Interreg Sudoe

EUROPEAN UNION

ADDITOOL

European Regional Development Fund

D 2.3.1. Rapport d’études de viabilité

www.additool.eu

INDEX

1. INTRODUCTION 3

2. ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE 4

2.1. Pilote FR1- LAUAK 4

2.2. Pilote PT1-MOLDETIPO 15

2.3. Pilote SP1- MEUPE/INESPASA 21

2.4. Pilote FR2-SOMOCAP 25

2.5. Pilote PT2- VIDIRIMOLDE 32

3. CONCLUSIONS 38

1. INTRODUCTION

Suite aux résultats obtenus lors des activités 2.1 (Matériaux pour la fabrication additive métallique) et 2.2 (Fabrication, post-traitement et caractérisation des démonstrateurs), ce document vise à analyser la viabilité technologique et économique de chaque pilote développé dans le cadre du projet ADDITOOL.

L'objectif principal de cette étude est de comparer et d'analyser les résultats obtenus lors du développement des cas d'utilisation de la Fabrication Additive Métallique (FAM) avec les procédés conventionnels appliqués dans l'environnement réel des PMEs. Concrètement :

- Étude des procédés de fabrication conventionnels que les PMEs utilisent pour la fabrication des outillages cibles.
- Analyse de la viabilité technologique de l'implantation de procédés de fabrication additive pour la fabrication des composants.
- Étude économique de l'implantation de la FAM ou de la modification de la chaine de valeur ajoutant la FAM et comparaison du coût des pièces.
- Avantages que la FAM offre à la fabrication du composant.

Les démonstrateurs fabriqués par les partenaires d'ADDITOOL ont été testés dans chaques entreprises (PMEs partenaires associées), directement sur leur site de production. L'objectif étant de valider ou non la pertinence de l'utilisation des technologies de FAM dans leurs lignes de production et de comparer avec les performances de la pièce d'origine.

2. ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE

2.1. Pilote FR1- LAUAK

Contexte

Les pièces pilotes proposées par le partenaire associé LAUAK sont deux outillages de forme de type "gabarit de contrôle" pour contrôler la bonne forme d'une tôle d'avion.
Ces deux outillages sont originellement usinés masse, à partir d'un bloc d'acier 40CMD8T prétraité à 110MPa, acier qui bénéficie d'une bonne usinabilité et de performances mécaniques suffisantes.

Les tolérances sur les surfaces fonctionnelles sont conformes à la norme ISO 2768 mK avec un Ra de 3,2µm. Sur l'ensemble de la pièce, les tolérances sont de 0.1mm +/-0.05.

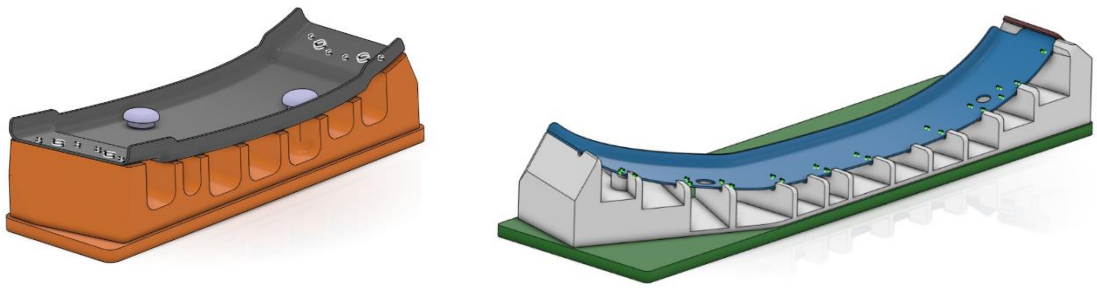


Figure 1 : Pièces LAUAK D54516181 & D54516298

La pièce D54516181 (en orange sur la Figure 1) est produite en interne par la société LAUAK qui dispose de tous les moyens nécessaires à la fabrication de la pièce :

- Délai d'approvisionnement matière : 1 semaine - Bloc de 40CMD8T (200 x 100 x 50mm)
- Usinage : Entre 15h et 20h et quelques outils de coupe
- Prix de revient : 1750€ comprenant étude / fourniture matière / fabrication / contrôle tridimensionnel.
- Durée de vie : 1000 pièces

La pièce D54516298 (en gris sur la Figure 1) est produite en interne par la société LAUAK qui dispose de tous les moyens nécessaires à la fabrication de la pièce :

- Délai d'approvisionnement : 1 semaine - Bloc de 40CMD8T (600 x 200 x 100mm)
- Usinage : plus de 100h et beaucoup d'outils de coupe

- Prix de revient : 3500€ comprenant l'étude / la fourniture des matériaux / la fabrication / le contrôle tridimensionnel.
- Durée de vie : 1000 pièces

Objectifs du pilote

L'objectif de ce projet pilote est triple :

- Conserver un prix de revient similaire en fabrication additive.
- Conserver un délai de fabrication équivalent ou réduit.
- Améliorer les performances (augmenter la durée de vie) tout en réduisant les coûts et le temps d'usinage.

Pour répondre à ces objectifs, voici la méthode qui a été utilisée :

- Caractérisation du matériau : matière première ainsi que la pièce fabriquée, pour chaque technologie.
- Simulation des températures et des contraintes résiduelles pendant la fabrication
- Fabrication de ces deux outillages avec 3 technologies différentes :
    - DED Wire Laser : Pièce D54516181 - Fabrication de la pièce complète
    - DED Wire Arc : Pièce D54516298 - Fabrication de la pièce complète avec une nouvelle conception.
    - DED Powder Laser : Pièce D54516298 - Rechargement pour améliorer la dureté uniquement sur la partie supérieure de la pièce (seule partie en contact avec la pièce d'avion).
- Scan 3D des pièces pour analyser les déformations éventuelles avant le traitement thermique et après l'usinage.
- Traitement thermique
- Usinage
- Contrôles et tests en conditions réelles d'utilisation

Sélection du matériau

Le matériau utilisé par LAUAK (40CMD8T) étant très peu soudable, un changement de matériau a été convenu pour rendre fabricable le pilote et améliorer ses performances mécaniques,

notamment sa dureté. L'amélioration de la dureté permettra ainsi un allongement conséquent de la durée de vie.

Après une étude sur les matériaux disponibles, nous avons sélectionné le 15CrMnMoV5-4-9-3 (15CDV6) pour la fabrication de ces pièces.

	Designation	Re (Mpa)	Rm (Mpa)	A5 (%)	Hardness (HRC)	Available for Wire D1,2mm	Available for DED Powder 40-110microns	Weldability
Original	40CMD8 (40CrMnMoS8-6)	850	1000	11	32 - 34	No	?	No
Proposal	EN4334 (15CrMnMoV5-4-9-3) // AIR 9117 : 15CDV6	930	1080 - 1280	10	42	Yes		Yes
Proposal	EN4331 (25CrMnMo4-2-2) // AIR 9117 : 25CD4	750	880 - 1080	12	46	Yes		Yes
proposal	INVAR 36	679	717	5.5	98 (RCB)	YES	YES	YES

Figure 2 : Sélection du matériau

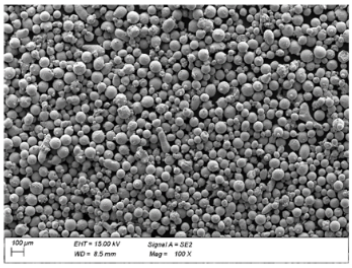
La Figure 2 montre que le 15CDV6 a de meilleures performances que le matériau d'origine, avec +10HRC et +80MPa sur le Re. Ce matériau est disponible sous forme de fil, donc adaptable au procédé DED Wire Arc, et présente une bonne absorption avec un laser dans l'infrarouge, donc possible pour le procédé DED Wire Laser.

L'objectif de ce pilote étant la comparaison de 3 procédés (DED Wire Laser, DED Wire Arc et DED Powder Laser), il était nécessaire de développer une poudre de 15CDV6 ayant les mêmes caractéristiques chimiques que le fil, voir Figure 3.

CEIT: FR1_LAUAK

15CDV6 Powder

10 Kg of gas atomized 15CDV6 (AIR 9117) powder. +44-106 µm particle size. [EN4334: 15CrMnMoV5-4-9-3]



Physical properties	
$\rho_{pycnometry}$ (g/cm³)	7,68 +/- 30
$\rho_{apparent}$ (g/cm³)	4,31
ρ_{TAP} (g/cm³)	4,54
Flow rate (s/50g)	0,33

Interstitial level (wt.%)	
O	0,0126
N	0,0014
C	0,122
S	0,049

Specifications. Chemical Composition 15CDV6 (wt.)

	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S	P+S
Min-Max	0,12-0,15	0,80-1,10	Max 0,20	1,25-1,50	0,80-1,00	0,20-0,30	Max 0,02	Max 0,0015	Max 0,04
Type	0,14	1,00	0,15	1,40	0,90	0,25	0,003	0,001	<0,040

Figure 3 : Développement de la poudre 15CDV6

Les résultats de la caractérisation des poudres sont disponibles dans le livrable D2.1.1 Rapport des matériaux pour la FAM.

Étude de viabilité

Comme indiqué précédemment, trois technologies ont été utilisées pour fabriquer ces deux pièces :

- DED Wire Laser
- DED Wire Arc
- DED Powder Laser

L'avantage d'utiliser la technologie DED Wire Laser est d'obtenir une pièce quasi finie (Near Net Shape) aussi proche que possible de la géométrie finale afin de limiter l'usinage et d'avoir un rendement/ taux de déposition élevé (plus élevé que les technologies à base de poudre).

Le DED Wire Arc permet d'avoir un « Near Net Shape » plus approximatif que le DED Wire Laser mais un rendement/taux de dépôt beaucoup plus élevé que les deux autres procédés.

Enfin, le DED Powder Laser est très utile pour le rechargement ou la fonctionnalisation d'une pièce. Cependant, les taux de dépôt étant relativement faibles, il n'y a pas forcément d'intérêt à fabriquer ces deux pièces avec cette technologie. Dans ce cas, il peut être rentable d'usiner un bloc d'AISI 1045 qui a l'avantage d'avoir un coût très faible et d'être très facile à usiner et à souder, puis d'ajouter de la matière (15CDV6) sur les zones utiles afin d'augmenter la dureté de surface.

DED Wire Laser

La fabrication de la pièce LAUAK D54516181 a été réalisée avec les moyens suivants :

- Robot COMAU NJ165
- Effecteur PRECITEC CoaxPrinter
- Laser TRUMPF TrueDisk 6000 – 6kW
- Fil SelectArc *15CrMnMoV5-4-9-3* // Diamètre D1.2mm

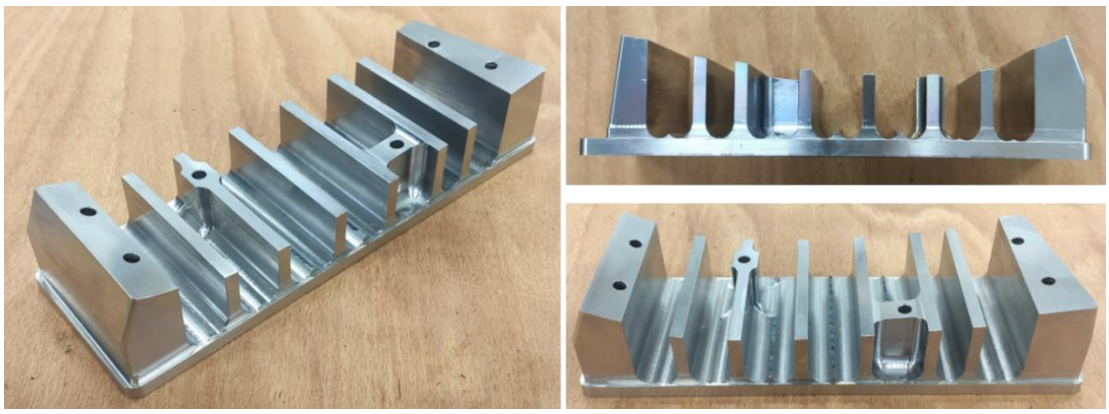


Figure 4 : Pièce fabriquée en DED Wire Laser

La pièce a été contrôlée par LAUAK et répond parfaitement aux exigences. La dureté a été améliorée par rapport à la pièce d'origine, ce qui laisse présager une durée de vie plus longue. Les propriétés métallurgiques sont également saines, avec des performances similaires, voire supérieures, à celles d'un bloc forgé, voir le document D2.1.1 Rapport des matériaux pour la FAM.

