HAL
open science

créativité par et pour la fabrication additive : proposition d'une méthodologie outillée

Anne-Lise Rias

To cite this version:

Anne-Lise Rias. créativité par et pour la fabrication additive : proposition d'une méthodologie outillée. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2017. Français. NNT : 2017ENAM0030 . tel-02987001

HAL Id: tel-02987001

https://pastel.hal.science/tel-02987001

Submitted on 3 Nov 2020

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.

2017-ENAM-0030

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteure délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie industriel "

présentée et soutenue publiquement par

Anne-lise RIAS

le 09 octobre 2017

Créativité *par* et *pour* la fabrication additive : Proposition d'une méthodologie outillée

En mémoire de Madame Carole Bouchard

Directrice de thèse : **Carole BOUCHARD**
Co-encadrement de la thèse : **Frédéric SEGONDS**
Co-encadrement industriel : **Stéphane ABED**

Jury

M. Xavier FISCHER, Professeur des Universités, ESTIA Bidart	Président - Rapporteur
M. Pascal MOGNOL, Professeur des Universités, Président de l'ENS Rennes	Rapporteur
Mme Nathalie BONNARDEL, Professeure des Universités, Université Aix-Marseille	Examinatrice
M. Eujin PEI, PhD, Professor and department director, Brunel University of London	Examinateur
M. Stéphane ABED, PhD, Président Directeur Général de Poly-Shape	Examinateur
M. Frédéric SEGONDS, Maître de Conférences, LCPI, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Améziane AOUSSAT, Professeur des Universités, LCPI, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Pathum BILA-DEROUSSY, PhD, Chief Design Officer, Bluenove Group	Examinateur
Mme Brigitte BORJA DE MOZOTA, Maître de Conférences, Designence	Invitée

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Campus de Paris
Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation

«Voir autrement et plus loin»

REMERCIEMENTS

MERCI

D'abord à Pascal MOGNOL *(ENS Rennes)* **et Xavier FISCHER** *(ESTIA Bidart)* **qui ont accepté de rapporter mes travaux.**
A Nathalie BONNARDEL *(Université d'Aix-Marseille)***, Brigitte BORJA DE MOZOTA (***Designence***), Eujin PEI** *(Brunel University of London)*, **Pathum BILA-DEROUSSY (***Bluenove***) pour avoir examiné mes travaux et pour nos discussions.**
À Frédéric SEGONDS pour le co-encadrement.
À la société Poly-Shape qui a financé ces travaux et à Stéphane Abed son Président, sans qui ces travaux n'auraient pas démarrés.
À Benjamin VAYRE qui a pris le relais.
À l'équipe du LCPI, pour son accueil d'abord en Master Recherche puis durant la thèse, et surtout à Séverine.

PENSÉES

À Carole BOUCHARD pour sa Direction et son expérience.
Notre rencontre a été interrompue.

MERCI

Aux collègues de Poly-Shape qui ont participé et contribué à l'expérimentation #2, notamment les collègues du bureau de conception, de la production et des parachèvements.
Tout particulièrement à Benjamin VAISSIER pour ses contributions directes dans le cadre de son stage.
Aux étudiant.es de l'école de design STRATE
Aux étudiant.es ayant participé au challenge FEST'INNOV 2014.
Aux étudiant.es des Arts et Métiers Paris et de l'école de design La Martinière-Diderot de Lyon qui ont participé aux expérimentations.
Aux personnes d'Air Liquide qui ont participé à l'expérimentation #3, et à l'iLab pour son accueil.
À Étienne, Floriane, Oscar, Vince, Fred, Kerstin, profesao Everton, Paula, Pathum, Théo, Francis, Kévin et Hak Young pour tous nos discussions/restaus/apéros.
À celles et ceux qui avant moi on fait une thèse après un cursus de designer, vous avez ouvert la voie. Aux collègues de Design en Recherche !

MERCI

À Denyse
À Guillaume, évidemment

À Elles,

Ce manuscrit suit les règles de l'écriture épicène[1]

[1] Charte et guide pour l'écriture épicène http://www.haut-conseil-egalite.gouv.fr/IMG/pdf/hcefh__guide_pratique_com_sans_stereo-_vf-_2015_11_05.pdf (France) https://www.unige.ch/rectorat/egalite/files/3214/0353/2702/charte_epicene_CantonVD_egalite_ecrit.pdf (Suisse)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I.Verrous et objectifs....13
II.Méthodologie de recherche : la recherche-action....14
III.Originalité et apports....16
IV.Structure du document....17

CHAPITRE 1 : CONTEXTE, DÉMARCHE ET ENJEUX DE CETTE RECHERCHE

1.1 Contexte industriel : la société Poly-Shape....21
1.1.1 Poly-Shape : une concentration de connaissances....21
1.1.2 La Recherche & Développement au sein de Poly-Shape....31
1.1.3 Poly-Shape et la créativité : une première approche....37

1.2 Contexte académique....38
1.2.1 Le Laboratoire de Conception de Produits & Innovation....39
1.2.2 Principes généraux de la recherche-action....41

1.3 Les enjeux de cette recherche....42
1.3.1-Enjeux scientifiques....42
1.3.2-Enjeux économiques....44

Synthèse du chapitre 1....46

CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART SUR LA FABRICATION ADDITIVE, LA CRÉATIVITÉ PUIS LA CONVERGENCE DES DEUX

2.1 Préambule sur la fabrication additive....51
2.1.1 Principe de base de la fabrication additive....51
2.1.2 Impression 3D ou Fabrication additive ? De l'usage du bon terme....52

2.2 Ancrage historique de la fabrication additive....54
2.2.1 Des origines de la Fabrication additive....;....54
2.2.2 Les usages de la FA : du Prototypage Rapide à la Fabrication Rapide....54

2.3 La fabrication additive : une famille de procédés....58
2.3.1 Synthèse de l'ensemble des procédés....58
2.3.2 Focus sur la Fusion de poudre métallique par laser....61

2.4 La chaîne de connaissances de la fabrication additive....63
2.4.1 La conception numérique....;....64
2.4.2 La fabrication....67
2.4.3 Les parachèvements....67
2.4.4 Les contrôles....68

2.5 Une nouvelle opportunité pour les concepteur.trices : la complexité....68
2.5.1 Les 4 types de complexité....68
2.5.2 Typologie de démonstrateurs vis-à-vis de la complexité....69

Synthèse de l'état de l'art – 1ère partie....72

2.6 Préambule : principes généraux de créativité....73
2.6.1 Tout le monde est créatif....73
2.6.2 La créativité : dimension systémique....74

2.7 Créativité et innovation dans les entreprises....76
2.7.1 De la R&D à la RID : vers un régime d'Exploration....76
2.7.2 Créativité et innovation en RID : le couple exploration-exploitation....80
2.7.3 Synthèse : créativité et entreprise....81

2.8 Créativité et processus de conception....82
2.8.1 Modèles du processus de conception....82
2.8.2 Le processus créatif : similitudes avec le processus de conception....90
2.8.3 Les caractéristiques de la créativité en conception....92

2.9 La créativité : un traitement singulier de l'information....94
2.9.1 Le raisonnement en conception créative....95
2.9.2 Le processus de traitement des informations....96
2.9.3 La construction de représentations....103
2.9.4 Types d'objets intermédiaires et leurs rôles....107

2.10 L'évaluation de la créativité en conception....116
2.10.1 Quand est-ce que la créativité est évaluée ?....116
2.10.2 Les critères d'évaluation....117

2.11 Méthodes, techniques et outils d'aide pour la créativité de groupe....119
2.11.1 Une grande variété....119
2.11.2 Les principes clés de la créativité de groupe : synthèse....125
2.11.3 Favoriser la « créativité ambiante »....125

Synthèse de l'état de l'art – 2ème partie....126

2.12 Conception pour, avec et par la fabrication additive....129
2.12.1 Du DFX à la conception pour la fabrication additive....130
2.12.2 Du DWX à la conception avec la fabrication additive....132
2.12.3 Du DTX à la conception par la fabrication additive....133
2.12.4 Synthèse des approches et positionnement....134

2.13 Analyse des méthodologies au regard de la créativité....136
2.13.1 Objectifs du DFAM....137
2.13.2 Typologie des méthodologies DFAM....137
2.13.3 Une classification des méthodologies au regard de la créativité....139
2.13.4 Limites quant à la génération de concepts créatifs....147

Synthèse de l'état de l'art – 3ème partie et positionnement....151

CHAPITRE 3 : PROJETS R&D, MODÈLE PRÉLIMINAIRE, PROBLÉMATIQUE ET HYPOTHÈSES

3.1 Cas d'application : l'intégration de fonctions en fabrication additive.....155
3.1.1 Principes de l'intégration de fonctions.....155
3.1.2 L'inclusion de corps étrangers en fabrication additive.....157

3.2 Description des projets R&D1 et R&D2.....159
3.2.1 R&D1 : faire l'expérience de la FA par la manipulation d'objets tangibles.....160
3.2.2 R&D2 : faire l'expérience de la FA par la fabrication d'objets.....166

3.3 Formulation de la problématique et des hypothèses.....174
3.3.1 Synthèse des constats.....174
3.3.2 Problématique et hypothèses de résolution.....176

3.4 Proposition d'un modèle Créativité par et pour la fabrication additive.....177

Synthèse du chapitre 3.....180

CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTATIONS, RÉSULTATS ET MODÈLE ENRICHI

4.1 Plan expérimental.....183

4.2 Pré-expérimentation : « La collecte des informations ».....184
4.2.1 Objectif.....184
4.2.2 Phase 1 : collecte des informations « Expected ».....185
4.2.3 Phase 2 : collecte des informations « Unexpected ».....194
4.2.4 Synthèse des phases 1 et 2.....197

4.3 [Projet A] Conception du dispositif « Cartes-Objets ».....198
4.3.1 Fondements et objectifs du projet A.....198
4.3.2 Contenu du dispositif « Cartes-Objets ».....199

4.4 Expérimentation #1 : stimulation par le dispositif « Cartes-Objets ».....203
4.4.1 Objectif.....203
4.4.2 Population et lieu.....203
4.4.3 Dispositif.....206
4.4.4 Tâches, durées et données attendues.....208
4.4.5 Evaluation : population, dispositif et critères.....210
4.4.6 Résultats quantitatifs et analyses.....212
4.4.7 Résultats qualitatifs et analyses.....215
4.4.8 Conclusion de l'expérimentation #1.....223

4.5 [PROJET B] Conception et fabrication du dispositif « AMIO ».....225
4.5.1 Fondements et objectifs du projet B.....225
4.5.2 Conception et fabrication des AMIO.....226
4.5.3 Scénarii de manipulation.....229
4.5.4 Définition du cadrage spatial.....233

Document confidentiel

4.6 Expérimentation #2 : stimulation par le dispositif « AMIO »....235
4.6.1 Objectif....235
4.6.2 Population et lieu....235
4.6.3 Dispositif....237
4.6.4 Tâches, durées et données attendues....240
4.6.5 Evaluation : population, dispositif et critères....242
4.6.6 Résultats quantitatifs et analyses....245
4.6.7 Résultats qualitatifs et analyses....245
4.6.8 Conclusion de l'expérimentation #2....263

4.7 Une modélisation enrichie....264
4.7.1 Synthèse globale des résultats expérimentaux....265
4.7.2 Proposition d'un modèle enrichi....268

Synthèse du chapitre 4....270

CHAPITRE 5 : APPORTS, ORIGINALITÉ ET PERSPECTIVES

5.1 Les apports et l'originalité de cette thèse....272

5.2 Perspectives de développement et de recherche....280
5.2.1 Perspectives de développement....280
5.2.2 Perspectives de recherche....280
5.2.3 Perspectives à plus long terme....282

CONCLUSION GÉNÉRALE....282

CONTRIBUTIONS

I. Revues et ouvrages scientifiques....284
II. Conférences....285
III. Enveloppes Soleau et brevets....286
IV. Articles de vulgarisation....286

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES....287

INDEX DES FIGURES....283

INDEX DES TABLES....301

ANNEXES....302

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. Verrous et objectifs

Accompagner l'intégration de la fabrication additive chez les grands groupes donneurs d'ordres devient crucial pour les sous-traitants. En effet, l'enseignement des procédés et de règles de conception, limités à une vision techno-centrée et parcellaire des connaissances ne suffisent pas pour projeter les futures applications de la fabrication additive dans diverses industries telles que l'aéronautique, l'énergie, le médical, le spatial, etc...

Il est donc désormais nécessaire d'accompagner la diffusion de la fabrication additive par des changements sociaux, humains. Il s'agira ainsi de limiter les risques de se heurter à la résistance aux changements, d'éviter de faire parler des clients qui ne peuvent pas dire ce qu'ils attendent de la technologie ou d'induire des comportements non pertinents comme refaire les produits existants, en rester à l'effet « whaou ! » ou vouloir à tout prix utiliser la fabrication additive même dans le cas où ce choix de procédés n'est pas pertinent. En d'autres termes, cette étude propose de s'appuyer sur la vision techno-centrée, puis de la dépasser pour faciliter l'émergence d'innovations en fabrication additive.

La littérature liée à la fabrication additive montre essentiellement des travaux techno-centrés. Ils s'attachent principalement à définir des méthodologies favorisant l'intégration de règles de conception pour reconcevoir des composants ou assemblages existants. Ils sont circonscrits au déploiement de formes et fonctions connues et répertoriées dans des typologies définies et guident peu dans l'exploration des connaissances apportées par la fabrication additive. Or, les travaux sur la fabrication additive et les observations de terrain montrent que la frontière des connaissances sur ses procédés, les matériaux et leur mise en œuvre est régulièrement repoussée. En outre, cette thèse est conduite dans le contexte industriel de l'entreprise Poly-Shape, spécialisée en conception et production de composants en fabrication additive. Constatant la difficulté de ses donneurs d'ordres à passer au paradigme de l'additif et une augmentation de la concurrence, cette PME structure son unité R&D. Pour devenir proactive -et non uniquement fournisseur- et moteur dans les transformations à déployer, cette unité R&D a donc besoin d'une méthodologie à la fois adaptée à ce paradigme et opérationnelle sur ce terrain.

