



ÉTUDE D'OPPORTUNITÉS DE LA FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE (FAM) DANS LE SECTEUR DE L'OUTILLAGE



INDEX

1.	INT	ROI	DUCTION	3
2.	OFI	FRE	TECHNOLOGIQUE DE LA FAM	4
	2.1.	Mc	tivation et Potentiel	4
	2.2.	Per	spectives	7
	2.3.	Im	pact & opportunités :	11
	2.4.	L'o	pportunité du marché	13
	2.5.	Ter	ndances du secteur de l'outillage en FAM	14
	2.5	.1.	Usinage hybride - Hybrid Machining	14
			Applications des procédés de FA et hybrides dans le secteur ge	
	2.5	.3.	Optimisation des matériaux – Optimisation topologique	19
	2.5	.4.	Refroidissement – Conformal Cooling	21
3.	DEI	MAN	DE DE LA FAM DANS LE SECTEUR DE L'OUTILLAGE	2 3
4.	IDE	NTI	FICATION DES OPPORTUNITÉS	25
	4.1.	Rép	partition des résultats par pays	25
	4.1	.1.	Secteurs industriels par pays	25
	4.1	.2.	Champ d'applications pour les technologies de FAM	26
	4.1	.3.	Matériaux et technologies de FAM	27
	4.2.	Ide	ntification des opportunités	27
	4.2	.1.	Espagne	27
	4.2	.2.	France	28
	4.2	.3.	Portugal	28
	4.3.	Sél	ection des cas d'études	29
5.	RÉI	FÉRI	ENCES	31



1. INTRODUCTION

Suite aux résultats de l'Activité 1.1, ce document a pour objectif d'analyser les différentes applications potentielles dans le secteur de l'outillage et prend part dans l'Activité 1.2 (« Etude d'opportunités pour les technologies de Fabrication Additive Métallique (FAM) dans le secteur de l'outillage).

Un ensemble d'opportunités pour le développement et l'amélioration des technologies actuelles de FAM dans les secteurs industriels sera identifié, ainsi que des indications sur de nouvelles applications potentielles. Cette activité est essentielle pour la définition des études de cas du projet ADDITOOL.

Comme indiqué dans l'activité 1.1 et la brève description du Work Package, les partenaires travailleront en étroite collaboration avec les partenaires locaux de leur région pour définir les défis et opportunités technologiques les plus pertinents dans le cadre du secteur des moules et de l'outillage en général.

Cette collaboration impliquera:

- 1. Le contact direct avec les entités identifiées lors de l'activité 1.1, par le biais de réunions techniques et de visites des installations, pour évaluer les besoins particuliers de chaque entreprise.
- 2. Une identification des technologies de FAM ayant le plus d'impact pour le secteur de l'outillage et adaptées à chaque utilisation.

Ce livrable servira de base pour définir les différents cas d'études à développer dans l'activité 1.3.



2.OFFRE TECHNOLOGIQUE DE LA FAM

2.1. Motivation et Potentiel

La Fabrication Additive (FA), également connue sous le nom d'impression 3D, permet la fabrication de géométries complexes, la production à distance, la réduction de poids, une réduction des délais de fabrication et une certaine liberté dans la conception. L'utilisation de la matière première est très généralement optimisée grâce à l'impression 3D, qui utilise des méthodes de construction dits « couche par couche » et qui permet de s'adapter à une grande variété de besoins. La FA permet dans de nombreux cas de réduire les coûts, tout en réduisant considérablement le temps de fabrication.

Des caractéristiques intéressantes telles que la capacité de fabriquer des pièces de plus en plus légères, d'utiliser la matière première en juste quantité, d'accroitre les propriétés mécaniques, de réduire les délais de fabrication et de production ou encore la liberté de personnalisation sont quelques-uns des facteurs qui encouragent les entreprises à investir dans ces nouvelles technologies. De nombreuses organisations (TPEs et PMEs) s'orientent de plus en plus vers l'impression 3D pour le développement de produits personnalisés [01].

Les métaux sont généralement utilisés dans la fabrication additive de produits nécessitant une grande résistance mécanique, une stabilité, une résistance chimique et/ou thermique élevées. L'impression 3D utilise différents matériaux métalliques pour la fabrication de divers prototypes, pièces de rechange et/ou pièces fonctionnelles, etc. pour diverses industries telles que l'aérospatiale, l'automobile, la défense, le médical et le monde industriel en général.

Également, la FA apporte de nouvelles méthodologies et de nouvelles capacités de production en comparaison avec les procédés de production conventionnels dits « soustractifs ». Elle ouvre de nouvelles perspectives sur le cycle de vie des équipements et des composants en prolongeant, par exemple, la durée de vie des pièces. Ces mêmes pièces peuvent être rechargées pour de l'ajout de fonctions ou être réparées grâce aux technologies DED, le tout sans outillage spécifique.

Grâce à la combinaison de tous les moyens numériques de conception (incluant la méthode des éléments finis (FEM), la fluidique (CFD), ou tout autre outils d'analyse



numérique), il est désormais possible d'explorer le véritable potentiel de la Fabrication Additive.

Dans ce contexte, les principaux **avantages** de la fabrication additive par rapport à la fabrication soustractive seraient les suivants [02] :

- Aucun outillage nécessaire, réduisant ainsi le temps et les coûts de production ;
- Des « petits lots » de production sont réalisables et économiquement viables ;
- Les changements de design sont faciles et rapide à implémenter ;
- L'optimisation des produits est centrée sur les fonctions (ex. : refroidissement, canaux optimisés, etc.);
- La capacité à produire des pièces à géométries complexes ;
- Grand potentiel de simplification de la Supply Chain, en réduisant les temps d'approvisionnement, les délais de livraison, une diminution des stocks, etc.

À mesure que les technologies s'améliorent et que les procédés s'affinent, la Fabrication Additive Métallique devient de plus en plus populaire et accessible. Cependant, même si les prix des machines évoluent à la baisse et que de nouvelles applications pour la fabrication additive sont découvertes, des défis restent à relever et empêchent de nombreuses entreprises d'utiliser cette technologie innovante à son plein potentiel. Dans sa récente enquête – « Rapport sur les tendances de l'impression 3D » – Dimensional Research a révélé que 96 % des parties prenantes de la fabrication sont confrontées à des défis dans l'impression 3D (pas d'expertise en interne, coûts des équipements, coûts matières, qualité des pièces produites, catalogues matière restreint, difficulté sur la grande dimension, coût des pré et post traitement) (Figure 1).

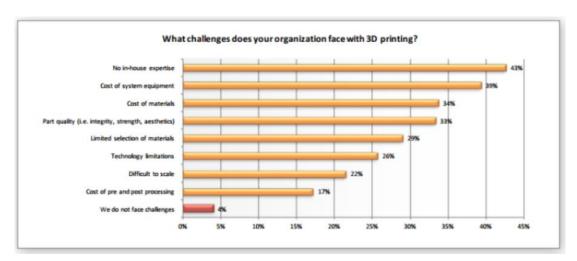


Figure 1 : Défis de la Fabrication Additive [03]



Les quatre principaux défis cités par les répondants sont : Pas d'expertise en interne, le coût des différents équipements, le coût matière et la qualité des pièces produites.

