



HAL
open science

Choisir rationnellement d'introduire la fabrication additive dans un processus industriel

Luna Kitila, Gezaei Asmelash, Séverine Durieux, Emmanuel Duc

► To cite this version:

Luna Kitila, Gezaei Asmelash, Séverine Durieux, Emmanuel Duc. Choisir rationnellement d'introduire la fabrication additive dans un processus industriel. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784410

HAL Id: hal-04784410

<https://hal.science/hal-04784410v1>

Submitted on 15 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Choisir rationnellement d'introduire la fabrication additive dans un processus industriel

Luna KITILA^(a), Gezaei ASMELASH^(a),
Séverine DURIEUX^(a), Emmanuel DUC^(a)

*(a) Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS,
Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France*

Mail : emmanuel.duc@sigma-clermont.fr

Résumé : Alors que de nombreuses preuves de concept sont réalisées pour démontrer l'efficacité technique de la fabrication additive sur des cas d'espèce, il apparaît que ce procédé a encore des difficultés pour franchir l'étape de l'industrialisation. En particulier la problématique de coûts reste prégnante. Cette communication présente une démarche de prise de décision pour évaluer rationnellement la pertinence de franchir le cap, pour une situation industrielle donnée. L'approche repose sur un processus de prise de décision multicritère hiérarchisé, selon une approche de type AHP. Les méthodes AHP et TOPSIS sont utilisées pour conseiller la décision finale. L'originalité de l'approche repose sur deux aspects. Le premier concerne la proposition d'une structuration du processus de fabrication prenant en compte toutes les tâches pouvant intervenir dans la transformation du processus, de la conception à la certification. La seconde concerne la proposition d'une liste d'indicateurs de performance permettant d'évaluer l'ensemble des facettes impactées par la transformation du processus : indicateurs d'ACV, de coûts, de délais, de maîtrise, de compétence et de disponibilité.

Mots clés : Fabrication Additive, Décision, Processus de fabrication.

1 Introduction

Cette communication présente une démarche permettant de comparer deux processus de fabrication, pour, en particulier envisager des innovations de rupture dans la mise en

œuvre d'un nouveau processus. Les questions abordées concernent la modélisation du processus de conception et de fabrication, la proposition d'indicateurs de performance et la structuration d'un processus décisionnel.

2 Problématique

Dans les industries manufacturières de référence, les processus d'innovation sont souvent incrémentaux et privilégient la sécurité industrielle (que nous appellerons maîtrise industrielle) à des gains potentiellement plus forts mais plus risqués (moins maîtrisés). Néanmoins, dans certaines industries, le lancement de nouveaux produits est l'occasion d'envisager le développement de processus de fabrication de rupture, sur plusieurs années. Généralement, le développement débute par la réalisation de preuve de concepts (POC) qui permettent de valider les niveaux de TRL les uns après les autres. Lorsque le niveau TRL de la technologie est jugé assez haut, il est possible d'envisager une industrialisation, car la maîtrise industrielle est acquise.

Cette approche reconnue souffre de deux défauts. Le premier concerne la focalisation de l'approche sur le procédé et non sur le produit. En effet, les POC valident la faisabilité du produit, mais ne valident pas son employabilité ou des gains de performance. Par ailleurs, l'approche par POC est coûteuse et hasardeuse. Il n'est pas toujours possible pour une PMI / PME de s'engager financièrement dans un tel processus parfois très long.

Dans cette communication, nous proposons une approche alternative qui vise à évaluer les gains envisageables avant de valider technologiquement la faisabilité. La méthode s'inscrit dans un contexte, où un produit est réalisé par un processus de fabrication connu et maîtrisé. La question posée est d'évaluer si l'introduction d'un nouveau processus ou d'un nouveau procédé, comme la fabrication additive, est un facteur de gain ou de perte. Pour cela, la méthode repose sur l'hypothèse fondamentale suivante :

« Il est possible d'évaluer a posteriori la faisabilité du procédé ou des processus par des preuves de concept qui valident un certain niveau de maîtrise ».

