



Evaluation des types d'informations et des supports de transmission pour favoriser l'assimilation de connaissances liées à la fabrication additive

Chloé Douin, Elise Gruhier, Robin Kromer, Olivier Christmann, Nicolas Perry

► To cite this version:

Chloé Douin, Elise Gruhier, Robin Kromer, Olivier Christmann, Nicolas Perry. Evaluation des types d'informations et des supports de transmission pour favoriser l'assimilation de connaissances liées à la fabrication additive. S-MART 2023: 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04278706

HAL Id: hal-04278706

<https://hal.science/hal-04278706>

Submitted on 10 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.

Evaluation des types d'informations et des supports de transmission pour favoriser l'assimilation de connaissances liées à la fabrication additive

C. Douin ^a, E. Gruhier ^{a,*}, R. Kromer ^b, O. Christmann ^c, N. Perry ^a

^a Arts et Metiers Institute of Technology, University of Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France

^b University of Bordeaux, CNRS, Arts et Metiers Institute of Technology, Bordeaux INP, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France

^c Arts et Metiers Institute of Technology, LAMPA, HESAM University, Changé, France

* e-mail : elise.gruhier@ensam.eu

1. INTRODUCTION

La transmission de connaissances est un facteur clé pour le développement de la Fabrication Additive (FA) dans l'industrie. Pour des concepteurs n'étant pas spécialisés dans ce domaine, beaucoup de cycles de prototypage peuvent être nécessaires avant l'obtention d'un résultat satisfaisant le cahier des charges. Concevoir pour la FA implique la prise en compte des restrictions et règles spécifiques au procédé. La production ainsi que le temps de conception doivent être optimisés, en utilisant par exemple un système automatisé d'analyse de fabricabilité. Pour les procédés de fabrication traditionnels, de tels outils ont commencé à se développer dès les années 1990 [1], et des efforts ont déjà été fait pour les intégrer dans des systèmes de conception et fabrication assistés par ordinateur (CAO et FAO) [2]. De nombreuses recherches ont été menées sur des règles et méthodes de conception propres à la FA, mais peu de tentatives ont été faites pour mettre au point des systèmes automatisés d'analyse de fabricabilité et de qualité qui puissent identifier les problèmes spécifiques des modèles solides [3]. Pour assurer la qualité du produit, il est nécessaire que le concepteur puisse prendre des décisions liant le produit, le procédé et les matériaux choisis. La formalisation des connaissances des experts est donc un enjeu majeur pour optimiser le temps et le coût de la conception d'un objet destiné à être produit en FA [4]. Une fois ces connaissances formalisées, le support de communication choisi peut avoir un impact important sur leur transmission. L'essor de la Réalité Virtuelle (RV) dans le domaine de la conception a permis

de démontrer que cette technologie favorisait la créativité [5] et la communication entre différents acteurs [6]. La question se pose alors de savoir si la RV pourrait également permettre de faciliter la transmission des connaissances liées à la FA lors de la conception détaillée, et de déterminer si l'assimilation des connaissances est favorisée en fonction de leur type et du moment auquel elles sont transmises. Une expérimentation sur des personnes novices en FA est proposée en évaluant la progression de différents groupes en fonction du niveau de connaissances transmises et du support de transmission utilisé. A travers cette expérimentation, le but est de déterminer les types d'informations, la quantité et qualité des informations à apporter en fonction de la pièce considérée, ainsi que les supports et les instants auxquels sont transmises ces connaissances pour permettre une meilleure assimilation de celles-ci lors de la conception détaillée. Les résultats obtenus permettront alors d'établir un moyen de faciliter la montée en compétences des personnes novices pour optimiser le temps de développement des produits conçus pour la FA.

Dans un premier temps un bref état de l'art est proposé sur la transmission de connaissances liées à la FA, ainsi que sur l'utilisation de la RV dans la conception et l'éducation. La méthodologie employée est ensuite explicitée pour finalement mener à une discussion des résultats obtenus. Cette étude se base à la fois sur l'évolution des travaux produits par les participants lors d'un travail de conception en trois phases, ainsi que sur leurs réponses à un questionnaire permettant d'évaluer leur ressenti sur les outils proposés à la fin de chaque étape de l'expérimentation.