En conséquence, cette thèse cherche à associer à la fabrication additive, une approche par la créativité. En effet, les travaux de recherche en créativité, traditionnellement non liés à la fabrication additive, montrent qu'il est possible de stimuler les individus pour les guider dans la génération d'idées et de concepts créatifs. Cette thèse explore alors un rapprochement possible entre ces deux champs habituellement distincts. Il s'agira ainsi de se placer dans une approche centrée à la fois sur la technologie et sur les raisonnements et pratiques des individus, donc sur l'humain. Cette démarche « d'humanisation » de la technologie passera donc par un intérêt fort porté sur la créativité qui a montré ses capacités à impulser la projection d'applications innovantes dans d'autres domaines. Ce point de vue double devrait permettre de mettre en évidence des moyens de stimuler la créativité, dans le contexte spécifique de la fabrication additive.

Document confidentiel

L'objectif principal est donc de proposer une méthodologie de créativité dédiée aux phases initiales de l'innovation en fabrication additive et de concevoir des outils d'applications opérationnels dans un contexte industriel réel. Nous formulerons alors une question de recherche générale : comment intégrer la créativité en innovation pour la fabrication additive, dans un contexte de co-développement ? Pour y répondre, nous analyserons la littérature liée à la fabrication additive et la littérature liée à la créativité. Nous observerons des pratiques de terrain et réaliserons des projets de R&D pour formuler une définition de « faire l'expérience de la fabrication additive ». Il s'agira d'une part de comprendre les mécanismes de la créativité sur lesquels agir pour générer des idées puis des concepts créatifs et, d'autre part, de définir des outils de stimulation de la créativité spécifiquement adaptés à la fabrication additive. Ainsi, cette approche fera émerger le rôle prépondérant des objets intermédiaires qui articulent les interactions entre plusieurs dimensions de la capacité créative : les motivations, les émotions, l'exploration des connaissances, l'alternance individu/collectif et l'organisation spatiale. Elle fera aussi émerger le besoin de redéfinir les rôles de ces objets intermédiaires au regard de la fabrication additive. Ces focus permettront de proposer une méthodologie originale liant fabrication additive et créativité.

Cette étude vise finalement à contribuer à enrichir les connaissances méthodologiques des sciences de la conception mais aussi à répondre à des enjeux pragmatiques pour l'entreprise tels que le déploiement d'outils opérationnels ou la capitalisation des connaissances par le dépôt de brevets.

II. Méthodologie de recherche : la recherche-action

Cette thèse de doctorat a été réalisée conjointement au Laboratoire de Conception de Produits & d'Innovation de l'école Arts et Métiers ParisTech et au sein de la société Poly-Shape, une PME spécialisée dans la fabrication additive, sous-traitante pour différents donneurs d'ordres. Introduire une approche de créativité dans ce contexte a donc nécessité de travailler dans une double perspective : pour la recherche et pour la pratique. En ce sens, notre cursus en design industriel s'est révélé particulièrement utile pour pouvoir **adopter la posture de conceptrice-chercheuse**. Conduire une recherche en design tout en pratiquant le design permettait d'appliquer aux travaux des compétences et ressources nécessaires pour mettre en œuvre des projets et des outils dédiés à ce contexte. Enfin, cette démarche « chemin faisant » semble aussi faire écho aux mécanismes de la créativité.

En cohérence avec cette posture, cette thèse a donc été réalisée par une méthodologie de **recherche-action**, c'est-à-dire ancrée dans des contextes réels, où la réalisation de projets de conception articule les expérimentations, basée sur l'observation participante et visant à avoir des retombées à la fois pour la recherche et pour l'industrie. La méthodologie suivie vise donc finalement moins la fiabilité et la généralisation que l'authenticité **[1]**. De plus, la collaboration avec Poly-Shape donnait l'opportunité à la fois d'en extraire des connaissances pour la recherche et, dans le même temps, de contribuer directement aux activités de l'entreprise. Ces attentes ont d'autant plus motivé l'orientation vers la recherche-action que ce type de travaux aboutit à des méthodes plus qu'à des théories et valorise le développement d'outils et de connaissances pragmatiques.

La figure 1 présentée ci-contre illustre notre mise en pratique de la recherche-action.

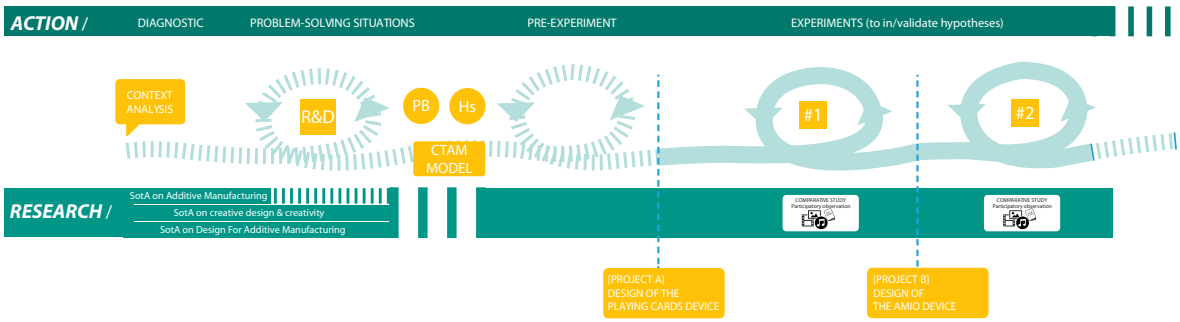


Fig. 1 - Démarche de recherche-action conduite pour cette thèse

Pour démarrer cette recherche-action, un « diagnostic » sera établi à partir d'une immersion dans le contexte Poly-Shape (§1.1). Ce diagnostic soulèvera une question de recherche générale. Intégrée dans l'unité R&D de Poly-Sape, il nous avait été demandé d'explorer la thématique de l'intégration de fonctions en fabrication additive. Deux projets seront réalisés pour explorer cette problématique technique (R&D1 et R&D2 sur la première boucle fig.1), selon deux approches différentes. L'analyse du déroulement et des résultats de ces deux projets de R&D, confrontée à l'état de l'art, nous éclaireront sur les orientations à choisir pour formuler une problématique, définir un modèle préliminaire et des hypothèses de résolution.

Ce modèle sera appliqué au cas de l'exploration de l'intégration de fonctions en fabrication additive. Il sera donc d'abord nécessaire de récolter des informations liées à ce cas. C'est l'objet de la pré-expérimentation nommée « La collecte d'informations » (2ème boucle sur fig. 1) et dont nous présenterons les résultats détaillés (§4.2).

Les données réunies par la pré-expérimentation permettront de concevoir et fabriquer le projet A : le dispositif Cartes-Objets. Ce dispositif composé d'un plateau, de cartes, d'objets typiques de la fabrication additive et d'un scénario de jeu vise à incarner les informations qui seront manipulées dans l'expérimentation #1. En ce sens, la pratique articule la pré-expérimentation et l'expérimentation #1.

L'expérimentation #1 (3ème boucle sur fig.1) vise à in/valider notre hypothèse H1 sur l'influence du dispositif « Cartes-Objets » sur la génération d'idées. Une méthode d'observation participante sera appliquée lors d'une série de séances successives de créativité.

Le projet B sera réalisé à partir des constats du projet R&D2 et des résultats de l'expérimentation #1. Il s'agira de concevoir et fabriquer le dispositif « AMIO » pour Additive Manufacturing of Intermediate Objects. Ce dispositif « AMIO » composé d'objets tangibles mis en scènes vise à incarner les informations qui seront manipulées dans l'expérimentation #2. Plus précisément, ce dispositif sera utilisé comme stimulation pour la phase de génération de concepts qui fera l'objet de l'expérimentation #2. Ainsi, notre casquette de praticienne du design permettra une nouvelle fois d'articuler les phases expérimentales de cette recherche.

L'expérimentation #2 (dernière boucle sur fig.1) vise à in/valider l'hypothèse H2 sur l'influence du dispositif « AMIO » sur la génération d'idées puis de concepts. Nous appliquerons la même méthode d'observation participante pour cette expérimentation mais cette fois conduite

Document confidentiel

lors d'une seule séance de créativité de groupe.

Pour atteindre le critère d'authenticité préconisé dans les principes de la recherche-action, nous convoquerons des collaborateur.trices de Poly-Shape pour participer aux séances de créativité de l'expérimentation #1. Pour l'expérimentation #2 nos participant.es seront des professionnel.les du groupe Air Liquide. Les experts de Poly-Shape qui évalueront les données expérimentales ne participeront à aucune de celles-ci.

Au terme des expérimentations (à droite sur fig.1), la démarche est susceptible de se poursuivre. En effet, une boucle additionnelle pourrait être réalisée afin d'évaluer la performance globale du modèle, par exemple en le comparant à d'autres processus créatifs. Cette dimension ne sera pas traitée dans le périmètre de ces travaux, l'optimisation de la méthodologie restant une perspective de plus long terme.

Cette section visait à montrer que la réalisation de projets de R&D et de projets de conception alimente et influence l'ensemble de la conduite de cette thèse, d'abord en amont puis à l'articulation des phases expérimentales. Cela illustre également le rôle double de chercheuse-praticienne que nous adoptons.

III. Originalité et apports de la thèse

Cette recherche est originale d'abord par l'approche qu'elle propose, qui met en relation fabrication additive et créativité, deux champs rarement associés dans la littérature. Elle l'est également au regard de la démarche de recherche-action suivie, véritablement ancrée dans la réalisation de projets réels aboutissant à des dépôts de demandes de brevets ainsi que dans l'observation participante en terrain réel.
Elle l'est enfin parce qu'elle cherche à anticiper l'évolution de l'écosystème de la fabrication additive : lorsque la mise en concurrence des sous-traitants spécialistes de la fabrication additive sera devenue particulièrement forte et que fournir des composants de bonne qualité et partager des règles de conception ne suffiront plus à démarquer une entreprise.
De manière générale, elle s'inscrit aussi dans le courant qui cherche à échapper au cloisonnement fréquent des profils et compétences, où la connaissance technologique n'est pas uniquement propre à l'ingénieur et la créativité uniquement propre au designer.

Les apports de cette recherche sont finalement divers. Le premier est la proposition d'un modèle de créativité **par** et **pour** la fabrication additive. L'une de ses spécificités réside dans le fait qu'il permet de faire l'expérience de la fabrication additive pendant des séances de créativité en temps limité pour explorer les connaissances liées. Autrement dit, il facilite la collecte d'informations, l'inspiration et la génération d'idées et de concepts créatifs. Le deuxième apport de cette recherche est relatif à la nouvelle définition du statut des objets intermédiaires, proposée au regard de la fabrication additive. Nous proposons ainsi les définitions de cartes de connaissances augmentées « d'objets typiques » de la fabrication additive nommées Cartes-Objets et d'objets intermédiaires de la fabrication additive nommés en anglais « AMIO » pour *Additive Manufacturing of Intermediate Objects*. Le troisième apport est lié à la mise en œuvre effective de ces définitions, c'est-à-dire à la conception et la fabrication de deux dispositifs opérationnels qui ont été appliqués durant des séances de créativité de

groupe en contexte industriel. Les gabarits conçus pour guider la construction de représentations, notamment le dépliant « Pitch Tail », utilisés dans le cadre de ces séances, constituent également un apport, de second ordre, de cette thèse.

Ce document tente alors de décrire les étapes qui ont abouti à ces apports d'ordres académiques et industriels.

IV. Structure de ce document

Ce document synthétise cette thèse en 5 chapitres, présentés comme suit :

• CHAPITRE 1 : CONTEXTE, POSITIONNEMENT, DÉMARCHE ET ENJEUX DE CETTE RECHERCHE

Premièrement, les caractéristiques du contexte industriel de cette thèse seront présentées, en particulier la société Poly-Shape. Cette description visera à expliquer pourquoi cette société s'ouvre aux approches par la créativité. La recherche-action sera présentée comme méthodologie de recherche ancrée et influencée par ce terrain industriel. Elle sera mise en pratique dans les chapitres suivants. Ce chapitre aboutira à la formulation d'une question de recherche générale.

• CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART SUR LA FABRICATION ADDITIVE, LA CRÉATIVITÉ ET LA CONVERGENCE DES DEUX

Ce deuxième chapitre présentera l'état de l'art, réalisé à partir d'une étude bibliographique et d'observations du terrain, selon les deux points d'entrée que sont la fabrication additive d'une part et la créativité d'autre part.

La 1ère partie présentera les fondamentaux de la **fabrication additive.** Nous montrerons le principe de l'addition de couches et une synthèse, sous forme d'infographie, de l'ensemble des procédés de fabrication additive. La présentation des usages de la fabrication additive soulignera un usage observé dans notre contexte industriel : la « démonstration rapide ». Au-delà des procédés, l'ensemble de la chaîne de connaissances de la fabrication additive sera présenté. Enfin, nous nous intéresserons aux quatre types de complexité apportés par la fabrication additive, comme autant d'opportunités qui peuvent être explorées.

La 2ème partie présentera le second point d'entrée de l'état de l'art : **la créativité**. Cette partie visera à identifier des processus, techniques et outils connus dans le champ de la créativité, en vue de les associer ensuite à la fabrication additive. Ainsi, nous présenterons d'abord les principes généraux de la créativité, avant de placer celle-ci dans le contexte de la Recherche-Innovation-Développement (RID) en entreprise. Nous lierons ensuite créativité et processus de conception pour souligner leurs similitudes. La définition du processus créatif sera ensuite affinée et décrite pour montrer qu'il est basé sur le traitement d'informations et la construction de représentations. Nous mettrons ainsi en lumière deux statuts pris par les objets intermédiaires : les objets instruments et les objets déclencheurs d'expériences. Ensuite, les critères qui permettent d'évaluer la créativité en conception seront présentés, de manière à souligner

Document confidentiel

ceux que nous retiendrons pour in/valider les hypothèses. Enfin, des techniques et outils existants pour stimuler la créativité seront synthétisés en vue de retenir leur caractère flexible et non générique.