Ainsi, nous nous plaçons en amont de la réalisation des POC, pour ne pas engager de coûts d'études importants. Il s'agit d'une phase stratégique d'avant-projet, de définition fonctionnelle du produit et du processus de fabrication. Cela sous-entend que l'étude s'appuie sur des données autant qualitatives que quantitatives.

Dans ce cadre, le premier constat porte sur le caractère multicritère de l'étude. En effet, les seuls indicateurs de coûts et de délais ne sont pas suffisants pour embrasser l'ensemble des impacts liés à la décision, pour notamment recourir à la fabrication additive (Zaman, 2018). Les entreprises ne peuvent pas toujours évaluer l'impact d'un indicateur de performance, en terme de délais ou financier.

Résoudre ce problème revient donc à résoudre trois problématiques. La première problématique consiste à *identifier les indicateurs de performance nécessaires à l'appréciation de la solution envisagée*. Par exemple, quels indicateurs exhibés si on souhaite prendre en compte aussi la performance durable du processus industriel ? comment estimer le gain ou la perte de performance fonctionnelle du produit liée au changement de processus ou de procédé ?

La seconde problématique concerne le périmètre défini pour l'étude, soit *la modélisation du processus*. Les POC réalisés par les plateformes technologiques comme Addimadour ([Fabrication additive - Compositadour](#)) ou les laboratoires de recherche ont souvent montré que l'introduction de la fabrication additive en tant que procédé n'était pas

suffisamment performante économiquement ou en terme de délais par rapport aux procédés conventionnels, ce qui restreint son développement industriel. Nous considérons que le périmètre d'étude doit couvrir l'ensemble du processus de conception et de fabrication pour envisager tous les gains possibles. Ainsi, comparer deux procédés nécessite aussi de comparer deux conceptions de produits, deux supply chain, deux processus de préparation, deux post-traitements et deux contrôles différents. L'introduction d'un nouveau procédé peut, en effet, engendrer des gains significatifs dans les phases amonts ou aval.

La résolution de ces deux problématiques aboutit à la formalisation d'un problème de prise de décision multicritère comportant un nombre significatif d'indicateurs de performance qu'il convient de hiérarchiser pour aboutir à une décision rationnelle. La dernière problématique concerne donc *la proposition d'un processus décisionnel robuste et fiable*, en s'appuyant sur les méthodes usuelles du génie industriel.

Enfin, il faut considérer le caractère imparfait des données qui permettront d'évaluer la décision, car le processus n'est pas maîtrisé et car l'étude se situe très en amont.

3 Modéliser le processus de fabrication

La modélisation du processus de fabrication est une étape nécessaire et particulièrement complexe. En effet, dans le cadre d'une comparaison de processus de fabrication, l'entreprise a généralement une bonne vision de son processus initial, au moins en termes de tâches ou d'étapes à réaliser. Par contre, par définition, elle ne connaît pas les impacts liés à l'introduction du processus alternatif. Il est donc nécessaire d'envisager globalement le processus pour identifier tous les gains ou pertes possibles. La pratique montre que la modélisation complète et détaillée d'un processus est particulièrement coûteuse et difficile à réaliser. Nous proposons un cadre de modélisation adapté qui doit permettre d'identifier l'ensemble des gains / pertes dans le cadre de l'introduction de la fabrication additive. Ce cadre peut être enrichi ou simplifié selon le cas d'espèce envisagé.

Tâches	Tâches
Conception Fonctionnelle	Fabrication
. Conception	. Fabrication de la préforme
. Choix matière	. Traitement thermique
Supply Chain	. Usinage
. Appro matière / préforme	. Assemblage
. Appro outillages	. Finition / Parachèvement
. Appro consommables	Qualité / Certification
. Logistique	. Contrôle qualité
Préparation	. Certification
. Outillages et consommables	

Tableau 1: Modélisation du processus

La modélisation du processus est partagée en plusieurs thèmes (Tableau 1). Le thème central concerne le processus de fabrication. Nous considérons l'ensemble du processus de fabrication de l'obtention de la préforme à la livraison de la pièce de service, car nous considérons que la fabrication additive impacte aussi de manière significative, l'obtention des préformes, les traitements thermiques et les parachèvements.

