



**HAL**  
open science

## Méthode d'évaluation en deux étapes d'un outil d'aide à la décision en fabrication additive

El-Haddi Mechekour, Frédéric Vignat, Franck Pourroy, Christelle Grandvallet,  
Philippe René Marin

### ► To cite this version:

El-Haddi Mechekour, Frédéric Vignat, Franck Pourroy, Christelle Grandvallet, Philippe René Marin. Méthode d'évaluation en deux étapes d'un outil d'aide à la décision en fabrication additive. 18ème colloque national S.mart, Apr 2023, Carry le Rouet, France, France. hal-04284308

**HAL Id: hal-04284308**

**<https://hal.science/hal-04284308v1>**

Submitted on 14 Nov 2023

**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.

# Méthode d'évaluation en deux étapes d'un outil d'aide à la décision en fabrication additive

E-H. Mechekour <sup>a,b,\*</sup>, F. Vignat <sup>a</sup>, F. Pourroy <sup>a</sup>, C. Grandvallet <sup>a</sup>, Ph. R. Marin <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

<sup>b</sup> University of Tiaret, 14000, Tiaret, Algérie

\* e-mail : elhadi.mechekour@grenoble-inp.fr

## 1. INTRODUCTION

Dans une industrie manufacturière soumise à des contraintes de plus en plus fortes à cause de la concurrence et des exigences environnementales, de nouvelles technologies voient le jour pour répondre en partie à cette problématique. Parmi ces technologies, on retrouve la fabrication additive qui connaît un essor grandissant et qui fait l'objet de notre contexte d'étude. Dans ce contexte de fabrication additive, l'ingénieur Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) doit effectuer des tâches associées à des activités complexes. Pour l'aider dans son travail en minimisant les erreurs et les mauvaises décisions, plusieurs modèles de connaissances et d'outils informatiques sont développés.

En se référant au travail de Grandvallet et al. [1] qui décrit le processus de fabrication additive comme une succession d'étapes (voir figure 1), nous allons nous focaliser sur l'activité d'orientation de pièces qui influence le reste du processus de fabrication additive et surtout la qualité des pièces obtenues. Beaucoup de travaux ont traité du problème d'orientation de pièces en technologie de Fusion sur Lit de Poudre (FLP) [2][3]. Dans notre article, nous allons utiliser le logiciel COFFA développé dans le cadre du projet ANR COFFA [4]. Ce logiciel se base sur des règles d'action illicites par des experts métiers et mathématisées afin de quantifier la désirabilité liée à chaque critère en les représentant sous forme de graphe de température comme le montre la figure 2.

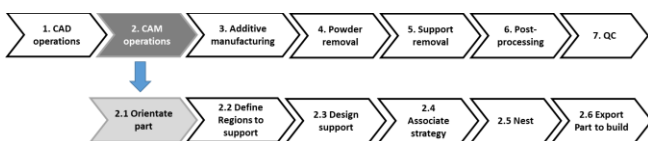


Figure 1 – Processus de fabrication additive (FLP)

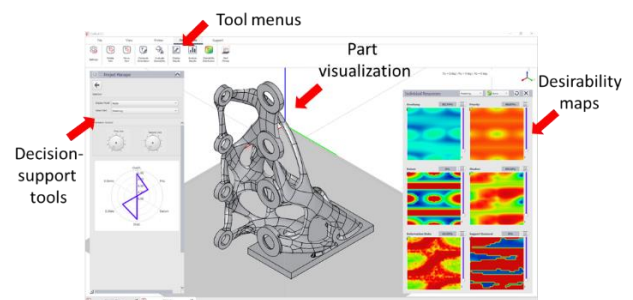


Figure 2 – Interface du logiciel COFFA

Enfin, l'objectif de notre travail de recherche est de se focaliser sur l'évaluation d'un logiciel d'aide à la décision pour l'orientation de pièces (COFFA), réalisées en fabrication additive pour une technologie de fusion sur lit de poudre.

