

Proposition de sujet de thèse

Industrialisation de la Fabrication Additive : Proposition d'un modèle de prise de décision.

Projet ANR Indus Addi

Présentation du projet

Dans un contexte où la fabrication additive est encore trop lente et trop chère, l'objectif de ce projet est de conduire les travaux de recherche permettant de formaliser le processus de fabrication additive pour l'optimiser industriellement.

La fabrication additive, inventée au 19^{ème} siècle, est un procédé de fabrication qui permet de fabriquer des pièces mécaniques de service, à partir d'un modèle numérique, par ajout de matière. Il présente plusieurs avantages comme le fait d'imposer peu de contraintes de mise en œuvre et d'optimiser les formes ([1], [2]). Il existe de nombreux procédés de fabrication additive, notamment métalliques, présentant des caractéristiques mécaniques, fonctionnelles, technologiques et économiques propres : fusion sur lit de poudre, projection de poudre, dépôt de fil fondu ([3], [4]). Depuis quelques années, la fabrication additive est le sujet n°1 dans le thème de la fabrication mécanique des publications scientifiques [5]. Plus de 9000 publications portent, sur l'étude du procédé et le développement des modèles de simulation de la transformation locale de matière [6]. Ainsi, la fabrication additive est reconnue par tous comme un procédé innovant, ayant un impact significatif sur le tissu industriel des pays développés ([7], [8]).

Aujourd'hui la question fondamentale est d'évaluer le potentiel de développement de cette technologie. La fabrication additive sera-t-elle un procédé de niche ou révolutionnera-t-elle l'industrie, comme annoncé ? Pour cela, il faut évaluer la pertinence de son développement industriel.

Industriellement, la mise en œuvre de ce procédé, peut être envisagée selon trois voies de développement :

- Situation #1 : la voie de la concurrence entre procédés, à courte échéance, qui évalue la pertinence technico-économique de remplacer un procédé usuel par celui-ci ;
- Situation #2 : la voie de l'innovation incrémentale, à moyenne échéance, qui évalue l'intérêt de regrouper des pièces ou des fonctions au sein d'une même pièce uniquement fabricable en fabrication additive ;
- Situation #3 : la voie de l'innovation de rupture, à plus longue échéance, qui permet d'ajouter de nouvelles fonctions à un système non réalisable autrement, grâce à la fabrication additive.

Techniquement, on peut considérer que la faisabilité technologique est quasi-démonstrée et que les procédés deviennent matures, mais le modèle économique n'est pas encore validé, en situation de production industrielle. Il convient de réfléchir aux problématiques d'industrialisation et aux verrous associés. Le développement de la fabrication additive se trouve, ainsi, dans une situation complexe où elle n'a pas encore trouvé ses marchés. Plus particulièrement, elle n'a pas prouvé qu'elle puisse passer du statut de procédé de niche, à un statut de procédé plus généraliste et économiquement viable.

En effet, les problématiques actuelles concernent l'augmentation des performances en vue de la réduction du coût des pièces, l'automatisation du processus, la réduction des périodes d'interaction entre les opérateurs et la poudre, la diversification des matériaux et la réduction des temps de mise au point pour de nouvelles pièces ou de nouveaux matériaux. L'industrialisation reste problématique, car les procédés demeurent trop lents et trop coûteux pour envisager une production en série [9]. De plus, elle nécessite des phases de prétraitement et de post-traitements nécessaires à la conformité géométrique et mécanique des pièces. La mise en œuvre d'un procédé de fabrication additive ne peut pas être traitée comme un procédé *stand-alone easy to click*. Enfin, le développement de cette technique nécessite, malgré tout, une reconception géométrique des pièces, pour bénéficier totalement des avantages du procédé, mais permet aussi d'envisager de nouvelles pièces avec des fonctions intégrées, voire même d'imaginer de nouvelles fonctionnalités.