La transformation de la tâche de fabrication impose de prendre en compte aussi la transformation des tâches de préparation et d'approvisionnement. En effet, les filières

d'approvisionnement sont différentes, ne portent pas sur les mêmes matériaux ou sur les mêmes formats. La fabrication de préformes peut-être transformée ou simplifiée.

Enfin, nous insistons sur le fait que le processus de conception doit nécessairement être modifié pour prendre en compte un nouveau procédé de manière optimale. Cela peut concerner une reconception géométrique du produit pour tenir compte des règles de tracé du procédé, une optimisation topologique pour réduire les masses engagées voire un changement de matériau en adéquation avec le procédé. Il convient donc de prendre en compte, aussi, ces tâches.

4 Evaluer la performance du processus

Une fois le processus formalisé, il est nécessaire de formaliser les indicateurs de performance pour les quantifier ou les qualifier, selon les cas.

4.1 Coût / délais

Tâches		Modèles de coût	Modèles de délais
Conception Fonctionnelle	Conception	Coût de conception	Délais de conception
	Choix matière	Coût lié à la tâche de choix de la matière	Délais de choix de matière
Supply Chain	Appro matière	Coût lié à l'approvisionnement de la matière	Délais d'approvisionnement
	Appro préforme	Gain lié à l'absence de préforme	Délais d'approvisionnement
	Appro outillage	Coût lié au changement d'outillage	Délais d'approvisionnement
	Logistique	Coût lié à la logistique	Délais
Préparation	Outillages	Coût lié à la préparation des outillages	Délais de préparation des outillages
Fabrication	Fabrication de la préforme	Coût lié à la fabrication de la préforme par ALM	Délais de fabrication par ALM
	Traitement thermique	Coût lié à la modification des traitements thermiques	Délais en traitements thermiques
	Usinage	Coût lié à la modification des usinages	Délais en usinage
	Assemblage	Gain lié à la simplification des assemblages	Délais en assemblage
	Finition / Parachèvement	Coût lié à la modification du parachèvement	Délais en parachèvement
Qualité / Certification	Contrôle qualité	Coût lié à la modification du contrôle qualité	Délais lié au contrôle qualité
	Certification	Coût lié à la certification	Délais lié à la certification

Tableau 2: Modélisation des coûts et des délais

Le premier indicateur « naturel » concerne bien entendu les *coûts* (Tableau 2). Pour comparer deux procédés, il est nécessaire d'estimer les coûts de chaque tâche pour évaluer la rationalité économique. Un coût est donc estimé pour chaque tâche, ce qui peut paraître complexe pour certaines tâches comme celles associées à la Supply Chain. Il est souvent globalisé, voire impossible à calculer et il n'est pas possible d'en extraire un coût unitaire. Par ailleurs, une partie d'un coût élémentaire peut être modélisée de manière fiable et précise (comme le coût d'usage d'une machine lié à son temps d'usage), mais une autre partie ne peut être modélisée que par un estimateur moins fiable ou moins précis, notamment lorsque le coût envisagé est globalisé au niveau de l'atelier ou de l'usine. Il est alors possible de proposer une comparaison qualitative plutôt que quantitative sans nécessairement que la qualité de la décision soit dégradée.

Les coûts liés à la conception concernent en particulier les surcoûts nécessaires à la reconception géométrique de la pièce et à la recherche d'un nouveau matériau ou à la validation de l'adéquation du matériau initial au procédé. Il faut remarquer que l'approche usuelle basée sur la réalisation de POC technologiques a tendance à sous-estimer ces coûts ou bien à la repousser à une phase ultérieure, alors qu'ils peuvent rendre l'innovation de rupture non viable.