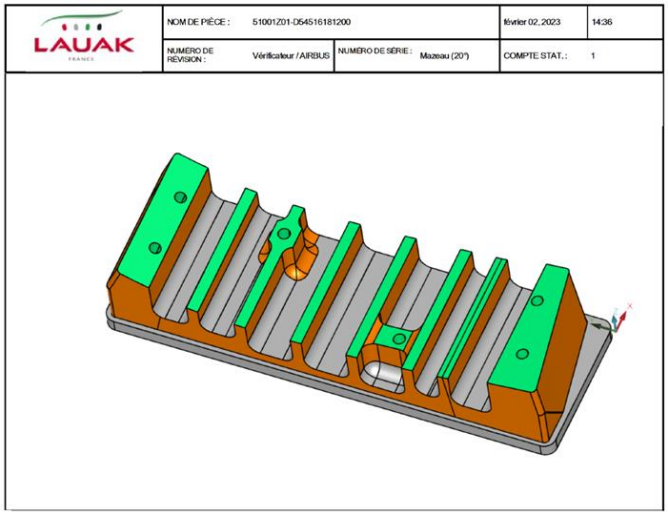


Figure 5 : Contrôle de la pièce par LAUAK

Il est difficile de comparer les coûts de fabrication d'une pièce qui ont été réalisés dans deux types d'entreprises différentes (centre de recherche versus entreprise de production) et avec deux modes de fonctionnement différents. Toutefois, voici une estimation de prix basée sur les dépenses réelles de sous-traitance.

Description	Prix	Délai
Approvisionnement du substrat 300 x 150 x 10mm	95€	3 semaines (peut être largement réduit)
Approvisionnement du fil (2.2kg déposé)	215.5€ (98€/kg)	3 semaines (peut être largement réduit)
Programmation	112.5€ (900€/jour)	1h
Fabrication	412.5€ (1500€/jour)	2.2h
Scan & Traitement thermique	500€	8h

Usinage	1620€ (sous-traité) (Peut être largement diminué si réalisé en interne)	5h d'usinage – 1 semaine en sous-traitance
Contrôle	-	1 semaine (réalisé par LAUAK)
Total	**2955.5€**	**5 semaines incluant 4.9 semaines en approvisionnement et sous-traitance**

Voici ce qu'il est important de noter dans la fabrication de cette pièce avec la technologie DED Wire Laser :

- Temps de programmation et fabrication du Near Net Shape en moins de 4 heures.
- Le coût de 2955,5€ prend en compte les 1620€ de sous-traitance d'usinage qui peuvent être largement réduits.
- Le temps d'usinage du Near Net Shape est de seulement 5h au lieu de plus de 20h pour une pièce usinée masse. Cela conduit logiquement à une réduction considérable d'usure outils.
- Le temps d'approvisionnement peut être considérablement réduit pour une entreprise de production.
- Les propriétés métallurgiques sont similaires, voire supérieures, à celles d'un brut forgé, voir le document D2.1.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM.

<u>DED Wire Arc</u>

La fabrication de la pièce LAUAK D54516298 a été réalisée avec les moyens suivants :

- Robot FANUC Arcmate 120iC
- CMT Fronius TPSi
- Fil SelectArc *15CrMnMoV5-4-9-3* // Diamètre D1.2mm

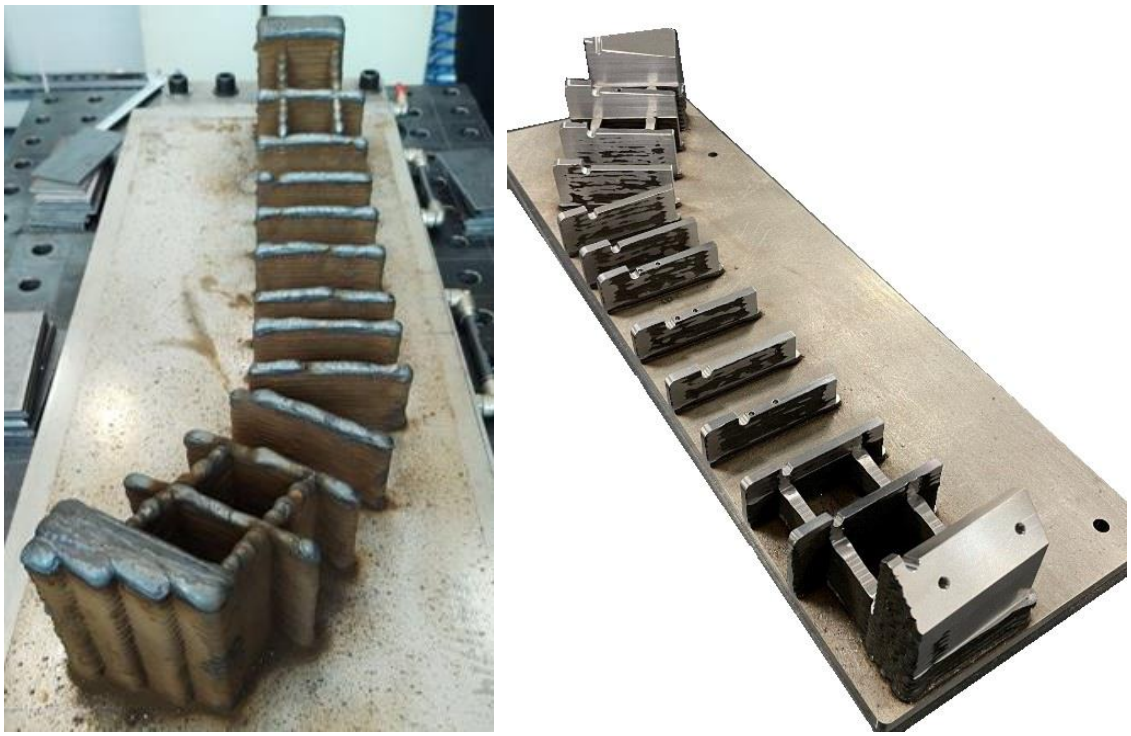


Figure 6 : Pièce fabriquée en DED Wire Arc

La pièce a également été vérifiée et répond parfaitement aux besoins de LAUAK. La dureté a été améliorée par rapport à la pièce d'origine, ce qui laisse présager une durée de vie plus longue. Les propriétés métallurgiques sont également saines, avec des performances similaires, voire supérieures, à celles d'un bloc forgé, voir le document D2.1.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM.

Pc	NOM DE PIÈCE : 51001Z01-D6451629820O			février 14, 2023	09:54
	NUMÉRO DE RÉVISION :	NUMÉRO DE SÉRIE : AVEC LAMAGE		COMPTE STAT. : 1	

DEFAUT DE FORME 0.2 DES FACES DE DESSUS

⊕	MM	LOC1 - PNT1					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.024	0.024	0.000
⊕	MM	LOC2 - PNT28					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	-0.003	-0.003	0.000
⊕	MM	LOC3 - PNT27					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	-0.010	-0.010	0.000
⊕	MM	LOC4 - PNT26					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.037	0.037	0.000
⊕	MM	LOC5 - PNT25					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.037	0.037	0.000
⊕	MM	LOC6 - PNT24					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.092	0.092	0.000
⊕	MM	LOC7 - PNT23					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.088	0.088	0.000
⊕	MM	LOC8 - PNT22					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.045	0.045	0.000
⊕	MM	LOC9 - PNT21					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.050	0.050	0.000
⊕	MM	LOC10 - PNT20					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.017	0.017	0.000
⊕	MM	LOC11 - PNT19					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.019	0.019	0.000
⊕	MM	LOC12 - PNT18					
AX		VAL. NOM.	+TOL	-TOL	MESU	DÉV	HORS TOL
T		0.000	0.100	-0.100	0.002	0.002	0.000

Figure 7 : Contrôle de la pièce en DED Wire Arc

De la même manière que pour le DED Wire Laser, il est difficile de comparer les coûts de fabrication d'une pièce dans deux types d'entreprises différentes et avec deux modes de fonctionnement différents. Cependant, voici une estimation de prix basée sur les dépenses réelles de sous-traitance.

Description	Prix	Délai
Approvisionnement du substrat 650 x 250 x 14 mm	194 €	1 semaine (possibilité d'avoir du stock)
Approvisionnement du fil (5.9 kg déposé)	527 € (90 €/kg)	3 semaines (possibilité d'avoir du stock)
Programmation	112.5 € (900 €/jour)	1 h
Fabrication	1312.5 € (1500 €/jour)	7 h (2.3 h de temps de pause qui peuvent être réduits)
Scan	100 €	1 h
Usinage	3470 € (sous-traité) (Peut être largement diminué si réalisé en interne)	3 semaines en sous-traitance (problèmes avec les déformations)
Contrôle	-	1 semaine (réalisé par LAUAK)
Total	**5716 €**	**8 semaines (peut être réduit à 1 semaine)**

Voici ce qu'il est important de noter dans la fabrication de cette pièce avec la technologie DED Wire Arc :

- Le temps de programmation et de fabrication du Near Net Shape est de 7 heures, dont 2,3 heures de temps de pause, avec un taux de dépôt de 3,3 kg/h.
- Le coût de 5716 € comprend les 3470 € de sous-traitance pour l'usinage, qui pourraient être considérablement réduits si une formation plus poussée à l'usinage des pièces NNS était dispensée.
- Le temps d'usinage du Near Net Shape n'est que de 20 heures au lieu de plus du triple ou même du quadruple pour une pièce usinée dans la masse. Cela induit une réduction considérable de l'usure des outils coupants - au total, plus de 40 kg de matériaux sont économisés.
- Le délai de livraison peut être considérablement réduit pour une entreprise de production à une semaine maximum.

- Les propriétés métallurgiques sont similaires, voire supérieures, à celles de la forge, voir le document D2.1.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM.
- La forte économie de matériaux (plus visible pour les grandes pièces), la diminution du temps d'usinage et la possibilité d'utiliser ces technologies pour les réparations contribuent à la durabilité.

DED Powder Laser

La fabrication de la pièce LAUAK D54516298 a été réalisé avec les moyens suivants :

- DED Trumpf Trucell 300 + Laser Disk 3kW
- Distribution de poudre (développée par le CEIT, partenaire du projet ADIDTOOL) avec une tête coaxiale – Même chimie que le fil
- Usinage d'un bloc de AISI 1045

