques

Quelques points restent en dehors des tolérances prévues, mais sont jugés acceptables par la société LAUAK, car la définition des tolérances était très stricte.



*Figure 26 : Zone hors tolérance*

### **DED POWDER LASER**

La poudre atomisée a été caractérisée dans le centre technologique CEIT, garantissant une poudre morphologiquement adéquate, à faible porosité, à faible satellite, avec une taille de particule comprise entre 44 et 106  $\mu\text{m}$  et un diamètre moyen de 73  $\mu\text{m}$ .

La méthodologie suivante a été appliquée :

- **Optimisation des paramètres avec le matériau 15CDV6. Essais de rechargement simple et de rechargement avec juxtaposition de cordons.**

Les valeurs optimales de la puissance du laser (P), de la vitesse de déplacement (F) et de la vitesse d'alimentation de la poudre (Q) sont établies par les essais de rechargement simple. Pour le plan d'expériences (tableau 5), une méthodologie à 3 facteurs et 3 niveaux est utilisée, en employant les paramètres de rechargement pour du H13 comme valeurs centrales :

Table 5 : Essai de rechargement simple DOE pour le dépôt de 15CDV6 par DED P-L

	P (W)	F (mm/min)	Q (g/min)
Ref.	600	450	3.3
Max	700	550	4
Min	500	350	2.6

Parmi les 27 essais de rechargement, le dépôt optimal est choisi sur la base des critères suivants :

- Intégrité métallurgique
- Géométrie adéquate (valeur H/W proche de 0,25)
- Une valeur de dilution proche de 30%

Sur la base des critères précédents, les valeurs optimales des paramètres de dépôt sont déterminées comme suit : P = 600 W, F = 550 mm/min et Q = 3,3 g/min. Le rechargement fabriqué avec cet ensemble de paramètres est illustré à la Figure 27. La hauteur du dépôt est de 0,229 mm, la largeur de 1,234 mm et la profondeur de dilution de 0,184mm.

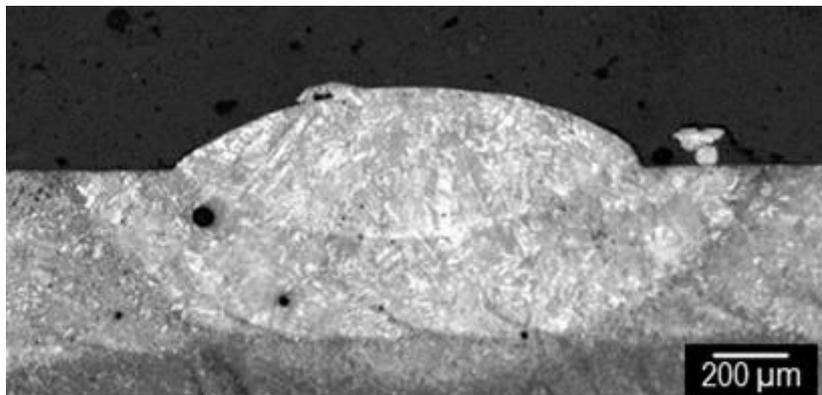


Figure 27 : Section transversale d'un cordon simple fabriquée avec les paramètres optimaux

Quatre couches ont été fabriquées en utilisant les paramètres ci-dessus et en fixant un chevauchement de 30 %, 35 %, 40 % et 45 % entre les couches successives. La valeur optimale de chevauchement doit concilier une hauteur de couche régulière avec le maintien d'une dilution suffisante sur le substrat, qui est d'environ 40 % pour le matériau 15CDV6. La Figure 28 montre la coupe transversale de la couche de chevauchement optimale.

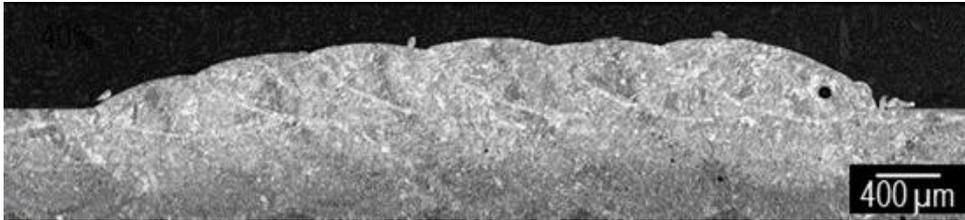


Figure 28 : Couche optimale fabriquée avec un chevauchement de 40%

### ➤ Tests des stratégies de dépôt pour la fabrication de murs

Afin de tester la meilleure stratégie de dépôt, trois parois 6x30x15mm sont fabriquées avec les stratégies présentées dans la Figure 29. La première couche est fabriquée sans pauses de refroidissement optimisées, tandis que les autres sont fabriquées avec une pause toutes les 8 couches.

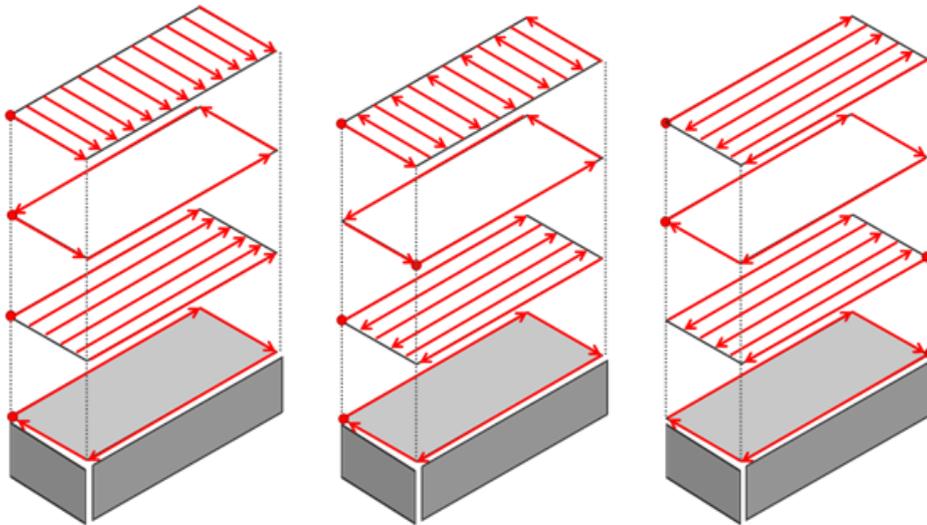
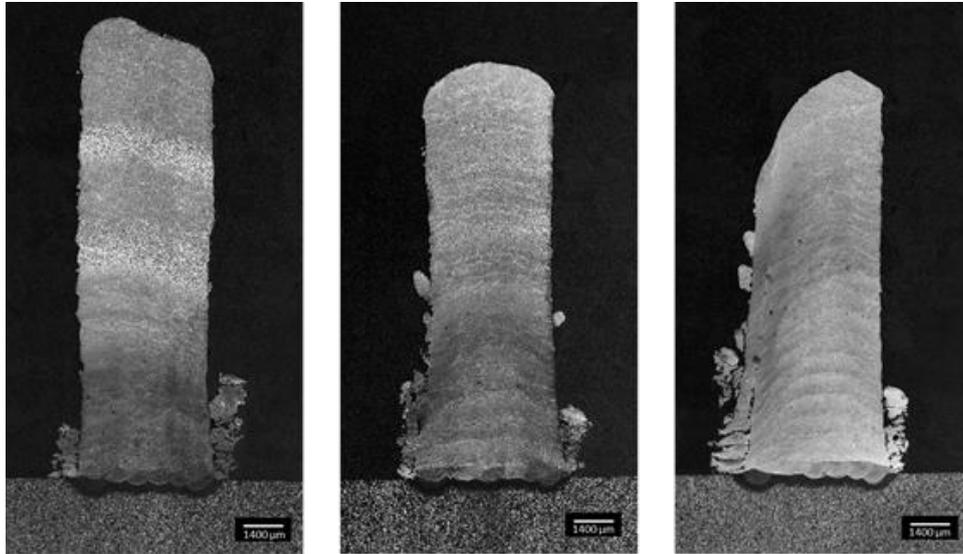


Figure 29 : Stratégies de dépôt testées lors de la fabrication des murs

La deuxième paroi, dans laquelle le matériau a été déposé dans les directions longitudinale et transversale en Zigzag pour le remplissage, présente la hauteur la plus uniforme et la meilleure précision géométrique, compte tenu de l'uniformité du champ thermique créé au cours du processus de fabrication. Les trois coupes transversales sont illustrées dans la Figure 30.



*Figure 30 : Sections transversales des murs fabriqués*

➤ **Caractérisation de la microstructure et de la microdureté**

Une analyse microstructurale du matériau déposé a révélé la création de ferrite aciculaire au cours du procédé. La formation de cette microstructure est favorisée par les cycles thermiques rapides du DED-PL et les éléments d'alliage présents dans le matériau 15CDV6.

La relation entre les temps de refroidissement et la présence de ferrite aciculaire est observée dans la Figure 31, où l'on voit que le matériau déposé pendant que le substrat est surchauffé, a un grain plus grossier avec une plus grande teneur en ferrite. Après les pauses de refroidissement, le matériau dissipe à nouveau efficacement la chaleur et la microstructure précédente est atteinte.

La formation de ferrite aciculaire est également liée à des propriétés mécaniques élevées dans le matériau déposé, avec une valeur moyenne de microdureté de 40 HRC.

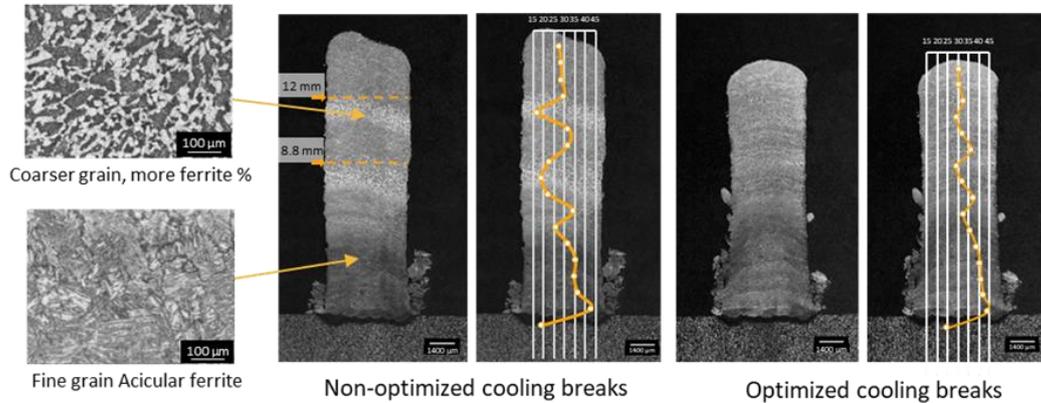


Figure 31 : Microstructure, temps de refroidissement et valeurs de microdureté pour les parois fabriquées avec et sans pause de refroidissement

### ➤ Fabrication du démonstrateur

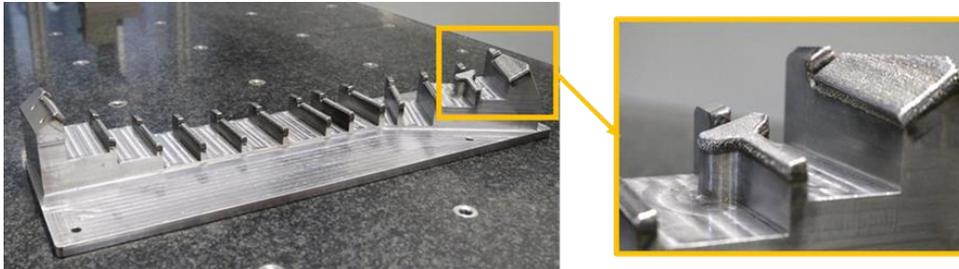
La pièce de démonstration est fabriquée à partir d'une préforme usinée en acier AISI1045. Le processus a été réalisé en utilisant les paramètres de référence précédemment développés qui donnent une hauteur de dépôt de 0,4 mm avec une stratégie de chevauchement de 40 %. Les faces fonctionnelles ont été usinées sur 2 millimètres supplémentaires pour préparer le revêtement en 15CDV6 et l'usinage final.

Pendant le processus de fabrication, la pièce est inclinée pour permettre à la buse d'atteindre la surface de dépôt, comme illustré dans la Figure 32.



Figure 32 : Configuration de la fabrication de la pièce de démonstration en DED-PL

La Figure 33 montre la partie du démonstrateur avant l'étape de post-traitement.



*Figure 33 : Pièce de démonstration après revêtement 15CDV6 en DED-PL*

La pièce rechargée est partiellement usinée, afin de montrer les différentes étapes du processus de fabrication. Les faces post-traitées ont une précision dimensionnelle de 0,1mm et un Ra compris entre 1,5 et 2 $\mu$ m. La dureté mesurée sur les faces post-traitées est de 42 HRC.