Les problématiques d'optimisation de processus et d'intégration sont, alors, critiques, alors qu'elles sont abordées de manière embryonnaire dans la littérature. En effet, outre la faisabilité technique et la tenue mécanique des pièces, il convient de se poser, la question de la pérennité économique de

ces procédés. De nos jours, le développement d'un procédé économiquement non viable en réduit fortement sa pertinence et sa portée, dans un contexte de vive concurrence industrielle.

L'industrialisation de ce procédé est donc amenée à évoluer et à se diversifier, pour s'adapter aux évolutions du procédé et des marchés. Dans le cas du développement d'un nouveau procédé, atteindre une industrialisation optimale nécessite d'introduire à la fois une aptitude au changement et à prendre en compte des données incertaines évolutives.

Dans ce contexte, l'objectif de ce projet est de conduire les travaux de recherche permettant de formaliser le processus de fabrication additive pour l'optimiser industriellement. Il s'inscrit dans la volonté de lever les verrous portant sur la stratégie d'industrialisation, la réduction des coûts et l'interaction homme / procédé pour rationaliser le processus et le rendre plus efficace ([10], [11]).

Sujet de thèse

L'étude des aspects économiques est fondamentale pour rendre ce procédé efficient ([12], [14], [15], [16]). La littérature montre que les points de vue sont généralement macroscopiques et orientés selon le business model : La fabrication additive devient compétitive, dans le cas de productions incertaines en termes de volume ou de typologie de produits. Les conclusions restent générales mais utiles pour envisager des évolutions de rupture sur les marchés industriels ([12], [17]). Le business model peut aboutir à l'expression d'un modèle de coût via la modélisation du coût des sous-processus de fabrication, qu'il reste à préciser ([18]). Allen base son étude de coût sur l'estimation du coût de fabrication par kilogramme de matière dans le cas particulier de pièces de moteurs aéronautiques ([19]). Les coûts initiaux sont le coût de la poudre et le coût horaire de la machine. Les évolutions technologiques lui permettent d'envisager une réduction des coûts et donc une rentabilité à long terme. Lindemann considère que l'étude du cycle de vie du produit est nécessaire à l'estimation des coûts qu'il considère comme complexes à élaborer, alors que l'approche reste usuelle ([13]). Il faut remarquer, que ces travaux se focalisent sur le processus de fabrication, sans tenir compte du processus de conception ou de reconception. D'autre part, la comparaison avec des processus usuels est conduite à iso-pièce et non à iso-fonction, ni n'intègre des innovations de rupture.

Comment évaluer l'impact économique d'une innovation de rupture apportée par le procédé, via l'intégration de fonctions nouvelles, dans les situations #2 et #3 ?

D'autres travaux proposent des modèles de coûts spécifiques, dans le but de comparer les procédés et non pas dans le but de les optimiser ([20]). Busachi cite 4 articles de référence sur la problématique d'estimation des coûts : 3 pour la fusion sur lit de poudre et 1 pour le dépôt de fil fondu ([16]). Les travaux portent plus sur des estimations de performance et des comparaisons des procédés uniquement en termes de coût et de productivité, sans prendre en compte le processus complet. Piili propose un modèle de coût, basé sur l'estimation du temps de fabrication, pour la fabrication de pièces en acier à partir d'une étude de cas ([18]). Certains travaux s'appuient sur le big data pour estimer les coûts de fabrication, via l'extraction d'entités caractéristiques et la recherche de fabrications antérieures similaires ([21]), mais les auteurs reconnaissent que leur approche dépend de la qualité des données initiales et qu'elle ne prend pas en compte la globalité du processus. Mahadik propose une approche d'estimation de coûts par complexification itérative du modèle de coût pièce après pièce ([22]).

Ainsi, dans un contexte de production de pièces en fabrication additive, il apparaît que la prise de décision basée sur un modèle de coût n'est pas satisfaisante pour prendre en compte à la fois les risques induits par l'introduction d'un nouveau procédé et par la résistance au changement et à la fois les opportunités, qui ne sont pas chiffrables.

En particulier, l'impact de la chaîne de la valeur sur la validité technico-économique de la fabrication de pièces doit être traité (Thèse Th1).