Pas d'expertise en interne : L'un des obstacles les plus importants de la Fabrication Additive en entreprise pourrait être la technologie en elle-même. Alors que peu d'entreprises remettent en question les mérites et la valeur de la fabrication additive métallique, beaucoup manquent de personnel possédant le large éventail de compétences et de formation nécessaires pour réussir à fabriquer des pièces en interne.

Coût des équipements/systèmes: Bien que les technologies de FAM aient fait des progrès significatifs au cours des dernières années et bien que le marché s'accélère avec une baisse des coûts des équipements jusqu'à 30% dans certains cas, le prix des équipements n'est toujours pas abordable (100.000€ minimum). La fabrication additive n'étant dimensionné que pour la réalisation de petites et moyennes séries, avec des faibles volumes, l'achat de plusieurs machines devient nécessaire pour augmenter les cadences de production. Ceci a pour conséquence directe que le coût global est un obstacle majeur pour ceux qui recherchent une solution de fabrication économique.

Coût matière : Les matériaux représentent souvent une ligne importante dans le budget d'un fabricant. Selon Dimensional Research, les fabricants d'outillages sont particulièrement touchés par le coût des matériaux et sont plus susceptibles d'être confrontés à des problèmes de sélection des matériaux disponibles.

Qualité des pièces produites : Tous les services d'impression 3D métal et les fournisseurs de pièces ne sont pas identiques ; pour cette raison, la qualité des pièces reste une préoccupation importante pour les fabricants. La répétabilité de pièce à pièce et de machine à machine est extrêmement difficile avec les procédés DED ou PBF.

Dans ce cadre, les activités de recherche européennes se concentrent actuellement sur l'étude de l'effet de la matière première, les paramètres des procédés et des post-traitements sur les propriétés résultantes des pièces. Un autre objectif important est de définir des procédures et des normes de qualification des procédés et des fournisseurs pour la fabrication de composants en FAM.



2.2. Perspectives

Il est attendu que la fabrication additive en 2050 soit complètement différente d'aujourd'hui car elle passe d'une production de masse bon marché à une production personnalisée, s'adaptant aux marchés mondiaux changeants [04][05]. Ces technologies permettent une production propre, par une efficacité énergétique et matérielle. Au cours des dernières années, l'industrie de la fabrication additive est passée du prototypage à la production, où les exigences de qualité et la complexité sont beaucoup plus grandes. Par la suite, des investissements très importants ont été faits dans la recherche et la commercialisation. De nombreux équipementiers sont apparus depuis 2015 et ce secteur continuera à progresser de manière exponentielle dans les années à venir [06].

La rareté des matières premières, la disponibilité des bases de Big Data [05] et la tendance à la personnalisation des produits font de la FA une alternative parfaite à la fabrication conventionnelle. La perspective de la FA est attentive à différents points pour améliorer cette technologie en termes de viabilité, à l'échelle industrielle :

- Productivité et flexibilité
- Augmentation des connaissances
- Standardisation de la qualité
- Disponibilité des matériaux
- Equipes multidisciplinaires et programmes de formation

Récemment, une analyse de la taille du marché de l'impression 3D métal a été réalisée par Polaris Market Research [01] montrant le potentiel de la FAM au cours des prochaines années et en fonction de la région (Figure 2).

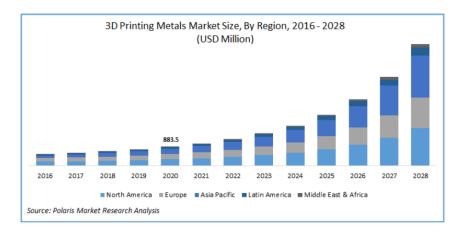


Figure 2 : Taille du marché de la FAM [01]



Les coûts élevés des équipements de FAM peuvent être justifiés par une vitesse de fabrication plus élevée, des volumes de fabrication plus grands et la facilité de chargement ou de déchargement des pièces, entre autres. Pour augmenter le taux de dépôt et la productivité, les principales solutions se concentrent sur différents points clés. À titre d'exemple, des lasers de puissance supérieure sont mis en œuvre, avec des multi-lasers pour travailler en parallèle ou pour suivre différentes stratégies (exemple : stratégies skin-core qui utilisent un laser haute puissance pour construire le noyau et un autre avec une puissance inférieure pour construire la peau avec une meilleure précision). Des systèmes multipoints avec élimination des fumées et gaz de protection local sont également utilisés pour les avantages qui en résultent (vitesse de fabrication élevée, absence de limitations de taille de chambre, etc.). De plus, le concept d'illumination d'un lit de poudre ou de fusion multi-jets sont dans leurs phases finales de développement. Ces systèmes utilisent des agents chimiques pour réduire ou amplifier la fusion en obtenant une précision de surface élevée, et des masques pour contrôler le rayonnement laser. Une autre option pour réduire le temps de fabrication est l'utilisation de nouveaux systèmes qui permettent un taux de dépôt de poudre plus élevé et une fusion plus rapide.

La rugosité et la précision de surface peuvent être optimisées par un post-traitement comme le fraisage, le polissage et/ou l'usinage. Pour cela, des machines hybrides intègrent directement les deux technologies (FA et Usinage) dans une seule et même machine pour augmenter la productivité et réduire les délais d'attente.

De plus, la modularité et les concepts d'intégration offrent une flexibilité en combinant et en intégrant divers périphériques comme des chambres de fabrication plus grandes, des post-traitements, des stations de manutention ou de déchargement automatisée, dans le but de réduire considérablement les coûts de production.

Une bonne qualité pour des pièces très complexes est très difficile à obtenir. Pour cela, il est important de créer et de suivre des méthodologies précises pour sélectionner les paramètres et les stratégies appropriés pour différents matériaux. L'intégration et la communication entre les machines, la collecte de données et les programmes d'analyse pour la gestion machine sont d'une grande importance. Par ailleurs, la simulation est un outil quasi indispensable pour prédire et contrôler les distorsions, les contraintes résiduelles et les microstructures, limitant ainsi le nombre d'essais.

Dans le domaine des systèmes de contrôle et de monitoring, différentes méthodologies ont été développées pour assurer un processus de fabrication robuste et répétable sans



différences en termes de qualité et de dimensions entre les lots. Le contrôle du process de la chambre permet de surveiller toute irrégularité lors du dépôt de la couche mais aussi les paramètres physiques du laser, le niveau d'oxygène et la pression de l'atmosphère. Le contrôle du bain de fusion permet de surveiller la température et la forme du bain en temps réel à l'aide de capteurs haute résolution. Cela améliore la traçabilité, la qualité, la fiabilité, la répétabilité et l'efficacité. Il existe également des logiciels de simulation qui prédisent le bain de fusion et le comportement de la poudre métallique.