La 3ème partie, analysera les méthodologies existantes qui lient conception et fabrication additive, par le prisme de la créativité, c'est-à-dire **la convergence possible des deux champs.** Nous relèverons d'abord trois types de liens : conception **pour, avec** et **par** la fabrication additive avant d'établir une classification des méthodologies au regard de la créativité. Nous soulignerons ainsi les limites de celles-ci quant à la génération d'idées et de concepts créatifs. Cette analyse permettra de positionner cette thèse dans le cadre théorique du *Design Through Additive Manufacturing* (DTAM). Dans ce cadre et en précisant notre orientation sur la créativité, nous proposerons le modèle de créativité par et pour la fabrication additive, c'est-à-dire la réunion de la créativité et de la fabrication additive.

• CHAPITRE 3 : PROJETS R&D, MODÈLE PRÉLIMINAIRE, PROBLÉMATIQUE ET HYPOTHÈSES

Ce troisième chapitre montrera la méthodologie de recherche-action conduite. Après avoir défini le positionnement théorique dans le chapitre précédent, deux projets pratiques, nommés R&D1 et R&D2, seront présentés car ils ont influencé la définition du modèle de créativité par et pour la fabrication additive que nous proposons, puis la définition de la problématique et de deux hypothèses de résolution.

• CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTATIONS, RÉSULTATS ET MODÈLE ENRICHI

Ce chapitre sera consacré aux phases expérimentales, visant à in/valider deux hypothèses de résolution et les dispositifs associés. La pré-expérimentation, conduite en deux phases, consistera à collecter les informations attendues (phase 1) et inattendues (phase 2) au regard d'un sujet d'exploration réel : l'intégration de fonctions en fabrication additive. Cette pré-expérimentation aboutira à la conception et à la fabrication d'objets typiques de la fabrication additive. La description du [Projet A] visera à relater la conception du dispositif « Cartes-Objets » permettant la manipulation des deux types d'informations collectés lors de la pré-expérimentation. L'expérimentation #1 visera à observer l'influence de la stimulation de la capacité créative par la manipulation du dispositif « Cartes-Objets ». En ce sens, une série de séances de créativité sera organisée au sein de Poly-Shape. La description du [Projet B] rendra compte de la conception et de la fabrication du dispositif « AMIO » permettant la manipulation de la fabrication additive. L'expérimentation #2 visera alors à observer l'influence de la stimulation de la capacité créative par la manipulation du dispositif « AMIO », dans un contexte de co-développement. Pour cela, une séance de créativité de groupe sera organisée en conviant la société Air Liquide pour participer.

• CHAPITRE 5 : APPORTS, ORIGINALITÉ ET PERSPECTIVES

Ce dernier chapitre visera à faire le bilan des travaux conduits. Une synthèse des apports et de l'originalité de cette thèse sera alors proposée, avant d'ouvrir sur des perspectives.
Ce document sera clos par la conclusion générale immédiatement à la suite de ce chapitre. Les contributions scientifiques et de vulgarisation seront présentées ensuite.

CHAPITRE 1

CONTEXTE, DÉMARCHE ET ENJEUX DE CETTE RECHERCHE

CHAPITRE 1 : CONTEXTE, DÉMARCHE ET ENJEUX DE CETTE RECHERCHE

Introduction du chapitre 1

Cette thèse visant à apporter des contributions à la fois pour les sciences de la conception et pour les pratiques d'une entreprise industrielle, ce 1er chapitre s'attache à décrire son double contexte. Cette thèse s'inscrit donc à la fois dans le contexte de développement de la société Poly-Shape, et également dans le contexte académique du Laboratoire de Conception de Produits & Innovation des Arts et Métiers, campus de Paris qui développe, entre autres, des travaux centrés sur la créativité et les nouvelles technologies. La figure 2 ci-dessous illustre ce positionnement et les éléments abordés dans ce chapitre 1.

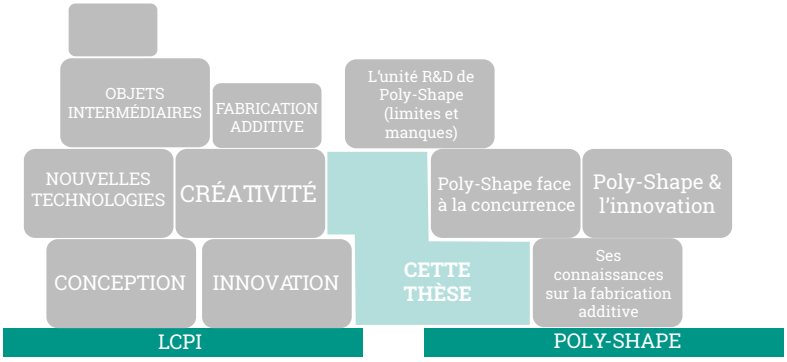


Fig.2 – Positionnement de cette thèse au regard des contextes industriel et académique

En ce sens, dans une première section, les observations de la société Poly-Shape issues de notre immersion participative seront analysées. Il apparaitra que cette PME concentre de riches sources de connaissances (§1.1.1), et que, étant encore « en construction », elle développe son unité de R&D. Ses caractéristiques actuelles (§1.1.2) seront alors présentées et surtout projetées vers un futur auquel nos travaux pourraient contribuer grâce à l'intégration d'une approche par la créativité (§1.1.3).
La 2ème section de ce chapitre présente le contexte académique. En citant les travaux antérieurs, nous soulignons qu'un intérêt particulier est porté d'une part sur les objets intermédiaires et sur la créativité et, d'autre part, sur les technologies (§1.2.1). Nous présentons ensuite la méthodologie de recherche conduite pour cette thèse : la Recherche-Action (§1.2.2) qui semble cohérente avec ce double contexte et avec notre posture de chercheuse-praticienne. Synthétisant le double contexte, les enjeux scientifiques (§1.3.1) et économiques (§1.3.2) liés à cette thèse seront présentés. Enfin, une synthèse de ce chapitre est proposée pour souligner les facteurs qui influencent particulièrement l'orientation de nos travaux et l'étude bibliographique rapportée dans le chapitre suivant.

1.1 Contexte industriel : la société Poly-Shape

Cette recherche est menée dans le cadre d'une convention industrielle, au sein de la société Poly-Shape spécialisée en fabrication additive. Pour apporter un éclairage sur ce contexte, cette section en détaille les caractéristiques. L'attention sera ensuite portée sur un autre aspect de ce contexte : sa forte croissance et sa structuration en cours. Nous montrerons ainsi la logique qui a conduit Poly-Shape à s'ouvrir à la créativité, c'est-à-dire à dépasser la vision uniquement techno-centrée pour s'intéresser aussi aux raisonnements humains.

1.1.1 Poly-Shape : une concentration de connaissances

1.1.1.1 Une appétence pour l'innovation

Poly-Shape est une PME née en 2007 avec pour ambition d'exploiter et de développer la fabrication additive. Son cœur de métier est centré sur la production de composants métalliques, par les procédés de fabrication additive, à destination de divers secteurs industriels. Contrairement à l'impression 3D largement médiatisée comme un outil accessible au grand public, Poly-Shape est tourné vers les marchés dits Business to Business : les composants fabriqués sont destinés à fournir de grands groupes industriels, pour intégrer leurs systèmes ou produits. Les entreprises destinataires des composants sont notamment dans les secteurs Aéronautique, Spatial, Véhicules Terrestres, Sport Automobile, Énergie, Outillage ou encore Médical. D'autres secteurs sont des donneurs d'ordres plus anecdotiques comme le Nucléaire ou le secteur Défense et Militaire. La figure 3 ci-dessous propose un aperçu des réalisations de Poly-Shape pour différents secteurs.

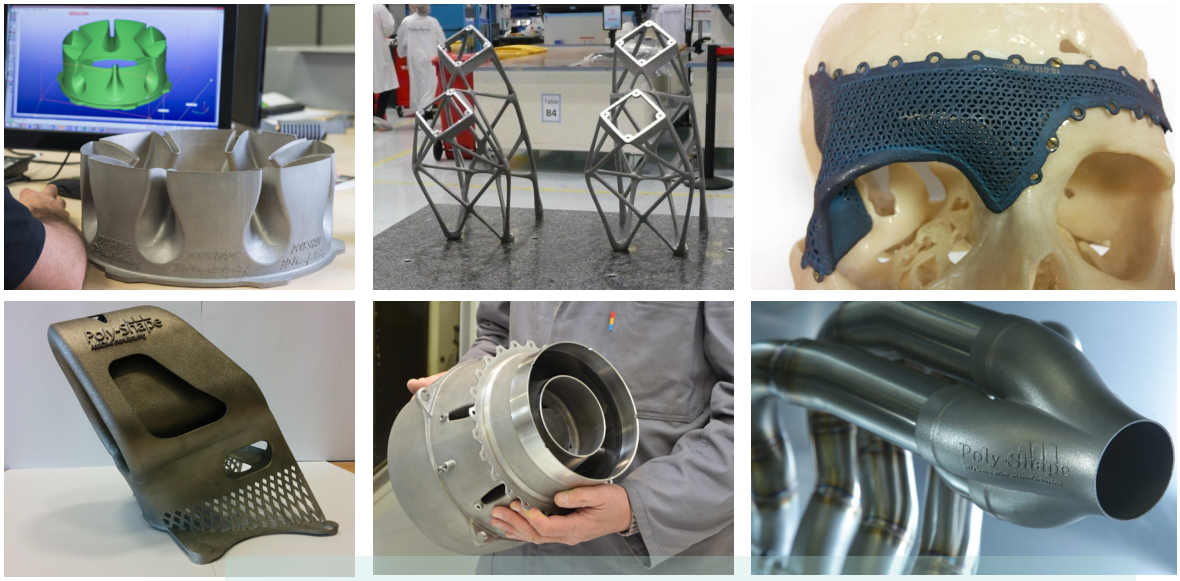


Fig.3 - De gauche à droite, réalisations pour les secteurs Aéronautique (Airbus Helicopter), Spatial (Thales Alenia Space), Médical (OBL Paris), Sport automobile, Aéronautique (Price Induction) et Véhicules terrestres (Goodfab)

Document confidentiel

Les relations avec cette grande variété de secteurs différents ont été (et sont encore) sources de challenges multiples. Pour répondre à leurs besoins différents, Poly-Shape a par exemple progressivement intégré 6 des procédés de fabrication additive : la Fusion par laser, la Fusion par faisceau d'électrons, le Frittage de poudre par laser, le Dépôt de filament, la Polymérisation par flashs et enfin la Fabrication hybride (dans ce cas projection + usinage). Pour exploiter pleinement ces procédés et pour fournir les donneurs d'ordres, Poly-Shape a aussi composé une palette de matériaux : plus de 12 poudres différentes, métalliques, polymères ou céramiques.

Ses capacités de production ont aussi augmenté, jusqu'à atteindre 22 machines pour la production métal et 8 machines pour la production polymère en septembre 2016. Outre le nombre de machines, Poly-Shape a montré un appétit particulier pour des machines nouvellement mises sur le marché par les constructeurs ou encore en phase de développement. Ainsi, en 2013 un partenariat entre un groupement d'industriels de l'aéronautique et un constructeur américain a permis d'intégrer la machine Concept Laser Xline 1000R ayant la plus grande chambre de fabrication alors développée : 630 x 400 x 500mm. D'abord utilisée dans le cadre de projets de recherche, la prise en main a progressivement permis de produire des composants aux dimensions répondant à des besoins industriels. Par exemple, en octobre 2015, Thales Alenia Space annonçait avoir intégré dans ses satellites KOREASAT 5A et 7 les plus grands composants jamais fabriqués en Europe par fabrication additive métallique[2]. Ils ont été produits par Poly-Shape grâce à la Xline 1000R.

En constituant ce réseau de donneurs d'ordres de divers secteurs industriels et de constructeurs de machines variés (Trumpf, Concept Laser, SLM Solutions, EOS, Arcam, Prodways, DMG Mori) Poly-Shape a fait des choix qui la rendent à la fois particulièrement présente dans l'industrie de la fabrication additive, singulière parmi d'autres fournisseurs et relativement indépendante vis-à-vis des marchés et des constructeurs.

La figure 4 ci-dessous montre quelques-unes des machines aux caractéristiques singulières.

Fig.4 - Concept Laser Xline 1000R, Arcam Q20, SLM Solutions 500 avec 4 lasers et machine hybride Lasertec 65

[2]Composants Poly-Shape & Thales Alenia Space https://www.thalesgroup.com/fr/worldwide/espace/press-release/les-satellites-de-telecommunication-koreasat-5a-et-7-embarqueront-les

Cette appétence pour l'innovation concerne aussi les logiciels et méthodes de conception 3D. Dans une démarche similaire à la relation aux constructeurs, des relations de partenariats ont été constituées avec des développeurs et permettent, par exemple, de tester des solutions logicielles non encore mises sur le marché.

Les exigences imposées par les donneurs d'ordres en conception, en production, pour les parachèvements ou encore en qualité ont fortement poussées les collaboratrices et collaborateurs de Poly-Shape à chercher soit de nouvelles solutions techniques, soit à adapter des outils existants à la fabrication additive. En d'autres termes, dans ce paradigme « techno-push » la société Poly-Shape s'est régulièrement tournée vers des innovations à différents niveaux : de l'innovation incrémentale (faible changement qui obéit à une logique d'évolution), jusqu'à l'innovation radicale (en rupture totale avec l'existant) **[2] [3] [4]**.

Cette description met en lumière certains aspects fondamentaux du contexte. En effet, la conjugaison d'une variété de donneurs d'ordres de différents secteurs industriels et d'un panel de constructeurs ont créées un effet de concentration de savoir-faire à la fois variés, riches et singuliers.