Dans le cadre de la thèse d'Anne Lise Antomarchi, soutenue en octobre 2019, nous proposons un premier modèle d'estimation de coûts dans la phase de prise de décision pour évaluer la pertinence de recourir à un procédé de fabrication additive ([23], [24], [25]). Le but est de proposer une estimation économique en amont de toute activité d'industrialisation en fabrication additive, en

considérant qu'il est inutile de réaliser des développements techniques, si on estime que la rentabilité économique ne sera pas atteinte. Le modèle simple est basé sur l'estimation des coûts des différents postes et du temps de fabrication à partir de quelques données géométriques et technologiques (volume, hauteur, épaisseur des couches etc ...). Les premières analyses montrent des résultats trop approximatifs pour être totalement pertinents. La mise en œuvre de cet outil nécessite une trop grande expertise.

De plus, cette approche est restreinte à une situation spécifique de transfert d'une pièce d'un procédé usuel à un procédé de fabrication additive, situation qui n'est pas forcément la plus favorable à la fabrication additive. En effet, ce modèle n'est pas capable d'estimer des gains annexes pouvant être significatifs comme la réduction du nombre de références ou des en-cours de sous-traitance. Nous souhaitons maintenant enrichir ce modèle de calcul et proposer la méthodologie de prise de décision associée, via une formalisation plus précise de la pratique industrielle, grâce à des échanges plus étroits avec nos partenaires industriels (MBDA, AddUP, Lauak, fusia).

Il sera nécessaire de proposer de nouvelles modélisations de la gestion de la poudre, des activités de fabrication additive, des activités de post-traitement et du flux, mais aussi de la valeur ajoutée du produit et des innovations produit associées, pour aboutir à un modèle économique plus complet du processus, selon les trois situations envisagées (#1, #2 et #3). Un des aspects critiques concerne la modélisation de la résistance au changement. Le processus décisionnel doit proposer des solutions acceptables par l'expert tout en l'accompagnant de proche en proche vers des solutions de plus en plus en rupture.

La résolution d'un tel problème repose sur la démarche suivante. Dans un premier temps, il est nécessaire de circonscrire le périmètre modélisé à partir d'une analyse de la chaîne de la valeur. Chaque activité est modélisée pour exprimer les variables de décision et les indicateurs de performance associés. L'identification de l'ensemble des variables de décision et des indicateurs de performance permet de choisir, dans la littérature, une méthode d'aide à la décision multicritères sous contrainte, en l'adaptant au cas d'étude. Par exemple, dans la thèse de Delolme, nous avons choisi de générer une population de solutions potentielles avec un algorithme génétique couplé à une méthode AHP pour finaliser la prise de décision, dans le cas de l'optimisation de processus d'usinage ([26]). La méthode AHP permet d'exprimer un monocritère pondéré traduisant le processus décisionnel à partir des différents indicateurs de performance associés au processus. Par la suite, la thèse de Fortunet s'intéresse à une problématique de Design For Manufacturing multi points de vue, appliquée à la conception d'une pièce aéronautique. Elle s'appuie sur un algorithme génétique de type NSGA II, qui prend mieux en compte le caractère multicritères du problème en recherchant les solutions situées sur le front de Pareto ([27], [28]). La méthode Topsis est alors utilisée pour sélectionner la meilleure solution en comparant les distances relatives de chaque solution à la solution idéale théorique et à la solution anti-idéale théorique. La distance est calculée en appliquant une méthode AHP. Enfin, dans la thèse d'Antomarchi sur la gestion opérationnelle d'ateliers de fabrication additive, le choix s'est porté sur l'utilisation d'un algorithme d'entropie croisée, car cette méthode présente un effet mémoire sur les itérations et donc sur l'apprentissage des caractéristiques d'une bonne solution, lui permettant de converger plus vite ([23]).

La sélection de la méthode de prise de décision la plus adaptée est au cœur du processus de recherche.

L'apport se situe donc dans la modélisation globale du processus décisionnel selon les trois voies envisagées (#1 concurrence, #2 innovation incrémentale, #3 innovation de rupture), en prenant en compte le caractère incertain des données et les aptitudes / résistances au changement des organisations. Ce modèle aboutit à la proposition d'une méthode d'aide à la décision multicritères.