Les enseignements tirés de l'élaboration de ce projet pilote sont les suivants :

Des pièces saines et sans défaut ont été fabriquées à l'aide des technologies de FAM en appliquant différentes stratégies :

- **Hybridation** de l'usinage et de la FAM. Cela présente l'avantage de réduire la difficulté d'usinage dans des zones spécifiques et d'avoir la possibilité d'utiliser des matériaux à haute valeur ajoutée uniquement dans les zones requises et un matériau moins cher dans le reste de la pièce.
- **Reconception** pour la FAM. Cela a l'avantage de réduire la masse de la pièce de près de 30%.

La reconception est essentielle pour obtenir les avantages de la FAM :

- Économies de matériaux
- Moins de déchets
- Délai plus court

La simulation améliore les stratégies de dépôt afin de réduire les distorsions. En l'occurrence, des simulations de température et de contraintes résiduelles ont été effectuées pour garantir une fabrication saine sans distorsions ni effondrements. Cependant, il est également très important de connaître la déformation finale de la pièce afin d'optimiser la surépaisseur pour répondre aux exigences dimensionnelles après l'étape d'usinage.

## Pilote PT1-MOLDETIPO

### Fabrication

L'insert de moule du pilote PT1 a été fabriqué avec la technologie L-PBF avec la machine Trumpf TruPrint 1000. La pièce a été fabriquée avec de la poudre Böhler W360, un acier à outils dont les propriétés sont équivalentes à celles de l'acier H13.

Avant la fabrication de la pièce elle-même, des échantillons du même matériau ont été produits, afin d'effectuer une caractérisation mécanique, microstructurale et thermique. Les résultats de cette tâche peuvent être consultés dans le livrable D 2.1. Rapport de matériaux pour la FAM.

Pour la fabrication de la pièce et des échantillons, les paramètres de traitement sont décrits dans le tableau 6. La pièce obtenue est illustrée à la Figure 34.

*Table 6 : Paramètres de fabrication L-PBF utilisés pour la fabrication de l'insert.*

Zones	Paramètres : Vitesse de déplacement et puissance LASER
Core (intérieur de la pièce)	700mm/s   120W
Downskin (zones non soutenues)	460mm/s   30W
Inskin Hatch (chevauchement entre la couche extérieure et l'intérieur de la pièce)	700mm/   120W
Inskin Border (couche extérieure)	500mm/s   80W

### Post-traitements

Le post-traitement de la pièce a consisté à la séparer du plateau de base par électroérosion à fil. Cette opération a été réalisée par une entreprise locale (EROFIO) qui possède l'équipement approprié pour cette tâche. Aucun traitement thermique n'a été effectué.

La pièce a ensuite été envoyée à Moldetipo, où des opérations de fraisage, d'électroérosion et d'ajustement des détails ont permis de préparer la pièce pour l'assemblage dans le moule. Ces opérations étaient identiques à celles que subissait la plaquette fabriquée de manière conventionnelle. La Figure 34 montre l'état final de la plaquette.



Figure 34 : Géométrie finale de l'insert L-PBF, après finition

Après la fabrication, l'insert a été analysé par tomodensitométrie afin de vérifier la géométrie intérieure des canaux de refroidissement et de déceler d'éventuels défauts. La Figure 35 présente une vue générale de l'insert. Il est possible de vérifier que le canal de refroidissement a été correctement obtenu et que seule une petite rugosité de surface à l'intérieur du canal est détectée.

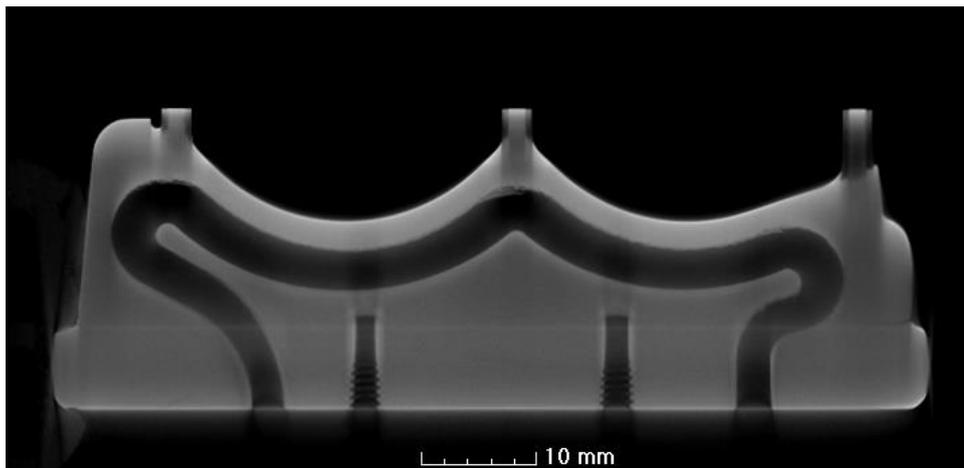


Figure 35 : Image de l'insert L-PBF obtenue par tomodensitométrie montrant le canal de refroidissement interne.

Cependant, l'analyse détaillée de la zone qui relie la base à la surface active de l'insert révèle une série de fissures - Figure 36. Certaines de ces fissures étaient visibles à l'œil nu.

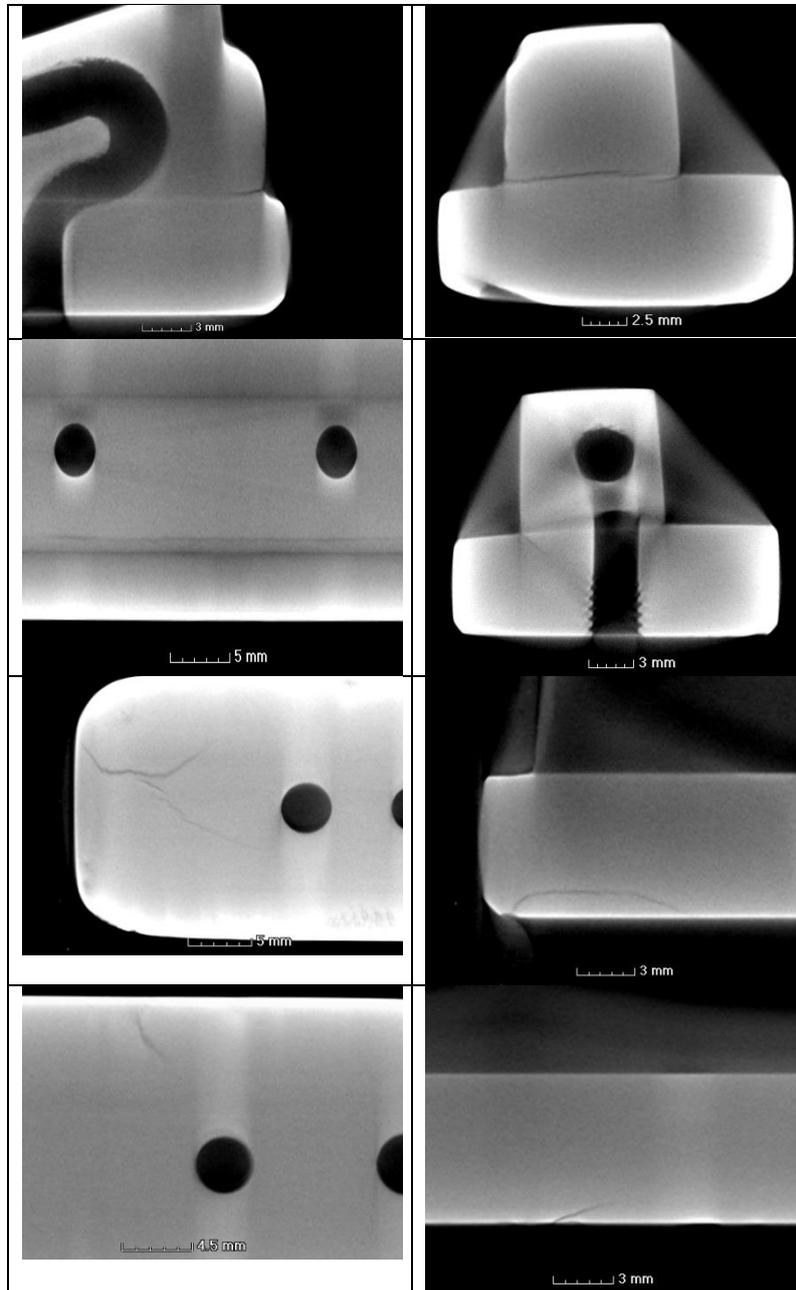


Figure 36 : Fissures détectées

### Caractérisation du démonstrateur

Dans l'ensemble, la fabrication du démonstrateur a été un succès. Moldetipo a estimé que l'insert de moule conduirait à des gains de productivité pour cette pièce. D'autres pièces pourraient également bénéficier de cette stratégie. Il a été prouvé que la stratégie de refroidissement affectait le cycle de moulage de manière significative et était économiquement viable - voir les résultats de D3.2.1 - Étude de viabilité.

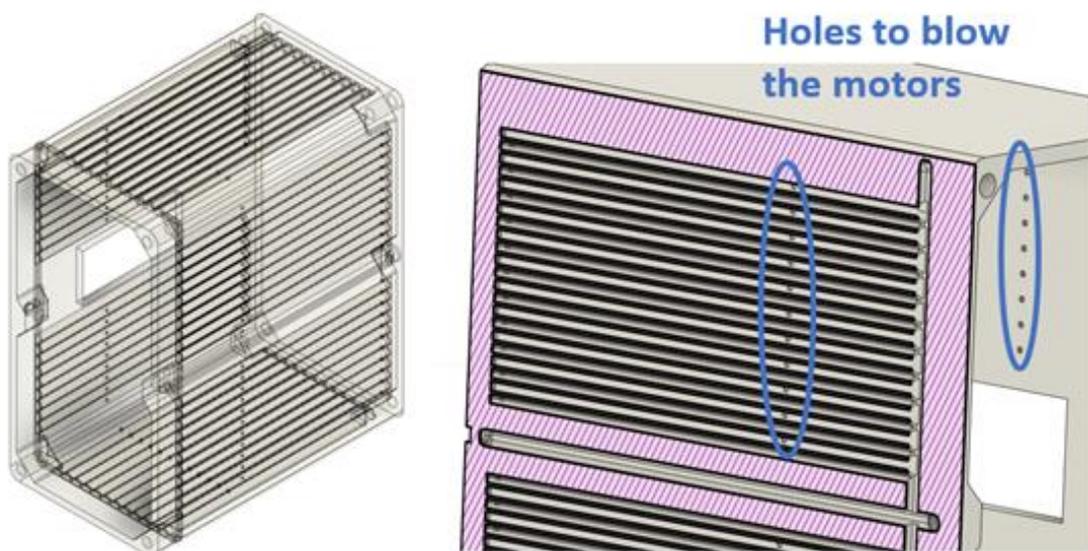
Les enseignements tirés du développement de ce pilote sont les suivants :

La fabrication de ce pilote a montré qu'il est possible d'utiliser les technologies de FAM pour obtenir une pièce fonctionnelle, pour une application industrielle, avec des performances plus élevées qu'à l'origine. La fonctionnalité a été démontrée malgré l'apparition de quelques défauts. Les traitements thermiques devraient être envisagés pour ce type de pièces, afin de contrôler la structure du matériau et d'obtenir des meilleures propriétés.

### **Pilote SP1-MEUPE/INESPASA**

La nouvelle conception du boîtier en FAM du pilote SP1 (Figure 37) a été réalisée en tenant compte des éléments suivants :

- Canaux internes avec air forcé pour diminuer la température de surface du boîtier.
- Trous pour refroidir les moteurs avec de l'air pendant le fonctionnement.



*Figure 37 : Image des canaux internes et des trous de réfrigération des moteurs*

Avant la fabrication du boîtier, plusieurs considérations ont été prises en compte :

- Résultats obtenus en termes de caractérisation des matériaux présentés dans le livrable D 2.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM
- Les résultats thermiques des éprouvettes sont également présentés dans le livrable D 2.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM
- Résultats de la simulation thermique sur le cas d'étude

En ce qui concerne le dernier point, des simulations thermiques ont été réalisées afin d'évaluer le comportement de l'ensemble de la machine de forage. Contrairement à l'analyse effectuée au niveau des éprouvettes, les conditions du modèle sont maintenues constantes et l'essai expérimental n'est effectué que pour déterminer l'erreur du modèle. La Figure 38 montre la coupe transversale du boîtier fabriqué par FAM. Comme on peut le voir, après 50 minutes de fonctionnement, la température du moteur atteint presque 70°C, mais grâce à la conception de l'enveloppe externe et au système de convection forcée mis en œuvre, la température extérieure reste inférieure à 25°C.