1.1.1.2 Une entreprise « en construction »

Ce paradigme de la fabrication additive a donc mis Poly-Shape face à de nombreuses problématiques techniques, humaines, géographiques et économiques. Compte-tenu du fait que la fabrication additive n'est pas encore pleinement adoptée par les donneurs d'ordres, l'entreprise s'est également trouvée face à des cahiers des charges flous, des demandes parfois formulées selon les règles des procédés de fabrication conventionnels mais non adaptées à la fabrication additive ou encore avec des exigences particulièrement ambitieuses au regard de la maturité de la technologie. La volonté affirmée de répondre à ces challenges a donc poussé Poly-Shape à construire en même temps ses savoir-faire, son organisation, son image de marque et son expansion. Ainsi, sur la durée de cette thèse, nous avons pu observer, bénéficier et contribuer à cette construction.
La figure 5 ci-dessous montre des éléments significatifs dans la chronologie de construction du contexte de cette recherche.

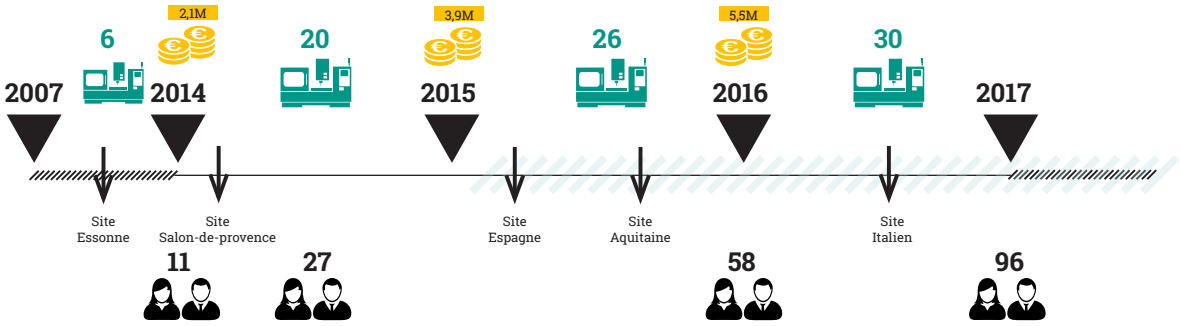


Fig.5 - Chiffres clés et étapes significatives de croissance de Poly-Shape

Document confidentiel

La capacité de production a augmenté, le centre de production comptait 6 machines de fabrication additive métallique au début de cette thèse, il en comporte 5 fois plus en 2016. Le nombre de collaborateurs.trices total est également en forte croissance, de 11 au début, il atteint 96 personnes fin 2016.
Début 2015 est aussi marquée par le développement de l'unité R&D (hachures claires sur figure 5). Il y a donc aussi dans cette structure une volonté de rassembler les connaissances et savoir-faire, de les capitaliser, de les valoriser et de les explorer au fur et à mesure des avancées techniques.
Ce travail de thèse étant rattaché à cette unité de R&D, celle-ci sera donc décrite dans la section suivante (§1.1.2).

Sur la figure 5 ci-dessus, nous observons également l'expansion géographique de Poly-Shape, qui a intégré le nouveau site de Salon-de-Provence début 2014. Courant 2015 et 2016, Poly-Shape s'est également étendue en Aquitaine et en Europe. Au-delà d'un intérêt économique, cette expansion visait un objectif double : à la fois diffuser les savoir-faire en les rendant accessibles par une proximité géographique et économique avec les donneurs d'ordres et également enrichir ces savoir-faire en les «croisant» avec d'autres savoir-faire déjà présents dans les entités partenaires.

Ainsi, une entité en Aquitaine est co-créée avec Lisi, une entreprise fournisseuse de longue date pour l'Aéronautique, dans l'objectif de pousser l'intégration de la fabrication additive dans ce secteur. L'entité italienne est une création commune avec une société reconnue pour son savoir-faire en usinage de composants mécaniques à destination du Sport automobile. En 2016, une autre forme de partenariat est établie avec le secteur de l'Energie. Dans un premier temps, celui-ci permet de pousser au sein du site de Salon-de-Provence les développements de projets liés à ce secteur industriel.

Désormais les activités de Poly-Shape (comprenant les activités des entités partenaires) couvrent la plupart des étapes de la chaîne de valeurs de la fabrication additive. La figure 6 ci-dessous représente les étapes prises en charge, de la conduite des projets de R&D aux contrôles et analyses faits par le laboratoire interne, en passant notamment par la conception et la fabrication. A chaque étape, les savoir-faire, les ressources et la structure ne sont pas figées mais encore en cours d'expansion et de formalisation. En creux sur cette figure, nous remarquons que l'activité de fabrication des matières premières (notamment les poudres) n'est actuellement pas assurée par Poly-Shape. Le développement des machines n'est pas pris en charge non plus. Les activités de Poly-Shape couvrent donc la plupart des étapes de la chaîne de valeur mais pas l'ensemble.

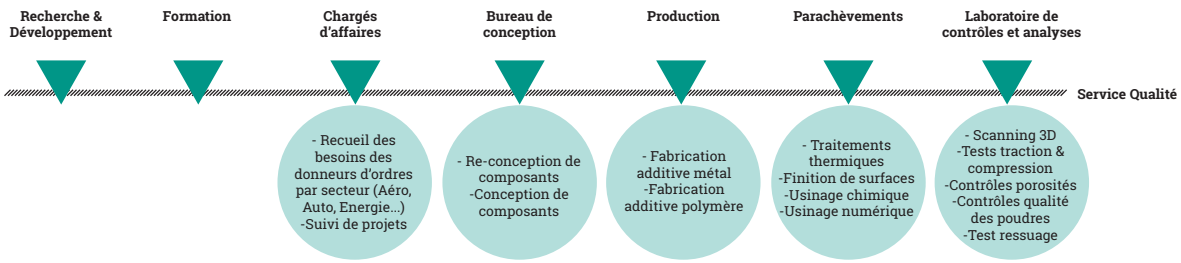


Fig.6 - Chaîne de valeurs de la fabrication additive chez Poly-Shape

Si cette dimension d'évolution permanente peut être perçue comme un handicap pour une entreprise de production qui doit être efficace en termes de coût-qualité-délai-fiabilité, c'est aussi un terrain agile, qui peut être modelé à façon. **Il est donc ouvert aux démarches non centrées uniquement sur la technologie telle que l'approche par la créativité que nous proposerons.** En ce sens, notre approche, traduite en pratique par des « séances de créativité de groupe », pourrait contribuer à la création d'une nouvelle activité pour l'entreprise.

Cette description visait à montrer deux dimensions du contexte industriel de cette recherche : son appétence pour l'innovation et son caractère « en construction ». C'est à partir de cette relation avec ce terrain industriel non encore figé que nous avons eu un accès facilité aux savoirs et aux pratiques, dont l'analyse a fait émerger l'approche proposée. Ces travaux visant à développer une méthodologie favorisant l'exploration des connaissances, la section suivante met l'emphase sur les connaissances présentes chez Poly-Shape, ses façons de les capitaliser et de les partager.

1.1.1.3 Les connaissances et leur externalisation

L'expérience accumulée par les collaboratrices et collaborateurs face aux différents challenges imposés par les donneurs d'ordres, les moyens à disposition et les pratiques mises en œuvre quotidiennement chez Poly-Shape constituent un réservoir de savoir-faire. Ces savoir-faire sont progressivement formalisés dans des documents procéduraux, une forme de capitalisation.
En sciences de la conception, la formalisation, la mise en réseau et globalement la capitalisation des connaissances sont des enjeux importants. Ils sont objets de recherche du champ de l'ingénierie des connaissances et, pour les travaux concernant leur numérisation, objets du champ du *Product Data Management*. En conception pour la fabrication additive, ces thèmes de recherche restent encore naissants (au LCPI, travaux de Laverne **[5]**). Nous décrivons ici l'émergence de ces préoccupations chez Poly-Shape.

La distinction sémantique entre *Connaissances* et *Savoir-faire* est couramment discutée, hors spécialité de la fabrication additive. Du point de vue légal, Savoir-faire est défini par un règlement européen[3] comme « un ensemble d'informations pratiques résultant de l'expérience, secrètes, substantielles et identifiées ». Autrement dit, ce sont des informations qui ne sont généralement pas connues et/ou difficilement accessibles, qui sont importantes et utiles pour la production des produits et aussi suffisamment explicites pour permettre de valider leurs caractères secret et substantiel. D'après cette définition, on peut aisément caractériser Poly-Shape comme un terrain où le capital savoir-faire est très important. Les sciences de la conception, s'intéressent aussi particulièrement aux approches cognitives de la conception. Ce sont les travaux qui considèrent moins les procédés de fabrication eux-mêmes que les personnes et les interactions entre elles.
Dans cette approche cognitive, les recherches s'articulent autour du triptyque Information-Connaissance-Compétence **[6],** ou plus précisément, Donnée-Information-Connaissance-Compétence qui définit chaque élément comme suit :

[3]Règlement européen n°316/2014 http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?qid=1437380319607&uri=CELEX:32014R0316

Document confidentiel

• La **donnée** désigne l'élément brut (chiffre, mot, etc.)
• L'**information** désigne une donnée ou un ensemble de données placées dans un contexte. Le sens de l'information est lié à ce contexte. L'information a donc un contenu mais aussi une forme, une structure
• La **connaissance** apparait quand l'information rencontre une personne. La personne interprète et s'approprie l'information, elle forme donc sa connais sance
• La **compétence** est la capacité à accomplir quelque chose en utilisant un en semble de ressources matérielles et immatérielles

En ce sens, le terme *Connaissances* englobe ici les savoir-faire de Poly-Shape. Selon les courants, les connaissances sont tantôt considérées comme un objet qui peut être modélisé, formalisé et numérisé et tantôt comme quelque chose d'individuel et personnel qui ne peut pas être extériorisé car il est incorporé à une personne.

Chez Poly-Shape, les connaissances sont majoritairement tacites et principalement basées sur l'expérience des personnes confrontées aux challenges imposés par les donneurs d'ordres. Ces projets étaient, jusque récemment, peu documentés. Les connaissances sont donc fortement liées aux caractéristiques de Poly-Shape, encore en évolution. Ces connaissances sont également dépendantes de l'ancienneté accumulée par chaque collaborateur.trice. Chez Poly-Shape, plus de la moitié d'entre eux.elles a moins de 5 ans d'expérience dans cette entreprise. Sur l'impulsion du service qualité interne et pour être efficace, une partie de ces connaissances tacites sont progressivement externalisées par une formalisation dans des documents procéduraux (les gammes, procédures, formations, guides de conception). Les documents procéduraux sont donc finalement une forme de traduction explicite du capital connaissances de Poly-Shape.

À partir de différentes activités de Poly-Shape, la figure 7 ci-contre illustre les sources d'informations concernant la production de composants métal, principale activité de Poly-Shape. Ces sources représentent autant d'informations que les collaborateur.trices ont intégré ou peuvent intégrer dans leurs connaissances (K). Elles sont liées au panel de procédés disponibles, au panel de machines, de parachèvements et de contrôles ainsi qu'aux secteurs d'applications les plus souvent adressés.
En périphérie sur la figure, le réseau de donneurs d'ordres forme également des sources d'informations (panel non exhaustif sur la figure 7), mais dans ce cas celles-ci ne sont pas spécifiquement et uniquement liées à la fabrication additive. Elles sont liées à leurs marchés, c'est-à-dire à leurs produits et aux besoins et usages de leurs produits par les utilisateurs finaux. Ces connaissances sont principalement détenues par les donneurs d'ordres et peu par Poly-Shape. Ces marchés et produits sont multiples chez tous ces grands groupes, par exemple le groupe Air Liquide est actif, entre autres, dans les domaines de la distribution des gaz, dans la conception, fabrication, distribution des bouteilles, des liquéfacteurs et des épurateurs ainsi que sur du petit matériel de santé.

Finalement, Poly-Shape exploite ces connaissances et en développe de nouvelles en combinant des connaissances présentes dans ses différentes sources d'informations.

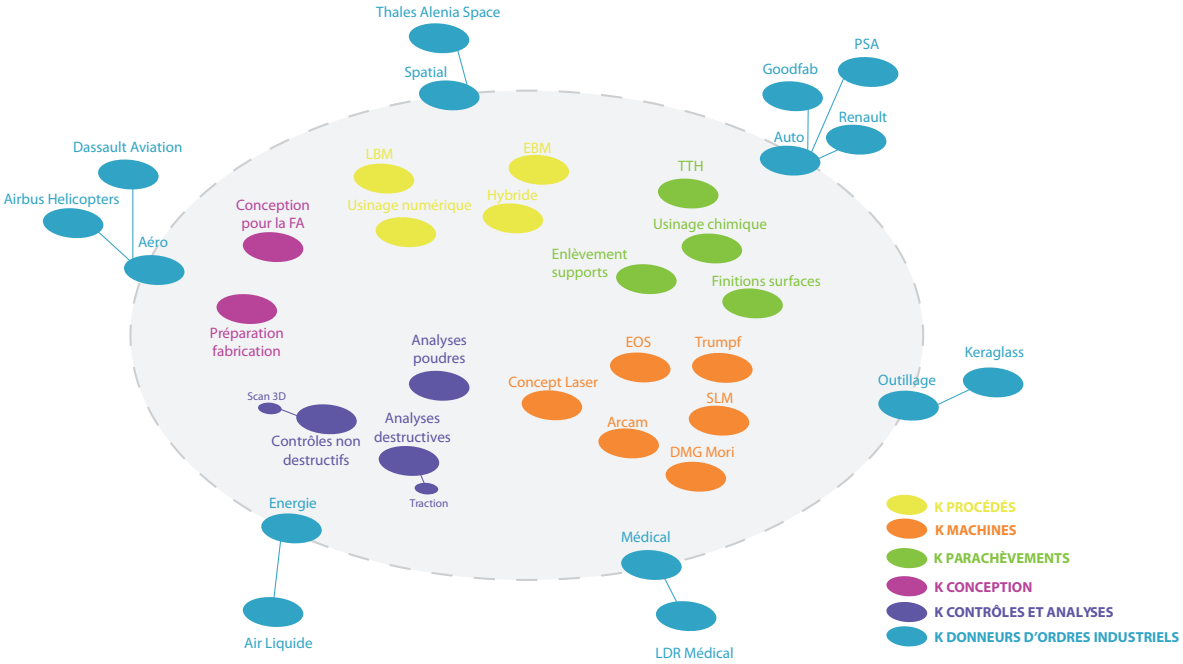


Fig.7 - Sources d'informations chez Poly-Shape

La volonté de formaliser l'ensemble des connaissances dans des documents procéduraux explicites pour différents acteur.trices internes et externes (par exemple les agent.es des audits qualité) est désormais présente au sein de Poly-Shape et plus généralement dans l'écosystème de la fabrication additive. On remarque ainsi des initiatives de publication de règles de conception ou des démarches de normalisation du vocabulaire définissant les procédés et d'autres terminologies [4] **[7, 8]**.