Directement associés aux coûts, les indicateurs de *délais* sont exprimés d'une manière similaire (figure 2). Simplement, dans le cadre de la fabrication additive, nous identifions deux indicateurs : un indicateur de lancement de série (*time to market*), qui tient compte des temps nécessaires à la reconception, mais aussi des temps gagnés sur la fabrication des préformes en fonderie par exemple, et un indicateur de *production de série*. La réduction de l'indicateur de *time to market* peut être un facteur stratégique majeur pour l'entreprise dont le bénéfice n'est pas uniquement financier (satisfaction du client, prise de parts de marché, coût d'immobilisation des moyens ou des installations, frais fixes de maintenance). Ici aussi, il est nécessaire d'évaluer la durée des tâches de reconception géométrique et de choix de la matière.

4.2 Modélisation la performance fonctionnelle

Les deux indicateurs précédents forment la base du processus décisionnel mais ne sont pas suffisant pour envisager une rupture dans le processus, car il n'est pas toujours possible de financiariser tous les impacts de l'introduction d'un nouveau processus. En particulier, l'impact sur la satisfaction hypothétique du client ne peut pas être directement estimée. Par ailleurs, l'expérience montre que la maturité actuelle des procédés de fabrication additive a tendance à jouer en défaveur du procédé selon les deux indicateurs de coût et de temps. Il est donc nécessaire d'exprimer de nouveaux indicateurs qui permettent de mieux apprécier l'apport du procédé alternatif.

Les premiers indicateurs concernent la *performance* du produit. Changer de procédé peut permettre d'obtenir des gains de performance sur le produit. En particulier, la *masse* du produit et le *ratio buy to fly* peuvent être réduits. De même, l'architecture de la matière dans la pièce ou bien la fabrication d'une pièce bi matière peuvent induire une augmentation de la *performance fonctionnelle du produit* qu'il est nécessaire d'identifier et de formaliser. En effet, le dernier indicateur concerne la *tenue mécanique* de la pièce qui doit être adapté au cas d'usage (critère de tenue, fatigue, etc. ...).

Alors que ces indicateurs peuvent être évalués d'un point de vue technique, il n'est pas toujours aisé d'en évaluer l'impact sur l'usage du produit par le client.

4.3 Prendre en compte des aspects durables

Le changement de procédé peut aussi être conduit pour réduire l'impact environnemental du processus ou bien amener conjointement une telle réduction (Amrina, 2015), (Baumers, 2017). Il convient donc de proposer des indicateurs de performance liés à l'Analyse du Cycle de Vie du produit. Ici aussi, la proposition d'un ensemble de critères exhaustifs conforme à la norme induit un trop grand nombre d'indicateurs (Taddese, 2021). Nous en proposons donc une liste simplifiée focalisée principalement sur la matière et les énergies nécessaires au processus de fabrication.

Le premier item concerne *l'extraction et la production de matières premières*, avec trois sous-indicateurs : *matières recyclées ou renouvelables*, *impact environnemental de l'extraction*, *impact social de l'extraction*. Le second item concerne les *énergies nécessaires à la fabrication du produit*, soit les indicateurs *d'énergies à faible émission de carbone*, *d'efficacité énergétique du processus* et de *l'impact environnemental du processus*. Le troisième item concerne *l'utilisation* du produit et par conséquent les indicateurs de *l'efficacité énergétique de l'usage*, *de la durée de vie utile du produit*, *de l'impact environnemental de l'usage*. Le dernier item concerne *la fin de cycle de vie du*

produit, soit la recyclabilité du produit, la dégradation du produit et l'impact environnemental de sa destruction.

Le but de cette structuration est de réduire le nombre d'indicateurs et de les rendre exprimables dans une situation industrielle classique.

4.4 Maîtrise du processus

Les critères précédents permettent d'apprécier les gains à la fois fonctionnels et économiques rendus possibles par la mise en œuvre d'un procédé alternatif. Avec ses indicateurs, le décideur peut donc apprécier l'intérêt de franchir l'étape stratégique de changement de procédé ou de processus. Par contre, ce changement risque d'induire nécessairement des aléas qui peuvent réduire les gains ou augmenter les pertes. Il convient donc de proposer des indicateurs de risque liés au changement de processus.