D'autre part, les tests non destructifs (CND) assurent la qualité des composants fabriqués. Dans ce domaine, la tomodensitométrie (tomographie) est un outil très utile pour détecter la porosité dans des géométries complexes. En raison de la jeunesse de la FA pour les pièces métalliques, les spécifications d'inspection sont encore en cours d'élaboration et de nombreux fabricants de méthodes d'inspection ont récemment développés de nouvelles méthodologies adaptées à la FAM [06].

L'optimisation des topologies des pièces doit être améliorée par des logiciels spécialisés. Les concepteurs changeront leur manière de concevoir pour adopter une méthode plus fonctionnelle et moins manufacturière, ce qui leur donnera plus de liberté dans les choix de conception. Les logiciels d'Optimisation Topologique permettent des design très optimisées et efficaces avec des structures de type réticulaire et/ou bionique en appliquant des algorithmes mathématiques. Dans les structures réticulaires, la matière n'est ajoutée qu'aux zones utiles, réalisant des structures rigides tout en minimisant la masse, réduisant par la même occasion la consommation de poudre métallique et le temps de fabrication.

Même si le nombre de matériaux disponibles continue de croître, le catalogue de choix doit encore s'étoffer pour répondre à toutes les demandes. Des développements sont en cours dans l'aptitude au traitement de nouveaux matériaux métalliques tels que les superalliages Ni, les alliages Al, les métaux réfractaires et les aciers martensitiques, entre autres. La génération de bases de données sur les propriétés de matériaux spécifiques construits par les différents procédés de FA (DED Wire Laser, DED Wire Arc, DED Powder Laser, PBF Laser, etc.) peut fournir des informations pour la conception de nouveaux alliages appropriés pour la FA.

EXMET a développé un procédé de fabrication de pièces métalliques amorphes par FA. Les métaux amorphes combinent de manière unique des propriétés telles que la résistance élevée, l'élasticité, la dureté, la résistance à la corrosion, la conductivité et la



biocompatibilité, toutes très utiles pour de futures applications à haute valeur ajoutée dans l'électronique, l'aérospatiale et l'ingénierie mécanique [68].

Un nouveau procédé de fabrication pour construire des pièces multi-matériaux avec des fonctions spécifiques est aussi en train d'émerger. Ils sont basés sur le gradient matériau dans une pièce au cours du processus de fabrication et doivent présenter une compatibilité matière. Ces pièces peuvent être fabriqués soit dans deux chambres différentes soit en changeant directement l'alimentation en combinant 3 matériaux différents, en modifiant les différentes proportions.

Dans le domaine de la fabrication des poudres, la tendance naturelle est de réduire le prix des poudres et d'augmenter le volume de production. METALYSIS est un nouveau procédé de fabrication de poudres par électrolyse : Ses avantages sont la « propreté », la faible consommation d'énergie et la réduction des coûts de près de 75 % [07]. Cependant, une méthodologie pour valider la poudre fabriquée par les nouvelles technologies est nécessaire. Également, une étude approfondie sur l'influence du recyclage ou de la réutilisation de la poudre tout en maintenant de bonnes propriétés des pièces produites est nécessaire.

Les exigences futures incluent des programmes d'éducation et de formation en tant que points clés pour former des travailleurs qualifiés et des équipes multidisciplinaires pour développer des produits complexes par FAM [04]. Pour y parvenir, la formation pédagogique axée sur les technologies de FAM (du collège à l'université, en intégrant également la formation professionnelle) est d'une grande importance. Elle aura pour but d'inclure différents profils et un grand nombre de professionnels qualifiés dans ce domaine [06].

Si nous prenons en considération les freins et les leviers du développement de la FA, les points suivants doivent être envisagés :

- Qualification, standardisation et répétabilité des procédés
 - o Manque de répétabilité et de fiabilité dans la fabrication des pièces : De nombreux paramètres influencent la production et les prendre tous en considération est une tâche complexe. Également, des phénomènes mécaniques, thermiques et thermomécaniques apparaissent et les anticiper est très difficile.
 - Aussi, les problèmes de répétabilité de spécifications techniques d'un lot de matière à un autre doivent être pris en compte.



- En matière de normalisation, des normes sont en cours d'élaboration.
 Certaines sont déjà accessibles, majoritairement sur les technologies dîtes sur lit de poudre ; en revanche, les procédés DED souffrent d'un certain retard.
- Amélioration du couple vitesse de production / coût de production
 - Le coût de fabrication des pièces est encore trop élevé pour être actuellement compétitif en production en série.
 - L'adoption des technologies de fabrication additive n'est possible que si un équilibre est trouvé entre la vitesse de fabrication, le coût de production et la qualité du produit fini.
 - Etat de surface et post-traitement : La fabrication additive ne permet pas aujourd'hui de produire des pièces avec un bon état de surface, notamment pour les procédés DED (Laser Fil, Arc Fil, Laser Poudre, etc.).
 Les surfaces fonctionnelles doivent toujours être reprises en usinage.

2.3. Impact & opportunités:

Le recours à la fabrication additive peut profondément modifier les chaînes d'approvisionnement et de fabrication, historiquement externalisées et centralisées. Même si, pour de nombreux produits standardisés, la production de masse traditionnelle reste et restera toujours l'option la plus avantageuse (au moins à court et moyen terme), les technologies de fabrication additive représentent une belle opportunité et s'appliquent notamment :

- Aux pièces impactées par les ruptures d'approvisionnement
- Aux pièces dont le besoin est limité mais pour lesquelles le volume minimum de commande des fournisseurs est élevé
- Aux faibles quantités de pièces nécessitant un moule et dont la fabrication est lente et coûteuse
- Aux pièces et sous-systèmes de réparation et de maintenance.

Aussi, une bonne identification des compétences et des ressources disponibles dans les différents territoires est essentielle pour établir une coopération renforcée entre les différents acteurs. Ceci, permet de réduire considérablement le coût d'accès à ces technologies.



L'émergence des technologies de fabrication additive invite ainsi à de nouvelles initiatives collaboratives en privilégiant les circuits courts et en partageant les méthodologies de conception et les compétences au sein de l'écosystème industriel.

Afin d'assurer le maintien et la pérennité de ces différents écosystèmes, la définition d'une politique nationale et régionale doit être une priorité afin de s'assurer que les enjeux et les initiatives de chaque écosystème industriel sont bien pris en compte.

D'autre part, diverses opportunités générales pour la FAM sont résumées ci-dessous :

Prototypage et expérimentation: La technologie s'est principalement développée au cours des trente dernières années. Le prototypage rapide, l'outillage rapide (réduction du coût et du temps de réalisation d'un prototype sans forcément une géométrie complexe) ou la validation de préséries (grâce à un outillage rapide notamment) ont permis de réduire les temps de développement, d'augmenter la qualité des produits et de réduire les coûts sur les produits existants sans modifier la chaîne d'approvisionnement.