## 2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### 2.1. Evaluation des logiciels

Avant de parler d'évaluation de logiciel, on aimerait donner une définition de la qualité d'un logiciel parce que cela nous semble important de connaître l'objet de notre évaluation. D'après la norme ISO9126 [5], la qualité d'un logiciel est représentée par les éléments suivants, à savoir : fonctionnalité, fiabilité, utilisabilité, efficacité, maintenabilité et portabilité. La norme SquaRE [6] définie depuis 2005 est la norme qui succède au standard ISO 9126. Elle a été définie à partir de ISO 9126 et de la partie évaluation de la norme ISO 14598. Cette dernière décrit deux modèles distincts : un modèle qualité lié à l'utilisation du logiciel et un modèle qualité lié à la production du logiciel. Le problème de ce type de norme est qu'il n'y a pas de lien direct entre les caractéristiques et les métriques.

En faisant une recherche bibliographique sur le concept d'évaluation de logiciels, cela renvoie à trois termes bien distincts qui sont : performance, utilité et utilisabilité. Ces termes regroupent les éléments qui définissent la qualité d'un logiciel d'après la norme ISO.

Dans le cas de l'évaluation des performances, on retrouve des recherches axées sur les aspects techniques du fonctionnement du logiciel (temps de réponse, capacité de calcul, etc.) [7][8].

Dans le cas de l'évaluation de l'utilité, on retrouve quelques travaux qui explorent l'aspect financier de la mise en place d'une solution informatique au sein d'une entreprise [9][10]. Dans le cas de la fabrication additive le choix étant limité en terme de solutions logiciels commerciales et la difficulté de travail nécessitant des outils avec de bonnes capacités de calcul, on considère que ce facteur n'a pas besoin d'être développé dans notre article.

Dans le cas de l'utilisabilité, on retrouve beaucoup de travaux qui se basent sur l'expérience utilisateur afin de déterminer l'efficacité, l'efficience et la satisfaction d'un logiciel en permettant de réaliser une tâche dans un contexte bien déterminé [11][12].

D'autre part, dans un contexte d'ingénierie nous avons l'habitude d'évaluer les logiciels techniques en se focalisant sur la qualité de leurs résultats. Par exemple, pour les logiciels de calcul et de simulation on compare les résultats obtenus par rapport aux résultats théoriques ou expérimentaux.

Mais dans le cas d'un logiciel d'aide à la décision dans un contexte d'ingénierie la question qui se pose est la suivante : comment évaluer la qualité du logiciel d'aide à la décision et des résultats obtenus avec ce dernier ? Sachant que les résultats sont fortement impactés par le facteur humain à la différence des logiciels de calcul et simulation (avec les mêmes paramètres et hypothèses de calcul), et que l'évaluation de l'utilisabilité n'est pas suffisante pour avoir une métrique sur la qualité des résultats.

## 2.2. Méthodes d'évaluation

La classification des méthodes d'évaluation est très souvent liée au domaine d'application. En général, on trouve des méthodes quantitatives vs qualitatives. Et les deux domaines où le terme méthode d'évaluation est le plus répandu sont le domaine de l'éducation et des finances. Dans notre contexte de fabrication additive, l'évaluation est considérée comme faisant partie du contrôle qualité. Le contrôle qualité consiste à évaluer la conformité d'une pièce par rapport au cahier des charges et dans certains cas s'assurer que le procédé de fabrication adéquat à bien été respecté [13]. D'après la norme ISO900X, l'évaluation de la conformité passe par trois types de contrôles :

- Contrôle des caractéristiques mécaniques (allongement, module de Young, Résistance à la rupture...);
- Contrôle des caractéristiques physiques (dimensions, rugosité, dureté...);

- Contrôle non destructifs (défauts surfaces, défauts masse...).