2. ETAT DE L'ART

2.1. Transmission de connaissances liées à la FA

Une façon de définir la connaissance serait de dire qu'elle est synonyme d'expertise, c'est-à-dire qu'il s'agirait, d'après Milton [7], de ce qui permet à des personnes expertes dans un domaine d'effectuer un travail efficace et efficient et de faire face à des situations complexes. Deux catégories majeures de connaissances sont généralement distinguées : les connaissances explicites sont formelles, systématiques et facilement transmissibles, alors que les connaissances tacites relèvent souvent de l'expérience et des intuitions, ce qui les rend difficilement exprimables [8].

Dans le cadre de la conception, la transmission de connaissances est essentielle. Par exemple, si les contraintes de production ne sont pas prises en compte lors de la conception, la qualité, voire la fabricabilité du produit pourraient être directement impactées. Pour faciliter la transmission des connaissances tacites venant de l'expérience d'un acteur dans un certain domaine à des personnes n'ayant pas cette expérience, il peut être nécessaire de rendre ces connaissances explicites. Il a été montré par Laverne [9] que la typologie de connaissances, qu'elles soient tacites ou explicites, n'avait aucune incidence sur la recherche de solutions créatives. L'expérience présentée par la suite se concentrera donc sur une transmission de connaissances explicites.

Plusieurs moyens peuvent permettre de formaliser des connaissances explicites. Les travaux de Grandvallet et al. [4] sont centrés sur l'élicitation, c'est-à-dire l'interaction avec des experts pour expliciter des connaissances tacites, et la structuration de connaissances liées à la FA. L'approche développée a permis de mettre au point des règles d'action et des définitions s'intégrant dans le cadre de la conception pour la FA. Une fois ces connaissances formalisées, elles deviennent transmissibles. La question se pose alors de comment les transmettre, à quel moment et grâce à quel support.

Pour automatiser cette transmission dans le cadre des pièces complexes issues de la FA, une approche par reconnaissance de formes est nécessaire. Les modèles 3D peuvent être décomposés en un ensemble d'éléments géométriques caractéristiques, ou « features », pour lesquels des données quantitatives peuvent être apportées. Dans ce but, des analyses effectuées sur des pièces benchmarks permettent de mesurer les déviations par features des pièces produites par FA [10].

2.2. Utilisation de la RV pour la FA et l'éducation

Les usages de la RV se multiplient dans l'industrie et dans l'éducation. Lors de phases amont de la conception, elle apporterait une meilleure créativité et qualité des concepts proposés par les utilisateurs [5]. La RV est par ailleurs particulièrement utilisée pour la revue de conception, puisqu'elle permettrait de détecter légèrement plus de défauts que sur un écran classique, d'après Wolfartsberger et al. [11]. La RV semble donc être un support envisageable pour transmettre des

connaissances lors de la conception détaillée pour des pièces complexes.

En ce qui concerne la RV spécifiquement pour la FA, Ostrander et al. [12] se sont intéressés à la pertinence d'utiliser la RV pour enseigner des concepts généraux. L'étude compare l'utilisation passive, c'est-à-dire en visualisant mais sans interaction avec l'environnement, et active, en manipulant des objets, à un enseignement classique. Il est alors montré que si la RV permet bien d'améliorer la compréhension d'un environnement spatial, elle ne présente pas d'avantage significatif sur l'apprentissage des connaissances liées à la FA par rapport à un apprentissage traditionnel. L'approche proposée est donc de déterminer si l'usage de la RV est propice à la transmission de connaissances propres à la FA avec une démarche de présentation par features lors de la conception détaillée.

3. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

Dans le cadre de la mise au point d'un outil d'aide à la conception pour la FA, il est nécessaire de déterminer quelles informations doivent être transmises, à quel moment, et grâce à quel support. L'étude doit permettre d'évaluer si un utilisateur profane peut acquérir les connaissances nécessaires à l'amélioration de la géométrie de la pièce qu'il est en train de concevoir, le plus efficacement possible lors de la conception détaillée grâce à un apport d'informations globales et locales (par features). L'expérimentation proposée a également pour but de déterminer si l'usage de la RV est pertinent pour transmettre ces informations spécifiques, avec la possibilité de manipuler la pièce en cours de conception.