Industrialisation de la personnalisation: Les procédés de FAM ouvrent la voie à plus de flexibilité dans la configuration des outils de production. Il est ainsi envisageable d'intégrer des paramètres facilement personnalisables dans une chaîne de production industrielle, permettant de répondre à des besoins spécifiques. La mise en œuvre industrielle du procédé apporte de nouvelles interactions entre l'utilisateur final et la chaîne de production, afin d'offrir la réponse la plus adaptée à chaque besoin.

Production en série et gain de performances: La fabrication additive a l'avantage de pouvoir réaliser des formes complexes (qu'il ne serait pas possible de fabriquer avec un procédé conventionnel à coût raisonnable), ou d'intégrer des fonctionnalités supplémentaires pour réduire les étapes d'assemblage. Cet axe stratégique est certainement le plus important aujourd'hui pour de nombreux acteurs qui souhaitent augmenter leur capacité d'innovation produit. Les technologies permettent par exemple de réaliser des outillages complexes afin d'augmenter les cadences de production ou d'intégrer de l'électronique dans la fabrication sans transformer la chaîne logistique.

Évolution de la chaine de valeur : La fabrication additive a un potentiel impact durable sur l'approvisionnement des matières ou sur la gestion des unités de stockage, notamment en ce qui concerne les pièces de rechange. L'intérêt de la fabrication additive n'est pas lié ici à une amélioration du produit mais plutôt à une augmentation de la qualité de service, conjuguée à une nouvelle mobilité des outils de production.



Ouvrant la voie à de nouveaux modèles économiques, cet axe de développement peut être envisagé sur une période plus longue que les autres mais cumule plusieurs avantages. Elle offre la possibilité d'un gain de compétitivité, d'un meilleur positionnement concurrentiel, tout en permettant la création de modèles économiques innovants pour une production au plus proche de la demande.

Le segment le plus prometteur à l'horizon 5-8 ans semble être la fabrication d'outils, dans la mesure où le niveau de maturité actuel de la technologie permet d'augmenter la performance des lignes de production dans une démarche d'amélioration continue.

2.4. L'opportunité du marché

Bien qu'actuellement la plupart des activités de Fabrication Additive reposent sur les matériaux polymères, la Fabrication Additive Métallique suscite un intérêt certain et de nombreuses activités sont actuellement développées. La FAM rend possible la fabrication directe de composants "Near-Net-Shape", et, dans certains cas, de composants finaux, sans avoir besoin d'outils ou d'usinage. Il y a eu un intérêt particulier pour l'industrie aérospatiale, l'industrie automobile et les industries biomédicales en raison de la possibilité de produire des composants de haute performance avec un coût total de production réduit. Les chercheurs et les leaders de l'industrie de l'Union européenne (UE) ont identifié la FA comme une technologie clé émergente.

Différents pays, hors UE ont accru leur sensibilisation aux technologies de FA depuis de nombreuses années et, à ce stade, l'Amérique du Nord est à l'avant-garde en ce qui concerne l'adoption de ces nouveaux procédés. Cependant, l'importance accordée à ces systèmes et technologies a tendance à s'étendre rapidement à d'autres pays, plaçant la FA au centre du développement de leur juridiction nationale. Pourtant, la situation des différents pays d'Europe n'est toujours pas homogène.

La sélection et l'utilisation de certains matériaux sont fondamentalement définies par les exigences d'utilisation finale, mais sont également influencées par les technologies additives utilisées.

Les différentes technologies de production additive présentent sur la plupart des matériaux des possibilités d'utilisation similaires. De fait, les superalliages à base de titane et de nickel (par exemple l'Inconel) et les aciers inoxydables à haute résistance sont les principaux matériaux principalement utilisés — l'objectif est de tirer parti de la fabrication additive pour traiter des matières coûteuses, difficiles à usiner, en cherchant



à accroître les bénéfices économiques de réduction de matière première ou de réduction du temps de fabrication des composants.

Les technologies basées sur le laser, le faisceau d'électrons et l'arc électrique peuvent probablement traiter la majorité des métaux, mais nécessitent encore quelques recherches pour assurer une compréhension et une maîtrise complète de chacun de ces procédés. Pour chaque matériau, l'industrie doit se concentrer sur le traitement de la matière et sur la mise en œuvre du procédé pour rendre les technologies de FAM économiquement plus attrayantes que les procédés conventionnels. Les procédés de dépose de poudre présentent également un très grand potentiel puisqu'il est possible de multiplier les buses de déposition et permettre ainsi de modifier la composition chimique de la matière déposée, au sein d'une même pièce, en plus des ratios de dépôt et de précision différente selon la taille et l'utilisation de la pièce [08].

2.5. Tendances du secteur de l'outillage en FAM

Les industries du secteur de l'outillage utilisent principalement des procédés soustractifs (usinage) pour produire des outillages, indépendamment de leur type et de leur application. Ceux-ci garantissent une précision dimensionnelle et une très bonne finition de surface.

Les technologies de fabrication additive, et en particulier la Fabrication Additive Métallique, peuvent jouer un rôle important dans l'optimisation de plusieurs aspects de ce secteur. Cependant, il subsiste encore des limitations comme des états de surface médiocres ou des propriétés mécaniques hétérogènes. En revanche, la combinaison de procédés de fabrication additive avec des procédés soustractifs a fait l'objet de plusieurs études académiques et de recherche, montrant une augmentation significative de son utilisation dans un contexte industriel. Cette combinaison est appelée Usinage hybride (Hybrid Machining).

2.5.1. Usinage hybride - Hybrid Machining

La compatibilité et la complémentarité de la fabrication additive et de la fabrication soustractive impliquent qu'elles n'ont pas besoin, et ne doivent pas, s'exclure mutuellement. Pour tirer parti de toutes les synergies potentielles des technologies de fabrication additive et soustractive, les machines hybrides permettent d'utiliser les deux dans les proportions idéales nécessaires pour chaque cas.



Malgré les avancées dans le domaine de la fabrication additive, la productivité est encore bien inférieure à celle de l'usinage CNC. Ce fait incite à une augmentation de la productivité de cette technologie, impliquant le dilemme suivant : inhérent à toutes les méthodes de fabrication additive planaire couche par couche se trouve le compromis entre le désir d'une finition de surface de qualité sans sacrifier la productivité et vice versa, comme illustré sur la Figure 3. Ce dilemme peut se traduire par le choix entre « haute vitesse » (haute productivité) et « basse vitesse » (état de surface de haute qualité), mais, pour le moment, jamais les deux à la fois.