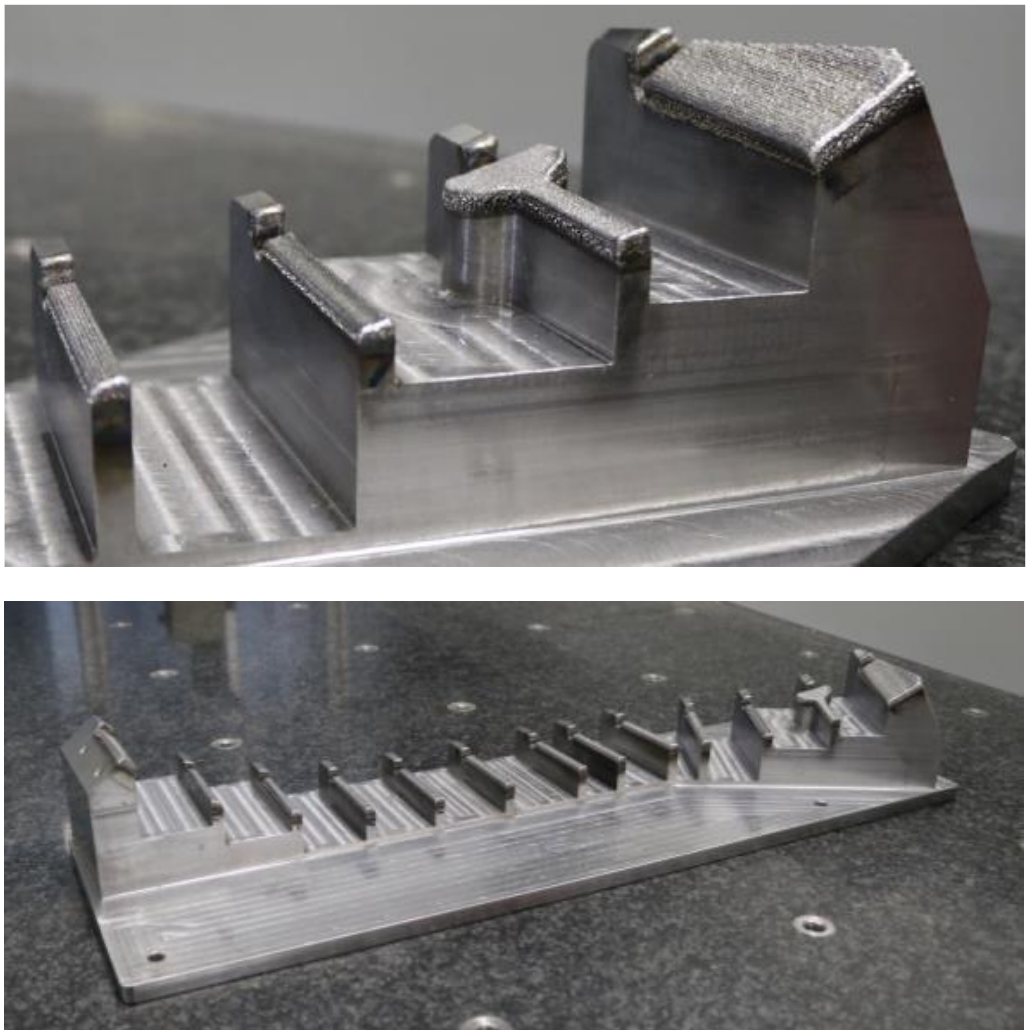


Figure 8 : Pièce fabriquée avec la technologie DED Powder Laser

Cette pièce n'a pas été contrôlée car elle n'a été que partiellement usinée pour servir de démonstrateur au projet. D'autre part, la dureté a également été améliorée par rapport à la pièce d'origine, ce qui laisse présager une durée de vie accrue - 39HRC en surface et 18HRC dans le substrat. En termes de coûts, voici une estimation :

Description	Prix	Délai
Approvisionnement du substrat 570 x 175 x 95 mm	148 €	1 semaine
Approvisionnement de la poudre (0,33kg déposé avec un rendement de 70%)	85.8 € (200€/kg)	4 semaines (peut être réduit)
Programmation	726 € (900€/jour)	6,5 h
Fabrication	311.25 € (1500€/jour)	1.66 h
Usinage	1,829.00 € (sous-traité) (Peut être largement réduit si réalisé en interne)	7h d'usinage – 4 semaines en sous-traitance
Contrôle	-	1 semaine (réalisé par LAUAK)
Total	**3,100.00 €**	**9 semaines incluant 4 semaines d'approvisionnement et 4 semaines de sous-traitance**

Voici ce qu'il est important de noter dans la fabrication de cette pièce avec la technologie DED Powder Laser :

- Un temps de fabrication du Near Net Shape en moins de 2 heures.
- Le coût de 3100€ prend en compte les 1829€ de sous-traitance d'usinage et qui peuvent être grandement réduits.
- Le coût de la matière première est fortement réduit avec ce procédé. De plus, ce procédé permet une réparation si l'outillage s'est usé et a perdu ses dimensions.

2.2. Pilote PT1-MOLDETIPO

Contexte

Les canaux de refroidissement de type « Conformal Cooling », c'est-à-dire conçus pour correspondre étroitement à la géométrie de la pièce afin d'en améliorer le refroidissement, ont déjà été réalisés par les technologies de FAM dans les moules pour plastiques, avec des résultats significatifs.

Dans ces applications, le degré d'optimisation atteint dans la performance thermique du moule se traduit par un taux de production beaucoup plus élevé, des coûts de production réduits et, par conséquent, donne une valeur ajoutée significative au moule.

La pièce proposée est un insert pour un moule d'injection, utilisé dans la fabrication d'une pièce bi-matière (POM + élastomère thermoplastique). Cet insert fonctionne de concert avec un autre insert, en binôme, pour la mise en forme de la pièce. Toutefois, ce dernier ne sera pas étudié, par souci de simplicité. Le moule lui-même comporte deux jeux d'inserts. Associé à une rotation du moule, il permet l'injection simultanée de deux matériaux.

Les inserts fonctionnent en mouvements latéraux, mis en évidence dans le moule en Figure 10 et est conçu pour produire deux pièces à chaque fois. Comme indiqué, un seul insert a été produit par fabrication hybride, tandis que l'autre insert de la paire et la deuxième série d'inserts ont été produits par des moyens conventionnels. Cela a permis de comparer leurs performances sans avoir à intervertir les plaquettes. Les composants ont une base (en gris sur la Figure 10) qui, en raison de sa géométrie, peuvent être fabriquées soit selon une approche hybride, soit selon une approche conventionnelle. Dans ce dernier cas, chaque insert peut être fabriqué en deux parties distinctes, qui sont ensuite assemblées, ou la base peut être fabriquée de manière conventionnelle, puis la partie active peut être construite par-dessus, à l'aide d'une technologie de fabrication additive.

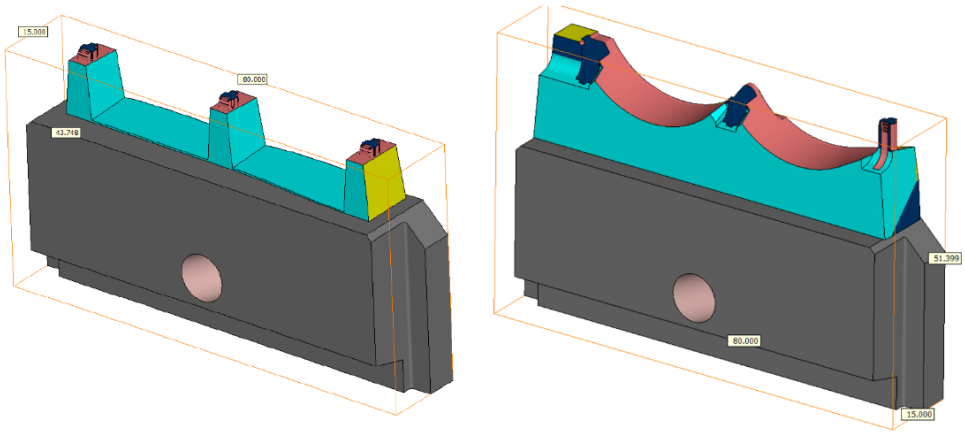


Figure 9. Inserts qui travaillent conjointement pour façonner la pièce. Seul l'insert de droite a été étudié et réalisé en fabrication hybride – L-PBF + usinage

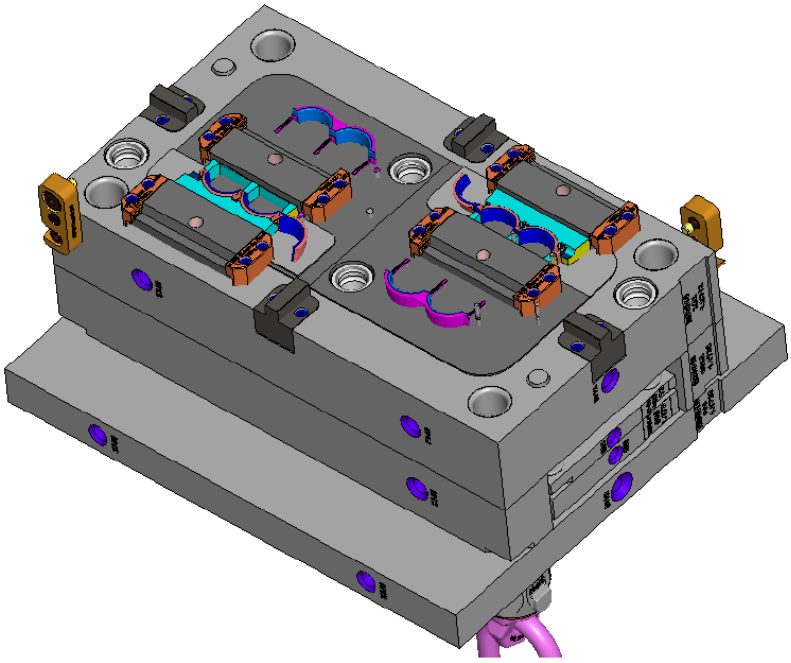


Figure 10. Moule dans lequel les inserts sont assemblés. Les inserts bleu clair sont des mécanismes coulissants. L'un d'entre eux doit être fabriqué par un procédé hybride.

Objectifs du pilote

L'étude de cas propose d'optimiser le refroidissement de l'insert en ajoutant des canaux de refroidissement de type « Conformal Cooling ». La petite dimension de la zone à refroidir dans ce cas rend la fabrication de canaux de refroidissement très difficile pour les procédés conventionnels. C'est ce que permet la fabrication par Laser Powder Bed Fusion (L-PBF).

L'objectif de ce projet pilote est d'optimiser la conception et les méthodes de fabrication des inserts de moules pour optimiser le refroidissement, en utilisant une modélisation avancée comprenant l'optimisation topologique, la simulation thermique, la fabrication hybride et les essais non destructifs. L'analyse des coûts sera également abordée. Tous les résultats seront comparés aux solutions de fabrication conventionnelles.

Sélection du matériau

Le matériau choisi pour le projet pilote est un acier à outils commercial sous forme de poudre - Böhler W360 - comme alternative à l'acier H13 standard. En effet, le W360 est conçu pour les machines sans lit chauffant, ce qui est le cas de la Trumpf TruPrint 1000 qui a été utilisée pour fabriquer l'insert.

Étude de viabilité

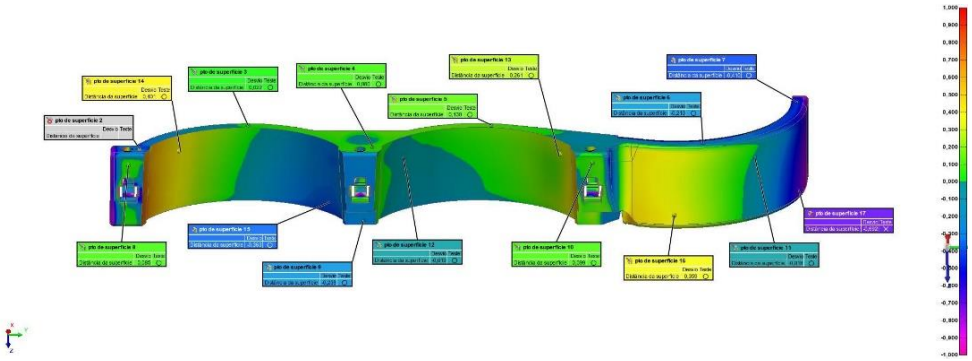
La plaquette a été fabriquée par L-PBF dans sa forme complète. L'opération de finition a consisté en un fraisage de la base et en un usinage par électroérosion (EDM) de la zone active de la plaquette. Selon Moldetipo, ces opérations de finition sont similaires à celles nécessaires pour obtenir la plaquette conventionnelle (sans canaux de refroidissement). La différence supplémentaire réside dans la présence d'entrées pour le raccordement au circuit de refroidissement par eau. Il n'a pas été possible de déterminer les performances à long terme de l'insert, et les inquiétudes concernant l'intégrité structurelle découlant des fissures détectées lors de l'analyse et ne sont pas à négliger. Il serait donc pertinent d'effectuer un traitement thermique sur l'insert, après la fabrication en L-PBF et avant les opérations de finition, afin de produire une pièce plus résistante et peut-être éviter les fissures.

Les inserts conventionnels et en L-PBF ont été assemblés dans le moule et des essais d'injection ont été réalisés. Pour la comparaison, deux temps de refroidissement ont été considérés : 10s et 16s. Les pièces produites ont été séparées en 4 groupes :

- C10 – Insert conventionnel, 10s de temps de refroidissement
- C16 - Insert conventionnel, 16s de temps de refroidissement
- S10 – Insert en L-PBF, 10s de temps de refroidissement
- S16 - Insert en L-PBF, 16s de temps de refroidissement

Pour l'évaluation complète des écarts par rapport au modèle CAO, 5 échantillons de chacun de ces groupes ont été analysés.

Les Figure 11 et Figure 12 montrent un exemple d'analyse dimensionnelle (écart par rapport à la géométrie CAO) de 2 échantillons de pièces injectées : fabriquées avec l'insert L-PBF et fabriquées avec l'insert conventionnel. Les deux pièces avaient un temps de refroidissement de 16 secondes (C16 et S16).