L'autre typologie d'évaluation qui nous a intéressé concerne le domaine de l'éducation, mais qui peut très bien être transposée à d'autres domaines, et qui est la suivante [14] :

- Pré-évaluation ou évaluation diagnostique : elle permet de connaître le niveau des apprenants pour ajuster la formation donnée.
- Évaluation formative : elle permet de faire une évaluation continue et ainsi avoir un feedback sur les points sur lesquels il faudra se baser pour continuer la formation dans de bonnes conditions.
- Évaluation sommative : elle permet de faire une évaluation globale des acquis à la fin d'une formation. Par ailleurs, elle permet aussi d'évaluer l'efficacité de l'apprentissage.
- Évaluation certificative : elle permet d'évaluer la qualité de la formation et de voir si elle est toujours adaptée.
- Évaluation normative ou évaluation comparative : elle permet de comparer les performances d'un apprenant à une norme moyenne.
- Évaluation critérée : elle permet de mesurer les performances d'un apprenant en fonction de critères prédéfinis.
- Évaluation ipsative : elle permet de mesurer les performances d'un apprenant par rapport à ses performances passées.

## 2.3. Question de recherche

Dans un contexte de fabrication additive, nous avons besoin d'évaluer qu'est-ce qu'un bon choix d'orientation de pièces en utilisant un outil d'aide à la décision. Sachant que l'impact de ces choix sont cruciaux sur la qualité des pièces fabriquées, nous devons répondre à la première question : qu'est-ce qu'un bon choix d'orientation de pièces ? et dans un deuxième temps répondre à la question : est-ce qu'une bonne orientation effectuée avec le logiciel COFFA correspond à une bonne qualité de pièce après fabrication avec l'EBM (Electron Beam Melting) ? D'après l'étude bibliographique que nous avons menée, il n'existe pas de méthode pour ce type d'évaluation. Ce qui nous a poussé à voir dans différents domaines les approches d'évaluation pour son inspirer et les adapter à notre contexte comme nous allons le voir dans la suite de l'article.

## 3. METHODOLOGIE

En se référant à notre recherche bibliographique, nous pouvons dire qu'il n'y a pas de méthode préexistante pour répondre à notre question de recherche. Pour cela, nous allons adapter les outils d'évaluation à notre contexte. La figure 3 synthétise notre démarche d'évaluation en deux étapes.

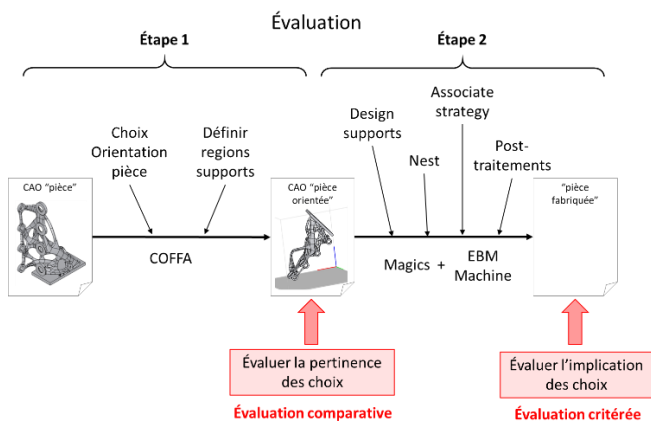


Figure 3 – Méthode d'évaluation en deux étapes

Dans un premier temps, l'utilisateur du logiciel COFFA va effectuer l'orientation de la pièce suivant un scénario de conception donné. Le résultat de son choix sera évalué par une méthode comparative par rapport à une valeur de référence que nous aurons au préalable définie avec l'aide d'un groupe d'experts métiers. Cette étape permet d'évaluer la pertinence des choix faits par l'utilisateur.

Dans un deuxième temps, l'utilisateur va mobiliser d'autres outils pour effectuer le reste du processus de fabrication additive en FLP afin de fabriquer la pièce orientée précédemment. En faisant attention à bien minimiser le parasitage de l'activité d'orientation de pièces (en suivant les recommandations des experts métiers), nous allons évaluer la qualité de la pièce fabriquée en utilisant une méthode d'évaluation critérée (conformité au cahier des charges). Cette étape permet d'évaluer l'implication des choix faits par l'utilisateur sur la pièce finie.