L'expérience a été menée en trois séances de deux heures sur un groupe de 19 étudiants de niveau bac +2 en IUT GMP (Génie Mécanique et Productique) de Bordeaux n'ayant aucune, ou très peu, de connaissances en FA. Lors de la première phase du projet, il est demandé aux participants de concevoir une potence permettant de lier le guidon au cadre d'un vélo, tout d'abord individuellement, puis en groupes de quatre ou de cinq. Une fois leur solution schématisée et décrite, un questionnaire individuel leur est distribué contenant 6 items sous formes d'échelles de Likert à quatre choix, « 1 » correspondant à un désaccord total et « 4 » à un fort accord. Un questionnaire différent est distribué à la fin de chaque phase de manière à déterminer le ressenti des participants sur les connaissances et supports qui leur sont proposés. Pour la phase 1, une partie des questions porte donc sur une auto-évaluation de leurs connaissances et une seconde partie sur les types de connaissances qu'ils estiment être les plus utiles pour leur progression (Figure 1, Phase 1).

Au début de la seconde phase, un cours théorique sur les procédés et principales règles de conception pour la FA leur est donné. Les informations transmises comprennent par exemple des indications très générales et valables pour tous les procédés de FA tels que les notions de couches, support et règles, ainsi que des informations sur les différences entre les procédés

existants. Il leur est alors demandé de proposer une nouvelle géométrie ainsi que de répondre à un second questionnaire. Les affirmations de la phase 1 sont reprises de manière à comparer leurs ressentis et attentes avant et après l'apport de connaissances générales explicites, en plus de questions sur l'évolution de leur géométrie (Figure 1, Phase 2).