Nous avons observé 4 limites à cette explicitation des connaissances tacites par des documents procéduraux :

1/ **Le partage entre connaissances internes et connaissances des donneurs d'ordres est déséquilibré.** Ce constat émerge de l'observation du projet conduit pour le GIFAS[5] sur le module WP6 à propos de la conception pour la fabrication additive. Il est attendu que chaque entreprise actrice de ce module partage ses connaissances dans l'objectif d'établir un socle commun qui peut être diffusé. Il s'agissait pour elles de donner des informations sur les projets de conception qu'elles ont traités, sur les formations recensées, de constituer un catalogue de composants et des résultats de tests comparatifs de logiciels. Actuellement supportée par une plateforme d'échange en ligne, cela devrait prendre notamment la forme d'un document

[4] ISO/TC 261 Additive manufacturing http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=629086

[5] Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales

Document confidentiel

listant les règles de conception à suivre pour tous les procédés de fabrication additive Métal et d'un catalogue d'exemples de composants. Dans ce module sont mélangés des donneurs d'ordres et des fournisseurs de composants. Or, il est évident que chaque fournisseur a saisi l'intérêt d'avoir un capital connaissances propre pour « peser » face aux donneurs d'ordres.

Au travers du projet pour le GIFAS, nous observons que le partage des connaissances est prudent et inéquitable entre fournisseurs et donneurs d'ordres. Finalement, le risque est que ces documents procéduraux ne reflètent pas la richesse réelle des connaissances. De plus, subissant la position de dépendance aux donneurs d'ordres, il existe aussi pour Poly-Shape un risque de « fuite » de connaissances n'ayant pas fait l'objet d'une formalisation et d'une capitalisation préalable. La relation donneurs d'ordres-fournisseurs évolue-t-elle vers une relation de concurrence ? Comment alors stimuler des coopérations plus équitables entre donneurs d'ordres et fournisseurs ?

2/ **La forme « documents procéduraux » est elle-même limitante.** En effet, nous constatons que les diverses traductions textuelles et graphiques explicites (normes, guides de conception, diagrammes procéduraux, etc) excluent les composants en eux-mêmes (i.e les objets tangibles). Ceux-ci sont considérés comme propriété des donneurs d'ordres. Dans la majorité des projets de conception, Poly-Shape n'était pas autorisé à produire un exemplaire supplémentaire du composant afin de le conserver et de l'exposer comme archive propre. Or ces objets incarnent voire prouvent le niveau de connaissances réel de Poly-Shape et ils sont intelligibles par l'ensemble des acteur.trices de la fabrication additive, expert.e ou non. Seul le catalogue d'exemples de composants constitué à partir de photos, mentionné pour le projet GIFAS, est prévu comme traduction explicite des connaissances incarnées dans ces composants. Ce catalogue est, à notre connaissance, à ce jour non existant et soumis à la bonne volonté des donneurs d'ordres. Reste pour Poly-Shape la possibilité d'employer ses propres ressources pour concevoir et fabriquer des « démonstrateurs », des objets semblables aux composants réalisés pour les donneurs d'ordres. En somme les documents procéduraux ne permettent de formaliser que partiellement les connaissances. Finalement, comment incarner fidèlement les connaissances de Poly-Shape dans des objets tangibles tout en s'affranchissant de restrictions imposées par des donneurs d'ordres ?

3/ **Seules les combinaisons de connaissances récurrentes sont formalisées.** Les démarches de formalisation par documents procéduraux ne peuvent en effet modéliser que des connaissances standards reproductibles. Or, Poly-Shape a potentiellement un capital de connaissances nouvelles qui peuvent émerger mais qui ne sont pas définies dès le départ. Capitaliser uniquement les relations récurrentes fait que Poly-Shape passe probablement à côté de l'émergence de connaissances originales. En tout cas, cette démarche n'incite pas à explorer toutes les possibilités qui peuvent émerger à partir de nouvelles combinaisons de connaissances.

4/ Directement liée à la limite n°3 décrite ci-dessus, **l'instanciation de capitalisation des connaissances est également limitante.** Nous avons observé que, puisqu'elle concerne uniquement les relations récurrentes, la formalisation est réalisée lorsque les connaissances sont matures, déjà mises à l'épreuve sur plusieurs projets de conception. Cette instanciation (i.e moment où les connaissances sont formalisées) exclut la capitalisation de connaissances non encore matures, émergentes.

Dès lors, comment favoriser la capitalisation de connaissances émergentes susceptibles d'évoluer ?

Finalement, le potentiel d'innovation réside dans les sources de connaissances présentes chez Poly-Shape et la prise de conscience de l'enjeu de leur capitalisation. Nous notons aussi les limites de la formalisation des connaissances par des documents procéduraux et de la capitalisation de connaissances à un stade mature.

1.1.1.4 Poly-Shape parmi d'autres : un environnement concurrentiel

Depuis sa création en 2007, la stratégie de développement impulsée chez Poly-Shape tend à la rendre singulière et donc capable de se démarquer vis-à-vis de potentiels concurrents. Cependant, « lorsqu'une industrie est issue d'une innovation technologique radicale, de nouvelles entreprises émergent avec » précisait Garcia **[4]**. En effet ce phénomène, que d'autres industries ont pu connaitre, s'applique dans l'industrie de la fabrication additive. De plus en plus d'entreprises émergent et se positionnent, comme Poly-Shape, en tant que fournisseur de composants pour des applications industrielles, en France et plus largement à l'échelle mondiale. Cet écosystème devient donc de plus en plus concurrentiel.

Selon le rapport du groupe Xerfi **[9]**, la menace de nouveaux entrants dans l'écosystème était déjà forte en 2014. Parmi ces nouveaux entrants sont comptés des constructeurs de machines, des fournisseurs de matériaux ou de matériels, des développeurs de logiciels et des prestataires de services, notamment de fabrication de composants. Concernant les fournisseurs fabricants, potentiels concurrents de Poly-Shape, la barrière d'entrée reste encore aujourd'hui importante : les coûts d'investissement dans les machines de production sont lourds. Le rapport prédit que cette menace devrait augmenter à horizon 2020. En effet, les perspectives de croissance du marché de la fabrication additive attirent de multiples acteurs ayant d'importants moyens financiers et techniques. Entre janvier 2014 et septembre 2016 nous avons pu nous entretenir avec des entreprises ayant différentes stratégies. On a vu des entreprises de production de composants, par exemple Spartacus 3D ou Prismadd s'adosser à des groupes spécialistes de la forge ou de l'usinage (Farinia, Farella) pour bénéficier de leurs moyens financiers, de leurs moyens techniques complémentaires à la fabrication additive et pour mailler rapidement le territoire national. De manière similaire, par des mécanismes de rachats et de fusions, on a vu des entreprises existantes être soutenues par des apports financier, humain et technique de la part de groupes cotés en bourse, c'est le cas d'Initial entré dans le groupe Gorgé par exemple. Nous avons aussi remarqué que des groupes de production industrielle (hors FA) ont créé leur spin-off spécialement dédiée à la fabrication additive (3D&P, GE Additive). Ou encore, des sociétés de prototypage compléter ou recentrer leurs activités sur la fabrication métallique (Erpro, Volum-e ou Sculpteo par exemple). Nous avons aussi suivi l'émergence d'acteurs modestes annonçant des développements, notamment en partenariat avec des institutions de Recherche (Addium, Z3d lab, XtreeE). Nous avons d'autre part remarqué le choix fait par des grands groupes d'intégrer la fabrication additive parmi leurs activités internes plutôt que de faire appel à des fournisseurs externes (Michelin), voire d'intégrer en interne une chaîne de valeurs complète comprenant la construction des machines (General Electric rachetant les constructeurs Arcam et Concept Laser). Ces dynamiques semblent se poursuivre fin 2016 / début 2017 **[10]** et confirmerait donc l'augmentation de la concurrence par l'arrivée ou le développement de nouveaux acteurs concurrents de Poly-Shape.

L'émergence de potentiels concurrents est également visible à l'échelle européenne et mondiale. La cartographie ci-dessous (fig. 8) montre Poly-Shape entourée des principales entre-

Document confidentiel

-prises concurrentes potentielles, notamment présentes en Allemagne et aux Etats-Unis, mais également en France.

Plusieurs de ces sociétés ont suivi les stratégies décrites ci-dessus. Par exemple, Arete-Sigma LLC est née d'une joint-venture entre Sigma labs et Arete Innovative Solutions (juillet 2015). Autre exemple, en novembre 2016 un fabricant industriel aux procédés conventionnels, Oerlikon, a annoncé le rachat de la société allemande CITIM déjà spécialisée en fabrication additive dans le but de créer une chaîne de valeurs complète.
Des fabricants de composants à destination de donneurs d'ordres sont ainsi repérés sur la cartographie ci-dessous à partir des sources notées en pied de page[6].

Fig.8 - Cartographie d'entreprises concurrentes, ouverte à actualisation suivant le lien : https://umap.openstreetmap.fr/fr/map/additive-manufacturing-companies_117882#4/41.18/-389.27

[6]-3TRPD http://www.3trpd.co.uk/
-Oerlikon + CITIM http://www.3ders.org/articles/20161130-oerlikon-acquires-german-metal-3d-printing-company-citim.html
-GKN Sinter Metals http://www.gkn.com/sintermetals/technologyandinnovation/additive-manufacturing/Pages/default.aspx
-3D MT http://www.3dmaterialtech.com/
-Smit Rötgen http://www.smitroentgen.com/
-Schaeffler + DMG Mori https://www.linkedin.com/pulse/schaeffler-dmg-mori-sign-premium-partner-contract-japan-rickermann
-Methods 3D Inc. http://www.mmsonline.com/news/methods-machine-tools-subsidiary-opens-seven-additive-manufacturing-labs-in-united-states
-Höganäs https://www.hoganas.com/en/business-areas/3dprinting/
-Arete-Sigma LLC http://www.areteisllc.com/
-Advanced Materials Technologies http://www.amt-mat.com/capsntechs/3d-metal-printing-additive-manufacturing/
-Tronrud Engineering http://www.tronrud.no/en/services/laser-sinter-systems

La concurrence intra-sectorielle – entre fabricants de composants – restait faible en 2014 **[9]** mais elle est en augmentation. Outre les mécanismes de concentration des connaissances (rachat/fusion des entreprises entre elles) qui peuvent créer des avantages forts, il semble que les donneurs d'ordres aient de plus en plus recours aux méthodes de mise en concurrence des fournisseurs à partir de cahiers des charges exigeants. Il s'agit pour eux de créer leurs panels de fournisseurs (notamment de 1er rang) spécifiquement liés à la fabrication additive. Pour les fabricants de composants, l'enjeu à long terme est de taille, le 1er rang pouvant assurer des commandes sur plusieurs années.
Prenant le point de vue des donneurs d'ordres, le rapport Wohlers 2016 **[10]** nuance cette chronologie. En effet, si les années 2013 à 2016 ont été marquées par des investissements, des développements techniques et des créations d'activités sans précédent, le rapport fait aussi état des déceptions des donneurs d'ordres face aux capacités réelles des procédés de fabrication additive, ils auraient donc freiné leurs demandes (pp 292-293). La reprise de l'émulation semble prévue pour 2017, les revenus mondiaux attendus pour la vente des composants fabriqués et des offres de services s'élèvent à 8,8 milliards $US et sont estimés à 15,8 milliards $US pour 2019.
Selon Wohlers 2016, les freins les plus importants à une diffusion plus large de la fabrication additive restent la latence dans la réactivité et la résistance au changement représentée par les tradition, organizational culture and fixed mindsets **[10]**. Pour pallier ces freins, le rapport recommande aux entreprises de développer une culture de l'innovation et de montrer des cas d'applications convaincants. Plus précisément, il est observé que, parce que la fabrication additive bouleverse les chaînes de connaissances existantes (géométries complexes, longueur des séries, adéquation aux besoins clients, recyclage…), la relation client-fournisseurs doit être changée.

Cet environnement concurrentiel et en partie réfractaire au changement ou ralenti a motivé Poly-Shape à créer une unité de Recherche & Développement en interne, justement pour maintenir sa participation dans la course et pour amplifier son avance vis-à-vis des concurrents. Cette thèse est rattachée à cette unité R&D, celle-ci est donc décrite plus précisément dans la section suivante.

1.1.2 La Recherche & Développement au sein de Poly-Shape

1.1.2.1 Les caractéristiques de l'unité R&D

Nos travaux s'inscrivent plus particulièrement au sein de l'unité R&D qui se structure chez Poly-Shape. Elle compte une douzaine de collaborateur.trices des métiers de l'ingénierie des procédés, de la conception et des matériaux. Cette unité vise 3 objectifs principaux, cohérents avec le stade de développement de Poly-Shape, sur les 4 axes de travail que sont les procédés, la conception, les matériaux et les produits. Elle vise à :

- **Poursuivre les recherches.** Compte tenu de la relative nouveauté de la fabrication additive, il reste des opportunités de recherche de nouveaux matériaux, de nouvelles géométries, de nouvelles applications de la fabrication additive. Il reste également des oppor-

Document confidentiel

-tunités de développement dans les procédés et les logiciels de conception

- **Capitaliser les connaissances Poly-Shape existantes**
- **Valoriser les connaissances Poly-Shape**, notamment auprès des donneurs d'ordres industriels.