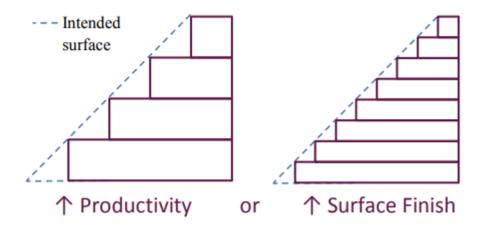
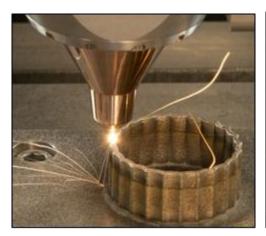


Figure 3 : Le dilemme de la productivité en fabrication additive : Productivité accrue ou état de surface amélioré [01]

L'option d'hybridation des machines apporte une réponse au dilemme présenté, combinant une construction en FAM et un usinage par la suite, contrôlant ainsi indépendamment les variables de productivité et d'état de surface, comme illustré sur la Figure 4.





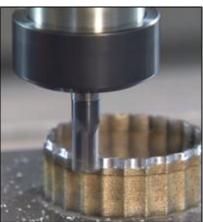


Figure 4 : Synergies entre Fabrication Additive et Soustractive [10]

L'utilisation de la FA en tandem avec des processus d'usinage est actuellement une pratique courante pour la plupart des pièces métalliques produites par fabrication additive afin d'obtenir la finition de surface souhaitée.

Cependant, pour répondre au dilemme ci-dessus, cela nécessite des investissements très conséquents dans les machines et les opérateurs, même si des moyens supplémentaires pour renforcer les synergies entre les deux technologies ont fait l'objet de recherches et de développement.

Pour assurer le transfert entre les technologies impliquées, la solution idéale est alors d'intégrer un système de dépôt directement dans la machine CNC, alliant ainsi productivité et qualité de surface dans une seule machine.

Plusieurs fabricants d'outils opèrent déjà sur le marché de la fabrication additive, utilisant à la fois les technologies DED et PBF. Cependant, lorsqu'il s'agit de systèmes d'usinage hybrides, la disponibilité des machines basées sur la technologie DED est considérablement plus élevée que celles basées sur la technologie PBF. La raison de cette plus grande disponibilité est due au taux de dépôt plus élevé offert par la technologie DED combinée à la possibilité d'ajouter de la matière/recharger les pièces existantes. Aussi, étant donné la faisabilité du dépôt de matière grâce aux interpolations de tous les axes de la machine (5 axes voire plus), des géométries complexes peuvent être construites sans avoir besoin de structures support. Les systèmes hybrides représentent ainsi une solution viable pour réduire le temps de fabrication de pièces complexes par rapport aux techniques conventionnelles, comme le montre la Figure 5.



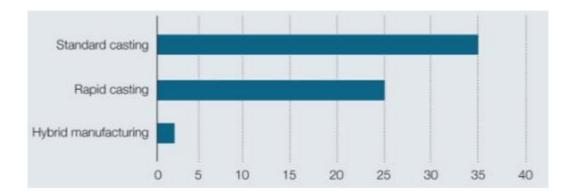


Figure 5 : Comparaison des temps de production (en jours) de turbines utilisant différentes méthodes de fabrication [11]

La combinaison de procédés de FA et soustractifs dans une seule machine hybride est particulièrement recommandée lorsque des matériaux à faible usinabilité sont impliqués, tels que des alliages résistant à la chaleur ou des matériaux à haute résistance mécanique, qui sont largement utilisés dans les industries aérospatiales, automobiles ou médicales.

Des procédés d'usinage hybrides ont été utilisés pour le ré-usinage (réparation, modification et reformage) de composants existants à haute valeur ajoutée, comme dans le cas des moules, des tuyères ou des aubes de turbine. La Figure 6 décrit les interactions possibles entre les procédés additifs et soustractifs. L'hybridation du procédé d'usinage permet également d'obtenir des géométries uniques qui ne seraient pas réalisables en utilisant chaque process indépendamment, comme le montre la Figure 7.

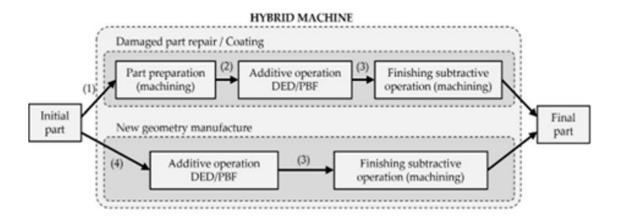


Figure 6: Interactions dans le process d'une machine hybride [11]



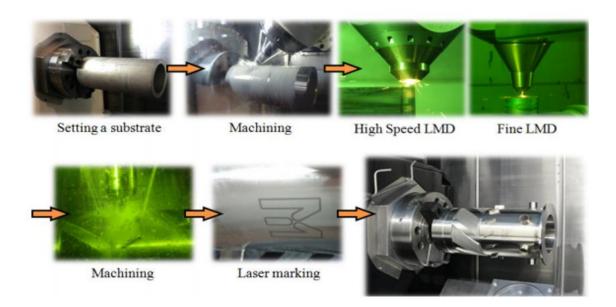


Figure 7 : Exemple d'une séquence de fabrication hybride [12]

2.5.2. Applications des procédés de FA et hybrides dans le secteur de l'outillage

Les types d'outillage qui combinent les avantages de la FA et des procédés hybrides sont :

- Les moules, tels que les moules d'injection plastique, les moules de coulée sous pression, les moules pour la fabrication du verre et les moules pour la fabrication des pièces composites;
- Les matrices d'emboutissage, à chaud et à froid, et matrices d'extrusion ;

Ces applications bénéficient de l'utilisation de procédés de FA ou hybrides principalement en raison de :

- La possibilité de réduire la quantité de matériaux déposé sur l'outil, en utilisant des techniques d'optimisation topologique principalement en utilisant la conception générative pour obtenir des structures lattices ou des brins localisés.
- La possibilité d'optimisation des fonctions de refroidissement qui fait partie intégrante de nombreux outils mentionnés, tels que les moules et les matrices



de marquage à chaud (principalement par la mise en œuvre de canaux de refroidissement mais également par la mise en œuvre de structures internes).

Quelques exemples des éléments ci-dessus sont ici présentés, sur la base de la littérature disponible.

2.5.3. Optimisation des matériaux – Optimisation topologique

Des cas d'optimisation topologique peuvent être illustrés sur les moules d'injection plastique, les matrices d'emboutissage, etc. Asnafi et al [13] présentent des exemples d'outils de production pour les deux cas ci-dessus. Pour les outils d'estampage, des exemples de matrices et de poinçons en U sont présentés. Pour la géométrie du poinçon étudiée - Figure 8 - les auteurs montrent, par des méthodes expérimentales et numériques, qu'il y a eu une réduction de poids de 34% pour le design conventionnel du poinçon en structure lattices et de 45% dans le cas du poinçon optimisé topologiquement.



Figure 8 : Poinçon industriel : conçu de manière conventionnelle et imprimé en 3D avec une structure interne rectilinéaire (à gauche) et imprimé en 3D après optimisation topologique (à droite). Matériau= DIN 1.2709 dans les deux cas [14]



Un cas d'association extracteur/poinçon pour un outil d'emboutissage automobile a également été présenté par Asnafi et al [15]. La pièce a été imprimée en 3D pour avoir une structure en treillis interne et ainsi minimiser la masse. Les pièces doivent répondre à des exigences spécifiques ce qui implique la nécessité d'une comparaison sur la réponse à ces conditions lors de l'utilisation de différentes technologies (Figure 9). Les résultats des pièces imprimées en 3D sont présentés sur la Figure 10. Le temps de fabrication total a été réduit de 8 à 3,7 jours en utilisant la pièce optimisée à structure lattice.