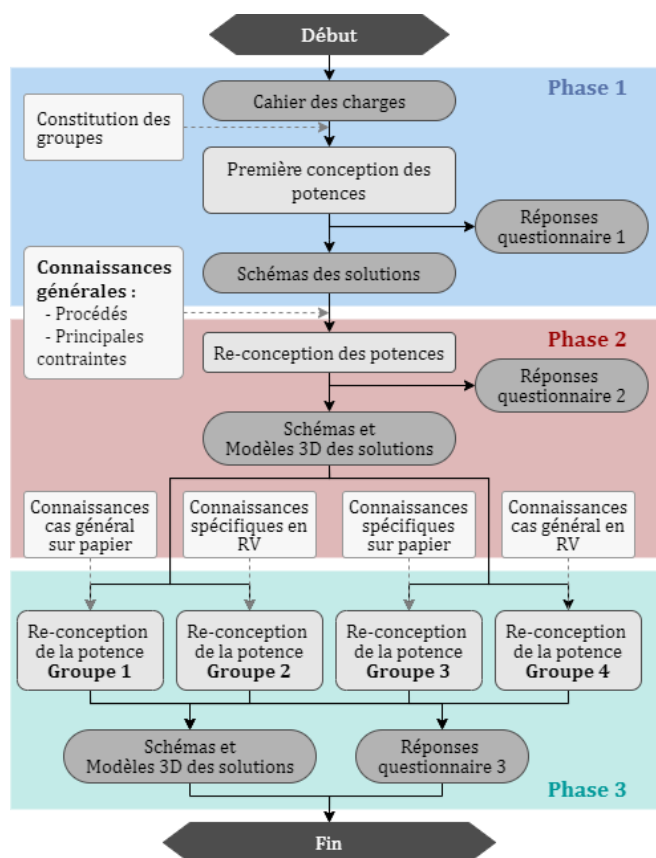


Figure 1 - Déroulement des trois phases de l'expérience

Pour la troisième phase, les quatre groupes ont accès à des informations plus spécifiques sur leur géométrie mais sous différentes formes (Figure 1, Phase 3). Deux des groupes ont des informations directement liées à leur modèle, l'un sur papier (Groupe 3) et l'autre par l'intermédiaire d'une application en RV (Groupe 2), sur un casque Oculus Quest 2. Les deux autres groupes ont les mêmes types d'informations appliquées sur un exemple similaire mais non identique au leur, ici une bielle avec des cotations différentes réalisée par optimisation topologique (Groupe 1 sur papier et Groupe 4 en RV). Pour chacun des groupes, trois types d'informations sont transmises : celles relatives à l'état de surface, à la fabricabilité, et au risque de déformation. L'approche est basée sur une démarche de formalisation de connaissance spatiotemporelle développée par les auteurs [13], appuyée sur une division par features. Discrétiser le modèle par tranches permet de mieux visualiser les problèmes qui pourraient avoir lieu lors de la fabrication, en permettant à la fois d'isoler une zone qui pourrait être améliorée grâce à un apport d'informations, tout en la visualisant dans son contexte. Dans le cas des groupes avec un support papier, une mise en plan de la bielle ainsi qu'un tableau reprenant les mêmes informations sont

fournis. Par exemple pour le cas d'étude général, le groupe 1 a à sa disposition la mise en plan de la figure 2.a ainsi que le tableau 1, alors que le groupe 4 dispose des informations du tableau mais sous forme de fenêtres liées aux tronçons correspondant de la figure 2.b qu'ils peuvent manipuler en RV. De la même manière, des informations propres à la potence du groupe 2 leur sont transmises en RV, et celles correspondant à la géométrie du groupe 3 sur papier. Tous les participants répondent finalement au troisième questionnaire proposé, visant cette fois-ci à la fois à évaluer leur ressenti sur le support de transmission et sur le type d'informations reçues.

Tableau 1 - Informations transmises aux groupes 1 et 4 pour le cas d'étude général

Titre	Description
1 Etat de surface : Inclinaison d'une surface	L'angle d'inclinaison d'une surface impacte fortement la qualité de surface de la pièce imprimée. En deçà de 45° d'inclinaison, l'ajout de support est nécessaire.
2 Fabricabilité : Trou horizontal	Un trou circulaire ayant un diamètre supérieur à 7mm ne peut être fabriqué sans l'ajout de support.
3 Déformation : Variation brusque	Une variation trop brusque de la surface à imprimer peut entraîner une déformation de la couche correspondante.
4 Fabricabilité : Porte-à-faux	Une surface en porte-à-faux ne pourra pas être fabriquée sans l'ajout de support.
5 Risque de déformation : Rapport de forme	Un élément dont la dimension verticale est très grande par rapport à sa section horizontale risque de se déformer lors de la fabrication.

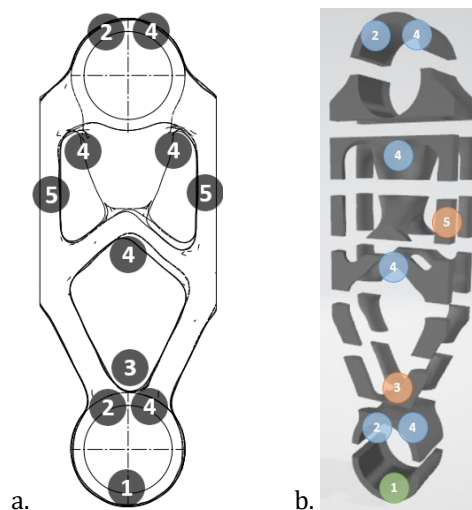


Figure 2 - Modèles fournis aux groupes 1 (a) et 4 (b)

Cette expérience permet ainsi de récolter des résultats en vue d'une double analyse quantitative et qualitative. Tout d'abord, l'évaluation des potences conçues lors de chaque phase permet de vérifier l'assimilation et le réemploi des connaissances acquises lors de chaque phase, en fonction du support et du type d'informations transmises, tout en tenant compte de l'expertise de l'enseignant. Quatorze critères d'évaluation ont été définis selon quatre catégories : le cahier des charges (réduction de la masse, rigidité de la pièce, respect des cotations, emploi de la FA justifié, prise en compte des

avantages de la FA), le risque de déformation lors de la fabrication (rapport de forme vertical, rapport de forme horizontal, angles vifs), l'état de surface anticipé en fonction de la géométrie (surfaces inclinées, minimisation du support, facilité du retrait du support), et la fabricabilité de la pièce (orientation des trous, porte-à-faux, parois fines). Dans un second temps, les réponses aux questionnaires individuels permettent d'évaluer le ressenti et les préférences des participants.