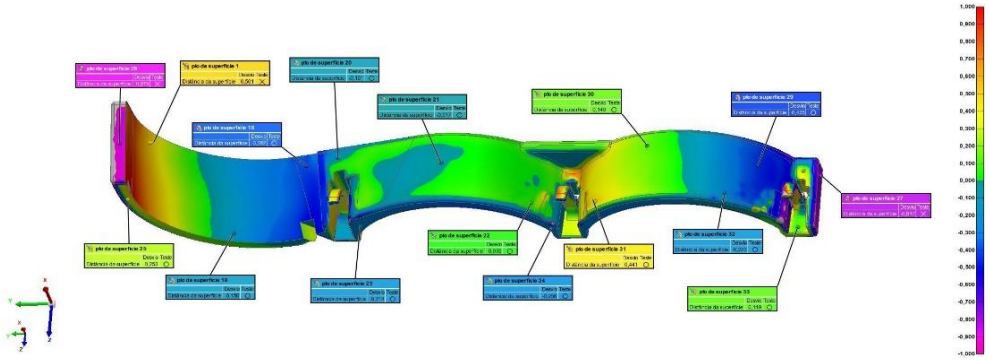


Figure 11– Analyse dimensionnelle des pièces injectées avec l'insert L-PBF et refroidies pendant 16s.

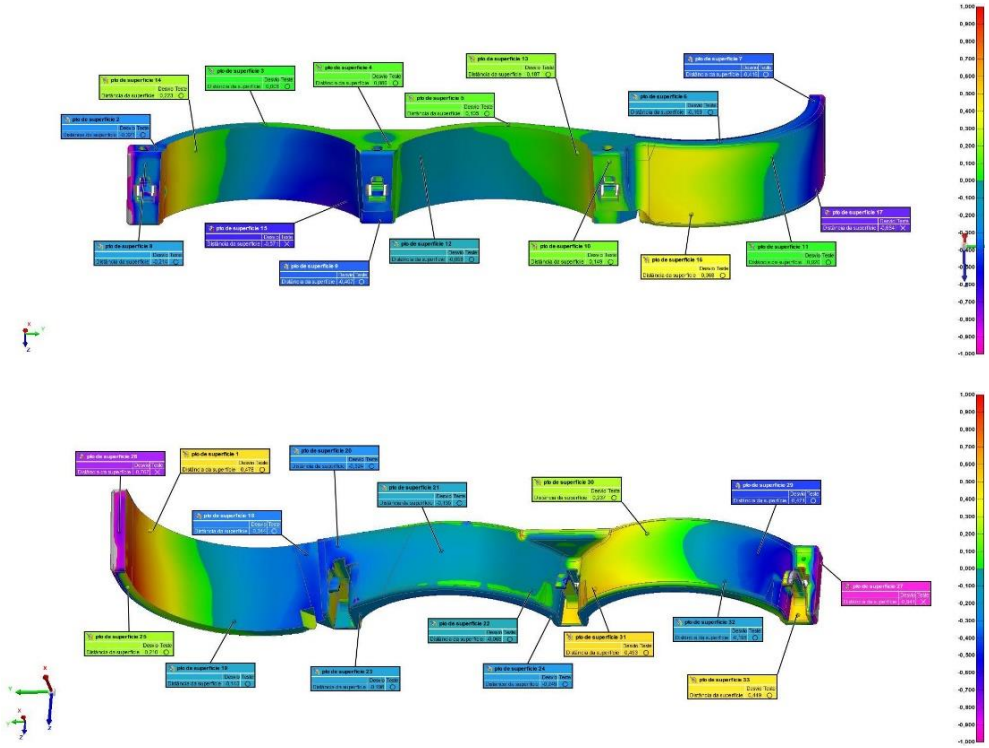


Figure 12– Analyse dimensionnelle des pièces injectées avec l'insert conventionnel et refroidies pendant 16s.

32 points ont été mesurés dans chaque pièce. Une analyse détaillée des écarts le long de ces points est présentée à la Figure 13. Le résumé de l'écart moyen et de la moyenne des écarts types est présenté à la Figure 14. Il est possible d'observer que la macroscopie et la tendance du gauchissement ne sont pas très différentes entre tous les échantillons. Cependant, il est possible de détecter un degré mineur d'écart par rapport à la CAO dans les échantillons L-PBF (S10 et S16), bien que l'écart type moyen soit significatif.

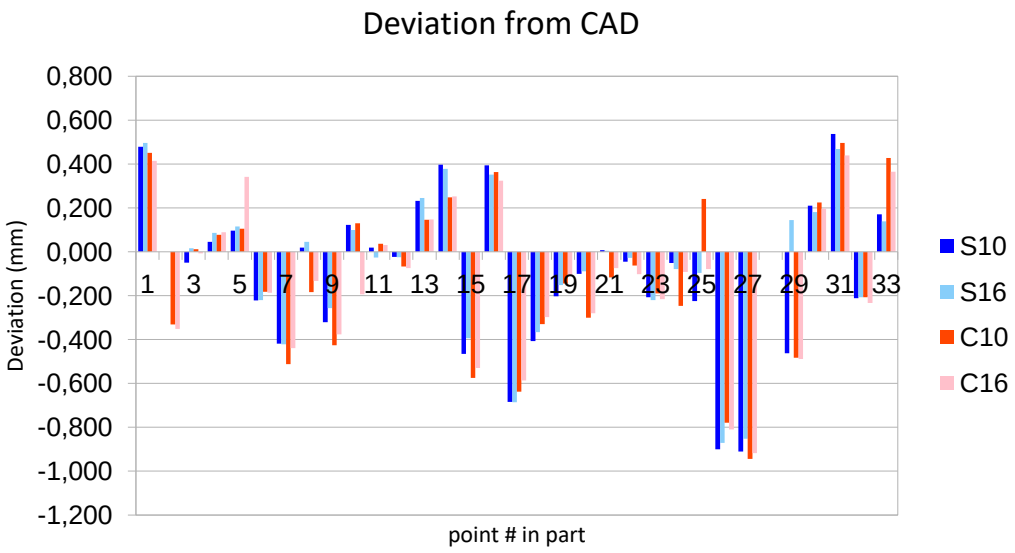


Figure 13– Déviations moyennes en chaque point des pièces.

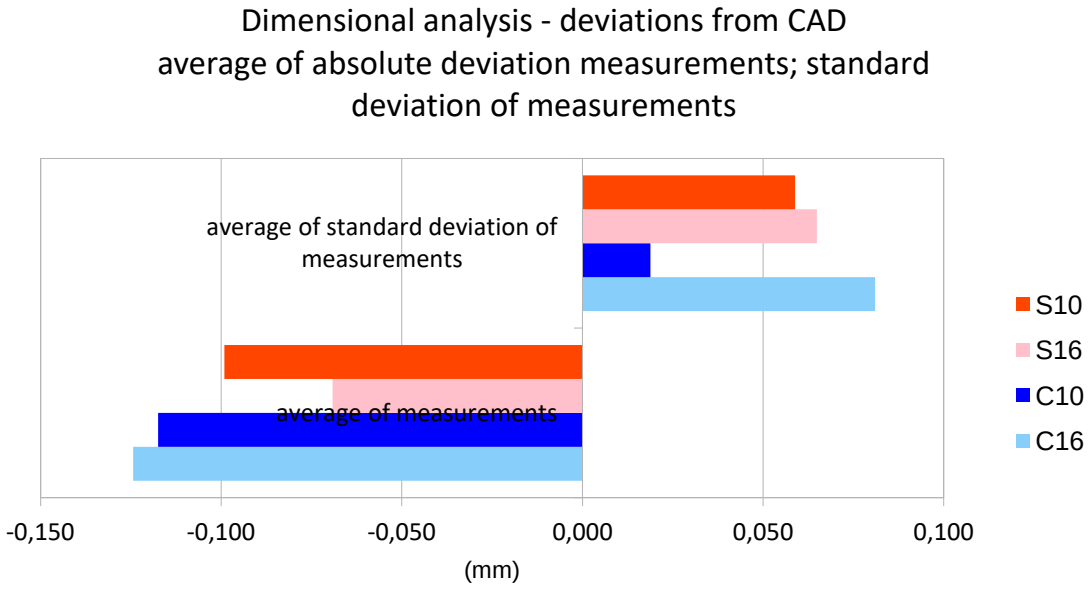


Figure 14– Moyenne et écart-type des mesures pour tous les échantillons

Pour l'étude de viabilité, les coûts internes de modélisation et de production de la plaquette L-PBF ont été comparés aux mêmes coûts de production de la plaquette conventionnelle. Le Tableau 1 résume les éléments de coût pris en compte pour les deux inserts. Le niveau de détail est différent, car le L-PBF a été fabriqué en interne au CDRSP et la plaquette conventionnelle a été fabriquée à Moldetipo, d'où une limitation des informations pour des raisons de confidentialité.

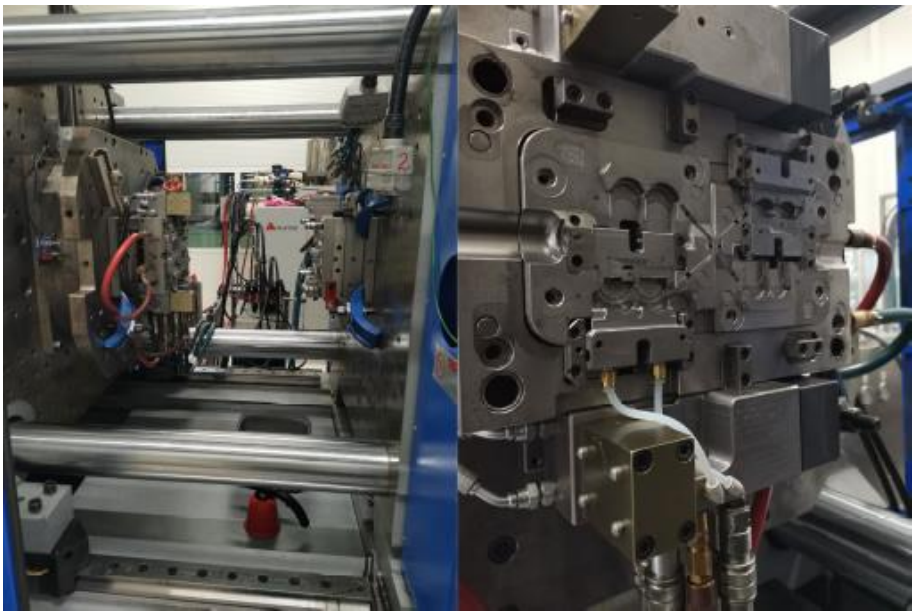


Figure 15 (à gauche) machine de moulage par injection avec moule assemblé ; (à droite) détail de la cavité du moule montrant l'insert L-PBF avec les entrées de refroidissement attachées.

Tableau 1 : Comparaison des coûts

	Coûts de fabrication (€)	Coûts de finition (€)
Insert en L-PBF	Matériel et équipement : Poudre + temps d'impression + gaz + électricité + dépréciation du matériel + taux d'insuccès - 77€. Temps (en considérant un taux horaire de 50€) Modélisation et simulations + Préparation + Post-traitement - 925€ Total : 1002€	Fraisage + EDM + ajustements – 100€
Insert conventionnel	Fabrication - 250€	Fraisage + EDM + ajustements – 100€
Différence de coûts	**752 €**	0

On observe une différence de coût de 752 €, qui servira de base à l'étude de viabilité.
L'étude de viabilité a été réalisée avec les paramètres suivants :

- Handicap du coût initial : -752€
- Différence de durée du cycle d'injection (moins importante pour l'insert L-PBF) - 6s / coût horaire de la machine de moulage par injection, y compris l'opérateur et les coûts fixes restants : 40 €.

En calculant les coûts de production pour des tailles de lots variables de 1000 à 100000 pièces, il est possible de déterminer le seuil de rentabilité du handicap de coût initial de l'insert L-PBF - Figure 16. Comme on peut le constater, une taille de lot d'environ 12 000 pièces seulement suffit pour récupérer la différence de coût de l'insert L-PBF. Il s'agit d'un résultat très intéressant, car cette taille de lot est assez faible dans le contexte d'une tâche de production de moulage par injection.