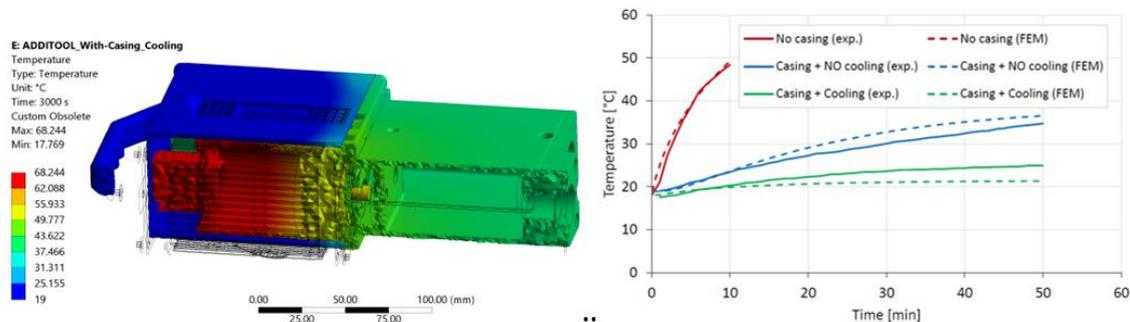


Figure 38 : Coupe transversale du champ thermique de la machine de forage avec le boîtier et le refroidissement activé (gauche). Comparaison entre les températures expérimentales et les températures issues de la simulation FEM (à droite)

Les pilotes SP1 ont été produits par fusion laser sur lit de poudre (LPBF) sur une machine Renishaw (RenAM 500E). 2 pièces différentes (BJ1 & BJ2) ont été fabriquées en Scalmalloy® avec une épaisseur de couche de 30 µm. Les boîtiers ont été conçus et orientés dans la plaque de construction pour éviter toute structure de support afin de minimiser le temps de fabrication et de post-traitement. Ci-dessous, on peut observer les processus de fabrication (Figure 39-gauche) et d'extraction (Figure 39-droite) de BJ2.

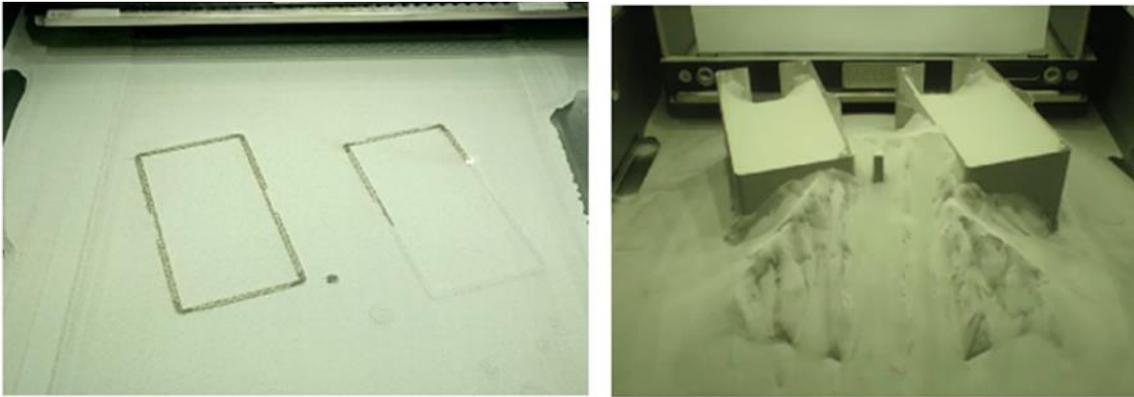


Figure 39 : (gauche) Processus de fabrication et (droite) d'extraction de BJ2

3 boîtiers ont été fabriqués en 2 lots différents. BJ1 (Figure 40-gauche) a pris 30h avec une consommation de matière de 246g pour produire le démonstrateur n°1 (D1), tandis que BJ2 (Figure 40-droite) a pris 42h avec une consommation de matière de 432g pour fabriquer les démonstrateurs n°2 et n°3 (D2 et D3). L'extraction de la poudre occluse dans les canaux internes de D1 et D3 a été réalisée à travers les trous conçus pour souffler les moteurs.

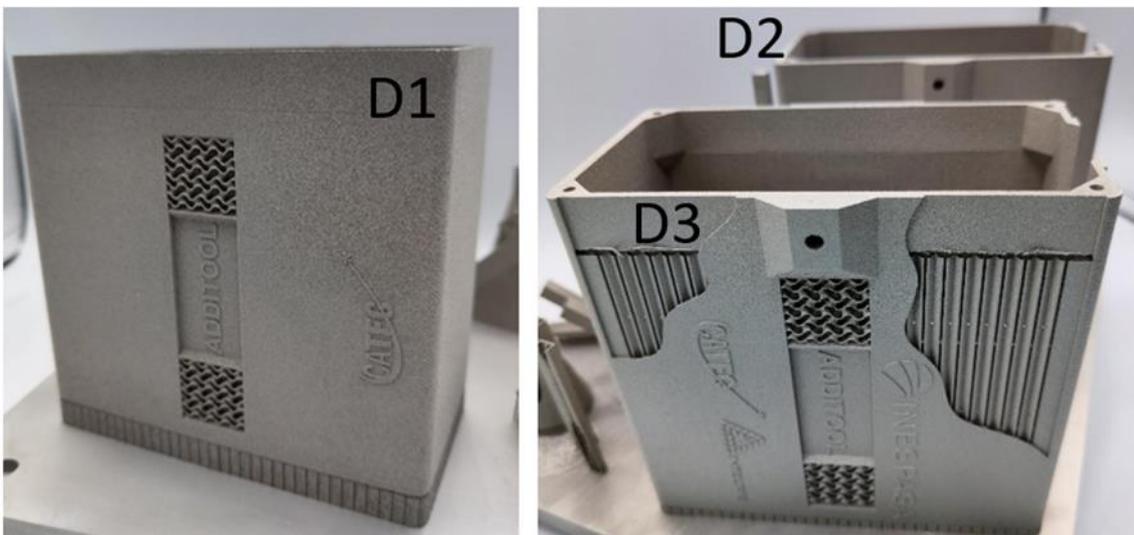


Figure 40 : (gauche) D1, (droite) D2 et D3 encore jointes au plateau de fabrication

D3 a été fabriqué comme démonstrateur pour montrer les canaux internes, tandis que D1 et D2 ont été produits pour démontrer la solution avec l'air forcé pendant le fonctionnement.

Afin de comparer différents processus pour obtenir les interfaces (zones avec des exigences dimensionnelles plus élevées, surlignées en rouge dans la Figure 41), deux post-traitements différents ont été envisagés :

- Les interfaces et les filetages de D1 ont été obtenus par usinage (installations MEUPE, Figure 42-gauche).
- Les interfaces D2 et D3 ont été réalisées par EDM (Electro Discharge Machining) (Figure 42-droite), et les filetages par un système de perçage vertical (Figure 43).

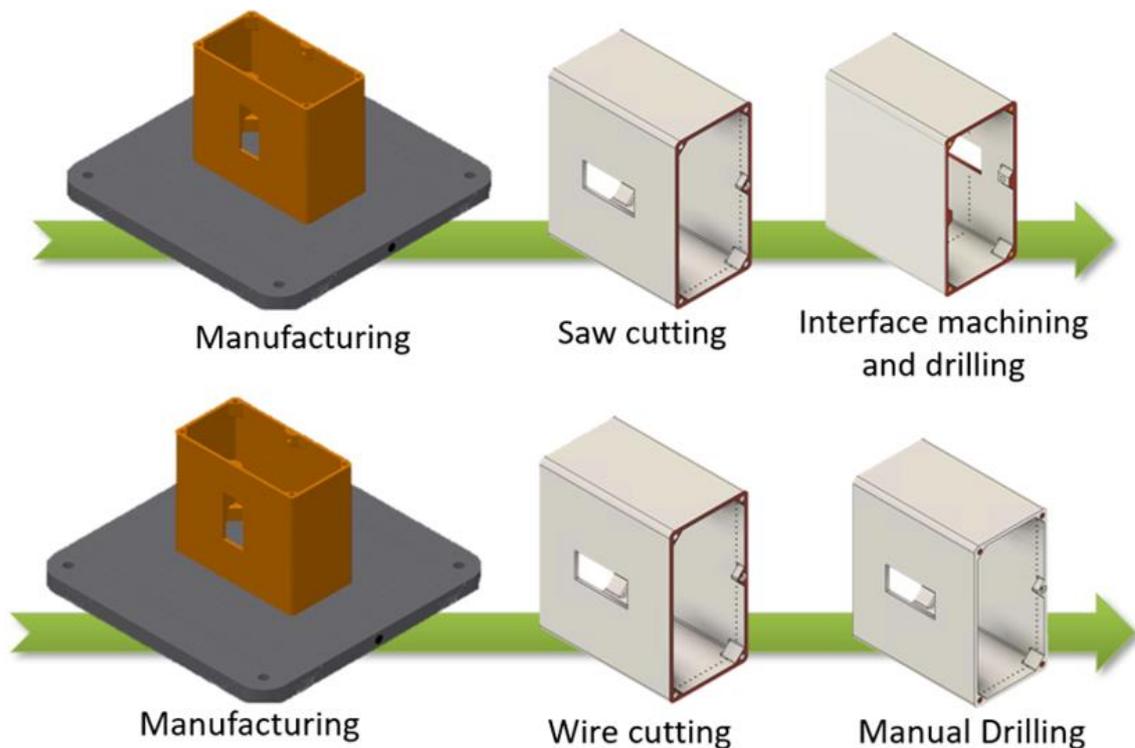


Figure 41 : Chaîne de valeur de post-traitement de D1 (en haut), D2 et D3 (en bas)

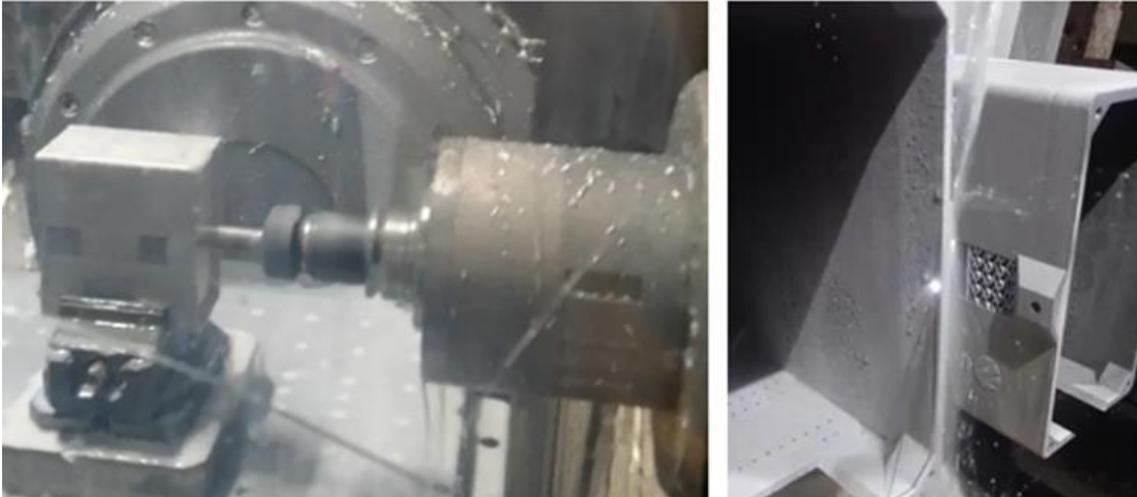


Figure 42 : (gauche) Processus d'usinage des interfaces D1 et (droite) réalisation interface par EDM pour D2 et D3



Figure 43 : (à gauche) Perçage et (à droite) filets obtenus manuellement pour D2 et D3

Pour s'assurer qu'aucune poudre n'est coincée à l'intérieur des canaux internes, un fluide chimique a été injecté à travers les cavités internes. Un acide nitrique et un acide fluorhydrique ont été utilisés pendant 5 minutes afin d'éviter une réduction de l'épaisseur et de maintenir l'intégrité structurelle. Ci-dessous, on peut observer les démonstrateurs après le processus de nettoyage (Figure 44).