Afin de valider cette approche d'évaluation en deux étapes, nous avons mis en place une étude empirique où des experts en fabrication additive ont été mis en situation avec un scénario d'orientation de pièces bien défini. Dans un deuxième temps, un travail de fabrication de ces pièces orientées a été effectué par un groupe d'experts plus réduit pour mener la deuxième partie de l'évaluation. Les détails et résultats de cette expérimentation seront traités dans la suite de l'article.

#### 4. ETUDE DE CAS « LOGICIEL COFFA »

Dans cette section, nous allons présenter la méthode d'évaluation en deux étapes appliquées au logiciel d'aide à la décision COFFA pour l'orientation de pièces en Fabrication additive de type EBM.

##### 4.1. Première étape d'évaluation

La première étape d'évaluation du logiciel COFFA consiste à comparer les résultats d'orientation des pièces obtenus par chaque expert métier participant à l'étude empirique par rapport au résultat de référence. Les valeurs d'orientation de référence sont établies par un groupe d'experts dans un cadre collégial en fin de l'expérimentation.

Dans cette étude empirique chaque participant devait orienter des pièces avec des scénarios de conception adaptés à chacune des pièces de la plus simple à la plus complexe (voir figure 4). L'orientation devait être effectuée avec deux logiciels différents. Une première fois avec un simple visualisateur 3D sans aucune fonctionnalité d'aide aux choix et une deuxième fois avec le logiciel d'aide à la décision COFFA.

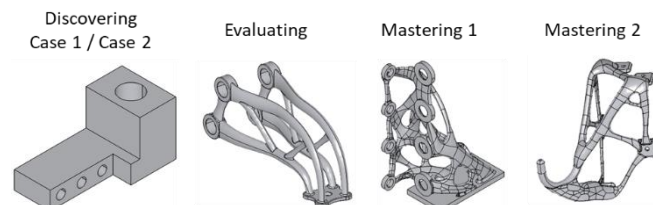
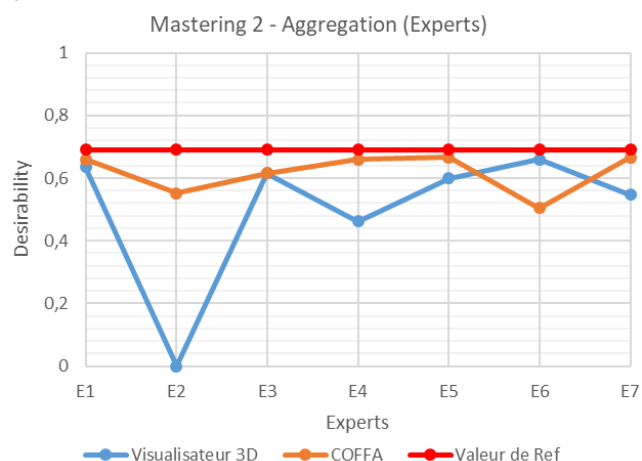


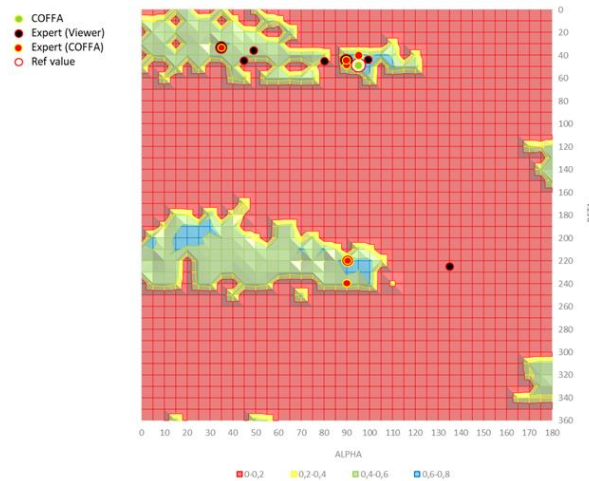
Figure 4 – Pièces à orienter avec le logiciel COFFA

Pour effectuer la comparaison des résultats d'orientation obtenus nous avons utilisé deux indicateurs : la désirabilité agrégée et les angles d'orientation suivant les axes X et Y. Sachant que la désirabilité agrégée représente le produit pondéré des désirabilités des règles d'action représentées dans l'interface du logiciel COFFA (figure 2).