CONVENTIONAL PROCESS

Punch

Requirements:

- Hardness (after hardening) = 55 HRC
- Surface roughness in the working area = R_a = 0.8 μ m Material = SS2263 (tempered)

Process:

- 1: Milling
- 2: Hardening
- 3: Wire EDM

Puller

Requirements:

- Hardness (after hardening) = No requirement
- Surface roughness in the working area = R_a = 2-3 μ m

Material = SS2172

Process:

- 1: Milling
- 2: Wire EDM

3D METAL PRINTING

Punch

Requirements:

- Hardness (after hardening) = 55 HRC
- Surface roughness in the working area = R_a = 0.8 μ m Material = Maraging steel (1.2709)

<u>Puller</u>

Requirements:

- Hardness (after hardening) = No requirement
- Surface roughness in the working area = R_a = 2-3 μ m

Material = Maraging steel (1.2709)

Process:

- 1: 3D printing of punch and puller
- 2: Post-processing
- 3: Hardening of the punch
- 4: Machining of the working area

Figure 9 : Les spécifications, les matériaux et les procédés de fabrication pour les versions conventionnelles et imprimées en 3D de l'extracteur et du poinçon pour la matrice progressive C Bow Lower dans la Fig. 10. EDM = Usinage par décharge électrique. SS= No



Figure 10 : L'extracteur et le poinçon imprimés en 3D dans la matrice progressive.

Matériau = DIN 1.2709. La structure interne a une épaisseur de façade/coque

extérieure de 1,5 mm. Adapté de [15]



2.5.4. Refroidissement - Conformal Cooling

Les mêmes auteurs présentent des cas de moules d'injection [14]. Un noyau et un insert pour un moule d'injection plastique ont été modifiés pour que leurs canaux de refroidissement soient conformes à la géométrie de la pièce - Figure 11. Les résultats ont montré une diminution du temps de cycle de moulage, entraînant ainsi un coût inférieur par pièce. Cette réduction suffit à compenser l'augmentation des coûts de fabrication des outillages.

Un autre exemple de Conformal Cooling peut être trouvé dans les matrices pour l'estampage à chaud. Le procédé d'estampage à chaud est utilisé pour le formage d'aciers à ultra-haute résistance et de certains alliages d'aluminium, où la phase de déformation plastique est effectuée à haute température et une phase de trempe est utilisée après le formage, afin de garantir les propriétés souhaitées sur les tôles. Une vitesse de refroidissement critique est nécessaire pour obtenir la structure adéquate sur le matériau, ce qui implique la nécessité de canaux de refroidissement sur les matrices.

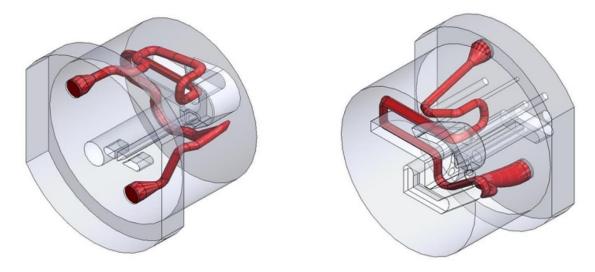


Figure 11 : Noyau et Insert pour le moulage par injection, optimisés par simulations. Couleur rouge= canaux de refroidissement après optimisation. Adapté de [15].

Plusieurs exemples d'optimisation du refroidissement dans ces outils peuvent être trouvés dans une revue de Chantzis et al.[16]. Un exemple présenté est le travail de Cortina et.al [17], où un Conformal Cooling a été produit dans une matrice d'estampage à chaud grâce à un processus hybride impliquant un bloc d'acier pré-usiné pour produire une partie du canal de refroidissement, qui est ensuite refermé par une technologie DED Laser - Figure 12.



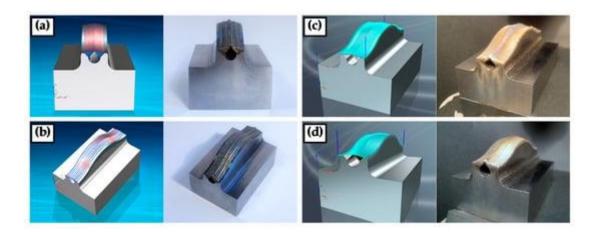


Figure 12 : (a) Avant; (b) vues latérales de la pièce résultante après DED; (c) DED transversal; (d) DED longitudinale. De [17].

Les résultats montrent une diminution de la température maximale sur la matrice, une meilleure répartition de la température dans l'outil, ce qui a contribué à de meilleures propriétés de la pièce et à des temps de cycle plus courts - Figure 13.

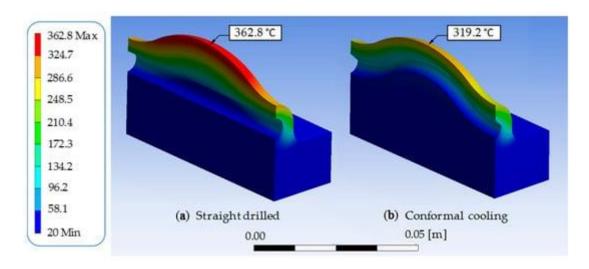


Figure 13 : Résultats de la simulation thermique du refroidissement conventionnel «foré» (a) par rapport au Conformal Cooling (b). De [17].



3.DEMANDE DE LA FAM DANS LE SECTEUR DE L'OUTILLAGE

Sur la base d'une analyse approfondie du secteur, le consortium du projet ADDITOOL a réalisé une étude à court, moyen et long terme de la Fabrication Additive Métallique (FAM) en déterminant au plus juste les besoins de l'industrie de l'outillage et en prenant en compte la maturité de toutes les technologies disponibles.

A cet effet, une enquête a été réalisée comme première étape du WP1 « *Identification des besoins et définition des cas d'application* ». Les résultats se trouvent dans le livrable « *D1.1.1 Rapport_Diagnostic_de_la_FAM_dans_le_secteur_de_l'outillage* » où l'objectif principal était d'identifier les besoins des acteurs du domaine de la Fabrication Additive Métallique (MAM) au sein du secteur de l'outillage.

L'enquête ciblait à la fois les fabricants d'outillage et les utilisateurs finaux d'outillage. Un total de 85 réponses a été obtenu englobant le Portugal, la France et l'Espagne. Une plus grande participation à l'enquête a été constatée dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile et la défense. De plus, une grande diversité de secteurs a également participé, tels que le médical, le naval, l'éducation, les jouets, le secteur du bâtiment, le secteur minier et bien d'autres.