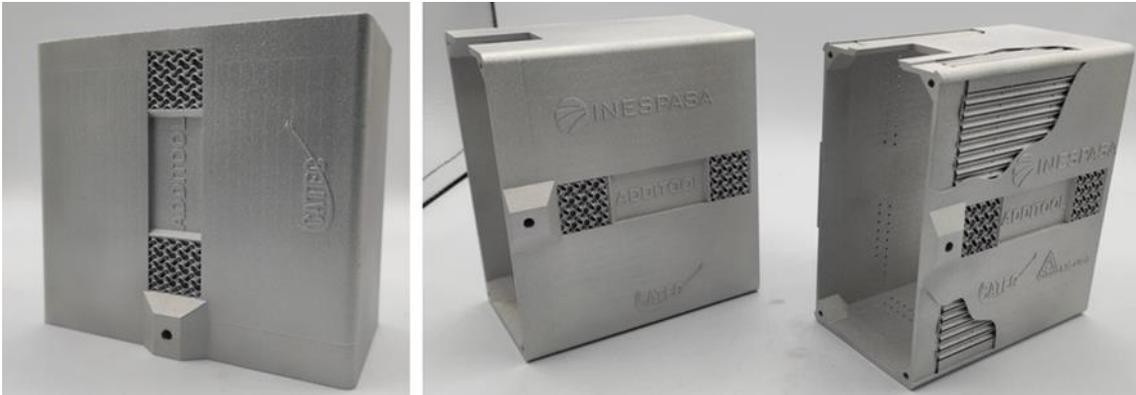


Figure 44 : Images de D1 (gauche), D2 et D3 (droite) après le processus de nettoyage

Tous ont été inspectés par tomographie assistée par ordinateur, qui est la seule technique non destructive capable de montrer les écarts dimensionnels dans les cavités internes et de s'assurer qu'aucune poudre n'est présente à l'intérieur des composants. La Figure 45 présente une coupe transversale en 2D et une représentation en 3D des résultats obtenus par tomographie pour D1. Pour obtenir l'analyse des écarts 3D, une analyse comparative entre la CAO nominale (orange dans la Figure 45) et l'ensemble des données de la tomographie 3D (gris dans la Figure 45) a été réalisée. On constate qu'il n'y a pas de poudre à l'intérieur des canaux et qu'aucune déviation significative n'est observée.

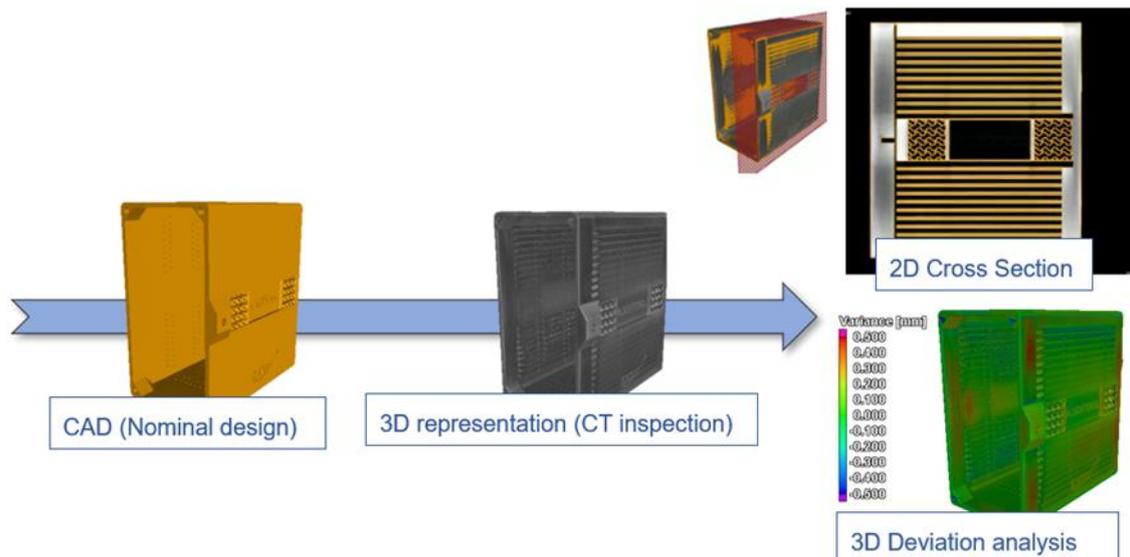


Figure 45 : Résultats de l'inspection par CT de D1

Plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés pour valider la solution via la FAM. Une caméra de thermographie infrarouge et un thermocouple ont été utilisés pour surveiller le comportement thermique pendant le fonctionnement. Les deux cas, conventionnel et modifié avec des canaux internes, ont été analysés pendant 50 minutes, les moteurs fonctionnant à 300 tr/min. La Figure 46 en haut à gauche (indication B) montre que le boîtier conventionnel atteint 55°C en 50 minutes, tandis que la température maximale atteinte dans le boîtier via FAM avec air forcé après 50 minutes de fonctionnement est de 25°C (indication A, Figure 46 en bas à gauche).

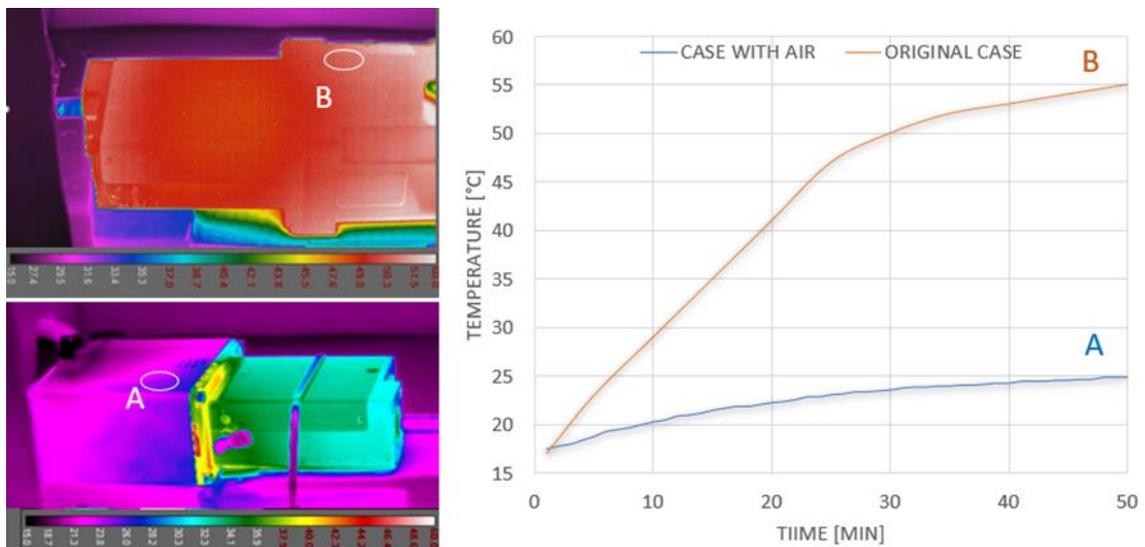


Figure 46 : Images thermographiques des boîtiers conventionnels (en haut à gauche) et des boîtiers redessinés pour la FAM (en bas à gauche). (à droite) Graphique comparatif des thermocouples

Des tests supplémentaires ont été effectués pour analyser le comportement du boîtier FAM lorsqu'il fonctionne sans air forcé. Dans ce cas, il atteint 40°C après 50 minutes de fonctionnement (Indication C, Figure 47) au lieu des 55°C enregistrés dans le boîtier conventionnel. À ce stade, si de l'air est induit à l'intérieur des canaux, le boîtier atteint 25°C en moins de 10 minutes (indication D, Figure 47).

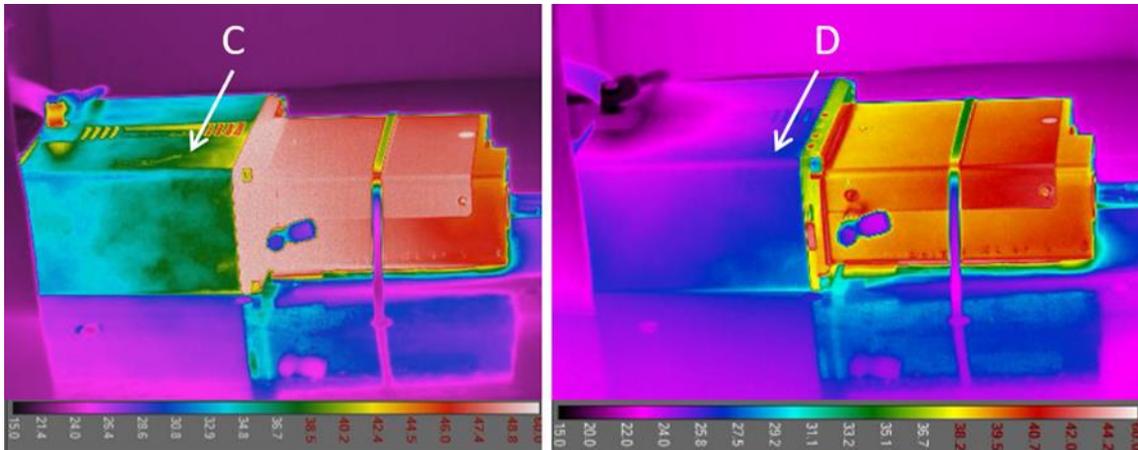


Figure 47 : Images thermographiques du boîtier FAM (à gauche) fonctionnant sans air forcé et (à droite) pendant le processus de refroidissement avec air forcé

Si l'on compare les simulations thermiques avec les essais effectués sur les cas conventionnel et FAM, on peut voir sur la Figure 48 que le modèle et les données expérimentales sont globalement concordant.

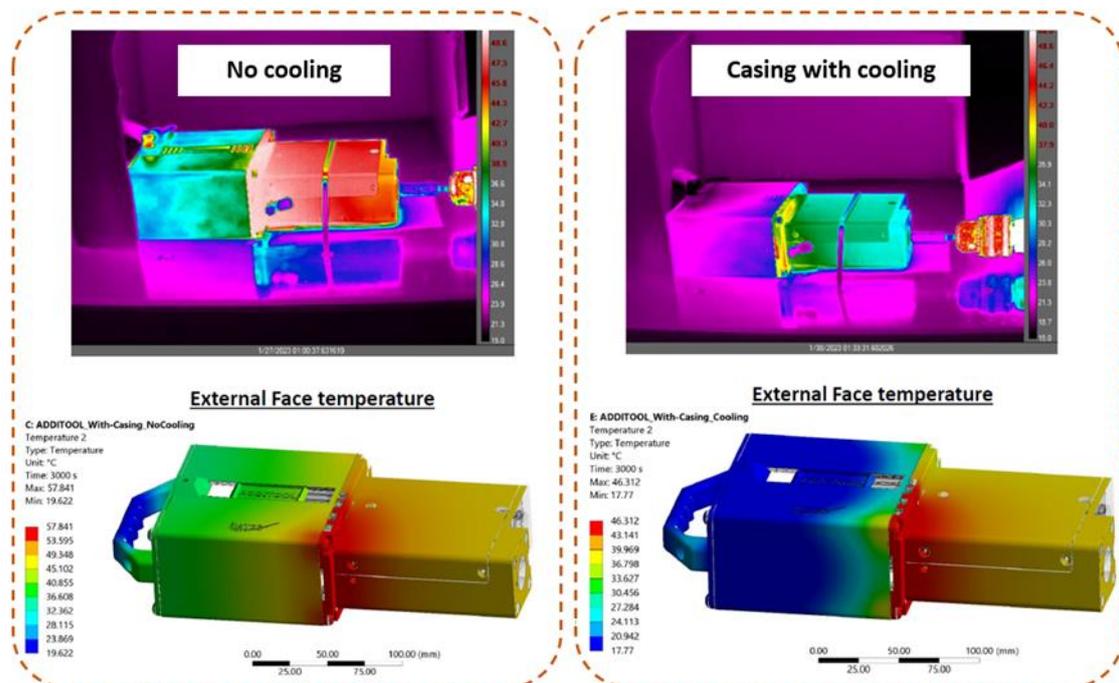


Figure 48 : Comparaison entre le comportement expérimental et la simulation

En ce qui concerne les enseignements tirés du développement de ce projet pilote, les essais finaux ont montré une amélioration du comportement thermique en termes de dissipation de la chaleur grâce à l'introduction d'un refroidissement interne. En termes de réchauffement pendant le fonctionnement, les différences sont de 15°C en comparant le boîtier conventionnel avec la nouvelle conception et de 30°C si l'on introduit de l'air forcé. Si le boîtier FAM est utilisé sans air forcé, il peut être à nouveau opérationnel en moins de 10 minutes (après 50 minutes de fonctionnement).

En ce qui concerne le poids du composant, l'utilisation d'un boîtier FAM avec des canaux internes a permis une réduction de 37 %.