La figure 5 montre un exemple des résultats de comparaison obtenus pour la dernière pièce (Mastering 2).



a) Comparaison de la désirabilité agrégée



b) Comparaison des angles d'orientation

Figure 5 – Résultats première étape de l'évaluation

La figure 5.a permet de voir l'écart entre les valeurs de désirabilité agrégée obtenues en utilisant le visualisateur 3D et COFFA par rapport à la valeur de référence. L'utilisation du logiciel permet une meilleure orientation en se basant sur ce critère. Pour certaines pièces dont les résultats ne sont pas représentés dans la figure 5 montre que les experts ne peuvent pas évaluer correctement les règles d'action liées à l'orientation (exemple : critère de risque de déformation ou de support difficile à enlever) ce qui induit des scores de désirabilité très bas lors de l'utilisation d'un visualisateur 3D sans assistance à l'orientation.

La figure 5.b permet de voir que l'utilisation du logiciel COFFA fait converger le choix des experts vers des îlots de solutions avec une bonne désirabilité. De plus les solutions retenues sont souvent une orientation donnée avec une orientation symétrique à elle par rapport à un axe X ou Y.

#### 4.2. Deuxième étape d'évaluation

La deuxième étape de l'évaluation consiste à vérifier la qualité des pièces orientées avec le logiciel COFFA après fabrication en EBM. Pour atteindre notre objectif nous avons mis en place un protocole de travail pour minimiser les interférences dues aux activités qui suivent l'orientation des pièces. Pour cela, nous avons identifié que l'activité de supportage représentait le plus gros risque de parasitage. Par conséquent nous avons regroupé les experts pour effectuer cette tâche, comme dans le cas de l'établissement des valeurs de référence, en travail de groupe en prenant soin de suivre les recommandations d'experts industriels avec lesquels nous avons mené des projets antérieurs (établissement des règles d'action). L'autre point important étant le « Nesting », nous avons fait attention de positionner les pièces en respectant les distances minimales pour éviter l'influence des pièces entre elles ainsi qu'avec les bords du plateau de la machine (voir figure 6).

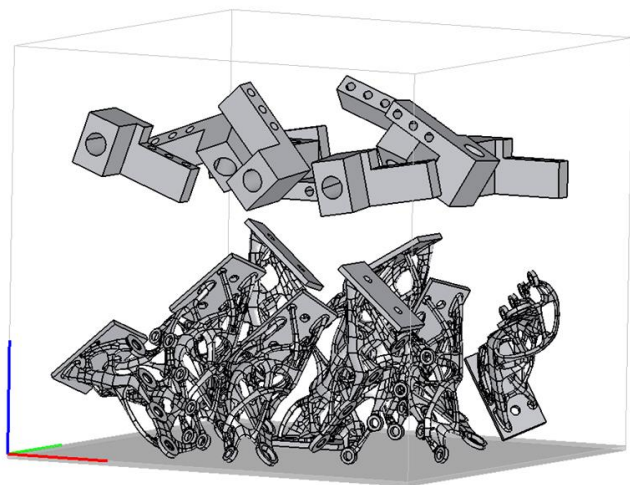


Figure 6 – Positionnement des pièces dans la machine EBM

La finalisation de cette étape étant en cours, nous allons juste discuter des points clés de la suite du travail d'évaluation.

Cette étape d'évaluation critériée nécessite l'établissement de critères qui permettront, en plus de vérifier la conformité des pièces, l'impact des choix d'orientation réalisés en utilisant le logiciel COFFA. In fine, cela permettra de faire le lien entre une bonne désirabilité et une bonne qualité de pièce, qui est l'objectif sous-jacent à ce travail d'évaluation.