Equipe encadrante

Séverine Durieux et Emmanuel Duc

Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont–Ferrand, France.

Pour tout renseignement complémentaire, merci de contacter Emmanuel Duc (emmanuel.duc@sigma-clermont.fr)

Références :

- [1] H. LI, P. LI, L. GAO, L. ZHANG, AND T. WU, "A LEVEL SET METHOD FOR TOPOLOGICAL SHAPE OPTIMIZATION OF 3D STRUCTURES WITH EXTRUSION CONSTRAINTS," *COMPUT. METHODS APPL. MECH. ENG.*, VOL. 283, PP. 615–635, 2015.
- [2] D. L. BOURELL, J. J. BEAMAN, M. C. LEU, AND D. W. ROSEN, "A BRIEF HISTORY OF ADDITIVE MANUFACTURING AND THE 2009 ROADMAP FOR ADDITIVE MANUFACTURING: LOOKING BACK AND LOOKING AHEAD," *PROC. RAPIDTECH*, PP. 24–25, 2009.
- [3] J. VERHULST, "ANALYSE DE L'ÉTAT ET DE L'AVENIR DU MARCHÉ DE L'IMPRESSION 3D," P. 107, 2015.
- [4] ASTM INTERNATIONAL, "F2792-12A - STANDARD TERMINOLOGY FOR ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES," *RAPID MANUF. ASSOC.*, PP. 10–12, 2013.
- [5] B. ESMAEILIAN, S. BEHDAD, AND B. WANG, "THE EVOLUTION AND FUTURE OF MANUFACTURING: A REVIEW," *J. MANUF. SYST.*, VOL. 39, NO. SUPPLEMENT C, PP. 79–100, 2016.
- [6] M. MARKL AND C. KÖRNER, "POWDER LAYER DEPOSITION ALGORITHM FOR ADDITIVE MANUFACTURING SIMULATIONS," *POWDER TECHNOL.*, 2018.
- [7] B. OBAMA, "DISCOURS DE L'UNION," 2013. .
- [8] E. MACRON, "DISCOURS DE NANTES, 18 MAI 2015," 2015. .
- [9] S. H. KHAJAVI, J. PARTANEN, AND J. HOLMSTRÖM, "ADDITIVE MANUFACTURING IN THE SPARE PARTS SUPPLY CHAIN," *COMPUT. IND.*, VOL. 65, NO. 1, PP. 50–63, 2014.
- [10] M. J. COTTELEER, "3D OPPORTUNITY: ADDITIVE MANUFACTURING PATHS TO PERFORMANCE, INNOVATION, AND GROWTH," *SIMT ADDIT. MANUF. SYMP.*, P. 23, 2014.
- [11] T. CAMPBELL, C. WILLIAMS, O. IVANOVA, AND B. GARRET, "COULD 3D PRINTING CHANGE THE WORLD? TECHNOLOGIES, POTENTIAL, AND IMPLICATIONS OF ADDITIVE MANUFACTURING," *TECHNOL. POTENTIAL, IMPLIC. ADDIT. MANUF.*, P. 16, 2012.
- [12] C. WELLER, R. KLEER, AND F. T. PILLER, "ECONOMIC IMPLICATIONS OF 3D PRINTING: MARKET STRUCTURE MODELS IN LIGHT OF ADDITIVE MANUFACTURING REVISITED," *INT. J. PROD. ECON.*, VOL. 164, PP. 43–56, 2015.
- [13] C. LINDEMANN, U. JAHNKE, M. MOI, AND R. KOCH, "ANALYZING PRODUCT LIFECYCLE COSTS FOR A BETTER UNDERSTANDING OF COST DRIVERS IN ADDITIVE MANUFACTURING," *INT. SOLID FREE. FABR. SYMP.*, VOL. 23, PP. 177–188, 2012.
- [14] M. BAUMERS, P. DICKENS, C. TUCK, AND R. HAGUE, "THE COST OF ADDITIVE MANUFACTURING: MACHINE PRODUCTIVITY, ECONOMIES OF SCALE AND TECHNOLOGY-PUSH," *TECHNOL. FORECAST. SOC. CHANGE*, VOL. 102, PP. 193–201, 2016.
- [15] V. BHASIN AND M. BODLA, "IMPACT OF 3D PRINTING ON GLOBAL SUPPLY CHAINS BY 2020," P. 82, 2014.