En outre, les simulations thermiques ont démontré une correspondance étroite entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés dans le cas du boîtier FAM. Cette approximation pourrait être très intéressante dans le cas où une nouvelle conception serait proposée, par exemple en redessinant l'ensemble du boîtier, et pas seulement l'endroit où se trouvent les moteurs. Dans ce contexte, la performance thermique du boîtier pourrait être vérifiée avant la fabrication, ce qui éviterait des essais expérimentaux supplémentaires pour valider le composant.

## Pilote FR2-SOMOCAP

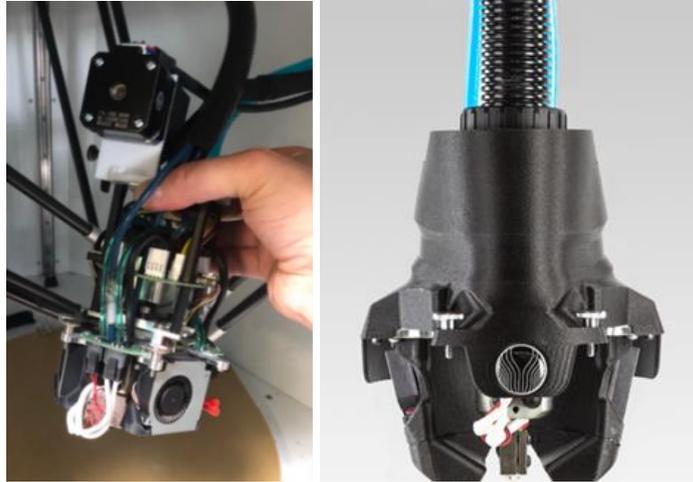
La technologie étant nouvelle et non exploitée pour un système ouvert, il a fallu commencer par faire quelques adaptations matérielles sur la machine FDM :

- Développement avec la machine Lynxter S600D + filament NANO E H13 (abandon du développement du NANO VIA 316L car pas assez de propriétés mécaniques sur ce matériau).
- Plusieurs tests d'impression + déliantage + frittage avec un four cubique (atmosphère Argon + 2.5% Hydrogène).
- Impression d'échantillons pour le CEIT afin d'améliorer le déliantage et le frittage.
- Reconception de la pièce en tenant compte de toutes les règles de conception (boucle de discussion avec SOMOCAP avec modification du diamètre du canal de refroidissement et corrélation avec la simulation).
- Négociation avec d'autres nouvelles entreprises pour développer une nouvelle pâte H13 ou 17-4PH (voir Livrable 2.3.1 Etude de viabilité)

### 1) Modification de la machine S600D + NANO E H13

La machine étant à l'origine montée en "Bowden", il a été nécessaire d'apporter des modifications matérielles pour la transformer en "Direct Drive". En effet, compte tenu de la fragilité du filament (chargé à plus de 50% en volume en poudre métallique), une machine "Direct Drive" est recommandée, avec une buse de 0,8mm en acier pour éviter qu'elle ne se bouche.

Cette modification a permis de trouver tous les paramètres d'impression avant d'acheter le nouvel outil d'extrusion (développé en cours de projet par Lynxter) - voir Figure 49.



*Figure 49 : Modification de la tête triple extrusion en Direct Drive*

Grâce à l'identification des paramètres, voir Figure 50, le profil d'impression est le suivant :

- Diamètre de la buse : 0,8 mm
- Facteur d'extrusion : 115%
- Largeur d'extrusion : 0,8 mm
- Hauteur de couche : 0,2 mm
- Remplissage : 100%
- Chevauchement des contours : 50%
- Température de la buse : 183°C
- Température du plateau : 35°C
- Température de la chambre : 25°C
- Refroidissement : 10%
- Vitesse : 15mm/sec

RECHERCHE DES PARAMETRES INITIAUX																			
Test N°	Etruder			Layer				Infill					Temperature		Cooldown	Speed	Commentaires		
	Nozzle	Distression	multiplier/co	extrusion width/mm	layer/mm	Top Solid	bottom Solid	Outline Perimetre	Internal Fill	External Fill	Interior Fill	Outline Overlap	Infill Extrusion	T°c base	T°c plateau	LayerZ/c		mm/s	
1	0.8	1.14		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	30	0	20	couche anachéelgrinding sur filament	
2	0.8	1.3		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	30	0	20	couche anachéelgrinding sur filament	
3	0.8	1.3		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	30	0	20	couche anachéelgrinding sur filament	
4	0.8	1.3		0.96	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	30	0	20	couche anachéelgrinding sur filament	
5	0.8	1		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	30	0	15	couche anachéelgrinding sur filament	
6	0.8	1		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	30	0	15	Pas d'adhérence sur plateau	
7	0.8	1		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	35	0	15	dimensionnel ok avec optimisation point	
8	0.8	1		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	35	0	15	dimensionnel ok avec Random point	
9	0.8	1		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	50	45	100	150	35	0	15	Défaut cohésion couche	
10	0.8	1		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	35	0	15	Défaut cohésion couche	
11	0.8	1.07		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	35	0	15	Défaut cohésion couche	
12	0.8	1.1		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	35	0	15	Défaut cohésion couche	
13	0.8	1.12		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	100	45	100	150	35	0	15	cohésion couche Perfectible	
14	0.8	1.14		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	45	100	150	35	0	15	cohésion couche Perfectible entre perimetre et remplissage grinding sur filament	
15	0.8	1.14		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	104	150	35	0	15		
16	0.8	1.14		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	150	35	0	15	Bonne cohésion couche Première	
17	0.8	1.16		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	150	35	0	15	Pas bonne cohésion centre Solid et grinding sur filament	
18	0.8	1.16		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	153	35	0	15	Nettoyage Buse et Heat-break	
19	0.8	1.15		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	153	35	2100V	15	Première délaminé	
20	0.8	1.16		0.8	0.2	5	5	5	Rectilinear	Concentric	0	50	100	153	35	2100V	15	Bonne cohésion de couche	

Figure 50: Recherche des paramètres

## 2) Tests d'impression + déliantage + frittage

Plusieurs échantillons ont été imprimés (Figure 51), notamment :

- Cubes.
- Parois (pour connaître les épaisseurs maximales pouvant être déliantées et frittées).
- Cylindres.
- Cubes avec trou à l'intérieur.
- Structure en treillis.
- Éprouvettes de traction.
- Cylindres avec canaux de refroidissement - Boucle avec la phase de reconception pour voir la qualité du dépôt.
- « Benchy boat » pour valider la bonne impression.
- Etc.



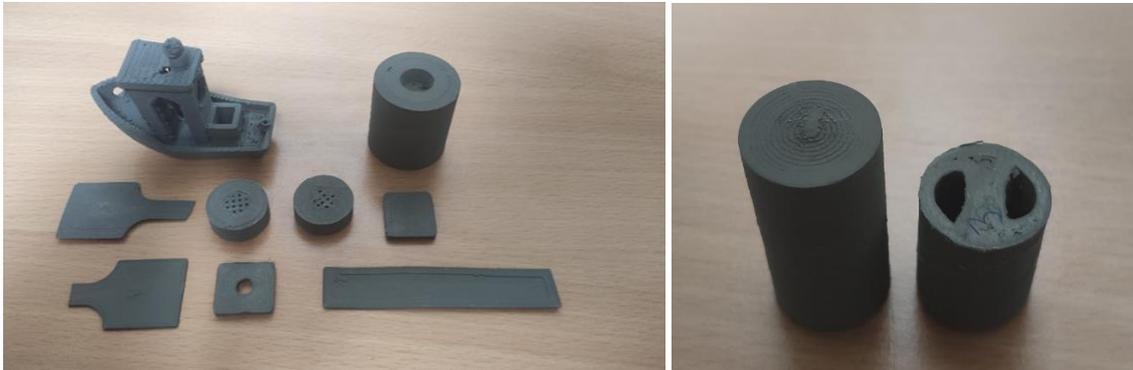


Figure 51: Tests d'impression

ESTIA Addimadour s'est équipée d'un four cubique prêté par Lynxter pour les premiers essais. Ce four est composé de parois poreuses avec la possibilité d'avoir une atmosphère inerte et une température élevée (+1600°C). Le matériel utilisé est visible sur la Figure 52.



Figure 52: Four utilisé pour les premiers essais

Le fournisseur de filament a fourni des courbes de déliantage et de frittage pour chaque matériau. Pour l'acier H13, 91 heures sont nécessaires pour délianter et fritter la pièce, voir Figure 53.

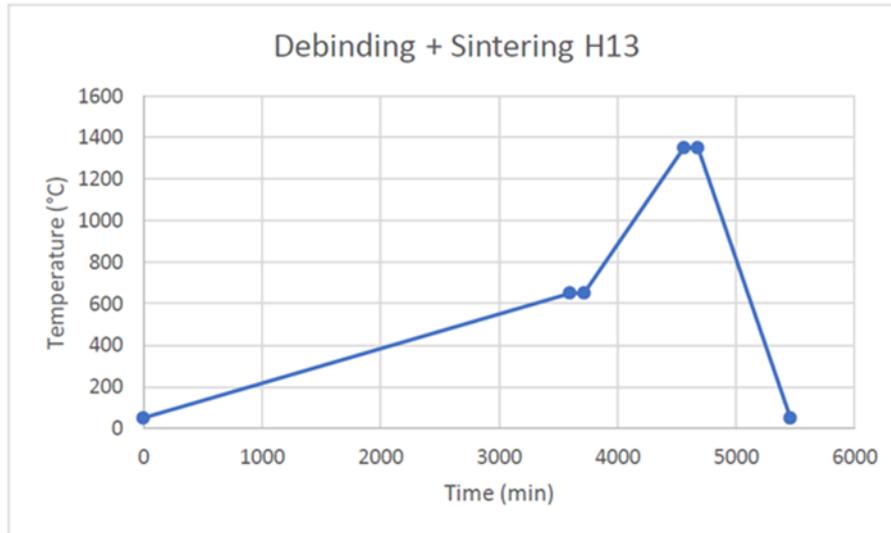


Figure 53: Exemple de courbe de déliantage et frittage pour du H13

Malgré de nombreux essais, le four utilisé ne donne pas de résultats satisfaisants (voir Figure 54), il reste notamment des:

- Fissures,
- Bulles,
- Déformations,
- Résidus de polymères / carbonisation,
- etc.

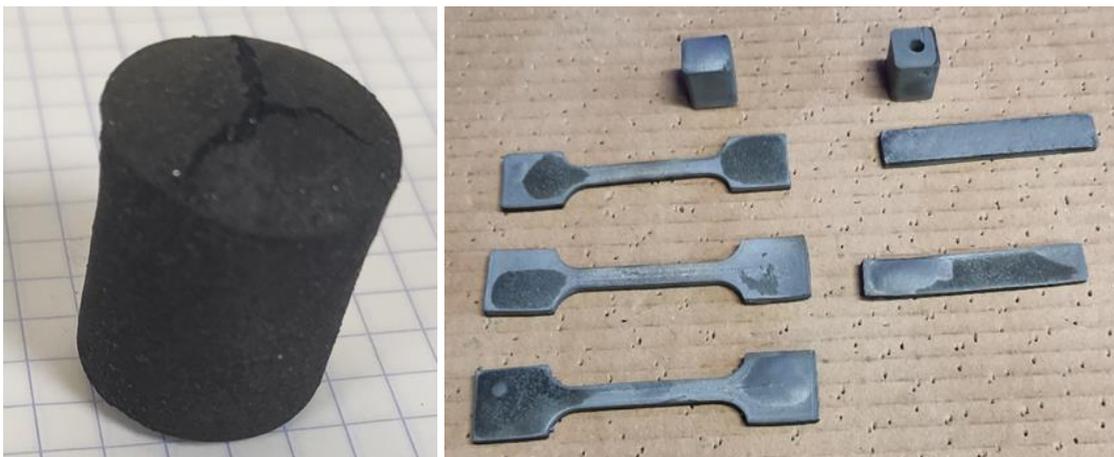


Figure 54: Exemples de problèmes de déliantage/frittage

Pour conclure avec cet équipement, le cycle de 91h pour déliantier et fritter une pièce est trop long et doit être réduit pour rester compétitif et exploitable par une PME. En effet, ce type de cycle implique une très forte consommation d'électricité et une très

forte consommation de gaz : A 1,6L/min, c'est environ 8800L pour un cycle complet ce qui correspond à environ 1 bouteille de gaz de 50L à 200Bars.