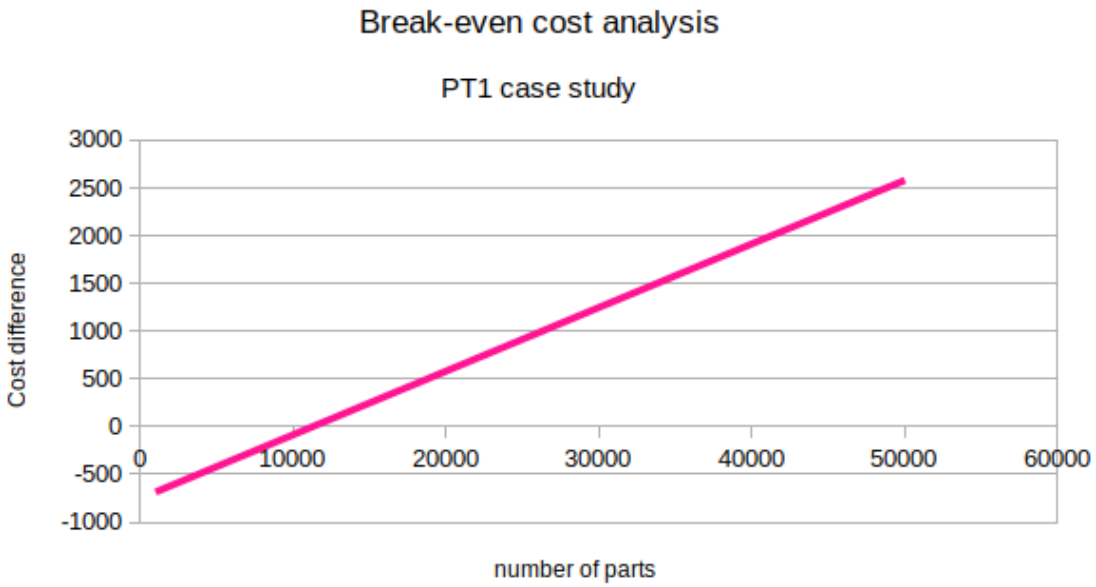


Figure 16: Analyse du seuil de rentabilité de l'insert L-PBF par rapport à l'insert conventionnel.

2.3. Pilote SP1- MEUPE/INESPASA

Contexte

Le pilote analysé dans cette section est un système de perçage manuel développé par INESPASA pour le secteur aéronautique (Figure 17-a). Ce système doit être compact (aucun espace à l'intérieur en dehors de l'électronique et des moteurs) et léger. Le boîtier a été initialement obtenu en usinant un bloc d'aluminium (matériau de faible densité et peu coûteux). Cette solution compacte présentait quelques difficultés liées à la dissipation de la chaleur. Pendant le fonctionnement, la chaleur générée par les moteurs produit une augmentation de la température à l'endroit où l'opérateur doit poser sa main (Figure 17-b), jusqu'à plus de 60°C. En fonction du nombre de tours par minute, les moteurs peuvent même s'arrêter en raison de la température élevée de fonctionnement.

Le délai de livraison de l'ensemble du système est de 3 à 4 semaines et pourrait être produit pour moins de 1 000 €. Cependant, la partie étudiée est le cas où les moteurs sont situés (à gauche, Figure 17.b), et ce composant pourrait être produit en 1 jour (8h) et un coût d'environ 500€.

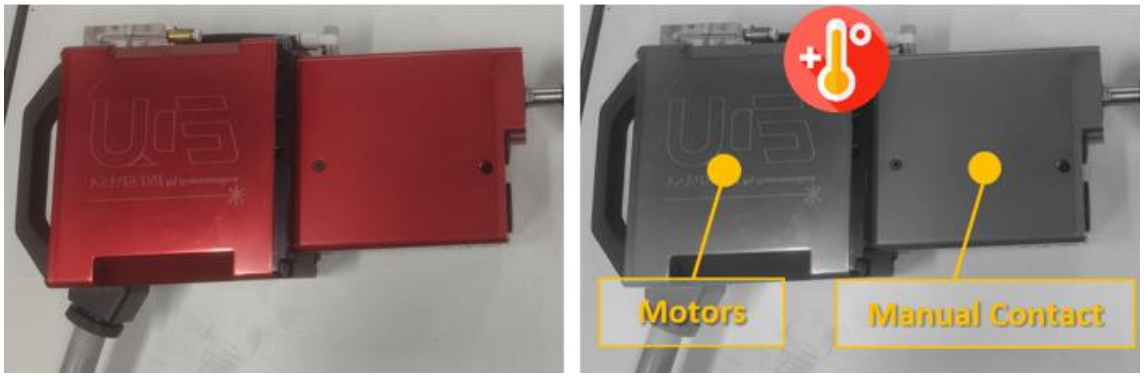


Figure 17. Image (a) du boîtier original et (b) des zones présentant une mauvaise dissipation thermique

Objectifs du pilote

Les principaux objectifs de ce projet pilote sont les suivants :

- Fabriquer l'ensemble du boîtier en aluminium à l'aide de la technologie L-PBF (Laser Powder Bed Fusion).
- Augmenter les performances thermiques en ajoutant une dissipation active (canaux de refroidissement à l'intérieur du composant) ou passive (structure en treillis ou gyroïde).
- Comparer les propriétés thermiques entre la pièce usinée d'origine et les résultats obtenus par L-PBF.
- Diminuer le besoin d'outillage pour l'usinage
- Chercher à optimiser la technologie déjà en place en ajoutant des fonctionnalités à l'outil.

Pour atteindre ces objectifs, la solution proposée par la FAM a consisté à fabriquer le boîtier où se trouvent les moteurs, en incluant des canaux internes pour refroidir le boîtier et les moteurs (Figure 18). Le système étant déjà doté d'un sous-système pneumatique interne, le même flux d'air peut être utilisé pour améliorer les performances thermiques.

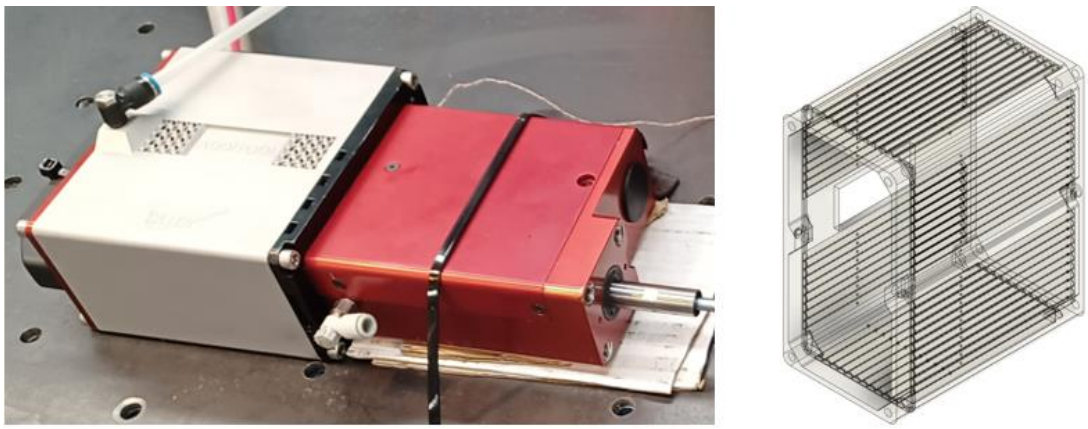


Figure 18. Image (a) du boîtier en FAM et (b) vue schématique des canaux internes.

Sélection du matériau

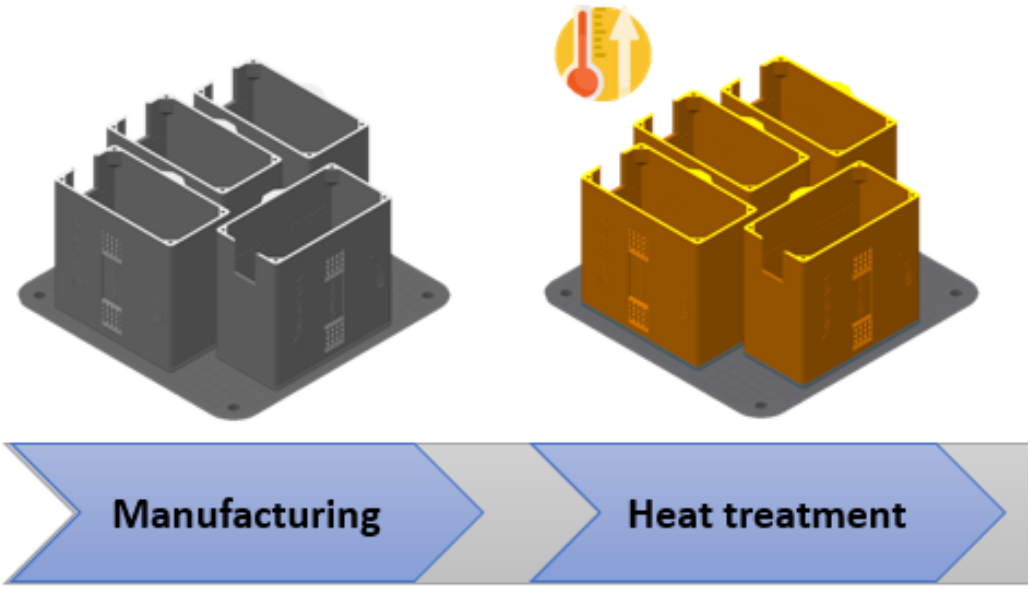
Deux matériaux différents ont été étudiés au cours du développement de ce pilote : AlSi10Mg et Scalmalloy®.

L'objectif principal étant de caractériser les propriétés électriques et thermiques des deux matériaux une fois qu'ils ont été mis en forme (solides), aucune caractérisation des matières premières (poudre) n'a été envisagée dans le cadre de ce projet pilote. La poudre de Scalmalloy® a été fournie par TOYAL et l'AlSi10Mg par LPW.

Les résultats et les conclusions de la sélection des matériaux sont présentés dans le rapport D2.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM. La principale conclusion est que le Scalmalloy® a été choisi comme meilleure approche car il possède de meilleures propriétés mécaniques mais aussi une conductivité thermique plus faible.

Étude de viabilité

Pour étudier la viabilité économique de la solution en FAM proposée, la meilleure approche a été trouvée en fabriquant 4 cas en une seule fois, en utilisant la découpe au fil pour extraire le composant mais aussi pour obtenir les interfaces. Les perçages et les filetages sont réalisés manuellement (Figure 19).



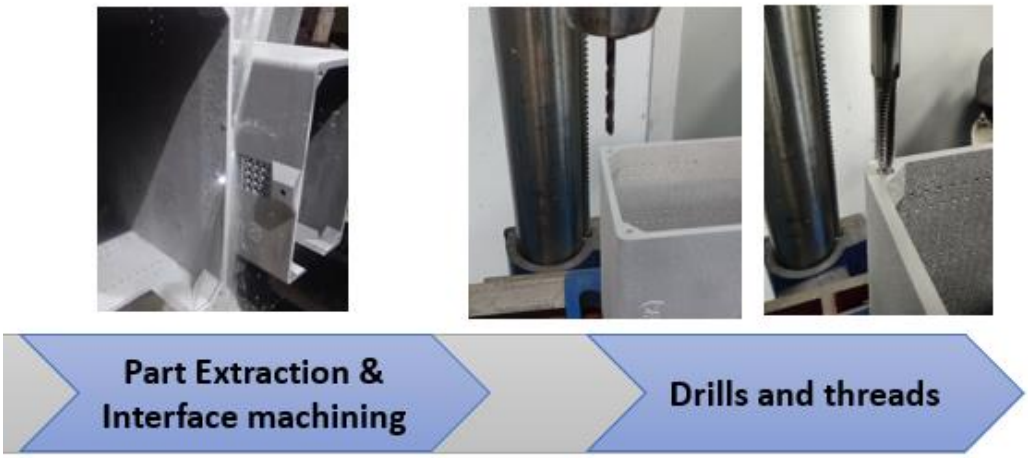


Figure 19. Feuille de route pour la FAM.