4. RESULTATS

4.1. Evolution de la géométrie proposée

A la fin de chacune des trois phases, les géométries proposées par les quatre groupes ont été évaluées et une note ramenée sur 10 points a été attribuée. Les résultats obtenus pour chaque groupe à chacune des trois phases sont présentés dans la figure 3.

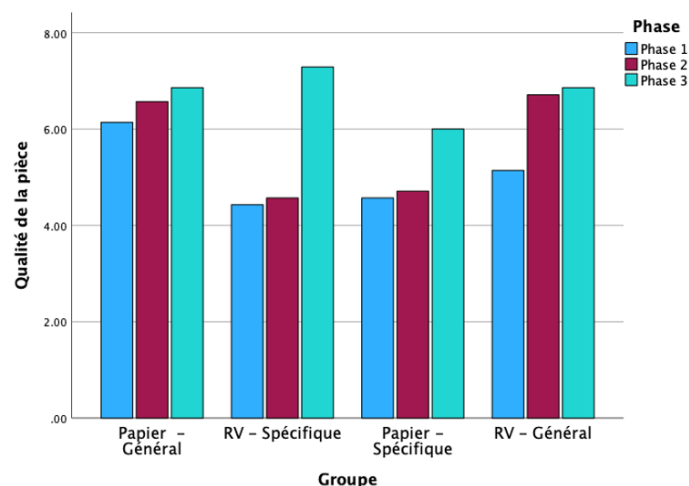


Figure 3 - Evolution de la qualité de la conception proposée par groupe pour chaque phase de l'étude

Pour chacun des groupes, une légère amélioration est observée lors du passage de la phase 1 à la phase 2. L'amélioration est particulièrement marquée sur les critères de fabricabilité : En moyenne sur les quatre groupes, la note de cette catégorie passe de 4,75 à 7 sur 15. Cela est cohérent avec l'apport de connaissances générales, puisque les critères concernés sont principalement liés à des notions de porte-à-faux et d'orientation. Cependant, une nette différence d'évolution entre les groupes est observée lors de la phase 3. Le premier groupe, qui avait un support papier et l'apport d'informations « général », maintient une progression plutôt constante entre les trois phases, avec une augmentation de 4% de la note entre les phases 2 et 3. De la même manière, le groupe 4, qui avait le même exemple et les mêmes informations mais en RV, montre une légère amélioration mais sans écart vraiment marqué avec la phase 2 (2%).

Les deux autres groupes, qui avaient les mêmes informations mais directement affichées sur la potence conçue précédemment, ont proposé une nouvelle géométrie cette fois ci beaucoup mieux adaptée à la FA,

avec une progression de 37% pour le groupe en RV et 21% pour le groupe sur papier, dont les résultats sont présentés dans le tableau 2. Même s'il n'est pas possible ici de faire une analyse inférentielle, ces données nous donnent une première indication sur les différences entre les groupes.

Tableau 2 – Schémas et notes du groupe 3

Schéma	Notes attribuées
	Cahier des charges : 24/25 Risque de déformation : 6/15 Etat de surface : 0/15 Fabricabilité : 2/15 Note phase 1 : 4.57/10
	Cahier des charges : 20/25 Risque de déformation : 10/15 Etat de surface : 2/15 Fabricabilité : 1/15 Note phase 2 : 4.71/10
	Cahier des charges : 17/25 Risque de déformation : 8/15 Etat de surface : 7/15 Fabricabilité : 10/15 Note phase 3 : 6/10

4.2. Réponses aux questionnaires

Les réponses aux questionnaires ont permis de tirer plusieurs conclusions sur l'apport de connaissances et la pertinence du support. Pour chacune des phases, l'affirmation « J'ai des connaissances suffisantes pour concevoir un objet destiné à être fabriqué par un procédé de FA. » est proposée, de manière à évaluer leur propre perception de leur niveau de connaissances. Une différence significative est observée entre chaque phase d'après le test de Friedman ($\chi^2(2, n=18) = 20,667, p < .001$). Les tests paire à paire indiquent une amélioration constante (phase 1 : $m = 2,00$; phase 2 : $m = 2,67$; phase 3 : $m = 3,08$). Cette augmentation permet de confirmer la pertinence des deux phases d'apport de connaissance, et que les informations transmises n'ont pas semblé redondantes pour les participants.