L'unité R&D complète le cœur d'activité de Poly-Shape qui reste actuellement la production de composants pour fournir les donneurs d'ordres. Comme décrit dans la chronologie de croissance de Poly-Shape (fig.5), la production tend à être externalisée chez les entités partenaires, tandis que l'unité R&D se construit comme un pôle unique commun à ces différentes entités (aéro, spatial, auto, médical). Cette unité se déploie progressivement et répond à des appels à projets impulsés par des donneurs d'ordres qui «commandent» des études à réaliser et des composants à fabriquer. En d'autres termes, Poly-Shape réagit à des offres des donneurs d'ordres. Le challenge pour Poly-Shape est alors de montrer la pertinence de ses connaissances pour répondre à des cahiers des charges exigeants. De manière générale, cette forme de R&D contribue à l'adoption de la fabrication additive par des secteurs industriels de plus en plus nombreux et soutien la poursuite des recherches.

Par exemple, Poly-Shape est un des acteurs du projet européen MANSYS[7] qui vise à développer une chaîne logistique spécifique à la fabrication additive prenant en compte notamment la gestion des coûts, le recueil des besoins des donneurs d'ordres, la robustesse du réseau d'approvisionnement et enfin l'évaluation environnementale.

Poly-Shape a également pris part au projet FALAFEL[8] , initiative d'un groupement de donneurs d'ordres de l'Aéronautique. Ce projet visait à mettre en œuvre et à valider deux des procédés de fabrication additive comme pertinents et viables pour la production de composants aéronautiques. Le rôle de Poly-Shape au sein de ce projet a notamment été de produire des éprouvettes de tests mécaniques, des composants montrant les grandes dimensions réalisables en Fusion par laser et des composants démontrant la réduction de masse réalisable grâce à la fabrication additive.

Poly-Shape est actuellement un acteur majeur dans le projet FAIR[9] à l'initiative du groupe Air Liquide. Ce projet vise à développer une nouvelle technologie d'échangeur-réacteur basée sur la fabrication additive. Ces composants devront être « plus compacts, moins énergivores et pour un coût moindre ». La contribution de Poly-Shape est attendue sur la conception et sur la fabrication des composants. Une part de l'étude de conception s'attache à concevoir des composants qui rassemblent plusieurs fonctions en un seul composant, tirant ainsi parti d'une caractéristique propre à la fabrication additive : la complexité fonctionnelle.

Finalement, 4 attributs caractérisant cette forme de R&D ont été relevés :

[7] Projet MANSYS (MANufacturing decision and supply chain management SYStem for additive manufacturing) http://cordis.europa.eu/project/rcn/108896_en.html
[8] Projet FALAFEL (Fabrication Additive par Laser et Faisceau d'Electrons) http://www.viameca.fr/assets/files/falafel.pdf
[9] Projet FAIR (Fabrication Additive pour Intensification de Réacteurs) https://www.airliquide.com/fr/media/impression-3d-air-liquide-initie-fair-projet-collaboratif-developper-nouvelle-filiere

- **L'origine du projet.** Les projets sont impulsés par des donneurs d'ordres industriels, selon leurs besoins. Poly-Shape n'est alors pas porteur du projet mais contributeur, l'entreprise est sélectionnée parmi un panel d'autres entreprises concurrentes.
- **Les connaissances impliquées dans le projet.** Dans ces projets, Poly-Shape joue principalement deux rôles : une contribution pour la conception de composants et une contribution pour leur fabrication
- **Le niveau de maturité des livrables.** Le niveau de maturité attendu des composants produits est élevé. En effet, les composants doivent pouvoir être testés dans leur environnement d'usage réel : « le projet couvre les aspects conception, fabrication, fonctionnalisation, intégration et usages de ces nouveaux équipements » [extrait de la description du projet FAIR]. Sur une échelle TRL, ces productions pourraient être placées aux niveaux 6 ou 7.
- **La durée du projet.** Ce sont des projets d'une durée de 3 à 5 ans qui réclament une organisation structurée et un suivi dans le temps long.

Nous avons observé que l'organisation et le mode d'action de cette unité de R&D est soumise à plusieurs risques, à court et plus long terme. Ces risques sont décrits ci-après.

Premièrement les thématiques des projets développés (par exemple l'« échangeur-réacteur » avec Air Liquide) sont dépendantes des initiatives des donneurs d'ordres. Ainsi, la capacité de Poly-Shape à pousser la valorisation d'une partie précise de ses connaissances selon sa propre stratégie de croissance est conditionnée à la volonté de ces donneurs d'ordres et donc limitée. De plus, cette forme de R&D prend les besoins des donneurs d'ordres industriels comme point de départ. Cela circonscrit l'exploration aux besoins qu'ils peuvent formuler et au niveau de connaissances qu'ils ont. Il a ainsi été observé que les projets se heurtent à des résistances au changement et à des comportements non pertinents. Nous avons par exemple entendu des donneurs d'ordres des secteurs de l'Aéronautique et de l'Energie souhaiter « refaire ce composant mais avec la fabrication additive » révélant une volonté d'utiliser la fabrication additive mais une méconnaissance de ses capacités, ou exprimant leur déception face au coût de la fabrication additive comparée aux procédés conventionnels, ou encore montrant une tendance à choisir la fabrication additive à tout prix, même si ce n'est pas pertinent pour le projet concerné, ou encore exprimant des difficultés à projeter des applications de la fabrication additive pour leur secteur. Autrement dit, les donneurs d'ordres ne sont pas nécessairement les moteurs du changement, au contraire, ils peuvent y opposer des obstacles. Il est alors nécessaire d'accompagner cette intégration.

D'autre part, le partage des connaissances est peu équitable. Il est attendu que Poly-Shape transmette ses connaissances aux donneurs d'ordres, à leur demande, tout au long des projets R&D. Ces projets contribuent alors peu à la capitalisation des connaissances de Poly-Shape. Comme indice, nous remarquons que jusque fin 2016, aucun des projets de R&D à l'initiative des donneurs d'ordre n'a donné lieu à un dépôt de brevet avec Poly-Shape dans le rôle du déposant. Poly-Shape est donc restreint à son rôle historique et traditionnel de fournisseur de composants.
De plus, cette forme de R&D est également soumise au risque de diminution des appels à projets. Si les donneurs d'ordres réduisent ou gèlent leurs programmes de développement, Poly-Shape pourrait être touché.
Avec cette forme de R&D, il existe aussi un risque à plus long terme. En effet, il est possible qu'elle soit fragilisée par l'environnement devenu concurrentiel. Quid de Poly-Shape si d'autres fournisseurs peuvent également produire des composants de grandes dimensions ? Quid de Poly-Shape si d'autres prestataires peuvent également fournir des conceptions de composants allégés ?

Document confidentiel

Globalement, quid de la R&D Poly-Shape lorsque les problématiques aujourd'hui spécifiques deviendront des services standards proposés par différents fournisseurs ?

A partir de ces constats, la Direction impulse donc une seconde forme de R&D, proactive, c'est-à-dire dont les projets sont à l'initiative de Poly-Shape, en parallèle de la démarche R&D existante qui répond à des projets. Ces travaux de recherche s'inscrivent directement dans le développement de cette unité R&D proactive. Ils devront contribuer à répondre aux risques mentionnés et la méthodologie proposée devra être cohérente avec ses attentes.

Pour ces raisons, cette (future) unité proactive est décrite dans la section suivante.

1.1.2.2 Vers une unité R&D proactive

Le potentiel d'innovation lié à la richesse des sources de connaissances de Poly-Shape a été décrit. Nous avons montré aussi la nécessité de faire émerger de nouvelles connaissances en combinant les sources existantes, ce pour démarquer Poly-Shape de la concurrence et donner une alternative à la dépendance aux donneurs d'ordres. Une seconde forme de R&D se dessine donc dans la poursuite de la construction de l'unité : une forme plus « proactive ». Cette forme de R&D n'est pas encore effective chez Poly-Shape, l'un des enjeux de nos travaux est justement de contribuer à son développement. Cette dynamique est encore peu visible sur le terrain mais impulsée par la Direction, convaincue que le capital connaissances de Poly-Shape est assez riche « pour développer ses propres produits ».

Cette orientation vise plusieurs objectifs :

- **Positionner Poly-Shape en initiateur des projets R&D** (et non uniquement contributeur) afin d'avoir la main sur le choix des connaissances à développer et à valoriser
- **Favoriser les combinaisons originales** entre des connaissances déjà existantes pour en faire émerger de nouvelles et afin d'exploiter le potentiel d'innovation de ces connaissances décontextualisées (i.e connaissances dont la production n'est pas liée à une thématique ou une demande imposées par des donneurs d'ordres)
- **Formaliser et capitaliser des connaissances émergentes** afin que Poly-Shape puisse participer à la compétition par l'innovation
- **Proposer un accompagnement des individus** pour faciliter le saut technologique à faire, notamment face aux nouvelles connaissances à intégrer
- **Créer la demande** plutôt que réagir à l'expression des besoins des donneurs d'ordres afin de s'affranchir des obstacles au changement
- **Accélérer le déroulement des projets R&D**, notamment les coopérations avec les donneurs d'ordres afin d'impulser un plus grand nombre de développement de projets et ainsi une dynamique d'innovation répétée
-

Etonnamment, cette orientation fait écho à la stratégie d'offres innovantes à laquelle ont eu (et ont encore) recours les industries en perte de vitesse dans les années 1990, écrasées par une très forte concurrence et une raréfaction de la demande, comme par exemple l'automobile, le bâtiment et la chimie **[11] [12]**.

Cette stratégie consiste à ne plus attendre les demandes de clients mais à constituer un portfolio de projets peu matures mais originaux qui peuvent être présentés à ces mêmes clients en vue d'initier de potentiels développements. L'émergence « naturelle » de ces projets aurait été très improbable sans la démarche proactive de ces entreprises.

Dans le cas de l'industrie de la fabrication additive chez Poly-Shape, il s'agit, non pas d'attendre la crise, mais d'anticiper en faisant cohabiter les deux démarches : réactive et proactive.

Les recherches sur la compétition par l'offre innovante prescrivent des conditions qui permettent de mettre en place un portfolio de projets de ce type **[13] [11]**. Certaines de ces prescriptions concernent l'organisation de l'entreprise et d'autres la conception, c'est-à-dire à la fois la gestion du projet et le développement de nouveaux produits.

Ainsi, il est tout d'abord conseillé de communiquer en interne et à destination des donneurs d'ordres. Pour expliquer, en interne, que constituer un portfolio d'offres innovantes est une activité nécessairement différente de la production routinière de l'entreprise et que cela peut heurter le rythme habituel des activités. En externe il s'agissait d'expliquer que cette activité ne peut se faire sans la participation des donneurs d'ordres. En effet, cette situation d'anticipation où la conception de l'offre est conjointe entre le fournisseur qui apporte un type de connaissances et le donneur d'ordres qui apporte ses connaissances en termes de besoin et d'usages fait naître **une relation de co-développement**.

Les travaux de JP. Deschamps sur le management de l'innovation **[14]** précisent aussi que des compétences singulières sont nécessaires à l'entreprise pour mettre en place cette offre. Parmi celles-ci figurent « la créativité, les savoir-faire, l'état d'esprit et les comportements générateurs d'innovation ». En effet, l'auteur précise que l'innovation est composée de deux grandes phases. La phase amont est floue et mise sur la créativité tandis que la phase aval est véloce, elle mise sur la discipline pour aboutir à la mise sur le marché. Dans la phase amont, on trouve un processus de recherche de nouveaux projets, nouveaux concepts, nouveaux marchés. Les acteur.trices de cette phase doivent avoir « une tolérance naturelle pour l'ambiguïté, l'incertitude », une curiosité et une écoute tournées vers les nouvelles technologies, les nouvelles connaissances, « les idées neuves ».

Au-delà des compétences individuelles, cette stratégie d'offres innovantes appelle à mobiliser, en amont, des connaissances existantes dans l'entreprise. Mais elle mets aussi en lumière la nécessité « d'explorer et de développer de nouvelles poches de connaissances » **[15]** car, par nature, la finalité de ces projets est difficile à spécifier au départ du processus, elle se précise au coup par coup. On note l'utilisation du terme Exploration que nous développerons dans l'état de l'art. Ainsi, le processus traditionnel Recherche puis Développement n'a plus cours, les deux phases se superposent. L'enjeu est alors d'explorer simultanément les possibilités techniques et les valeurs d'usages **[16]** (§2.7).

Pour atteindre les objectifs de Poly-Shape dans le développement de l'unité R&D et selon les prescriptions sur la stratégie d'offres innovantes, nous proposons de représenter le processus de R&D proactive par la figure 9 ci-après.

Ici, c'est bien Poly-Shape qui est à l'initiative des projets de R&D (partie encadrée), avant d'aller vers les donneurs d'ordres dans le but de développer une relation de co-développement.

Document confidentiel

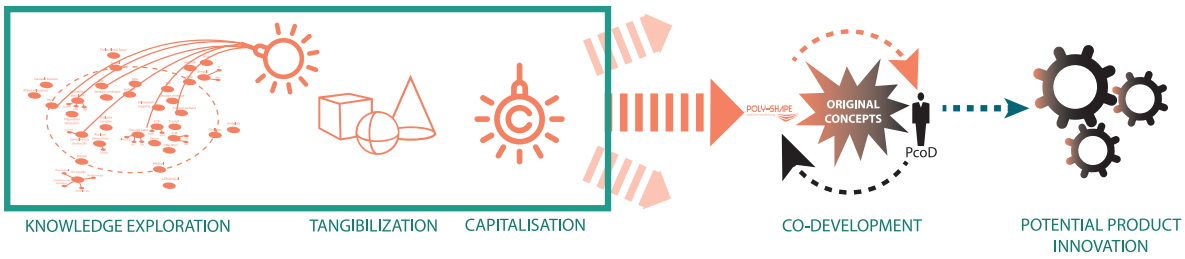


Fig.9 - Processus d'une unité R&D proactive chez Poly-Shape

En se basant sur la richesse des sources de connaissances de Poly-Shape, nous retenons l'**Exploration** comme démarche visant à combiner des connaissances existantes afin d'en faire émerger de nouvelles (1ère étape sur fig.9). En vue d'être capitalisées par la protection intellectuelle (dépôt d'enveloppes Soleau, de brevets), ces connaissances émergées seraient formalisées par des objets tangibles prouvant leur faisabilité technique en fabrication additive.