La notion de risque est très codifiée dans l'entreprise, aussi, pour ne pas faire d'amalgame, nous proposons trois indicateurs de performance spécifique : *la maîtrise, la compétence et la disponibilité*.

L'indicateur de maîtrise a pour but d'évaluer à quel niveau l'entreprise domine, peut ou doit dominer le procédé, pour réduire l'apparition d'aléas et leur impact financier. Il permet de qualifier le niveau de rupture ou d'inconnue lié à l'introduction du procédé.

Ainsi, l'indicateur de maîtrise peut être modélisé qualitativement pour les tâches de conception sous la forme d'un niveau de 1 à 5 : 1) Nouvelle tâche nécessitant l'acquisition de compétences nouvelles ; 2) Nouvelle tâche portant sur un nouveau matériau, une nouvelle gamme de produit et ayant des objectifs fonctionnels différents ; 3) Tâche déjà réalisée sur un produit différent et un matériau différent ; 4) Tâche déjà réalisée sur un produit différent ou un matériau différent ; 5) Tâche déjà réalisée sur un produit similaire. L'indicateur de maîtrise peut être modélisé quantitativement pour les tâches d'approvisionnement en évaluant les retards ou les aléas de livraison auprès des fournisseurs déjà référencés.

Pour les tâches de préparation, l'indicateur de maîtrise peut être modélisé qualitativement suivant 3 niveaux 1) Nouvel outillage ; 2) Outillage déjà réalisé sur un produit différent ; 3) Outillage déjà réalisé.

En fabrication, l'indicateur de maîtrise peut être modélisé qualitativement sous la forme d'un niveau de 1 à 5 : 1) Tâche de fabrication inconnue jamais mis en œuvre ; 2) Tâche de fabrication en cours d'évaluation en R&D ; 3) Tâche de fabrication connue et déjà mise en œuvre pour un matériau différent sur une pièce différente ; 4) Tâche de fabrication connue et déjà mise en œuvre pour le même matériau sur une pièce différente ; 5) Tâche de fabrication connue et déjà mise en œuvre pour le même matériau sur une pièce similaire.

4.5 Compétences

Associé à l'indicateur de maîtrise, l'indicateur de compétence peut être formulé suivant 5 niveaux, pour chaque tâche, selon une taxonomie de Bloom : 1) Pas de compétences, niveau d'information ou d'expression ; 2) Applications de méthodes en cours d'acquisition, niveau de maîtrise d'outils ; 3) Application de méthodes acquises, niveau de maîtrise d'outils ; 4) Compétences expertes en cours d'acquisition, niveau de maîtrise méthodologique ; 5) Compétences expertes acquise et certifiée, niveau de maîtrise méthodologique.

Il permet de s'assurer que l'entreprise a les compétences nécessaires à l'introduction du processus de rupture ou bien d'identifier les manques et les montées en compétence nécessaires. Par exemple, ne pas avoir les compétences nécessaires à la sécurisation de l'approvisionnement des poudres en fabrication par lit de poudre peut induire un aléa catastrophique dans le développement du processus alternatif.

4.6 Disponibilités des ressources

Enfin, associé aux indicateurs de compétences et de maîtrise, le dernier indicateur concerne la *disponibilité des ressources* et donc la capacité de l'entreprise à muter technologiquement sans engendrer des retards coûteux. Ici la question du *Faire* ou du *Faire – faire* ou *Quasi Faire-faire* est posée.

La disponibilité des ressources humaines aptes à mobiliser les compétences nécessaires peut prendre une valeur de 1 à 5 : 1) Ressources externes inconnues, ou peu connues ; 2) Ressources externes connues peu disponibles ; 3) Ressources externes connues disponibles ; 4) Ressources internes peu disponibles ; 5) Ressources internes disponibles.