Si l'on considère le processus de fabrication présenté à la Figure 19, quatre boîtiers ont pu être fabriqués, traités thermiquement, coupés au fil, percés et filetés en moins de 30 heures (7,5 heures par boîtier). Le coût de chaque boîtier est d'environ 750 €.
En comparant le cas conventionnel et le cas en FAM, on peut observer que les deux ont un délai de livraison similaire, mais en termes de coût, le cas obtenu par la FAM est 250€ plus cher que le cas conventionnel. Ce résultat était attendu car le coût de l'usinage d'une géométrie simple en aluminium est difficile à améliorer.
D'autre part, en ce qui concerne la viabilité technologique, les résultats présentés dans le livrable D2.2.1 Rapport sur les résultats de la FAM, montrent comment la nouvelle conception du boîtier avec des canaux internes a considérablement amélioré la performance thermique de l'ensemble du système, atteignant une différence de 31°C (55°C → 24°C) à la surface du boîtier analysé.
La figure ci-dessous montre l'analyse thermographique réalisée sur le cas conventionnel (Figure 20.a) et le cas modifié (Figure 20.b), après 50 minutes de fonctionnement. On peut observer que la température maximale atteinte par le cas de la FAM est de 24°C, alors que le cas conventionnel atteint 55°C.

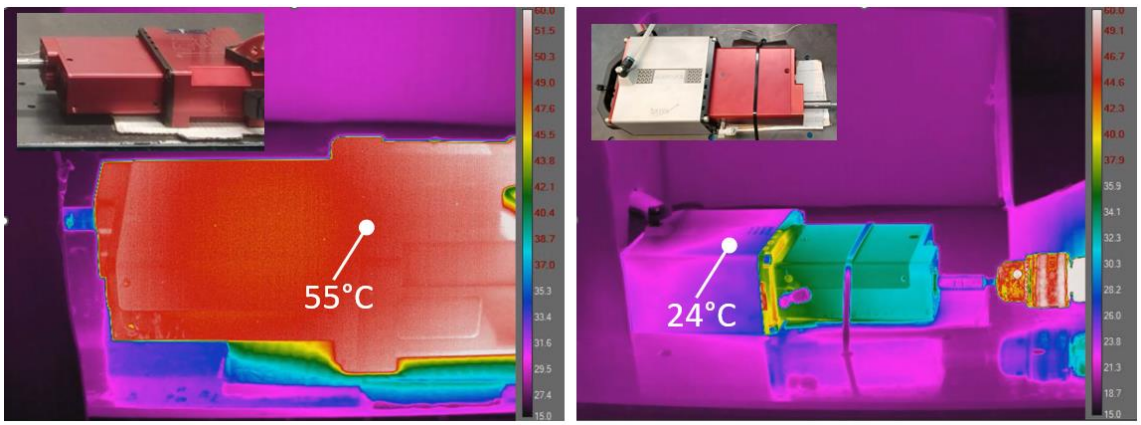


Figure 20. Images thermographiques des cas (a) conventionnel et (b) FAM

Le démonstrateur a été testé en collaboration avec la société INESPASA et, outre le coût supplémentaire de 250 euros par cas, la solution proposée dans le cadre de ce projet a clairement satisfait l'utilisateur final, car le système est désormais fonctionnel, avec un comportement thermique qui rend l'outil confortable, plus léger (réduction du poids de 37 %) et opérationnel pendant de longues périodes.

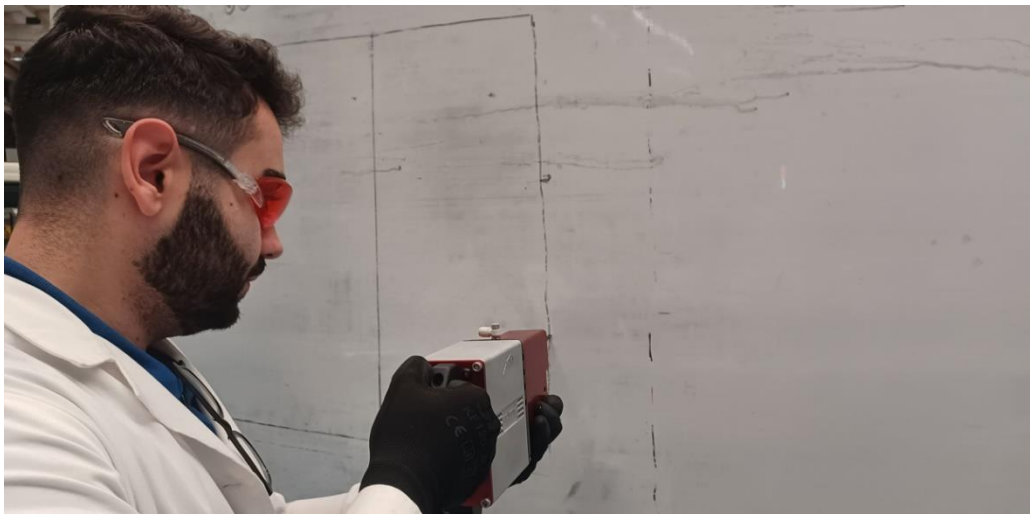


Figure 21. Image du test final réalisé pour valider l'outil.

2.4. Pilote FR2-SOMOCAP

Contexte

La pièce pilotes proposée par le partenaire associé SOMOCAP est un noyau de moulage pour l'injection plastique (Polyéthylène PE).

Cet outillage, destiné à l'industrie agricole, est une pièce originellement usinée dans un bloc d'acier 40CMD8 (C45), avec un trou de 10 mm à l'intérieur pour refroidir la pièce polymère sur tout son pourtour.
Cependant, ce simple trou droit pour le refroidissement n'est pas suffisant et n'est pas efficace : pendant la phase de refroidissement, la pièce en polymère présente une ovalisation et n'est pas tout à fait circulaire.

Données originales :

- Tolérance finale : +/-0.02mm poli de démoulage
- Prix original : 5000€ (incluant l'électroérosion pour la partie supérieure de la pièce)
- Délai de livraison original : 2 semaines
- Pression d'injection : 800 bars

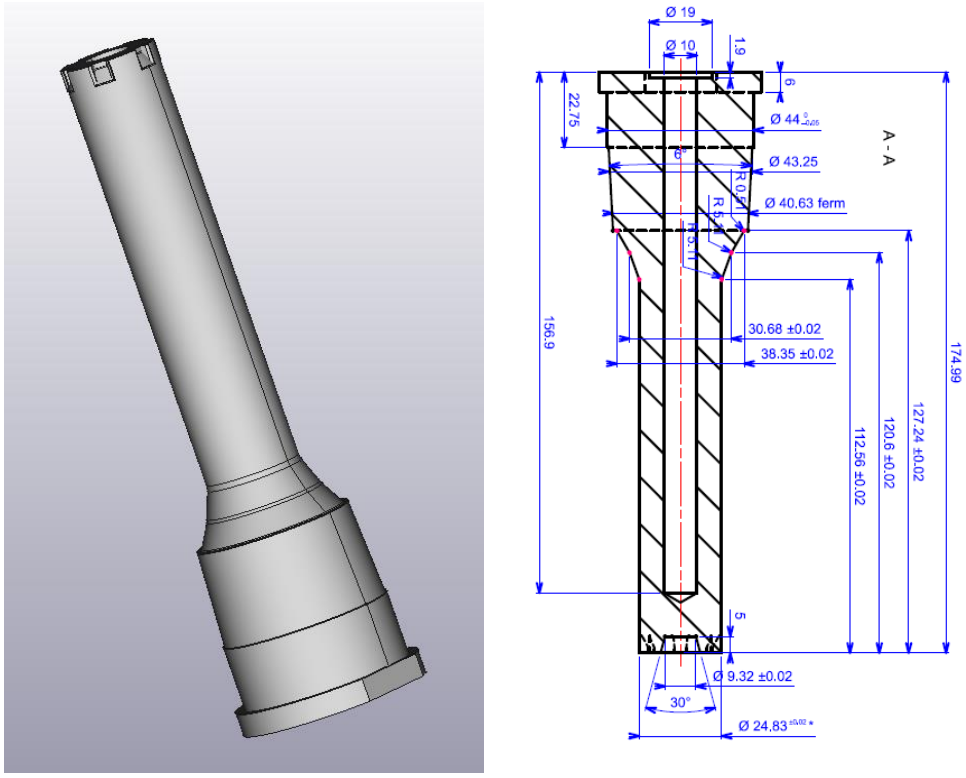


Figure 22: Pièce SOMOCAP

Le principe de la régulation se fait à l'aide d'un séparateur, comme le montre le schéma en Figure 23.

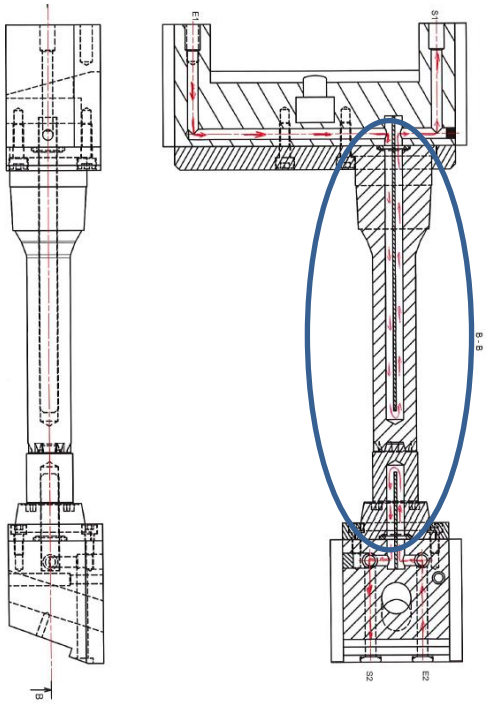


Figure 23: Principe de régulation

Objectifs du pilote

Les objectifs de ce pilote sont divers :

- Fabriquer cette pièce avec 2 technologies différentes FFF/FDM chargé métal (Fused Filament Fabrication / Fuse Deposition Modeling) et frittage (avec et sans HIP).
- Augmenter les performances de cet outil en ajoutant du refroidissement de type « Conformal Cooling ».
- Réduire les délais de livraison et le prix.
- Rendre la fabrication additive métallique accessible à tous / Technologie basée sur le procédé MIM.

Les technologies de FAM, y compris le DED Wire Arc ou Laser, le L-PBF, le DED Powder Laser, etc. sont très coûteuses et ces coûts sont généralement prohibitifs pour une PME.

Développer un nouveau procédé, basé sur une technologie bien connue (le procédé FDM) et essayer d'obtenir une pièce métallique à moindre coût est l'un des principaux objectifs de ce projet pilote.

La référence sur le marché pour ce type d'application est la Markforged Metal X, disponible dans le consortium ADDITOOL. Cependant, cette machine est un système fermé et une "technologie propriétaire".

Essayer de faire le même travail avec une machine classique et ouverte, directement disponible sur le marché pourrait être très intéressant.

Une reconception de l'outil proposé par SOMOCAP a été réalisée par les partenaires d'ADDITOOL afin d'augmenter les performances de refroidissement. Le pilote de fabrication est présenté sur la Figure 24.

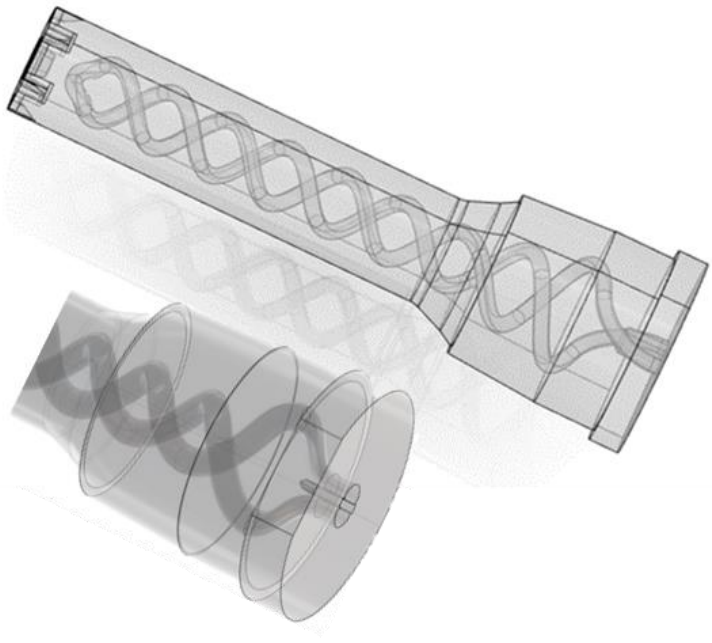


Figure 24 : Pilote SOMOCAP avec canaux de refroidissement en spirale

Pour répondre à ces objectifs, voici la méthode utilisée :

- Caractériser le matériau et la pièce fabriquée pour chaque technologie : Matière première et matière fabriquée.
- Fabriquer la pièce par différentes technologies : Markforged Metal X + accessoires & Lynxter S600D + accessoires.
- Traitement thermique : Déliantage / Frittage.
- Scan 3D / Tomographie.
- Usinage des pièces.
- Tests des outillages sur leur site de production + livrable de viabilité.