À la différence des critères de conformité des pièces en contrôle qualité cités précédemment, nous n'allons pas nous focaliser seulement sur des critères liés aux pièces fabriquées. Nous allons aussi avoir des critères liés aux supports des pièces que l'on considère comme étant un bon indicateur de l'orientation des pièces. Donc, le choix des critères retenus sera composé de :

- Critères liés à la pièce : contrôle des caractéristiques physiques (dimensions, rugosité, déformations, ...);
- Critères liés aux supports : types, volume, temps d'enlèvement.

#### 5. DISCUSSION

Avant de commencer cette section, nous souhaitons apporter un éclaircissement sur la suite des discussions. La mise en œuvre de notre démarche n'étant pas encore arrivée à terme, nous ne pouvons tirer de conclusion que sur la première étape de l'évaluation. Toutefois, nous allons présenter nos réflexions sur la deuxième étape de l'évaluation, sachant qu'une grande partie du travail a déjà été menée.

La première étape de l'évaluation qui consiste à comparer le choix de l'utilisateur par rapport à une valeur de référence a permis de constater la pertinence des choix faits par l'utilisateur en utilisant le logiciel COFFA à la différence de l'utilisation d'un visualisateur 3D sans assistance à l'orientation des pièces. Le point marquant étant que l'utilisation du logiciel COFFA a évité aux experts de faire des choix trop mauvais pour des pièces avec une géométrie complexe.

Un résultat intéressant dans cette étape concerne l'utilisation du logiciel COFFA par les experts comme outil de vérification de choix d'orientation et parfois cela leur a permis de justifier certains choix, qu'ils avaient pressentis en se basant sur leur expérience et leur savoir-faire, sans pouvoir les expliquer.

Concernant le choix des indicateurs, à savoir la désirabilité agrégée ainsi que le positionnement du choix des angles d'orientation dans la carte des désirabilités agrégées, cela a permis d'avoir une représentation de la pertinence des choix des utilisateurs et de l'efficacité du logiciel d'aide à la décision. Donc, suivant l'objectif de cette étape d'évaluation comparative, nous pouvons l'utiliser soit pour évaluer l'outil d'aide à la décision ou bien la qualité de travail de l'utilisateur par rapport à un groupe d'experts.

Nous constatons que le résultat de cette étape peut représenter un jalon pour la suite du processus de fabrication additive et sa validation permet d'entreprendre la fabrication des pièces avec un risque minime.

Pour finir sur cette étape d'évaluation, nous pouvons dire que l'évaluation comparative peut être appliquée à plusieurs niveaux d'un processus de travail si ceux-ci sont considérés comme étant suffisamment importants pour le reste du processus. Toutefois, pour ne pas alourdir le processus de travail global, nous pouvons imaginer d'introduire une règle de type Pareto 80/20 pour le choix des jalons à évaluer.

La deuxième étape de l'évaluation qui consiste à évaluer les implications des choix d'orientation des pièces faits avec le logiciel COFFA sur les pièces fabriquées, est une adaptation du contrôle qualité des pièces mécaniques à la fabrication additive en prenant en compte le supportage des pièces qui est fabriqué en même temps que les pièces et qui a un effet non encore bien identifié sur elles.

L'objectif de cette étape est de faire la concordance entre une bonne désirabilité agrégée et une bonne qualité de pièce fabriquée, et par conséquent l'efficacité du logiciel d'aide à la décision COFFA qui permet de faire des choix d'orientation de pièces en maximisant la désirabilité agrégée.

La difficulté de cette étape étant que la suite du processus de fabrication additive, surtout la génération de supports, peut influencer considérablement la qualité des pièces fabriquées. D'où le recours à un groupe d'experts pour réaliser ce travail en faisant attention que les pièces réalisées soient le moins impactées par cette tâche ou que l'influence des supports soit la même pour toutes les pièces. Les experts nous ont permis d'établir quel type de support on doit utiliser pour chaque type de surface ainsi que les paramètres associés. Ce travail a permis de voir les limites des logiciels commerciaux actuels, en particulier pour la technologie EBM. L'exploitation d'un brevet [15] développé au sein de l'équipe de recherche est actuellement en cours d'exploitation pour apporter des solutions aux problèmes rencontrés dans le supportage des pièces en EBM.