Lors des phases 1 et 2, trois propositions concernant le type d'information à transmettre ont été énoncées. Il a été demandé aux participants d'évaluer s'ils aimeraient avoir le plus de connaissances possibles sur le fonctionnement des machines de la FA, avoir le plus d'informations possibles sur des méthodes de conception pour la FA ainsi que s'ils aimeraient avoir des informations propres à la géométrie de leur produit. Les réponses obtenues sont présentées dans la figure 4 en pourcentage d'accord avec chaque proposition. Lors de la première phase, les moyennes des réponses pour ces trois affirmations sont proches, respectivement 3,58 ; 3,53 et 3,68 sur 4. En comparant ces résultats à ceux obtenus lors de la phase 2, aucune différence significative n'est observée pour le souhait d'obtenir des informations générales et des

informations propres à la géométrie proposée. Pour la seconde affirmation cependant, un test de Wilcoxon montre que le souhait des participants d'avoir accès au plus d'informations possibles sur les méthodes de conception pour la FA a tendance à baisser d'une phase à la suivante ($z = -1,897$, $p = 0,058$). Une façon d'interpréter ce résultat est que suite à deux phases de conception, les participants gagnent en confiance par rapport à la géométrie qu'ils proposent et estiment que les connaissances relatives aux méthodes de conception reçues sont suffisantes.

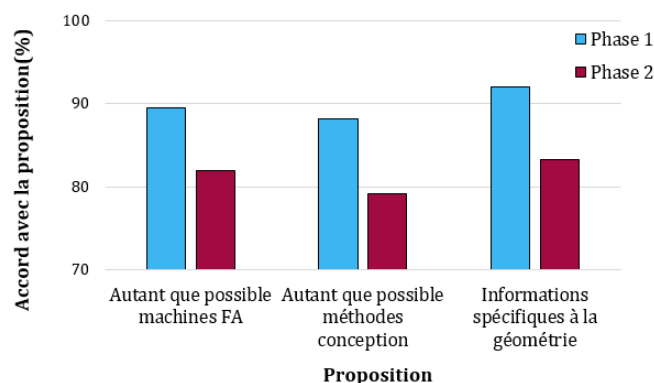


Figure 4 – Types d'informations souhaités à la fin des phases 1 et 2

En ce qui concerne la phase 3, une partie du questionnaire vise à déterminer le support optimal pour un outil d'aide à la conception. A l'affirmation « Le support fourni a facilité ma compréhension des informations qui m'ont été transmises », aucune différence significative n'est notée sur le ressenti des participants en fonction du groupe. Cependant, à la question portant sur le support qu'ils estiment qui les aiderait au mieux dans un futur projet de conception pour la FA, une plus forte disparité est observée. Les quatre réponses suivantes, appuyées par une illustration des outils, étaient proposées :

1. Fiches de règles de conception sur papier
2. Base de données en ligne de règles de conception pour la FA
3. Logiciel d'apport de connaissances sur ordinateur
4. Logiciel d'apport de connaissances sur casque de réalité virtuelle

Une préférence pour le support papier a été indiquée dans 38% des cas. Pour justifier cette préférence, les principaux arguments écrits par les participants étaient liés à l'accessibilité de l'information (ne pas avoir à changer de fenêtre lors d'un travail de CAO), au fait de pouvoir garder des traces tangibles des informations, ainsi qu'à la simplicité d'utilisation. La base de données a été préférée par 28% des participants, qui ont indiqué encore une fois apprécier l'accessibilité et la simplicité d'utilisation, ainsi que l'exhaustivité des informations disponibles. Le logiciel sur écran a été choisi par 17% des étudiants, principalement pour la visualisation, l'aide à la compréhension et la précision possible pour les informations transmises. Finalement, 17% également ont préféré la RV, à la fois pour avoir une meilleure vision de la géométrie, une plus grande immersion, ainsi qu'une

meilleure visualisation des points faibles et points forts du produit conçu.