5 Décision

De nombreux travaux portent sur le développement de méthodes de prise de décision adaptées à des problèmes particuliers (Sabaei, 2015), (Mardani, 2015), (Bertolini, 2020), (Zhao, 2021). Nos travaux nous ont permis de développer une méthode de prise de décision basée sur les outils développés dans le cadre du génie industriel appliquées aux problématique du génie mécanique (Delolme, 2017) (Fortunet, 2017) (Antomarchi, 2019) (Taddese, 2021). Le problème décisionnel posé est un problème de décision multicritère dont les données sont incertaines. La première problématique porte sur la hiérarchisation des critères. La pondération usuelle est souvent arbitraire. Il convient de proposer une démarche plus rationnelle qui reflète le comportement du décideur. Nous nous appuyons sur la méthode AHP développée par Saaty en 1980. Le processus permet de comparer le critère d'importance des indicateurs et des sous indicateurs deux à deux via un questionnement relatif, qui reflète le comportement du décideur. Il permet aussi d'en valider la cohérence. Cet outil est aussi utilisé pour confronter différentes attitudes de décideurs, d'une manière constructive. Ainsi, on peut constater des différences de points de vue dans une même équipe, liée à l'expertise de chacun. La hiérarchisation des indicateurs aboutit à une première pondération qui sera questionnée par la suite.

Pour choisir le procédé, l'étape suivante concerne la comparaison des processus industriels envisagés. Il est possible de continuer d'utiliser la méthode AHP en comparant les candidats deux à deux selon chaque indicateur de performance. Le questionnement selon chaque critère permet d'éviter les amalgames ou les conclusions globales qui peuvent fausser la décision.

Nous proposons aussi une seconde approche, basée sur la méthode TOPSIS. Cette méthode construit une solution idéale théorique et une solution anti-idéale théorique à partir de la performance élémentaire de chaque processus pour chaque indicateur. Elle calcule, ensuite, un indicateur de distance basé sur la distance relative de chaque solution à la solution idéale d'une part et à la solution anti-idéale d'autre part. Cette approche plus rapide que la première permet aussi d'identifier facilement les marges de progression d'une solution pour chaque indicateur.

Lors de la mise en œuvre, nous estimons que le décideur doit pouvoir décider en dernier ressort. Aussi, nous utilisons ces méthodes pour classer les solutions, l'aider à formaliser ses priorités d'une part et identifier les quelques meilleures solutions ou les forces et faiblesses d'un procédé par rapport à un autre.

La mise en œuvre d'un processus décisionnel repose sur la collecte de données nécessaires à l'évaluation des indicateurs de performance élémentaire. La pratique industrielle montre que tous les indicateurs de performance ne peuvent pas être évalués quantitativement. Il est donc nécessaire que le processus décisionnel tienne compte d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs, sans pour autant que cela affecte la qualité de la décision. Par ailleurs, il convient de se questionner sur la justesse et la fiabilité des données quantitatives collectées. Pour tenir compte de ces variabilités, nous développons des outils pour fiabiliser la prise de décision en appliquant des méthodes floues dans un premier temps et en conduisant une étude de sensibilité sur la pondération des indicateurs (Bhadra, 2022). Les méthodes floues permettent de remplacer des valeurs numériques par des fonctions calculées sur une étendue (Zougari & Benyoucef, 2012), (Ayhan, 2013), (Sedaghat, 2013), (Nouri, 2015), (Kubler, 2016), (Sarkar, 2018), (Sumrit, 2020). Par exemple, un indicateur de performance évalué à 4 est remplacé par une fonction triangle variant de 3 à 5. L'applicabilité de cette approche est actuellement évaluée dans une thèse en cours.

6 Applicabilité de la méthode

L'analyse brute du résultat d'un processus décisionnel est complexe, car on doit évaluer des « notes » normalisées, dont la lisibilité industrielle est floue. Pour pallier cette difficulté, nous proposons de poursuivre la démarche en proposant une étape supplémentaire. Dans ce cas, la question n'est plus de savoir quel processus conventionnel ou de rupture est le meilleur, mais que faire pour que le procédé de rupture soit choisi. Cela permet de reformuler la problématique sous la forme de questions d'ingénierie. Nativement le processus de rupture peut être considéré comme moins bon que le processus conventionnel (c'est souvent le cas). La méthode permet d'identifier les actions à conduire pour améliorer la performance du processus de rupture.