Ces trois étapes EXPLORATION-FORMALISATION-CAPITALISATION seraient réalisées en interne chez Poly-Shape afin d'éviter la diffusion de connaissances de façon prématurée.

Ce n'est qu'à l'issue des démarches de capitalisation que les principes techniques pourraient être proposés, diffusés à un ou plusieurs donneurs d'ordres. En l'occurrence ici, ces entreprises n'étant pas à l'initiative des projets, elles deviendraient des Partenaires de co-Développement (noté PcoD sur fig.9) plutôt que des donneurs d'ordres. Ensuite le co-développement impliquerait des échanges « donnant-donnant » de connaissances. Poly-Shape leur apporterait des connaissances à la pointe des possibilités techniques tandis que les partenaires apporteraient leurs connaissances sur les applications potentielles dans leurs produits et sur les marchés potentiels. Ce partage équilibré pourrait permettre de renforcer le capital de Poly-Shape et/ou de le valoriser via des applications. Les entreprises clients seraient également ainsi accompagnées dans l'intégration de la fabrication additive. Cette relation de co-développement devrait ainsi générer des concepts créatifs applicables dans les secteurs industriels impliqués. Ce processus permettrait de diffuser, très tôt, des connaissances peu matures et de faire émerger leurs valeurs d'usages. L'objectif serait alors de les explorer en orientant les développements en fonction des partenaires. Ainsi, cette stratégie devrait permettre d'explorer un même principe technique pour de multiples applications différentes et/ou pour des secteurs industriels différents.

Finalement, ce processus devrait aboutir, à terme, à des innovations produit. Cette finalité est un objectif à plus long terme, qui ne peut pas encore être observé, mesuré, évalué. Il est donc hors du scope de nos travaux. En ce sens, la définition de l'innovation par ses stades connus (incrémental, radical…) est inapplicable pour le cas Poly-Shape. Nous nous attacherons alors à définir autrement les régimes d'innovation (§2.7).

Finalement, le fait de vouloir s'inscrire dans la future mise en place de cette nouvelle organisation au sein de Poly-Shape et dans ses relations avec ses partenaires de co-développement nous conduit à plusieurs interrogations :

- Comment favoriser l'exploration des connaissances pour en faire émerger de nouvelles ?
- Sous quelle forme mettre en évidence et diffuser l'état avancé des connaissances de Poly-Shape auprès des partenaires ?
- Comment favoriser la génération d'idées et de concepts à partir de connaissances émergentes ?
- De plus, comment le faire dans une organisation de co-développement, c'est-à-dire où deux entreprises y trouvent leurs intérêts ?
- Comment accompagner les collaborateur.trices de Poly-Shape et les partenaires vers le changement (autrement dit comment leur faciliter l'intégration et la manipulation des connaissances fabrication additive ?)
- Comment favoriser le développement d'un grand nombre de projets de R&D (objectif d'accélération) ?

Ces questionnements ayant fait écho, hors de la fabrication additive, dans les champs de recherche de la créativité et de l'innovation dans les entreprises, nous faisons alors l'hypothèse générale que s'intéresser plus particulièrement à la créativité permettrait de répondre à ces enjeux. A partir des constats relevés, des objectifs fixés pour l'unité de R&D proactive et des questionnements en suspends, une question de recherche globale est alors formulée : **Comment intégrer la créativité dans l'innovation en fabrication additive, dans un contexte de co-développement ?** Chercher à répondre à cette question c'est alors contribuer au déploiement de l'unité R&D proactive chez Poly-Shape.

Cette culture de la créativité n'est, à priori, pas dans l'ADN de Poly-Shape qui est largement concentrée sur les technologies. Les caractéristiques de ce terrain sur lesquelles il est possible de s'appuyer pour développer une approche par la créativité seront donc synthétisées dans la section suivante .

1.1.3 Poly-Shape et la créativité : une première approche

Nous l'avons décrit, la création et la croissance de la société Poly-Shape sont basées sur la technologie. Ce terrain fortement lié à l'ingénierie fait maintenant face à la nécessité « d'ajouter une corde à son arc » pour rester compétitif dans une industrie qui devient concurrentielle et surtout accompagner ses donneurs d'ordres dans le passage vers le paradigme additif. La décision de s'orienter vers une unité R&D proactive va en ce sens.

Ainsi il n'y a pas de « passif » ou d'historique lié aux approches par la créativité au sein de Poly-Shape. Nous avons noté l'absence d'une entité ou d'une cellule dédiée à la créativité, de ressources dédiées ou d'un comité de direction de l'innovation. Il n'y a pas, à notre connaissance, de ressources témoignant d'expériences précédentes dans la construction de théorie ou l'application de méthode de créativité. D'un point de vue hiérarchique, il ne semble pas y avoir de programme de management de la créativité annoncé. En interne, la sensibilisation ou la participation récurrente à des séances de créativité n'est pas encore présente.
Pour autant, nous avons relevé des caractéristiques qui devraient être favorables au développement d'une approche par la créativité :

Document confidentiel

- la Direction présente elle-même cette curiosité et cette appétence pour l'émergence de nouveaux concepts. Elle impulse cette stratégie.

- La PME Poly-Shape présente actuellement peu de niveaux hiérarchiques. Cette organisation agile et la proximité entre R&D et Direction ouvrent à une liberté dans les actions et la mise en place d'initiatives. Le sentiment d'appartenance, d'implication et d'attachement, souvent présent dans les PME, participe également à la motivation dans des activités encore inhabituelles pour ses collaborateur.trices.

- Le caractère « en construction » - donc malléable - de Poly-Shape favorise l'introduction d'une nouvelle approche. En effet, les rejets ou les résistances dus à des habitudes et une organisation ancrée depuis de nombreuses années devraient être moindres.

- La concentration des connaissances et le réseau important de partenaires industriels représentent un terreau fertile pour l'émergence de combinaisons originales de connaissances et la génération de nouveaux concepts.

- La distinction entre rythme de la production et rythme de la R&D s'étant mise en place pendant ces travaux, la prise de recul pour voir autrement, détourner, manipuler ou diverger autour des connaissances présentes est rendue possible.

- La curiosité des collaboratrices et collaborateurs vis-à-vis de la créativité constitue une première motivation pour qu'i.elles participent aux séances de créativité.

- Nous avons remarqué que des collaborateurs.trices formulent, de manière informelle, des idées nouvelles en dehors des missions qui leur ont été attribuées et en dehors d'un cadre dédié à cette attitude. Une « attitude créative » est donc déjà palpable.

Finalement, ces travaux ont pour ambition de poser de premiers jalons d'une approche par la créativité pour la R&D fabrication additive. Ce constat engendre deux conséquences. D'une part, la mission est double, elle concerne à la fois la pratique dans l'entreprise et la recherche. Cela conduit donc à suivre une démarche de recherche-action (§1.2.2). D'autre part, elle positionne les enjeux : ils ne se situent pas dans le développement d'une théorie basée sur l'analyse de nombreuses expériences précédentes mais plutôt dans le développement d'une méthode et d'outils pragmatiques, actionnables sur ce terrain de recherche pour initier cette mise en relation entre fabrication additive et créativité.

1.2. Contexte académique

Les sections précédentes ont décrit la partie industrielle du contexte dans lequel s'inscrit cette thèse. Il s'agit donc maintenant de décrire la seconde partie : le contexte académique. Ainsi, nous soulignerons trois centres d'intérêt majeurs du Laboratoire de Conception de Produits & Innovation : la créativité, les représentations intermédiaires et les nouvelles technologies.

1.2.1 Le Laboratoire de Conception de Produits & Innovation

Conjointement au contexte industriel, ces travaux ont été conduits au Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI) de l'école des Arts et Métiers ParisTech. Créé en 1978, le LCPI est reconnu pour ses recherches en sciences de la conception, notamment sur les processus de conception et d'innovation **[17]**. Par processus s'entend une succession de boucles permettent de passer d'un état immatériel (idée, concept) à diverses formes de concrétisation (croquis, modèles 3D, etc.) tout en tenant compte d'un certain nombre de contraintes (fonctionnalité, fabricabilité, sensorialité, coût, critères esthétiques, etc.). Les recherches sont orientées sur la compréhension et la modélisation de ces processus, leur optimisation et leur instrumentation dans le but de guider l'activité des conceptrices et concepteurs dans le cheminement vers des solutions innovantes.

Ainsi, les travaux du Laboratoire sont conduits sur les 3 axes suivants :

1. **L'intégration des métiers** – Les travaux plus anciens en sciences de la conception ont montré que la conception est une activité par essence pluridisciplinaire, qui convoque donc différents métiers, notamment de l'ergonomie, du design industriel, de l'ingénierie et de l'informatique. Les travaux du laboratoire en extraient des données, connaissances, méthodes, outils, compétences, théories ou encore concepts et étudient leurs contributions dans les processus de conception.
2. **Les nouvelles technologies** – notamment celles qui permettent de formaliser les représentations intermédiaires, ces concrétisations des connaissances et des attributs du produit qui sont créées au fil des processus de conception.
3. **La formalisation des processus** – c'est-à-dire le développement de méthodes et d'outils supports à la conception de produits innovants dans un contexte collaboratif

1.2.1.1 Focus sur les représentations intermédiaires et la créativité

L'approche du Laboratoire est originale au sens où elle est plus particulièrement centrée sur les phases amont des processus de conception de produits. Les étapes couvertes par l'expression phases amont varient car les processus de conception présentent des décompositions et terminologies qui leurs sont propres **[18]**. Une synthèse sur cet aspect sera proposée dans l'état de l'art (§2.8) dans la perspective de positionner cette thèse au regard des méthodologies de conception.

Dans les travaux du laboratoire, le focus est mis sur deux caractéristiques :

- La mobilisation et la construction de représentations intermédiaires au cours des activités de conception.
- Le rôle prépondérant de la créativité comme compétence clé pour aboutir à des solutions innovantes.
-

Nous nous attacherons donc dans l'état de l'art, à expliciter d'une part, les définitions et rôles des représentations et objets intermédiaires et d'autre part les mécanismes de la créativité, pour les questionner vis-à-vis de la fabrication additive.

Document confidentiel

Cette thèse s'appuie sur l'historique du laboratoire qui a en effet montré un appétit particulier pour les métiers du design industriel en coopération avec les métiers de l'ingénierie. Ceci est notamment dû au fait que les designers cultivent généralement leur capacité créative, reconnue clé pour l'innovation et des aptitudes dans la construction de représentations. Au départ centrés sur les contributions des designers pour les aspects de stylisme et d'esthétique **[19]**, les travaux ont évolués en parallèle des pratiques professionnelles des designers **[20, 21]**. Ainsi, les thèses ont exploré le design centré sur les utilisateurs (de produits), les usagers (de services) **[22-24]**. Puis plus particulièrement sur les interactions entre humains et objets au travers des stimuli sensoriels **[25]** et des scénarii d'expériences **[26, 27]**. A la suite de travaux présentant la nécessité d'intégrer la créativité dans l'industrie **[28]**, des efforts particuliers ont été mis sur la compréhension des mécanismes de la créativité, dans le but de favoriser d'une part le développement de cette compétence individuelle et collective et, d'autre part, l'aboutissement à des produits innovants. Ainsi, les travaux de Mougenot **[29]** ont étudié l'impact des sources d'inspiration et d'information sur la créativité. Récemment, la thèse présentée par Bila-Deroussy **[30]** a initié au Laboratoire les recherches pour construire une théorie générale sur la créativité.

1.2.1.2 Focus sur les nouvelles technologies

Les travaux du laboratoire s'intéressent aussi particulièrement à la contribution des nouvelles technologies. On peut citer les recherches sur la contribution de la Réalité Virtuelle pour la phase d'inspiration des concepteur.trices et pour la construction d'objets intermédiaires dans un environnement immersif **[31]**. L'intelligence artificielle et ses algorithmes ont également été explorés comme technologies support à la numérisation des activités de conception, notamment en phase amont pour la collecte et la manipulation des informations inspirantes **[29] [32]**.

Concernant la fabrication additive, un premier lien avait été établi avec la conception, sous l'angle du prototypage rapide, par la thèse « Formalisation d'une démarche pour la conception d'un processus de prototypage rapide » **[33]**. Ces travaux se sont moins intéressés aux qualités des objets ainsi fabriqués qu'aux conséquences du prototypage rapide sur les méthodes de conception. Soutenu en 1999, ce travail initiateur ne prend plus en compte l'état actuel des technologies qui ont connu une formidable accélération et appellent donc de nouveau à étudier les relations entre conception et fabrication additive.

Ainsi nous observons que les technologies sont également étudiées du point de vue des connaissances nouvelles que les concepteur.trices doivent intégrer. En ce sens, la thèse de Laverne **[34]** sur une proposition d'intégration amont de connaissances liées à la fabrication additive s'inscrit à la suite de ces travaux.

1.2.2 Principes généraux de recherche-action

La recherche-action a été, à l'origine, développée pour les sciences sociales qui, compte tenu de l'aspect évolutif de leur objet de recherche – les humains – ne pouvaient pas utiliser les méthodes des sciences naturelles dont la validité est basée sur la réplicabilité des résultats expérimentaux **[35]**.

Sous l'impulsion de H. Simon **[36]** et, en France de JL. Le Moigne **[37]** les sciences de la conception ont largement adopté la recherche-action, y voyant notamment l'intérêt des approches cognitives pour l'étude des concepteur.trices. Cette méthodologie globale a ensuite été précisée par des nuances, la recherche-participative **[38]**, la recherche-intervention **[39]**, ou encore la recherche-projet **[40]**. Sans entrer ici dans ces discussions épistémologiques qui animent aujourd'hui la recherche en design **[41]**, nous décrivons ici les principes généraux de la recherche-action retenus comme guide pour nos travaux.