- [16] A. BUSACHI, J. ERKOYUNCU, P. COLEGROVE, F. MARTINA, C. WATTS, AND R. DRAKE, "A REVIEW OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY AND COST ESTIMATION TECHNIQUES FOR THE DEFENCE SECTOR," *CIRP J. MANUF. SCI. TECHNOL.*, VOL. 19, PP. 117–128, 2017.
- [17] M. SCHRÖDER, B. FALK, AND R. SCHMITT, "EVALUATION OF COST STRUCTURES OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES USING A NEW BUSINESS MODEL," *PROCEDIA CIRP*, VOL. 30, PP. 311–316, 2015.
- [18] H. PIILI, A. HAPPONEN, T. VÄISTÖ, V. VENKATARAMANAN, J. PARTANEN, AND A. SALMINEN, "COST ESTIMATION OF LASER ADDITIVE MANUFACTURING OF STAINLESS STEEL," *PHYS. PROCEDIA*, VOL. 78, NO. AUGUST, PP. 388–396, 2015.
- [19] J. ALLEN, "AN INVESTIGATION INTO THE COMPARATIVE COSTS OF ADDITIVE MANUFACTURE VS. MACHINE FROM SOLID FOR AERO ENGINE PARTS," *COST EFF. MANUF. VIA NET-SHAPE PROCESS.*, PP. 17-1-17–10, 2006.
- [20] C. R. CUNNINGHAM ET AL., "COST MODELLING AND SENSITIVITY ANALYSIS OF WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING," *PROCEDIA MANUF.*, VOL. 11, NO. JUNE, PP. 650–657, 2017.
- [21] S. L. CHAN, Y. LU, AND Y. WANG, "DATA-DRIVEN COST ESTIMATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING IN CYBERMANUFACTURING," *J. MANUF. SYST.*, VOL. 46, PP. 115–126, 2018.
- [22] A. MAHADIK AND D. MASEL, "IMPLEMENTATION OF ADDITIVE MANUFACTURING COST ESTIMATION TOOL (AMCET) USING BREAK-DOWN APPROACH," *PROCEDIA MANUF.*, VOL. 17, PP. 70–77, 2018.
- [23] A. L. AN TOMARCHI, "CONCEPTION ET PILOTAGE D'ATELIERS DE FABRICATION ADDITIVE," THESE DE L'UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE, 2019.
- [24] A.-L. AN TOMARCHI, S. DURIEUX, AND E. DUC, "SCHEDULING IN ADDITIVE MANUFACTURING," IN *MOSIM 2018*, TOULOUSE, FRANCE, 2018.
- [25] A.-L. AN TOMARCHI, R. GUILLAUME, S. DURIEUX, C. THIERRY, AND E. DUC, "CAPACITY PLANNING IN ADDITIVE MANUFACTURING," IN *MIM 2019*, BERLIN, ALLEMAGNE, 2019.
- [26] L. DELOLME, "DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION POUR L'OPTIMISATION DES GAMMES DE FABRICATION EN PRESENCE DE DONNEES IMPARFAITES," THESE DE L'UNIVERSITE BLAISE PASCAL, 2017.
- [27] C. FORTUNET, "UNE METHODE D'OPTIMISATION MULTICRITERE POUR LE DFM, APPLICATION AUX PORTES D'AVION," THESE DE L'UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE.
- [28] C. FORTUNET, S. DURIEUX, H. CHANAL, AND E. DUC, "DFM METHOD FOR AIRCRAFT STRUCTURAL PARTS USING THE AHP METHOD," *INT J ADV MANUF TECHNOL*, NO. 95, P. 397 [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S00170-017-1213-1](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1213-1), 2018.