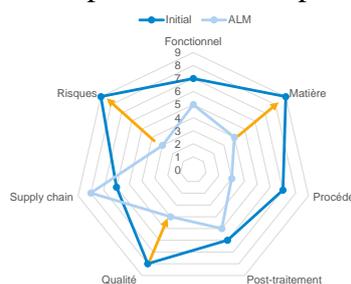


Figure 1: Identification des gains à réaliser pour choisir le processus disruptif

Par exemple sur la figure 1, il apparaît que trois axes sont à privilégier : la matière, la maîtrise du procédé et la qualité du produit. Il est alors possible de poser les questions d'ingénierie suivantes : Peut-on réduire la masse du produit ? changer la matière ? réduire le coût matière ? Comment améliorer la maîtrise du processus ? par le recrutement ? par des essais ? Peut-on améliorer l'état de surface ? Peut-on revoir le parachèvement ?

Par ailleurs, mettre en œuvre cette méthode peut être difficile pour une situation industrielle donnée. Formaliser le processus industriel avec suffisamment de précision est un exercice complexe, car il est souvent distribué entre plusieurs acteurs. De même, exprimer et hiérarchiser les indicateurs de performances nécessite une réflexion exigeante.

Mais, comprendre la démarche permet de mettre en évidence certains aspects critiques dans le processus décisionnel liés à l'introduction d'un processus de fabrication de rupture. Déjà, il est nécessaire d'envisager la transformation industrielle dans sa globalité. Autant il est assez aisé d'évaluer les inconvénients comme les surcoûts ou les délais supplémentaires, autant il n'est pas simple d'estimer les gains attendus. En particulier, les premières questions à poser concernent le *pourquoi* ? Quel est l'argument fondamental qui pousse à franchir le cap ? Est-ce que le client accepte ou suscite l'innovation ? Est-ce que cela entre dans le cadre d'un processus de simplification industrielle ? Un enrichissement du produit ou du service au client ?

Les questions suivantes vont porter sur la maturité industrielle de l'entreprise vis-à-vis de cette innovation et sur les efforts à réaliser par l'entreprise pour réussir. One shot ou série ? Quels sont les coûts directs ou indirects ? Quels sont les délais ? Est-ce que les compétences sont présentes ? etc.

7 Conclusion

Dans une démarche d'innovation de rupture, la question de changer de procédé ou de processus de fabrication est souvent posée. Face à la sécurité induite par un processus connu, il est nécessaire d'évaluer les gains potentiels apportés par un nouveau processus dont on ne domine pas l'ensemble des caractéristiques.

Nous proposons une méthode simple de prise de décision basée sur une modélisation du processus et l'expression d'indicateurs de performance. Pédagogique, cette méthode a pour but d'être facilement mise en œuvre et conduit à une décision raisonnée et rationnelle. Pratique, elle permet d'identifier simplement les forces et les faiblesses de chaque procédé. Les travaux en cours permettront de la rendre plus robuste de manière à rassurer le décideur dans sa démarche.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Agence nationale de la recherche dans le cadre du projet Indus Addi (N° ANR-19-CE10-0001-01), par la région Auvergne Rhône Alpes dans le cadre du projet « Fabrication Additive – Projet AEROPRINT » et par Campus France et l'ambassade de France en Ethiopie.

Références

- E. Amrina and A. L. Vilsa, (2015), *Key performance indicators for sustainable manufacturing evaluation in cement industry*, *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 19–23, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.173.
- A.L Antomarchi, (2019), *Conception et pilotage d'un atelier intégrant la fabrication additive - Thèse de l'Université Blaise Pascal, Directeur E. Duc, coencadrement S. Durieux*
- M. B. Ayhan, (2013), *A Fuzzy Ahp Approach For Supplier Selection Problem: A Case Study In A Gearmotor Company*, *Int. J. Manag. Value Supply Chain.*, vol. 4, no. 3, pp. 11–23, doi: 10.5121/ijmvsc.2013.4302.