Concernant l'application de la FAM mais aussi l'utilisation de l'outillage dans chaque entreprise, il a été observé un plus grand intérêt pour l'externalisation du service de fabrication que pour l'acquisition d'équipements en interne. Aussi, le besoin est plus important pour fabriquer une pièce spécifique plutôt que de réparer ou d'ajouter de nouvelles fonctionnalités à un outil. De plus, selon les résultats de l'enquête, les types les plus courants d'outillage fabriqué (fournisseur) ou utilisé (utilisateur final) étaient l'assemblage, les moules pour le plastique et les outils d'usinage.

En relation avec les technologies de fabrication additive, l'extrusion de matériaux et la fusion sur lit de poudre ont été présentées comme les technologies les plus demandées.

Néanmoins, il y a une FORTE CROYANCE dans ces nouveaux procédés de fabrication, puisque plus de 96% des répondants recommandent que l'INDUSTRIE DE L'OUTILLAGE DEVRAIT INVESTIR dans ces technologies.



En termes d'obstacles qui empêchent un déploiement plus large de la FAM, l'investissement initial a été sélectionné comme premier obstacle, suivi par les coûts des pièces produites.

Encore une fois, en comparaison avec les technologies conventionnelles, le coût élevé de l'équipement et des matières premières a été choisi comme le facteur le plus faible de l'utilisation de la FAM.

En ce qui concerne les défis de l'outillage en FAM, la certification et la réduction des coûts ont été considérées comme plus difficiles que la conception ou la fabrication. D'autre part, la liberté de conception a été sélectionnée comme le plus grand avantage de l'utilisation de la FAM par rapport aux technologies conventionnelles.

En termes de développement des connaissances, la collaboration avec un partenaire externe a été considérée comme la formation la plus adéquate pour développer les compétences, suivie de cours spécifiques de courte durée.

La plupart des entreprises interrogées n'ont pas de projet d'embauche de personnel MAM (ou n'ont pas de visibilité actuellement).



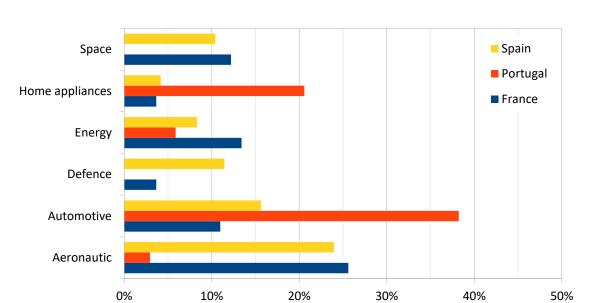
4. IDENTIFICATION DES OPPORTUNITÉS

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les opportunités de développement futur des technologies de FAM dans le secteur de l'outillage suite aux résultats de l'enquête. Pour fournir une base pour la sélection des études de cas, il est nécessaire de rassembler des informations sur les besoins industriels spécifiques de chacun des pays, France, Espagne et Portugal.

4.1. Répartition des résultats par pays

4.1.1. Secteurs industriels par pays

Concernant les secteurs industriels par pays, l'enquête a montré une bonne diversité avec une participation plus élevée de l'industrie aéronautique et spatiale en France et en Espagne, et de l'automobile et de l'électroménager au Portugal.



Enquête ADDITOOL - Secteurs industriels détaillés par pays

En détaillant les types d'outillage pour les secteurs ci-dessus, il a été constaté que l'assemblage, les moules pour le plastique et les outils d'usinage ont été sélectionnés comme les types d'outillage les plus courants dans les trois pays. Si l'on considère les résultats de ce paramètre par pays, on peut observer que :

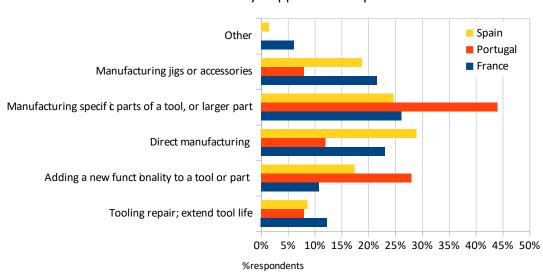
%respondents



- Les moules pour plastiques représentent la grande majorité des types d'outils utilisés/fabriqués par les répondants portugais ;
- Pour les répondants espagnols et français, les outils de perçage et matrices pour le formage de tôles recueillent également un pourcentage important de réponses.

4.1.2. Champ d'applications pour les technologies de FAM

Concernant le champ d'application des technologies de FAM, les trois pays interrogés ont choisi "Fabriquer une partie spécifique d'un outil, ou une partie complète ellemême" comme objectif principal.



ADDITOOL survey - Applicat on scope

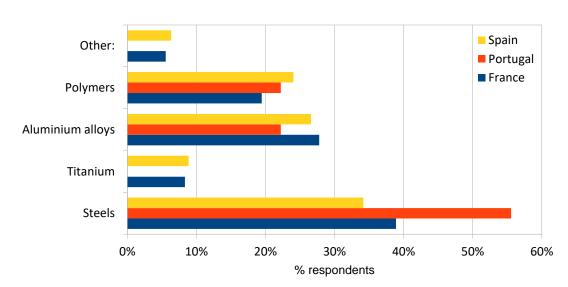
Si l'on considère les résultats de ce paramètre par pays, on peut observer que :

- Les répondants espagnols et français mentionnent également les « gabarits ou accessoires de fabrication » comme des applications pertinentes,
- Les répondants portugais ont également sélectionné « Ajouter une nouvelle fonctionnalité à un outil ou à une pièce » comme une application importante.



4.1.3. Matériaux et technologies de FAM

Concernant les matériaux et les technologies de FA actuellement utilisés, les répondants au sondage indiquent généralement que l'acier est le matériau le plus courant, suivi de l'aluminium. Les technologies de FA actuellement utilisées sont principalement le FDM (Extrusion de matière) (30%) et le Powder Bed Fusion (15%).



Enquête ADDITOOL - Matériaux utilisés

4.2. Identification des opportunités

L'analyse détaillée des résultats de l'enquête pour chaque pays établit la base pour proposer des opportunités spécifiques pour le développement technologique des technologies de FAM dans chaque pays. Ceux-ci sont proposés par la suite.

4.2.1. Espagne

Les fabricants espagnols d'outillage industriel produisent actuellement des outils d'usinage, des outils d'assemblage, des outils de perçage et des moules pour le plastique, destinés aux industries aéronautiques, automobiles et spatiales. Actuellement, ces industries sont intéressées par l'utilisation des technologies de fabrication additive pour la fabrication d'une partie spécifique d'un outil ou d'une pièce complète elle-même, et la fabrication de gabarits ou d'accessoires.

Pour les entreprises espagnoles, les opportunités peuvent porter sur :



- Le développement de la réparation d'outils (en utilisant des technologies de FA à grande échelle et/ou des technologies hybrides)
- L'optimisation des technologies déjà en place
- L'extension des secteurs moins représentés Moules pour fonderie sous pression, matrice de forge, etc.