## 6. CONCLUSION

Cet article propose une démarche d'évaluation en deux étapes pour les logiciels d'aide à la décision en fabrication additive. La première étape permet de vérifier la pertinence des choix effectués et la deuxième étape permet d'évaluer l'impact des choix précédents sur la qualité des pièces obtenues après fabrication.

L'étude empirique nous a aidé à observer et à quantifier les résultats d'un cas d'étude en utilisant le logiciel d'orientation de pièces COFFA et la machine de fabrication additive de type EBM Arcam®.

La finalisation de la deuxième étape de l'établissement nous permettra de voir la pertinence des indicateurs de qualité mis en place ainsi que l'influence du parasitage des autres activités du processus de fabrication additive FLP - EBM.

## REFERENCES

- [1] Grandvallet, C., Pourroy, F., Prudhomme, G., & Vignat, F. (2017). From elicitation to structuration of additive manufacturing knowledge. In 21st international conference on engineering design ICED17, Vol. 6: design information and knowledge, Vancouver, Canada 21-25.08.2017.
- [2] Pandey, P. M., Reddy, N. V., & Dhande, S. G. (2007). Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 185, 125-131.
- [3] Zhang, Y., Bernard, A., Harik, R., & Karunakaran, K. P. (2017). Build orientation optimization for multi-part production in additive manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 1393-1407.
- [4] Mbow M. M., Knowledge-based decision support in CAM for additive manufacturing: A rules mathematization approach. Université Grenoble Alpes, soutenue le 11/12/2020.
- [5] ISO/IEC 9126:1991, Génie du logiciel — Qualité des produits.
- [6] ISO/IEC 25000:2014, Ingénierie des systèmes et du logiciel — Exigences de qualité des systèmes et du logiciel et évaluation (SQuaRE).
- [7] ANN FITZSIMMONS AND TOM LOVE, A Review and Evaluation Of Software Science. *Computing Surveys*, Vol. 10, No. 1 March 1978.
- [8] MIGUEL, José P., MAURICIO, David and RODRÍGUEZ, Glen. A review of software quality models for the evaluation of software products. *International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA)*, Vol.5, No.6, November 2014. DOI : 10.5121/ijsea.2014.5603
- [9] YILMAZ, Nebi et TARHAN, Ayça Kolkukisa. Meta-models for Software Quality and Its Evaluation: A Systematic Literature Review. In : The 30th International Workshop on Software Measurement (IWSM) and the 15th International Conference on Software Process and Product Measurement (MENSURA). 2020.
- [10] Boehm, B.W. (2001). Software Engineering Economics. In: Broy, M, Denert, E. (eds) *Pioneers and Their Contributions to Software Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-48354-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48354-7_5)
- [11] Melody Y. Ivory and Marti A. Hearst. The state of the art in automating usability evaluation of user interfaces. *ACM Computing Surveys*, 33(4) -470-516, December 2001.
- [12] Brooke, J. SUS: A "quick and dirty" usability scale. In: Jordan, P.W., Thomas, B., Weerdmeester, B.A., McClelland, A.L. (Eds.), *Usability Evaluation in Industry*. Taylor and Francis, London, 1996.
- [13] ISO 9001:2015, Systèmes de management de la qualité — Exigences.
- [14] Nevo, D. (1983). The Conceptualization of Educational Evaluation: An Analytical Review of the Literature. *Review of Educational Research*, 53(1), 117-128. <https://doi.org/10.3102/00346543053001117>
- [15] Frédéric Vignat et Christelle Grandvallet, Systems And Methods For Determining Support Structures In Additive Manufacturing, U.S. patent application number 17/504436.