De plus, la pièce a de très mauvaises propriétés mécaniques pour être utilisée en l'état. Un four cubique dont les parois intérieures sont poreuses n'est pas recommandé pour cette application, un four tubulaire à atmosphère contrôlée est bien plus adapté. Le déliantage est une opération clé du processus ; la qualité de cette opération est fondamentale pour ne pas causer de dommages physiques (fissuration) ou chimiques (cémentation) à la pièce. Une très grande partie des défauts qui apparaissent après le frittage sont générés par un déliantage inadéquat.

### 3) Impression d'éprouvettes pour améliorer le cycle de déliantage et de frittage

Afin d'améliorer la qualité du déliantage et du frittage et de couvrir l'ensemble de la chaîne de valeur de cette nouvelle technologie, de nombreux échantillons ont été imprimés avec la Lynxter S600D et traités puis caractérisés dans les installations du CEIT, voir Figure 55.



Figure 55: Échantillons pour améliorer le déliantage et le frittage

#### 3.1) Optimisation du déliantage

Afin de choisir le bon cycle de déliantage, des tests thermogravimétriques (TGA) ont été effectués, Figure 56. Ce test montre la perte de masse du liant due à l'application d'un cycle thermique (rampe de chauffe de 5 °C/min jusqu'à 1000 °C dans une atmosphère H<sub>2</sub>). La première courbe (orange) a été réalisée sur un échantillon tel qu'imprimé et montre deux zones de perte de masse plus importante (275 °C et 375 °C). La perte de masse totale dans cet échantillon était de 9,2 % et a été complètement atteinte autour de 500 °C.

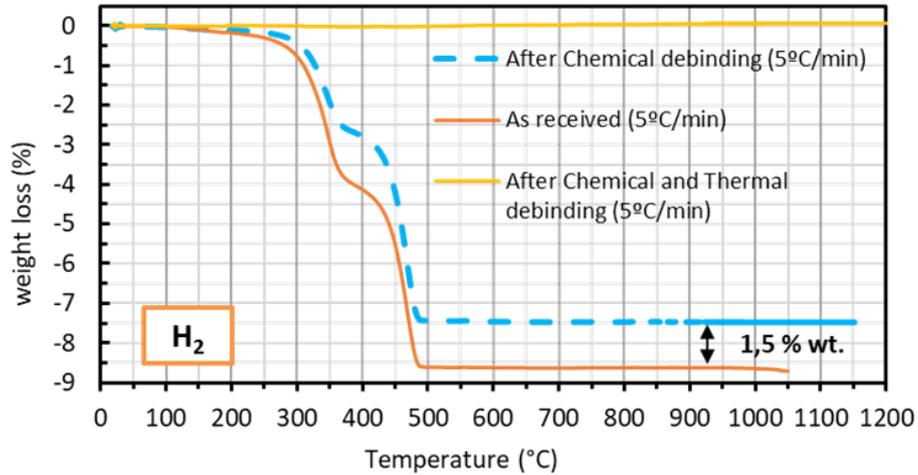


Figure 56 : Résultats de la thermogravimétrie des échantillons H13. Orange : Cycle TGA sur l'échantillon tel qu'il a été reçu ; bleu : Cycle TGA après déliantage chimique ; jaune : Cycle TGA sur un échantillon après déliantage thermique dans un four.

En tenant compte des résultats de la TGA, un cycle de déliantage avec deux étapes de maintien (à 275 et 375 °C) et une température maximale de 550 °C, pour assurer l'élimination complète du liant, a été conçu. Dans la première approche, la rampe de montée en température utilisée était de 1°C/min. Cette rampe de montée en température s'est avérée trop rapide car les échantillons présentaient des fissures et des déformations (Figure 57). Le cycle a donc été optimisé en réduisant la rampe de chauffage à 0,5 °C/min, Figure 58.



Figure 57 : Échantillons H13 après déliantage avec une rampe de montée en T°C de 1 °C/min

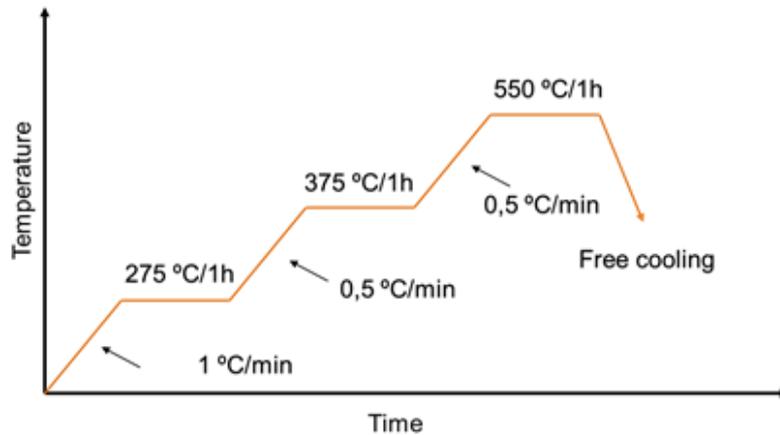


Figure 58 : Cycle de déliantage conçu avec les résultats TGA pour les échantillons H13

Bien que les fissures aient disparu après le nouveau cycle de déliantage thermique, les échantillons présentaient encore des déformations et des bulles (Figure 59, gauche), et une nouvelle approche a été utilisée en introduisant un déliantage chimique avant le déliantage thermique.



Figure 59 : Échantillons H13 après déliantage thermique (gauche) et après déliantage chimique + déliantage thermique (droite).

Pour le **déliantage chimique**, les échantillons ont été complètement immergés dans de l'isopropanol (alcool éthylique) pendant 5 heures à 55 °C, voir l'installation de laboratoire dans la Figure 60 suivante. L'analyse TGA effectuée sur les échantillons avec déliantage chimique a montré le même comportement que les échantillons tels que reçus, avec deux pentes différentes, mais avec une quantité moindre (1,5 % en masse) de perte de liant, Figure 56 courbe bleue. Bien que la perte de masse soit très faible, cette étape permet d'éliminer plus facilement le liant lors du déliantage thermique ultérieur et la géométrie des échantillons est donc plus stable et sans présence de bulles (Figure 59, droite).



Figure 60 : Installation en laboratoire pour le déliantage chimique

Enfin, grâce à l'application du déliantage chimique, le déliantage thermique a pu être optimisé en suivant et simplifié en supprimant les deux étapes de maintien, comme illustré sur la Figure 61. Le déliantage thermique au Ceit a été effectué dans un four de type Limberg avec un tube métallique couplé avec des tuyaux d'entrée et de sortie pour la circulation du gaz. Les cycles ont été effectués dans une atmosphère Arcal (97,5 % Ar et 2,5 % H<sub>2</sub>). Après ce cycle, les échantillons ont de nouveau été introduits dans des cycles TGA (ligne jaune dans la Figure 56) confirmant l'élimination totale du liant au cours de ce cycle de déliantage thermique optimisé et simplifié.

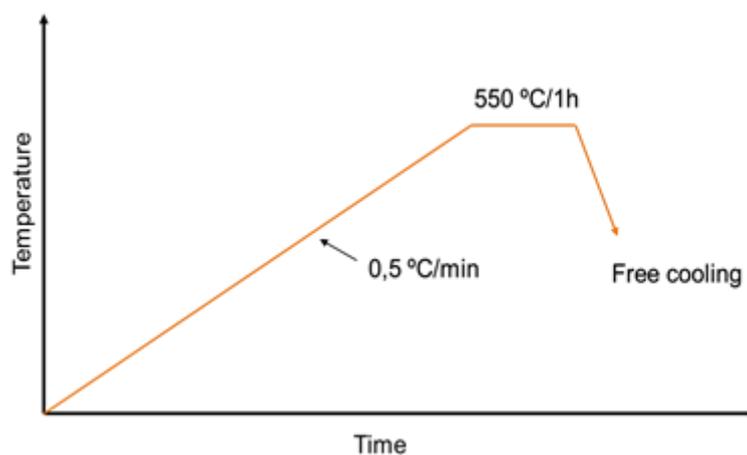


Figure 61 : déliantage thermique simplifié après le déliantage chimique

### 3.2) Optimisation du cycle de frittage

Le frittage des échantillons H13 après déliantage chimique + thermique a été réalisé dans un four de type MRF. Deux traitements de frittage (1350 °C et 1400 °C) ont été appliqués avec les mêmes conditions, un temps de maintien de 2h et une atmosphère Arcal (97,5 % Ar y 2,5 % H2). La différence obtenue avec ces deux cycles de frittage est expliquée dans le livrable 2.1. Rapport sur les matériaux pour la FAM.

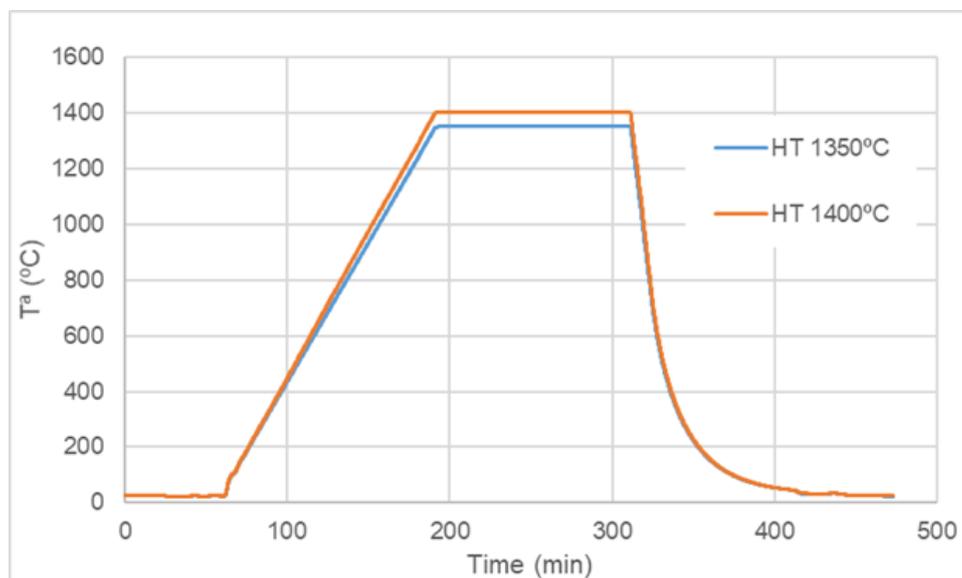


Figure 62 : Cycles de frittage (1350 °C et 1400 °C) appliqués aux échantillons H13 après déliantage chimique + thermique

### 3.3) Cycles HIP

En outre, pour obtenir une plus grande densification et pouvoir fermer les porosités internes du matériau, un cycle de compression isostatique à chaud (HIP) a été réalisé à 1150 °C et 150 MPa (pression appliquée avec de l'argon) avec un maintien de 2 heures. Une rampe de chauffe de 10 °C/min et un refroidissement libre ont été utilisés pour le cycle HIP, Figure 63.

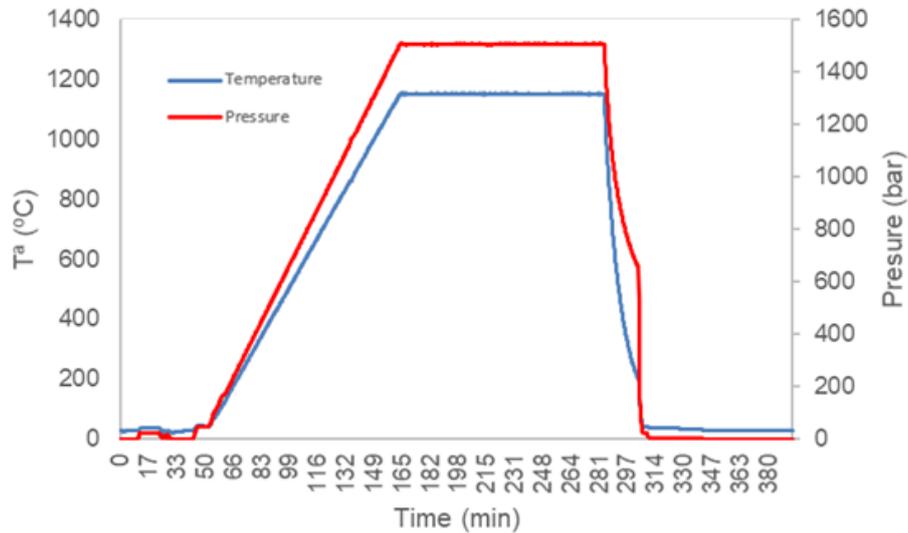


Figure 63 : Cycle HIP, 1150 °C, 2 h, 150 MPa, rampe de chauffe de 10 °C/min et refroidissement libre.

### 3.4) Validation des composants

La validation des composants a été effectuée et les résultats sont présentés dans le document D2.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM.