Sélection du matériau

Au début du projet ADDITOOL, voici les matériaux disponibles sur le marché :

- BASF : Ultrafuse 316L & Ultrafuse 17-4PH – Déliantage catalytique
- Nanoé : Zetamix 316L & Zetamix H13 – Déliantage thermique
- Nanovia : Mt 316L – Déliantage thermique
- Markforged : 17-4PH, Cuivre, Inconel 625, H13, acier à outil A2 et D2. Tous les matériaux sont traités avec la machine Métal X et ses accessoires – Déliantage à l'Optéon SF-79.

Selon la spécification donnée par SOMOCAP, seuls le 17-4PH et le H13 répondent à notre problématique (dureté et condition de haute pression), voir Figure 25.

De plus, le H13 et le 17-4PH sont à la fois disponibles pour la Markforged Métal X ainsi que pour un système ouvert.

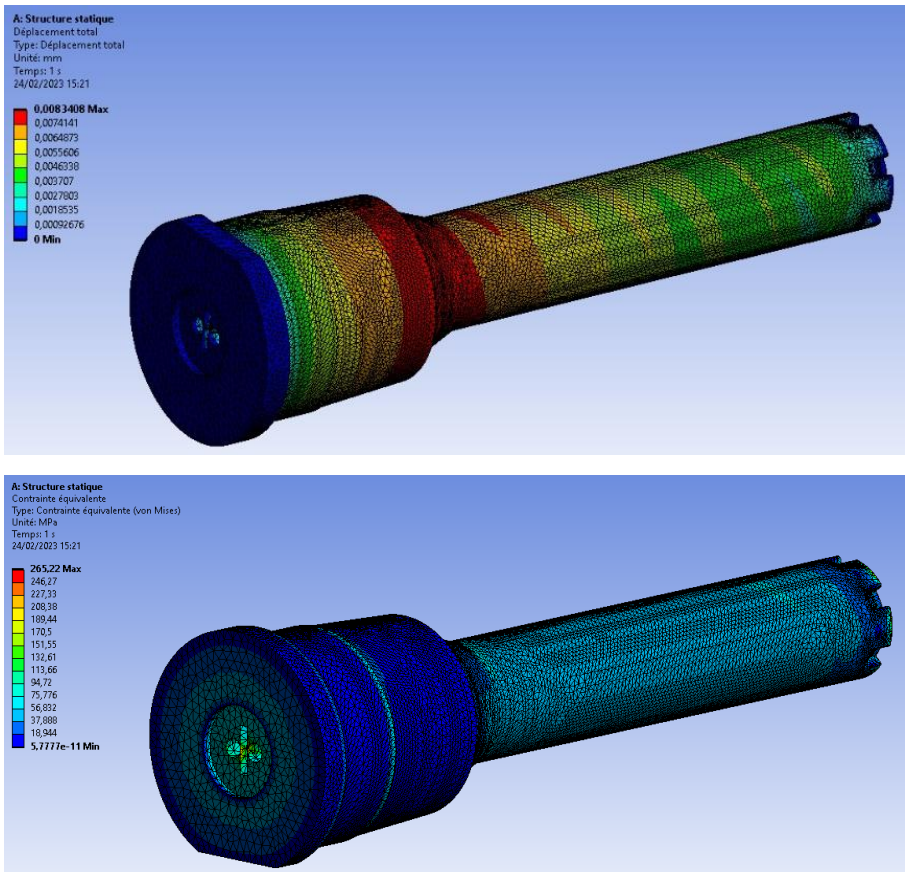


Figure 25: Simulation & Dimensionnement en fonction du matériau

Étude de viabilité

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

- Markforged Métal X + accessoires
- LYNXTER S600D + accessoires
- RAPIDIA, technologie basée sur une pâte aqueuse chargée en poudre métallique.

Techniquement, le filament NANOE donne des résultats assez médiocres, non pas durant l'impression avec Lynxter S600D, mais durant la phase de déliantage et de frittage s'il est utilisé tel que recommandé (voir Rapport D2.1.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM). Le procédé de déliantage et de frittage a été optimisé par le consortium pour ce filament, ce qui a permis d'obtenir une bonne géométrie externe et des niveaux de carbone contrôlés. Le cycle HIP (Hot Isostatic Pressing) final a permis de fermer la plupart des porosités. Cependant, il est nécessaire

d'avoir un premier déliantage chimique pour ouvrir quelques pores avant le déliantage thermique et faciliter l'enlèvement du liant.

Le fabricant annonçait 91h sur la phase de déliantage/frittage, ce qui n'est pas acceptable pour une PME et a été réduit à moins de 20h, ce qui devient un résultat intéressant et exploitable.
Cependant, les propriétés métallurgiques et mécaniques relativement faibles nous ont contraints à arrêter le développement pour une pièce aussi grande et massive. Ce filament peut fonctionner pour des petites pièces mais n'est pas viable actuellement pour des pièces de grandes dimensions.

La Markforged Métal X, référence actuelle sur le marché, donne d'assez bons résultats mais légèrement en dessous des spécifications annoncées, voir le livrable D2.1.1 Rapport sur les matériaux pour la FAM. En outre, l'acier Markforged H13 était déjà quasi dense après frittage et tous les pores restants ont été fermés avec le HIP. Cependant, des restrictions dimensionnelles subsistent dans la Markforged pour la fabrication et le frittage d'une aussi grande pièce.

Figure 26: Fabrication avec la Markforged Metal X

La technologie RAPIDIA semble prometteuse dans la mesure où elle n'utilise pas un filament chargé à 50 % de poudre métallique, mais une pâte aqueuse chargée à près de 60 %, avec un liant polymère en très faible quantité (<1 %).
L'utilisation d'une matière première contenant de très faibles quantités de polymère permet à cette technologie de simplifier le déliantage et de produire moins d'émissions. Ce système est capable d'imprimer des pièces avec des structures internes complexes, en utilisant une technologie propriétaire d'enlèvement des supports par évaporation. La pâte aqueuse permet de créer facilement des assemblages complexes en collant à l'eau des pièces imprimées en 3D ou en fusionnant des pièces imprimées en 3D avec des pièces usinées. Ce système d'impression 3D métallique permet de fritter les pièces directement à la sortie de l'imprimante, sans étape de déliantage séparée, comme c'est le cas pour la technologie Markforged ou sur un système ouvert avec des filaments du marché. Le procédé Rapidia élimine la nécessité d'une étape de déliantage distincte en remplaçant la plupart des liants polymères par de l'eau. L'eau s'évapore pendant l'impression, laissant une « pièce verte » avec moins de 1 % de liant. Les pièces vertes fabriquées avec le système Rapidia peuvent passer directement au frittage, avec des cycles de frittage courts.

Markforged et RAPIDIA permettent l'impression d'une large gamme de métaux, avec des options pour une excellente résistance, des capacités à haute température et une bonne résistance à la corrosion.
L'ensemble de la chaîne de fabrication des marques commerciales Markforged et Rapidia sont optimisées et fonctionnent en temps masqué ce qui rend ces technologies très compétitives (production pendant la nuit par exemple, pas besoin d'avoir un opérateur devant la machine, etc.).

Figure 27 : Technologie RAPIDIA

Coûts en fonction de la matière première :

Matériaux	**Prix/kg**
Nanovia Mt 316	250€/kg
Nanoe Zetamix 316L	500€/kg
Nanoe Zetamix H13	500€/kg
BASF Ultrafuse 17-4PH	100€/kg
BASF Ultrafuse 316L	130€/kg
Markforged H13	245€/200cm^3
Markforged 17-4PH	135€/200cm^3
RAPIDIA 17-4PH	376€/L --> 75.2€/kg

Description	Prix	Délai
Programmation	56 € (900 €/jour)	30min
Fabrication	150 € (150 €/jour)	20h
Matériau – 1.8kg	156€ pour du 17-4PH Markforged 283€ pour du H13 Markforged 87€ pour du 17-4PH Rapidia	/
Déliantage/frittage	900 €	J +1
Usinage	865 €	1 semaine en sous-traitance
Total	**2 127 € Markforged 17-4PH** **2 254 € Markforged H13** **2058 € RAPIDIA 17-4PH**	**5 jours**

Le coût, même s'il est moins important que l'original, n'est pas un indicateur ici car la comparaison avec la pièce d'origine n'est pas possible.
En effet, ce procédé permet de fabriquer la pièce avec une réelle valeur ajoutée (le canal de refroidissement type « Conformal Cooling » n'est possible qu'avec les technologies de FAM) qui n'était pas possible avec les technologies conventionnelles.

2.5. Pilote PT2- VIDIRIMOLDE

Contexte

L'application de canaux de refroidissement type « Conformal Cooling », conçus pour correspondre parfaitement à la géométrie de la pièce afin d'améliorer leur refroidissement, a été appliquée aux moules d'injection plastiques, aux matrices d'emboutissage et à d'autres outils, afin de permettre une réduction du temps de cycle et/ou d'atteindre des cycles thermiques spécifiques, tels que la trempe.
Toutefois, cela n'a pas été le cas pour les moules de bouteilles en verre. Ces derniers présentent des aspects qui font que l'application de canaux de refroidissement mérite d'être étudiée : travail à des températures d'environ 600°C, fluide de refroidissement, air comprimé, et durée du cycle – typiquement de quelques secondes.
Le refroidissement conventionnel des moules de verre est réalisé en injectant de l'air comprimé à travers un ensemble de trous droits percés le long de la direction verticale du moule. C'est ce qu'on appelle le "flux vertical" (Figure 28). L'avantage de cette approche est la relative simplicité

de réalisation de ces trous. L'inconvénient est que la température autour de la pièce en verre n'est pas uniforme sur toute la surface du moule. Cela signifie qu'il y a une plus grande probabilité de défauts dans la pièce finale.

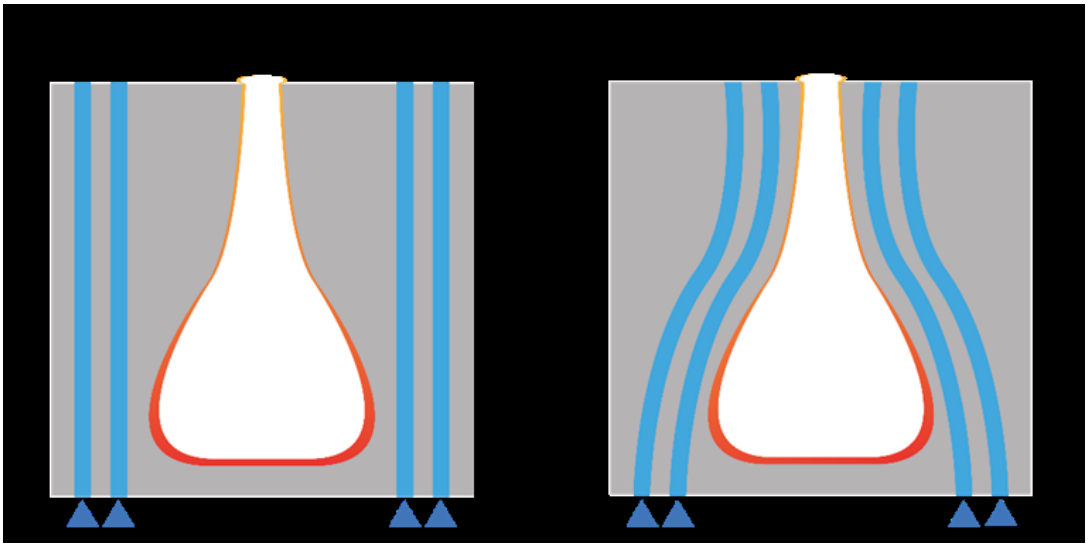


Figure 28: Deux types de refroidissement pour les moules en verre. À gauche, la méthode de refroidissement conventionnelle ; à droite, la méthode de refroidissement proposée type « Conformal Cooling »

Les moules pour le verre connaissent également des problèmes d'usure sur les surfaces de moulage, en raison des températures de service élevées. Ce problème est généralement atténué par le dépôt d'une couche d'un matériau plus dur, tel qu'un alliage à base de nickel, sur les bords internes du moule. Ce processus est généralement réalisé par dépôt plasma, TIG ou MIG, en tant que procédé supplémentaire au sein de la chaîne de production.
La pièce proposée est un moule pour une petite bouteille en verre - Figure 29. Cette bouteille a une géométrie inhabituelle, qui pose un défi supplémentaire au système de refroidissement conventionnel. Toutefois, compte tenu de sa petite taille, elle sera plus appropriée pour la production par FAM.