4.2.2. France

Les outillages industriels français produisent actuellement des outillages d'usinage, des outillages d'assemblage, des outillages de perçage, des moules pour le plastique et des matrices pour le formage de tôles, destinés aux industries Aéronautiques, Automobiles, Energies et Spatiales. Actuellement, ces industries sont intéressées par l'utilisation des technologies de fabrication additive pour la fabrication d'une partie spécifique d'un outil ou d'une pièce complète elle-même, et la fabrication de gabarits ou d'accessoires.

Pour les entreprises françaises, les opportunités peuvent porter sur :

- Le développement de la réparation d'outils et l'ajout de fonctionnalités à un outil, en utilisant des technologies de FA à grande échelle et/ou des technologies hybrides
- L'optimisation des technologies déjà en place
- L'extension des secteurs moins représentés moules pour fonderie sous pression, matrices de forge, etc.

4.2.3. Portugal

Les fabricants portugais d'outillage industriel produisent actuellement et principalement des moules pour plastique, destinés soit à l'industrie automobile, soit à l'électroménager. Actuellement, ces industries sont intéressées par l'utilisation des technologies de FAM utilisées pour les inserts de moule ou l'ajout de fonctionnalités aux moules.

Pour les entreprises portugaises, les opportunités peuvent porter sur :

- Le développement des stratégies de réparation d'outils (utilisant des technologies de FA à grande échelle et/ou des technologies hybrides) ou la fabrication de gabarits et d'accessoires.
- L'optimisation des technologies déjà en place



 L'extension des secteurs moins représentés - outillage d'assemblage, outillage d'usinage.

4.3. Sélection des cas d'études

Pour sélectionner l'ensemble des cas d'études à traiter dans le WP2, une stratégie est proposée. Chaque partenaire du projet propose des études de cas basées sur les résultats de l'enquête - voir les principaux domaines potentiels ci-dessus - tels que :

- Au moins une étude de cas aborde l'un des principaux domaines/technologies/échelles (taille de l'outil/de la fonctionnalité) identifiés.
 Idéalement 3 pilotes dans cette catégorie.
- Des études de cas supplémentaires peuvent traiter des applications secondaires
 / moins explorées / moins développées identifiées ci-dessus.

La 4ème proposition d'étude de cas est sélectionnée en tenant compte de l'éventail complet des technologies / domaines d'application / échelles couverts par toutes les études de cas et considérée comme offrant le plus grand potentiel d'impact sur les résultats du projet.

Par la suite, un tableau de notation est proposé, pour aider à la sélection de la meilleure solution pour l'ensemble des études de cas :

Case study	Materials	Score	Technologies	Score	Scale	Sector	TRL
PT1 – mould inserts	Steels	1	SLM, Milling	2	S	Auto, HA	5 to 6
PT2 – moulds for glass	Steels, Nickel	2	SLM, DED, Milling	3	S	Food	3 to 4
ES1							
ES2							
ES3							
FR1							
FR2							
FR3							

Échelle: S – petit, M – moyen, L – grand | TRL – niveau de préparation technologique | Secteurs: Auto – automobile; HA – appareils électroménagers, Food - Agroalimentaire, Aero – Aéronautique, Sp – Espace, O&G – Pétrole et gaz, Agl–Industrie agricole, EN – Énergie, Def – Défense, O – autre

Les partenaires du projet peuvent contacter des partenaires associés régionaux / des entreprises locales pour proposer les études de cas les plus pertinentes à inclure dans la



liste des candidats. Les critères de sélection de l'ensemble approprié d'études de cas doivent être discutés et définis par tous les partenaires du projet. Après avoir rassemblé toutes les propositions, le choix de l'ensemble des 4 études de cas finales, sur la base des critères définis ci-dessus, pourra être effectué.



5.RÉFÉRENCES

- [01] Global 3D printing Metal Market Size & Share. Polaris Market Research Report, 2021 (PM1153).
- [02] Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., & Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. Journal of Manufacturing Technology Management, 21(6), 687-697.
- [03] Overcoming the top Metal 3D printing Challenge, Metal 3D printing-3DEO, December 2017. https://www.3deo.co/metal-3d-printing/overcoming-the-top-metal-3d-printing-challenges/
- [04] The government office for science, "The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK," London, 2013.
- [05] European Commission, "Advancing Manufacturing- Advancing Europe-Report of the task force on advanced manufacturing for clean production," Brussels, 2014.
- [06] Wohlers associates, "Wohlers report 2016. 3D printing and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report," 2016.
- [07] R. Berger, "Additive Manufacturing next generation," 2016
- [08] [64] Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2010), "Additive Manufacturing Technologies", Springer, London 59
- [09] J. B. Jones, "The synergies of hybridizing CNC and additive manufacturing," Tech. Pap. Soc. Manuf. Eng., vol. TP14PUB72, pp. 1–8, 2014.
- [10] K. A. Lorenz, J. B. Jones, D. I. Wimpenny, and M. R. Jackson, "A Review of Hybrid Manufacturing," Igarss 2014, no. 1, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [11] M. Cortina, J. I. Arrizubieta, J. E. Ruiz, E. Ukar, and A. Lamikiz, "Latest developments in industrial hybrid machine tools that combine additive and subtractive operations," Materials (Basel)., vol. 11, no. 12, 2018, doi: 10.3390/ma11122583.
- [12] T. Yamazaki, "Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining," Procedia CIRP, vol. 42, no. Isem Xviii, pp. 81–86, 2016.



- [13] N. Asnafi, J. Rajalampi, D. Aspenberg, e A. Alveflo, «Production Tools Made by Additive Manufacturing Through Laser-based Powder Bed Fusion», Berg Huettenmaenn Monatsh, vol. 165, n. 3, pp. 125–136, Mar. 2020, doi: 10.1007/s00501-020-00961-8.
- [14] Asnafi, N.; Alveflo, A.: 3D Metal printing of Stamping Tools & Dies and Injection Molds. Proceedings of at Tooling 2019 Conference and Exhibition, 12–16 May, 2019, Aachen, Germany, 2019
- [15] N. Asnafi, T. Shams, D. Aspenberg, e C. Öberg, «3D Metal Printing from an Industrial Perspective—Product Design, Production, and Business Models», Berg Huettenmaenn Monatsh, vol. 164, n. 3, pp. 91–100, Mar. 2019, doi: 10.1007/s00501-019-0827-z.
- [16] Chantzis, D., Liu, X., Politis, D.J. et al. Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping. Int J Adv Manuf Technol 109, 87–107 (2020). https://doi.org/10.1007/s00170-020-05622-1
- [17] M. Cortina, J. Arrizubieta, A. Calleja, E. Ukar, and A. Alberdi, "Case Study to Illustrate the Potential of Conformal Cooling Channels for Hot Stamping Dies Manufactured Using Hybrid Process of Laser Metal Deposition (LMD) and Milling," Metals, vol. 8, no. 2, p. 102, Feb. 2018.

Interreg ***** Sudoe ADDİTOOL