#### 4) Reconception de la pièce

Le cas d'utilisation proposé par la société SOMOCAP comportait un canal de refroidissement conventionnel à l'intérieur de la pièce, voir la Figure 64. Cependant, ce simple trou droit pour le refroidissement n'est pas suffisant et le refroidissement n'est pas efficace : pendant la phase de refroidissement, la pièce en polymère après injection présente une ovalisation et n'est pas tout à fait circulaire. L'utilisation des technologies de fabrication additive permet d'effectuer un refroidissement de type « Conformal Cooling » qui améliore grandement le refroidissement. Une nouvelle conception du refroidissement interne a donc été réalisée, comme illustré sur la Figure 65.

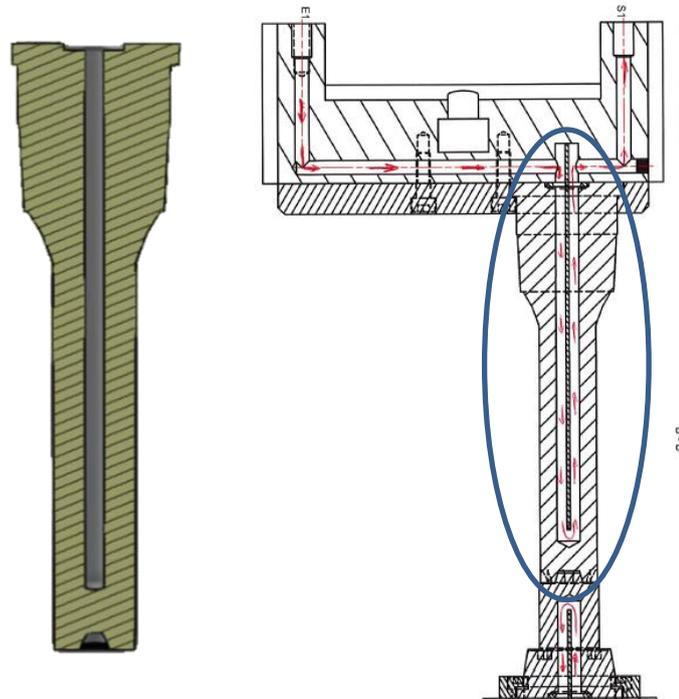


Figure 64: Régulation conventionnelle

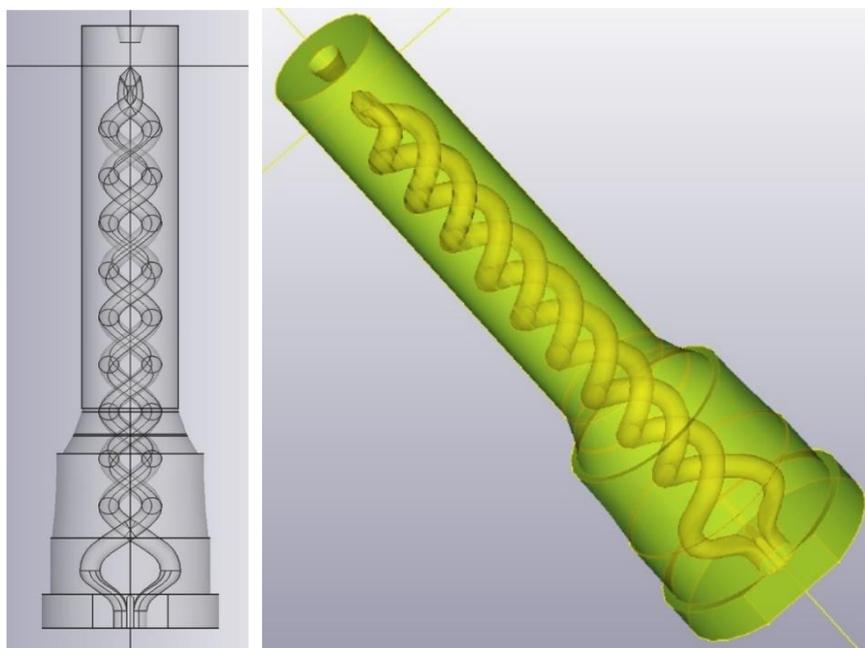
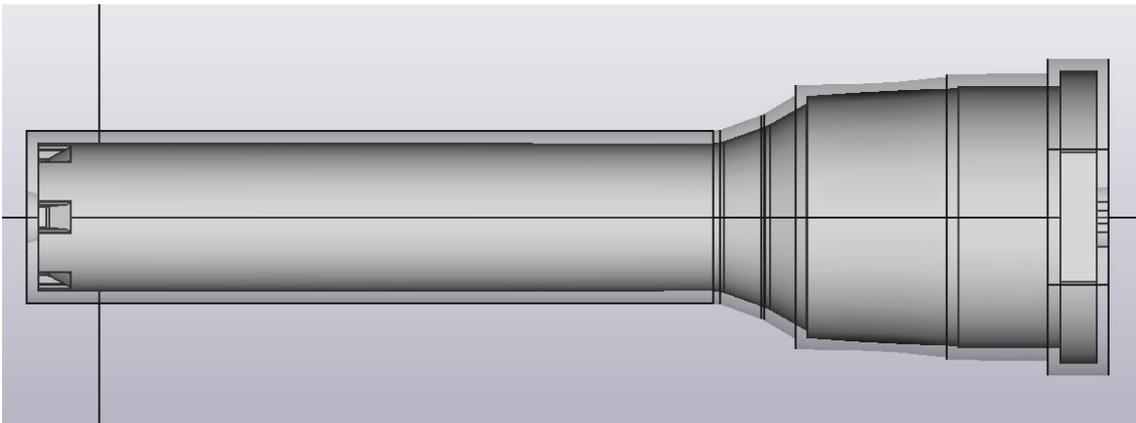


Figure 65: Conformal cooling

En outre, comme pour toutes les technologies de FAM, une épaisseur supplémentaire a été ajoutée pour l'étape d'usinage de la surface fonctionnelle externe.

Dans ce cas, 2 mm ont été ajoutés (voir la Figure 66) pour la surface fonctionnelle externe pour :

- S'assurer qu'il y a suffisamment de matière à usiner et qu'il n'y a pas de matière manquante.
- Prévoir les déformations possibles après le déliantage et le frittage.



*Figure 66: Surépaisseurs pour usinage*

Pour les pièces fabriquées par le procédé FFF avec l'équipement Markforged Métal X, la méthode suivante a été appliquée :

- Fabrication d'échantillons pour les deux matériaux : 17.4-PH et H13.

Les éprouvettes de traction fabriquées à l'horizontale, les échantillons de dilatométrie, les échantillons HIP de forme cylindrique avec un trou central et les échantillons pour l'étude microstructurale sont présentés dans la Figure 67.



Figure 67. Éprouvettes de traction construits à l'horizontale.

➤ Sélection des paramètres

Table 7. Paramètres sélectionnés pour la fabrication des éprouvettes.

Hauteur de la couche (mm)	0,125
Méthode de remplissage	Solid
Épaisseur des bords (mm)	0,5-2
Epaisseur du dessus et du dessous (mm)	0-2

➤ Reconception

La pièce a dû être fabriquée en orientation horizontale en raison de la limitation de la hauteur de la chambre de fabrication. Les canaux de refroidissement ont donc dû être adaptés pour éviter les supports à l'intérieur. L'adaptation a consisté à choisir une forme en goutte d'eau.

- Fabrication d'éprouvettes pour vérifier l'intégrité des canaux et l'absence de supports à l'intérieur de ceux-ci.

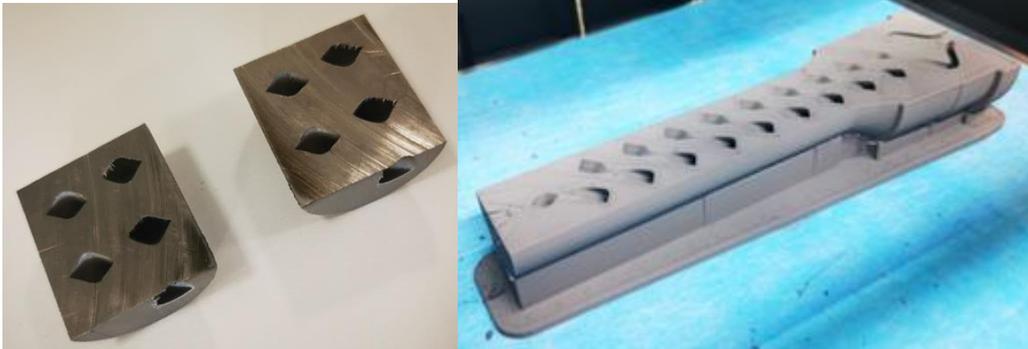


Figure 68. Éprouvettes pour tester les canaux de refroidissement.

- Fabrication des démonstrateurs dans les deux matériaux.

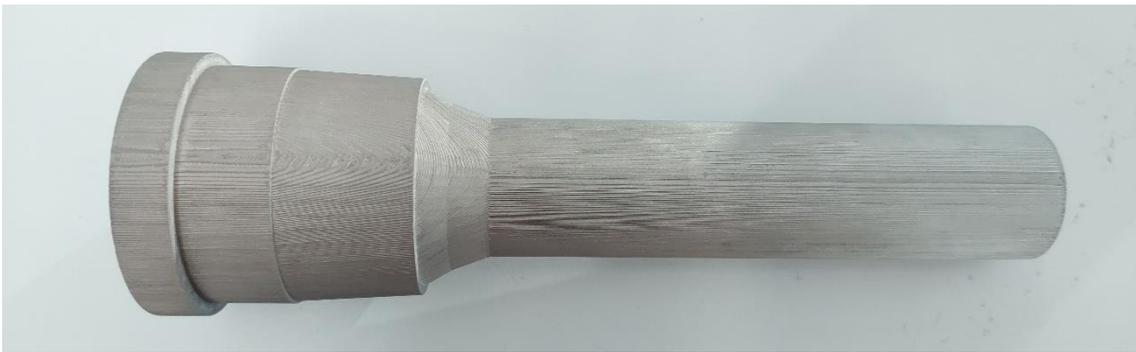


Figure 69 : Exemple d'une pièce fabriquée

- Usinage pour enlever les 2 mm de surépaisseur de la surface externe et obtenir une surface lisse.



*Figure 70 : Pièce usinée*

Les enseignements tirés du développement de ce pilote sont les suivants :

- La machine Markforged est très fermée, de sorte que le procédé ne peut pas être amélioré.
- En raison des restrictions dimensionnelles de la chambre de fabrication et du four, la pièce a dû être imprimée horizontalement et, par conséquent, une nouvelle conception des canaux a été appliquée pour éviter les supports.
- L'application de la technologie HIP a permis de fermer la plupart des pores et d'atteindre une densité d'environ 98 %. Cela a permis d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques.

## Pilote PT2-VIDRIMOLDE

### Fabrication

#### Fabrication du corps principal avec la technologie L-PBF

Le moule du pilote PT2 a été fabriqué en deux étapes. Tout d'abord, le corps principal a été fabriqué par L-PBF, dans une entreprise locale (DRT), en raison de la taille de la pièce. Ce corps a été fabriqué à l'aide de la poudre EOS StainlessSteel CX, une poudre d'acier inoxydable : “tooling grade steel characterized having a good corrosion resistance, combined with high strength and hardness.”<sup>[1]</sup>. Ensuite, des couches d'Inconel 718 ont été ajoutées à ce corps par dépôt d'énergie dirigée par laser (DED Powder Laser – DED-PL).

Avant la fabrication de la pièce elle-même, la poudre a été analysée et des échantillons L-PBF ont été produits pour effectuer des tests de dépôt DED-PL. Les résultats de la première tâche peuvent être consultés dans le livrable D2.1. Rapport sur les matériaux pour la FAM. Quant aux essais de dépôt, ils sont décrits ci-dessous.

#### Tests de rechargement DED-PL

Les essais de dépôt ont été réalisés dans une cellule TruLaser 3000 de Trumpf, avec ces paramètres :

Paramètres	Valeur
Vitesse (m/min)	0.4
Diamètre du spot (µm)	2000
Mode de fonctionnement de la sortie laser	Annulaire
Puissance du laser (W)	800
Densité de puissance surfacique (W/mm <sup>2</sup> )	255
Débit de poudre (g/min)	5
Débit de gaz porteur (l/min)	4 (He)
Débit de gaz de la buse (l/min)	15 (Ar)

L'étude suivante caractérise l'hybridation du procédé DED-PL avec le procédé L-PBF. Les objectifs de ce travail sont de clarifier les paramètres procédé suivants :

- Epaisseur de la couche solide qui recouvre la structure interne du réseau. La recherche vise à réduire cette valeur d'épaisseur tout en empêchant la création de défauts sur la structure interne.
- Paramètres de fabrication du procédé DED-PL, à savoir la puissance du laser (P), la vitesse d'alimentation (F) et le débit de poudre (Q).