- M. Bertolini, G. Esposito, and G. Romagnoli (2020), A TOPSIS-based approach for the best match between manufacturing technologies and product specifications, *Expert Syst. Appl.*, vol. 159, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113610.
- M. Baumers, J. R. Dufloy, W. Flanagan, T. G. Gutowski, K. Kellens, and R. Lifset, (2017), Charting the Environmental Dimensions of Additive Manufacturing and 3D Printing, *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, pp. S9–S14, doi: 10.1111/jiec.12668.
- D. Bhadra, N. R. Dhar, and M. Abdus Salam, (2022), Sensitivity analysis of the integrated AHP-TOPSIS and CRITIC-TOPSIS method for selection of the natural fiber, *Mater. Today Proc.*, vol. 56, pp. 2618–2629, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.178.
- L. Delolme, (2017), Développement d'un outil d'aide à la décision pour l'optimisation des gammes de fabrication en présence de données imparfaites, Thèse de l'Université Blaise Pascal, Directeur E. Duc – coencadrement S. Durieux
- C. Fortunet, (2017), Une méthode d'optimisation multicritère pour le DFM, application aux portes d'avion, Thèse de l'Université Blaise Pascal, Directeur E. Duc, co-directeur H. Chanal, coencadrement S. Durieux
- S. Kubler, J. Robert, W. Derigent, A. Voisin, and Y. Le Traon, (2016), A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications, *Expert Syst. Appl.*, vol. 65, pp. 398–422, doi: 10.1016/j.eswa.2016.08.064.
- A. Mardani, A. Jusoh, and E. K. Zavadskas, (2015), Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications - Two decades review from 1994 to 2014, *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 8. Elsevier Ltd, pp. 4126–4148, May 15, doi: 10.1016/j.eswa.2015.01.003.
- F. A. Nouri, S. K. Esbouei, and J. Antucheviciene, (2015), A Hybrid MCDM Approach Based on Fuzzy ANP and Fuzzy TOPSIS for Technology Selection, *Inform.*, vol. 26, no. 3, pp. 369–388, doi: 10.15388/Informatica.2015.53.
- D. Sabaei, J. Erkoyuncu, and R. Roy, (2015), A review of multi-criteria decision making methods for enhanced maintenance delivery, *Procedia CIRP*, vol. 37, pp. 30–35, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.086.
- S. Sarkar, D. K. Pratihar, and B. Sarkar, (2018), An integrated fuzzy multiple criteria supplier selection approach and its application in a welding company," *J. Manuf. Syst.*, vol. 46, pp. 163–178, doi: 10.1016/j.jmsy.2017.12.004.
- M. Sedaghat, (2013), A productivity improvement evaluation model by integrating AHP, TOPSIS and VIKOR methods under fuzzy environment (case study: State-owned, partially private and private banks in Iran), *Econ. Comput. Econ. Cybern. Stud. Res.*, vol. 47, no. 1, pp. 235–258
- D. Sumrit, (2020), An integrated fuzzy multi-criteria decision making approach for evaluating suppliers' co-design ability in new product development," *Int. J. Appl. Decis. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 215–246, doi: 10.1504/IJADS.2020.106417
- G. Taddese, (2021), Multicriteria decision making methodology for sustainability evaluation in the design and manufacturing of engineering products – Application to Additive Manufacturing, Thèse de l'Université Clermont Auvergne – Directeur E. Duc – coencadrement S. Durieux
- U. K. uz Zaman, M. Rivette, A. Siadat, and S. M. Mousavi, (2018), Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making, *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 51, pp. 169–180, doi: 10.1016/j.rcim.2017.12.005.
- A. Zouggar and L. Benyoucef, (2012), Simulation based fuzzy TOPSIS approach for group multi-criteria supplier selection problem," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 25, no. 3, pp. 507–519, doi: 10.1016/j.engappai.2011.10.012.
- Q. Zhao, Y. Ju, P. Dong, and E. Aliakbari D. R. S. Gonzalez, (2022), A hybrid decision making aided framework for multi-criteria decision making with R-numbers and preference models, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 111, no. October 2021, p. 104777, doi: 10.1016/j.engappai.2022.104777.