La seconde partie du questionnaire est axée sur le type de connaissances transmises. A la question « Estimez-vous que les informations que vous avez reçues vous ont été transmises au bon moment ? » trois réponses étaient proposées. Au total, 72% des participants préfèrent recevoir uniquement des informations générales sur la FA au tout début du processus de conception, puis avoir des informations précises au fur et à mesure en fonction de l'évolution de leur géométrie, contre 22% pour avoir accès à toutes les informations possibles dès le début et 6% pour uniquement des informations au fur et à mesure.

4.3. Discussion

D'un point de vue de l'évolution de la géométrie, l'écart entre la phase 2 et la phase 3 est beaucoup plus marqué pour les groupes ayant des informations affichées directement sur leur géométrie par rapport aux groupes pour lesquelles les mêmes informations sont affichées sur une pièce similaire mais n'étant pas exactement la leur. Une explication possible pourrait être que les participants ont uniquement modifié leur géométrie en suivant les indications présentes sur leur modèle sans réellement les comprendre et les assimiler. Pourtant, dans le cas du groupe 2, il peut être noté que la géométrie a complètement changé, passant d'une géométrie à trois branches fines à une géométrie à une unique branche creuse avec une nette amélioration des critères de fabricabilité et de risques de déformation. Cette observation confirme que l'apport de connaissances explicites propres à la géométrie des participants n'a pas été un frein à leur créativité, et leur a permis d'assimiler les connaissances puis de les réemployer dans une solution originale. La vitesse d'assimilation de ces connaissances peut être également remarquée, les participants ont eu deux heures pour acquérir les connaissances transmises, et ont su les réemployer efficacement au cours de la même séance. En ce qui concerne les groupes ayant eu ces informations sur une pièce différente de la leur, l'écart est moindre pour ces critères, la principale amélioration étant dans les deux cas le critère « cahier des charges ». Il semblerait donc que les groupes ayant les informations directement affichées sur leur géométrie ont mieux su réemployer les informations qui leur ont été transmises, en changeant drastiquement de géométrie pour le groupe 2 ou en améliorant la géométrie précédente pour le groupe 3. L'apport d'informations directement sur les modèles découpés en features semble donc avoir favorisé une acquisition rapide des connaissances transmises.

Cette expérience présente donc des résultats intéressants, mais fait tout de même face à certaines limites. Tout d'abord, chaque groupe n'a pu expérimenter qu'un seul support lors de la phase 3 et ne peut donc pas juger de la pertinence des autres types de supports. Par ailleurs, les participants ont eu une phase de conception en autonomie avant de passer à un travail de groupe lors des phases 1 et 2. Cet aspect doit donc être pris en compte lors de l'étude des réponses aux questionnaires puisque

la communication au sein du groupe peut être vecteur d'un apport de connaissances supplémentaires qui pourrait influencer sur leur ressenti. Finalement, il est important de noter que l'expérience n'a été menée que sur quatre groupes de quatre à cinq étudiants, et sur un unique objet qui était une potence de vélo. Pour augmenter la fiabilité des résultats, il serait intéressant de reproduire cette étude sur une population plus grande, et de varier les cas d'études puisque la complexité de la pièce étudiée pourra possiblement influencer sur les résultats obtenus.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude présentée est centrée sur trois aspects de la transmission de connaissances liées à la FA lors de la conception détaillée d'un produit par des utilisateurs novices. Elle permet à la fois de comparer les types d'informations transmises, le moment adéquat pour transmettre certaines connaissances, ainsi que les supports possibles pour apporter ces informations. A partir d'un cahier des charges mais sans apport de connaissances, les étudiants ont dû concevoir une potence de vélo destinée à être produite par FA métallique. Lors de la séance suivante, des connaissances générales leur ont été apportées, puis finalement lors d'une dernière séance, des informations plus précises sur les géométries pouvant donner lieu à des déformations lors de la fabrication, à un mauvais état de surface, ou poser des problèmes de fabricabilité leur ont été transmises. Les résultats des géométries proposées par les quatre groupes lors des trois phases d'étude ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative sur l'assimilation des connaissances apportées entre la RV et le support papier. En revanche, pour des connaissances apportées identiques, il peut être observé que les groupes ayant leur propre modèle à disposition ont mieux réussi à réemployer ces connaissances, par rapports aux groupes ayant comme support un modèle différent. La discrétisation des modèles qui a été proposée a permis une localisation spatiale des informations, qui a entraîné une acquisition efficace des connaissances à transmettre.