### Méthodologie : Tests mono cordon

Des essais mono cordons, combinant les ensembles de paramètres décrits précédemment avec des substrats de différentes épaisseurs : 6, 1 et 0,7 mm ont été réalisés. Les cordons fabriqués ont une longueur de 25 mm et ont été centrés sur une surface de 15 mm x 32mm. Figure 71, Figure 72.

	P (W)	F (mm/min)	Q (g/min)	P/F
Ref.	600	525	5.5	1.143
Reduced	500	525	5.5	0.952

Figure 71 : Jeu de paramètres du procédé DED-PL

[1] EOS, EOS StainlessSteel CX Material data sheet.

N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
1	Single bead	Ref.	6
2	"	Reduced	6
3	"	Ref.	1
4	"	Reduced	1
5	"	Reduced	0.7

Figure 72 : Paramètres du plan d'essai mono cordon

### Méthodologie : Tests de chevauchement

Des essais de couches utilisant les valeurs réduites des paramètres ont été réalisés sur des substrats de 2 et 1 mm d'épaisseur. Ces couches sont constituées de 5 cordons superposés, avec une distance de 1 mm d'écart vecteur. Afin de simuler l'effet qu'une plus grande zone de dépôt aurait sur la fabrication, un temps de refroidissement de 5 secondes intervient entre chaque cordon.

N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
6	Layer	Reduced	2
7	"	Reduced	1

*Figure 73 : Paramètres réduits des couches*

### Méthodologie : parois mono cordon

La fabrication d'un mur mono cordon utilisant les valeurs réduites des paramètres sur un substrat de 2 millimètres a été réalisée - Figure 74. Le mur est constitué de 20 couches de cordons, déposées dans la même direction et avec un temps de refroidissement de 10 secondes entre chaque.

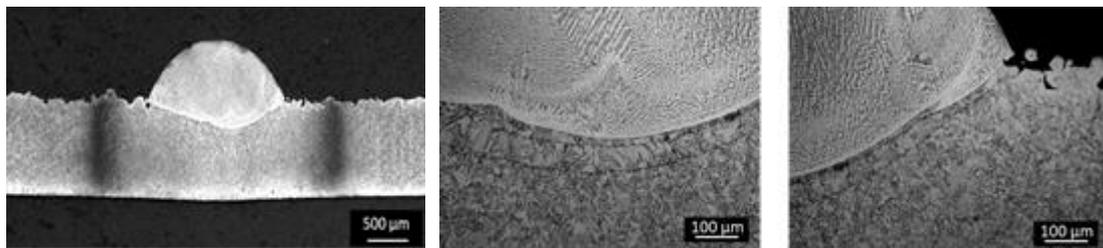
N.	Test type	Parameter set	Substrate thickness (mm)
8	Wall	Reduced	2

*Figure 74 : Paramètres réduits des murs fins*

Après les tests ci-dessus, les échantillons fabriqués ont été analysés par métallographie et la déformation causée par les contraintes résiduelles issues du procédé a été mesurée.

### Résultats des essais de dépôt : Essais sur un seul cordon

La Figure 75 représente l'analyse métallographique de l'interface entre le substrat L-PBF et le cordon DED-PL.



*Figure 75 : Interface L-PBF / DED-PL*

D'après l'observation de la Figure 75 (à droite), il est possible de noter deux lignes qui distinguent une discontinuité dans le substrat, suivant la ligne de dilution. Cela pourrait indiquer la formation de microfissures sur le substrat.

La Figure 76 présente les mesures de la zone affectée thermiquement (HAZ). Il est possible d'observer que, plus le substrat est fin, plus la ZAT est large.

N.	Substrate thickness (mm)	HAZ Measurements (mm)
4	1	2.89
5	0.7	3.88

Figure 76 : Mesures de la zone affectée thermiquement (ZAT) pour les essais 4 et 5.

### Résultats des essais de dépôt : Essais sur les couches

La Figure 77 montre la section transversale de la couche déposée sur des échantillons de base de 2 mm (en haut) et de 1 mm (en bas) d'épaisseur. On peut observer que les paramètres optimaux du procédé DED-PL sur un substrat PBF sont les paramètres réduits précédemment définis.

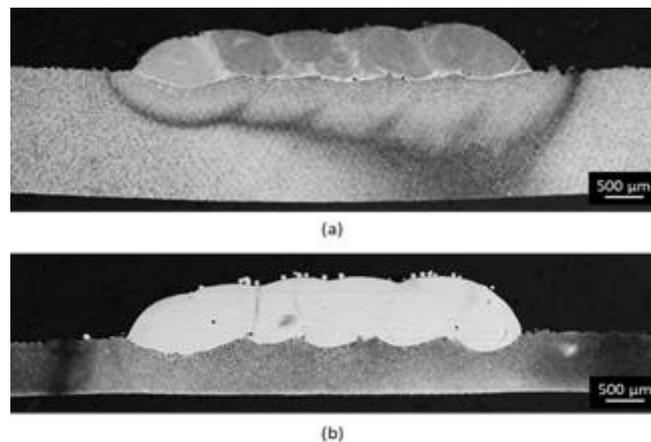


Figure 77 : Coupes transversales des couches fabriquées : (a) n. 6, et (b) n. 7

La Figure 78 montre les échantillons 6 et 7 après rechargement. Une déformation importante est observée dans l'échantillon 7. En conclusion, la fabrication sur un substrat aussi fin que 1 mm est possible, mais avec une déformation importante de la partie du substrat.



Figure 78 : Échantillons 6 et 7. Le gauchissement observé est important, surtout sur l'échantillon 7

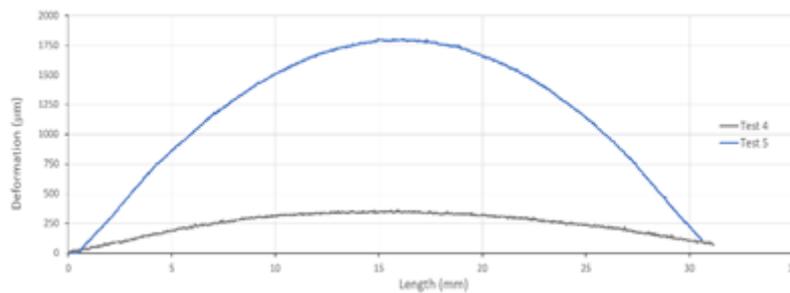


Figure 79 : Mesure de la déformation verticale sur les échantillons 6 et 7 - Essai 4 et 5, respectivement.

### Résultats des tests de rechargement : Essais de murs

La coupe transversale de la paroi fabriquée à partir d'un seul cordon est illustrée à la Figure 80. L'épaisseur du substrat utilisé étant supérieure à celle des essais précédents (2 millimètres), la ZAT est considérablement réduite par rapport à ces derniers.

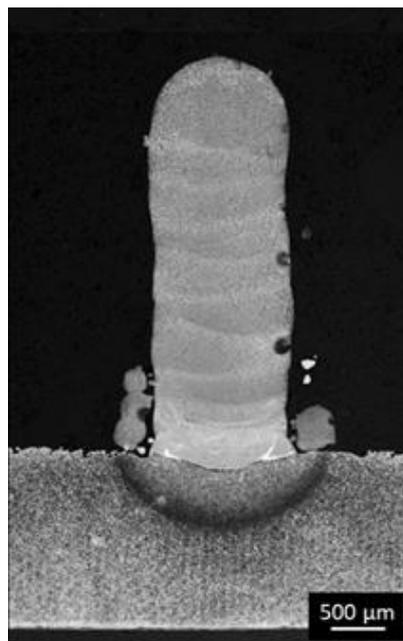


Figure 80 : Essais de murs

### Résultats des essais de dépôt : Température pendant la fabrication

La Figure 81 représente l'analyse de la température pendant la fabrication des échantillons 4 et 5, à titre d'exemple. Une température plus élevée est vérifiée sur les substrats plus minces.

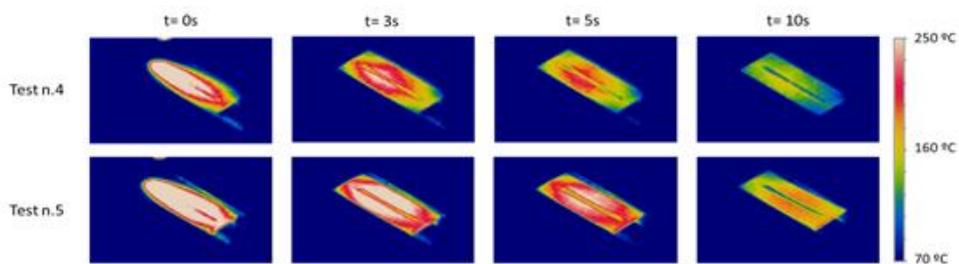


Figure 81 : Analyse de la température pendant la fabrication des échantillons 4 et 5

La Figure 82 représente le profil de température du bain de fusion lors de la fabrication du n.4, à titre d'exemple. On observe que la température du bain de fusion reste comprise entre les valeurs de 2000 et 2300°C dans tous les cas..

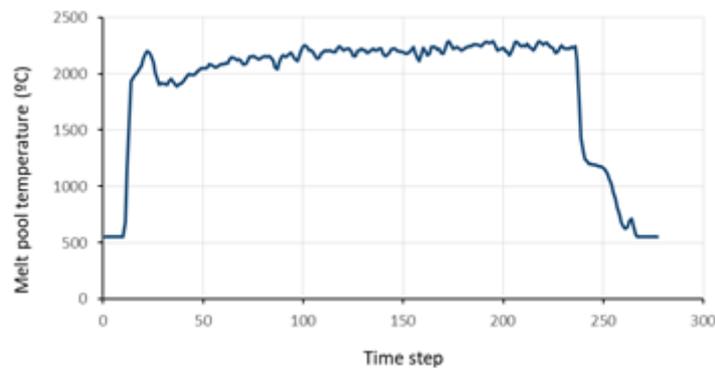


Figure 82 : Profil de température du bain de fusion lors de la fabrication de n.4

### Résultats des essais de dépôt : Conclusions

Une puissance laser (P) de 500 W, une vitesse d'alimentation (F) de 525 mm/min et un débit de poudre (Q) de 5,5 g/min sont les paramètres optimaux pour le dépôt de matériaux sur des substrats minces.

Avec ces paramètres, des substrats d'une épaisseur de 0,7 millimètre peuvent être utilisés pour la fabrication de mono cordons.

Dans le cas de la fabrication en couches successives, l'utilisation de substrats d'une épaisseur de 1 mm est possible, bien qu'il faille tenir compte de la déformation du substrat dans ces conditions.

### Résultats de fabrication

La Figure 83 représente le moule après fabrication par L-PBF. La pièce a ensuite été envoyée à UPV pour le dépôt en DED-PL.



*Figure 83 : Moule pour verre fabriqué par L-PBF*

La Figure 84 représente le moule après dépôt par DED-PL.



*Figure 84 : Moule après dépôt par DED-PL*

### **Post-traitements :**

Le post-traitement de la pièce L-PBF a consisté à la séparer du plateau de fabrication par électroérosion. Cette opération a été réalisée dans la même entreprise (DRT), qui possède l'équipement approprié pour cette tâche. Aucun traitement thermique n'a été effectué.

Les enseignements tirés du développement de ce projet pilote sont les suivants :

- La technologie de moulage du verre présente des défis spécifiques qui rendent la fabrication alternative de moules par FAM en principe moins attrayante. Ces facteurs sont le faible prix du moule conventionnel et le temps de cycle réduit (typiquement 5 secondes) qui laisse peu de possibilités d'amélioration.
- La fabrication d'un moule pour le verre par FAM prend du temps et a un coût initial très élevé. Mais la combinaison des procédés L-PBF et DED-PL a permis d'obtenir un moule avec de meilleures performances thermiques (grâce aux canaux de refroidissement conformes) et probablement avec une meilleure durée de vie, puisque la surface complète du moule est maintenant revêtue d'un alliage à base de nickel (alors que dans le cas des moules conventionnels, le revêtement ne se trouve que sur les bords de la surface du moule).
- Il est nécessaire de démontrer, par le biais d'installations d'essais pilotes, les performances et la viabilité de cette solution, en particulier auprès des fabricants de pièces en verre. Il faut espérer que leurs réticences à autoriser des essais in situ seront atténuées.

# Interreg Sudoe



EUROPEAN UNION

# ADDITOOL

European Regional Development Fund

[www.additool.eu](http://www.additool.eu)