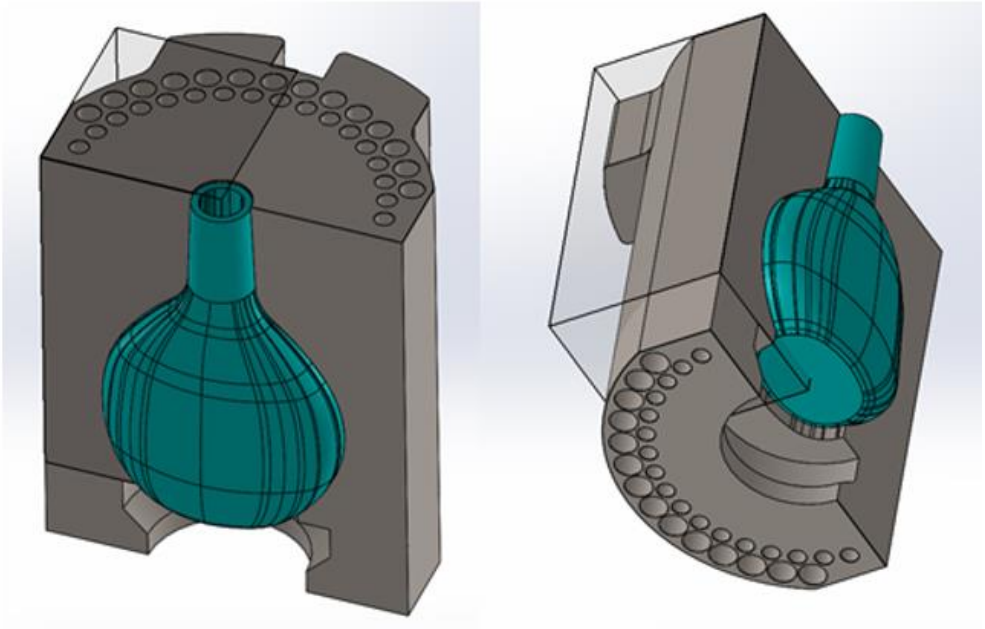


Figure 29: Moule pour une bouteille en verre.

Objectifs du pilote

L'objectif du pilote est d'évaluer la viabilité de l'application d'un système de refroidissement type « Conformal Cooling » au moule, tout en le combinant avec une structure interne en treillis pour réduire le poids et avec une surface de moulage améliorée. Les deux premiers objectifs sont atteints en utilisant la fabrication L-PBF, tandis que le dernier est atteint en déposant des couches d'alliage de nickel avec le procédé DED Powder Laser.

Sélection du matériau

Le matériau choisi pour le pilote est un acier inoxydable commercial sous forme de poudre - EOS Stainless Steel CX. En effet, la pièce sera fabriquée dans une entreprise partenaire, en raison de sa taille, et il s'agit de la poudre (SS) disponible dans l'équipement.

Étude de viabilité

Le moule a d'abord été fabriqué par L-PBF, laissant une surface décalée pour le dépôt ultérieur par DED Powder Laser. L'opération de finition a consisté à fraiser la surface du moule.

Il n'a pas été possible de tester le moule dans des conditions de travail réelles. En effet, cela nécessiterait l'arrêt d'une ligne de production et le remplacement d'un ensemble de moules dans une station (généralement composée d'environ 12 moules). Des indications sur les

performances de refroidissement ont donc été tirées sur modèles d'essais. Dans ces essais, un ensemble de spécimens pour plusieurs options de systèmes de refroidissement a été testé à l'aide d'air comprimé, après avoir été chauffé aux températures de service typiques. Ces options comprenaient des canaux à section circulaire, à section elliptique, combinés à des sections non uniformes sur la longueur de l'échantillon, ainsi que la combinaison avec des structures en treillis et des ailettes internes - Figure 30.

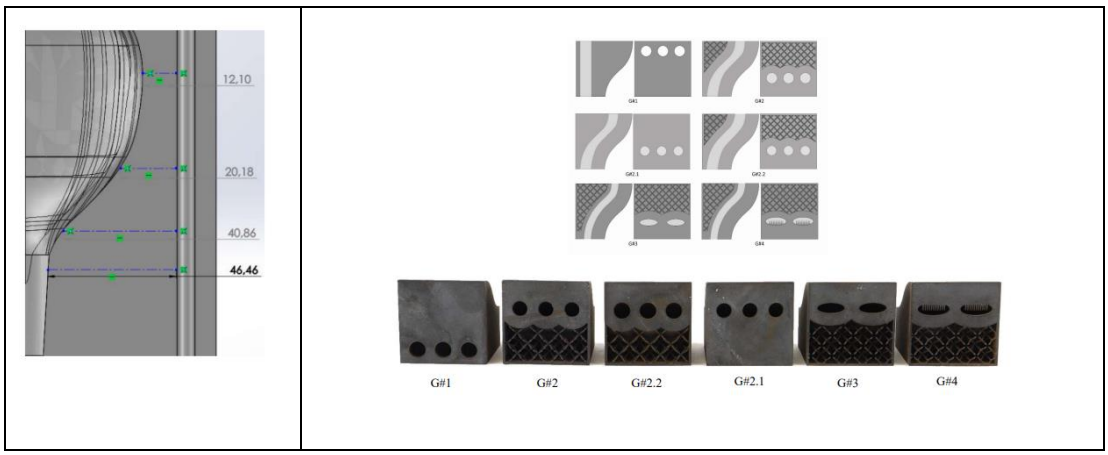


Figure 30: Géométrie des échantillons pour la modélisation du refroidissement.

Les résultats indiquent que toutes les solutions de refroidissement type « Conformal Cooling » atteignent une vitesse de refroidissement plus rapide par rapport à la solution de refroidissement conventionnelle. Pour une température de départ de 650°C, la solution de refroidissement la plus performante - G#3 (canaux elliptiques combinés à une structure en treillis) - réduit le temps de refroidissement pour atteindre, par exemple, 610°C à environ la moitié (d'environ 9 s à 4,5 s) – Figure 31.

Les coûts internes de modélisation et de production du moule L-PBF ont été comparés aux mêmes coûts de production que le moule conventionnel. Le tableau ci-dessous résume les éléments de coût pris en compte pour les deux moules.

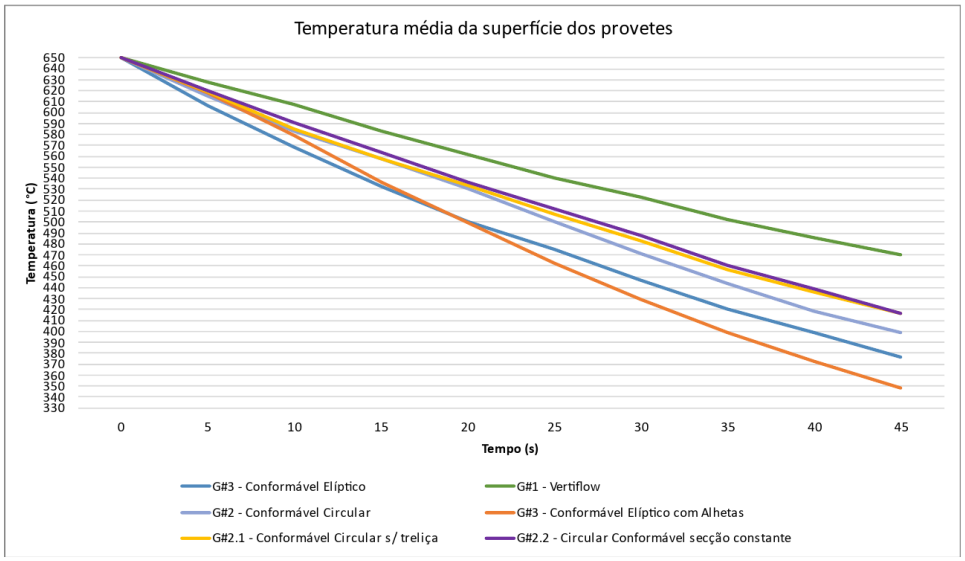


Figure 31: Comparaison des performances du refroidissement conventionnel et de plusieurs options de refroidissement type « Conformal Cooling ». Température moyenne à la surface des échantillons (surface du moule)

	Coûts de fabrication (€)	Coûts de finition (€)
Fabrication L-PBF	Estimé : 10000€	Fraisage - 100€
Rechargement DED P-L	Estimé : 5000€	
Moule conventionnel	Estimé : 280€	Fraisage - 100€
Différence de coûts	**14720**	**0**

Pour calculer le nombre de pièces nécessaires pour compenser la différence de coût initial, les paramètres suivants ont été pris en compte :

- Coût initial du handicap : **14720€ - 1 moule ;**
- Dans un environnement de production, chaque machine utilise entre 8 et 12 moules. Dans ce scénario, on considère qu'il y a 10 moules par machine. La différence de coût initial s'élève donc à **147200€**
- Pour le temps de cycle de la pièce, une valeur de base de **3s** a été considérée
- Pour la réduction du temps de cycle (gain), deux scénarios ont été envisagés :
    - 25% de réduction (nouveau temps de cycle = 2,25s) et
    - 50% de réduction (nouveau temps de cycle = 1,5s). Basés sur les simulations présentées précédemment.

- Le taux horaire de la machine / de l'opérateur / des installations ont été estimé à 80 €.
- La cadence de production a été fixée à 15 pièces/minute par moule, soit 150 pièces/minute pour l'ensemble des 10 moules.
- La ligne de production a été considérée comme fonctionnant en continu (24 heures).
- Compte tenu des paramètres ci-dessus, il est possible de calculer le nombre de pièces qui compensent le handicap du coût initial pour les deux scénarios :
    - Pour une réduction de 25% du temps de cycle - 883200 pièces. Compte tenu de la cadence de production, cela représente 41 jours.
    - Pour une réduction de 50 % du temps de cycle - 441600 pièces. Compte tenu de la cadence de production, cela représente 21 jours.

Comme on peut le constater, bien que le coût initial de la mise en place de 10 moules L-PBF + DED dans un environnement de production soit très élevé - environ 15 000 euros - le fait que l'industrie du verre travaille avec des taux de production élevés signifie que le temps de retour sur investissement n'est pas aussi élevé qu'on pourrait penser. Bien que les coûts ne soient pas entièrement déterminés, étant donné qu'il n'a pas été possible d'accéder à des informations plus détaillées, il est raisonnable d'affirmer que l'utilisation des technologies de FAM dans le secteur de la fabrication du verre est potentiellement viable.

3.CONCLUSIONS

Les résultats présentés dans ce document ont montré la viabilité potentielle de l'utilisation des technologies de FAM dans le secteur de l'outillage. 5 pilotes différents (FR1, PT1, SP1, FR2, PT2) ont été développés pour ce vaste secteur (moules pour le plastique, moules pour le verre, usinage, gabarits de contrôle, etc.) en utilisant différentes technologies de FAM (PBF-L, DED Wire Laser, DED Wire Arc, DED Power Laser et FFF chargé métal).

La viabilité technologique a été démontrée en testant les pilotes dans des conditions réelles. Tous ont donné de bons résultats, satisfaisant aux exigences (à l'exception du PT2, car ce test nécessite l'arrêt de la ligne de production, il sera donc testé lors des prochains arrêts de ligne).

En ce qui concerne l'étude de viabilité économique, des conclusions différentes ont été tirées en fonction de chaque pilote étudié (voir les conclusions de chaque pilote). En général, les délais de livraison ont été réduits grâce à l'utilisation des technologies de FAM. En ce qui concerne les coûts, on peut observer que la sous-traitance de l'usinage a un impact important sur le coût total. Cette augmentation devrait diminuer si une formation plus poussée à l'usinage de pièce Near Net Shape est dispensée.

Interreg Sudoe

EUROPEAN UNION

ADDITOOL

European Regional Development Fund

www.additool.eu