Par conséquent, il peut être conclu qu'il existe un réel besoin de transmettre des connaissances localisées et propre à la géométrie du produit, mais que l'impact du support semble être négligeable entre la RV et un outil traditionnel lors de la conception détaillée. L'évaluation des géométries et les réponses aux questionnaires permettent de déterminer que dans le but de mettre au point un outil d'aide à la conception pour des utilisateurs non-expert en FA, un apport de connaissances général sur les procédés et contraintes est préférable avant de commencer les premières phases de conception. Une fois les premières ébauches réalisées, les participants préfèrent en majorité avoir un support permettant la transmission d'informations précises, directement sur leur géométrie, mais simple d'utilisation et facilement accessible. Le support de l'outil développé devra donc être évolutif en fonction de l'avancé de la conception pour répondre aux attentes des participants, ce qui est en

faveur d'un outil numérique. Le développement d'un tel outil implique donc une réelle nécessité de formaliser des connaissances liées à différents features en fonction de leur position au sein d'une pièce, et de les classer de manière à pouvoir y faire appel selon la géométrie d'un produit. Dans de futurs travaux, il pourrait être intéressant d'approfondir ces résultats en reproduisant l'expérience sur un plus grand nombre de groupes, en proposant d'autres cas d'études.

RÉFÉRENCES

- [1] Gupta, S.K., Regli, W.C., Das, D., & Nau, D.S. Automated manufacturability analysis: A survey. *Research in Engineering Design* 9, 168–190, 1997.
- [2] Molcho, G., Zipori, Y., Schneur, R., Rosen, O., Goldstein, D., & Shpitalni, M. Computer aided manufacturability analysis: Closing the knowledge gap between the designer and the manufacturer. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 153-158, 2008.
- [3] Shi, Y., Zhang, Y., Baek, S., De Backer, W., & Harik, R. Manufacturability analysis for additive manufacturing using a novel feature recognition technique. *Computer-Aided Design and Applications*, 15:6, 941-952, 2018.
- [4] Grandvallet, C., Pourroy, F., Prudhomme, G., & Vignat, F. From elicitation to structuring of additive manufacturing knowledge. *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, Vol. 6: Design Information and Knowledge. Vancouver, Canada, pp. 141–150, 2017.
- [5] Rieuf, V., Bouchard, C., Meyrueis, V., & Omhover, J. Emotional activity in early immersive design: Sketches and moodboards in virtual reality. *Design Studies*, 48, 43-75, 2017.
- [6] Stelzer, R., Steger, W., & Petermann, D. The VR Session Manager: A Tool to Co-Ordinate a Collaborative Product Development Process in a Virtual Environment. *32nd Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Chicago, Illinois, USA: American Society of Mechanical Engineers, pp. 1517–1525, 2012.
- [7] Milton, N. R. *Knowledge Acquisition in Practice: A Step-by-step Guide*. 2007.
- [8] Nonaka, I., Takeuchi, H. The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation. *Long Range Planning*, 29(4), 1996.
- [9] Laverne, F. *Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique*. PhD thesis, 2016.
- [10] Vorkapic, N., Pjevic, M., Popovic, M., Slavkovic, N. & Zivanovic, S. An additive manufacturing benchmark artifact and deviation measurement method. *J Mech Sci Technol* 34, 3015–3026, 2020.
- [11] Wolfartsberger, J. Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. *Automation in Construction* 104, pp. 27–37, 2019.
- [12] Ostrander, J. K., Tucker, C. S., Simpson, T. W., and Meisel, N. A. Evaluating the Use of Virtual Reality to Teach Introductory Concepts of Additive Manufacturing. *ASME. J. Mech. Des.* May 2020; 142(5): 051702, 2019.
- [13] Douin, C., Gruhier, E., Kromer, R., Christmann, O., Perry, N. A method for design for additive manufacturing rules formulation through Spatio-temporal process discretization. *Procedia CIRP*, 32nd CIRP Design Conference, 2022.