Tout d'abord, nous retenons que si la recherche-action est proche de la Recherche & Développement (notamment par la participation à des cas d'études) elle s'en distingue parce que l'un de ses objectifs est d'aboutir à une méthodologie et un modèle qui la représente **[42]** qui peuvent contribuer à l'enrichissement des connaissances en sciences de la conception. En ce sens, on peut dire que la recherche-action inclut les projets de R&D mais qu'elle va au-delà. Adopter une démarche de recherche-action c'est donc s'impliquer à la fois dans l'initiative des projets, dans leur conduite et dans leur réalisation mais aussi dans l'analyse des activités et leur communication. C'est avoir une double casquette, celle de chercheur.e-praticien.ne. Il s'agit alors d'être conscient.e que cette implication oriente la recherche, consciemment ou non, en fonction d'une vision, d'intentions personnelles **[43]**.

Adopter une démarche de recherche-action c'est également avoir conscience que les biais peuvent être multipliés du fait que les expérimentations sont conduites avec des personnes humaines à un instant t et dans des milieux réalistes. Il n'est de fait pas possible d'anticiper tous les aléas de l'activité des entreprises (i.e une réunion stressante juste avant l'expérimentation, un changement de salle imprévu, une mésentente entre collègues, etc.). Ces difficultés peuvent ainsi rendre difficile la conduite d'études comparatives pour lesquelles il est nécessaire de reproduire des protocoles rigoureusement identiques **[35].**
Une recherche-action c'est finalement une réponse à une situation particulière dans un contexte singulier. Et cette unicité du contexte pose des obstacles à la généralisation des résultats expérimentaux vers d'autres contextes, ce qui peut mettre en doute la fiabilité de la recherche **[44]**.

Ces limites liées aux caractères subjectif et biaisé de la recherche-action sont inévitables mais elles peuvent être compensées. Ainsi, nous retenons 4 clés pour guider le déroulement de cette thèse :

1. **La démarche sera nécessairement cyclique et évolutive [1] [45]**. Au départ d'une démarche de recherche-action se trouve le plus souvent un ou des « incidents critiques », des problèmes constatés, des besoins ou une volonté de changements exprimée. Une 1ère phase de la démarche consiste donc à décrire l'existant, à « diagnostiquer ». Une 2ème phase vise à envisager des plans d'actions pour répondre à l'incident critique. Elle donne lieu à la formulation, dans un premier temps, de questions de recherches ou de « thèmes » et non

Document confidentiel

1. pas d'hypothèses **[35]**. Dans la 3ème phase les actions sont réalisées de manière mesurée et contrôlée. La 4ème phase vise à évaluer les actions réalisées selon des critères définis à l'avance ou qui ont émergés au cours des actions. Enfin l'analyse et l'interprétation de ces résultats permettent d'identifier les connaissances que l'on peut en retirer et si nécessaire, de formuler des hypothèses à challenger (ce qui fait reprendre le cycle à la phase 2).

2. **Viser l'authenticité plus que la fiabilité**. La notion d'authenticité s'appuie sur le fait qu'une diversité et un nombre important d'acteurs et d'actrices « réel.les » participent aux travaux, notamment dans les phases expérimentales. Ces personnes apportent alors une caution aux travaux parce qu'elles s'y reconnaissent, elles sont concernées par les interrogations soulevées. L'authenticité peut alors servir de substitut à la fiabilité **[44]**.

3. **Qui participe n'évalue pas**. Justement parce que la recherche-action s'appuie sur l'authenticité, il est nécessaire de distinguer les personnes qui évaluent les résultats de celles qui ont participé aux expérimentations.

4. **Utiliser des outils rigoureux pour collecter les données**. La démarche présuppose de choisir des outils connus souvent utilisés dans les méthodes de recherche qualitative comme par exemple l'observation des participants par vidéo et photographie, l'analyse d'études de cas ou les comptes-rendus d'évènements.

Cette thèse cherche donc à suivre ces principes généraux de la recherche-action, notamment en adoptant la double posture de chercheuse-praticienne et en articulant les expérimentations par des projets de conception.

1.3 Les enjeux de cette recherche

Parce que ce travail est ancré dans un contexte industriel et dans un contexte académique, les enjeux concernent à la fois la production de connaissances scientifiques et la production de contenus pragmatiques porteurs de valeurs pour la société Poly-Shape. Parce que nous avons exploré deux thématiques actuellement sous le feu des projecteurs, la fabrication additive et la créativité, des enjeux économiques plus larges sont également présentés.

1.3.1 Enjeux scientifiques

Pour accompagner les développements techniques de la fabrication additive, de nombreux efforts de recherche ont été investis dans le développement de méthodes et de règles de conception spécifiquement orientées pour ces procédés. Ceux-ci remettent en question de nombreuses connaissances fondamentales des concepteur.trices et, finalement, l'intégration des nouvelles connaissances et habitudes se heurtent à leur complexité, à la résistance au changement et aboutissent régulièrement à refaire l'existant.

Peu de recherches se sont concentrées sur les phases amont de la conception pour la fabrication additive. Or, de nombreux travaux en sciences de la conception, non liés à la fabrication additive, ont montré que les toutes premières étapes du processus sont cruciales pour les personnes car c'est pendant ces phases que leurs cerveaux intègrent et manipulent plus facilement de nouvelles informations pour générer des idées et des concepts créatifs. En orientant le focus principal sur les aspects technologiques plutôt qu'humains, la conception pour la fabrication additive semble donc occulter les apports venus d'autres orientations des sciences de la conception, en particulier venus des travaux sur les mécanismes de la créativité. Notre projet de recherche vise donc à établir un lien entre créativité et fabrication additive. Plus précisément, nos travaux visent à proposer une méthode de créativité basée sur les spécificités de la fabrication additive. Cette mise en relation devrait favoriser l'intégration de nouvelles connaissances et leur manipulation et donc favoriser la génération d'idées et de concepts créatifs relatifs à des applications de la fabrication additive. En ce sens, aborder la thématique de la fabrication additive du point de vue des sciences humaines pourrait enrichir les sciences de l'ingénieur.

Par un effet de miroir, ces travaux pourraient aussi contribuer à enrichir la recherche sur la créativité. Cette thèse présente une étude pragmatique. Autrement dit, nous nous intéressons aux résultats des séances de créativité de groupe pour en déduire des prescriptions plutôt qu'à la construction d'une théorie générale sur la créativité. Ainsi, nous montrons les impacts de la fabrication additive, notamment sur la définition et le rôle des objets intermédiaires qui tendent à devenir des objets déclencheurs d'expériences.

D'un point de vue plus élargi, nous espérons contribuer au débat national animé sur la définition de la recherche en design. Le design n'étant pas reconnu comme discipline scientifique, les travaux de recherche en design sont aujourd'hui systématiquement rattachés à d'autres disciplines (histoire de l'art, informatique, sciences politiques, architecture, ingénierie, etc.). Ce statut génère de nombreux questionnements scientifiques et différents positionnements. Le design est-il l'objet de la recherche ou un prétexte à l'étude d'une autre discipline ? Est-ce qu'on étudie les pratiques des designers ou les résultats produits ? Le débat soulève des questions étymologiques : recherche pour, en, sur, par ou avec le design **[41]**. Cela soulève également des questions épistémologiques. Faut-il formaliser les méthodes de recherche en design ? Dans les méthodologies de recherche, quelle place pour la pratique des projets de design ? La fédération des doctorant.es et des jeunes docteur.es en une association, fondée en 2014, Design en Recherche[10] illustre cette diversité de positionnements.

Empruntant des connaissances techniques traditionnellement liées à l'ingénierie, modélisant une méthode selon les principes des sciences de la conception et cela avec une démarche de recherche intégrant la pratique, nos travaux plaident donc pour une orientation de la recherche en design vers la recherche-action telle qu'elle est pratiquée en génie industriel par des designers.

[10] Association Design en Recherche fondée en 2014 http://designenrecherche.org/

Document confidentiel

1.3.2 Enjeux économiques

Nos travaux visent à produire une méthode et des connaissances scientifiques sur un processus créatif par et pour la fabrication additive mais, ancré dans le contexte Poly-Shape, il est attendu de notre recherche qu'elle génère aussi des résultats porteurs de valeurs ajoutées et, à court terme, actionnables sur ce terrain.
En ce sens, notre démarche de recherche-action intègre la réalisation de projets de R&D. Au-delà de leurs apports expérimentaux, les résultats de ces projets devront contribuer au capital propriété intellectuelle de la société Poly-Shape. De plus, nos travaux devront participer, à moyen terme, à la création d'une nouvelle activité de Poly-Shape : l'organisation et la conduite de séances de créativité de groupe à destination de grands groupes industriels. Cette impulsion devra être donnée par l'expérimentation #2 avec le groupe Air Liquide.

Il a été précédemment souligné que l'industrie de la fabrication additive entrait dans une compétition concurrentielle sur l'innovation qui ne concerne plus uniquement la production de composants mais aussi les prestations de services qui favorisent la diffusion de la fabrication additive et la génération-capitalisation de nouvelles connaissances. Au-delà de cette thèse, la créativité est désormais reconnue comme étant intrinsèque à l'innovation. Chercher à lier durablement, en recherche comme dans les entreprises, créativité et fabrication additive pourrait donc être, à plus long terme, un facteur favorisant la compétitivité des entreprises de cette industrie.

Hors fabrication additive, la créativité est l'objet d'un fort intérêt. C'est une valeur recherchée par les entreprises, notamment dans les secteurs où la compétition par la technologie rencontre ses limites. Si elle est présente chez tous les individus, la créativité est particulièrement cultivée par les designers au long de leur cursus. « I.elles deviennent ainsi des créateurs-concepteurs et créatrices-conceptrices capables d'être à la fois les inventeur.trices et les promoteur.trices de la nouveauté, en charge de l'émergence et du développement industriel des inventions, pour et au sein même de l'entreprise » **[46]**.

En ce sens, intégrer durablement une approche créative dans la méthodologie de travail de l'unité R&D d'une entreprise industrielle basée sur la technologie pourrait participer à la transformation actuelle que vit la profession du design industriel. Les designers sont progressivement intégré.es dans des entreprises où i.elles ne sont traditionnellement pas attendu.es. Leurs rôles sont étendus au-delà du rôle de technicien.ne pour aller vers le ou la designer chef.fe de projet voire, pour agir plus profondément sur l'entreprise, incarner le ou la designer stratège [11], [12]. A l'inverse des prestations ponctuelles fournies par des consultant.es appliquant des techniques de créativité « clé en main », ou des designers freelance, cette tendance montre la nécessité d'agir avec les designers sur la durée, en cohérence avec le temps long qui permet les véritables changements transverses dans les entreprises. En somme, nos travaux pourraient participer à l'affirmation d'une nouvelle forme du métier de designer industriel.

[11] Embaucher un designer : une opportunité, mais surtout un risque ! http://bluenove.com/blog/embaucher-un-designer-une-opportunite-mais-surtout-un-risque/
[12] Peut-on innover en France avec le Design Thinking ? https://graphism.fr/peut-on-innover-en-france-avec-le-design-thinking/

Aborder la fabrication additive par la créativité c'est aussi participer au courant de fond qui affirme que les innovations technologiques doivent nécessairement être accompagnées par des changements sociaux, humains. Le manque d'accompagnement c'est prendre le risque de se heurter à la résistance aux changements, de chercher à faire parler des clients qui ne peuvent pas dire ce qu'ils attendent de la technologie puisqu'ils n'en n'ont pas encore besoin ou d'induire des comportements non pertinents (i.e refaire les produits existants, en rester à l'effet « whaou ! » ou vouloir à tout prix utiliser la fabrication additive même dans le cas où ce choix de procédés n'est pas pertinent[13]) et donc finalement, prendre le risque de ne pas pouvoir explorer le potentiel de la fabrication additive. Accompagner les changements par des formations reste une réponse partielle. Le catalogue des formations disponible et la tendance des MOOCs [14] témoignent d'un courant qui choisit d'implanter de nouvelles connaissances théoriques via une forme magistrale. Nos travaux devront s'inscrire dans un courant alternatif. Dans ce contexte, il s'agira plutôt de concevoir des scénarii d'interactions entre des humains et des objets technologiques. Ces interactions, au sens de Fischer **[47]**, permettraient de manipuler les connaissances sur la fabrication additive pour que les concepteur. trices et les partenaires de co-développement se l'approprient et s'en inspirent. Ainsi, nos travaux pourraient contribuer à convoquer, dans l'industrie de la fabrication additive, des métiers connexes aux traditionnel.les ingénieur.es comme par exemple issus de la psychologie, de la sociologie et du design.

[13] De l'intégration de la FA vers l'innovation par et pour la FA, les processus de Deloitte https://dupress.deloitte.com/content/dam/dup-us-en/articles/3d-printing-product-design-and-development/DUP_708-Figure2.jpg

[14] Massive Open Online Courses comme par exemple : La fabrication additive pour tous, Apprendre l'impression 3d avec Sculpteo

Document confidentiel

Synthèse du chapitre 1

Ce chapitre 1 a décrit les caractéristiques du contexte industriel puis du contexte académique. Enfin, avec un point de vue plus large, les enjeux scientifiques et économiques liés à ces travaux ont été présentés. Cette synthèse souligne les éléments à retenir :

Poly-Shape concentre une somme importante de connaissances diversifiées relatives à différents procédés, matériaux et cas d'études. Le terme Connaissances est à comprendre dans sa définition regroupant savoir-faire pratiques + connaissances théoriques

L'industrie de la fabrication additive devient concurrentielle et Poly-Shape, actuellement, capitalise et valorise peu ses connaissances riches, il est nécessaire de favoriser cela

Le développement d'une unité R&D proactive vise à pallier ces fragilités, notamment en visant les objectifs de :

- Equilibrer les relations avec les donneurs d'ordres par le co-développement
- Capitaliser les connaissances dès leur stade émergent
- Continuer à faire émerger de nouvelles connaissances
- Accompagner les individus dans l'intégration des connaissances et leur exploration
- Favoriser la génération d'idées et de concepts à partir de ses connaissances

Nous faisons l'hypothèse générale qu'une approche par la créativité peut répondre à ces enjeux

Le contexte à la fois industriel et académique conduit à adopter une démarche de recherche-action, rythmée par la réalisation de projets de R&D et de projets de conception articulant les phases expérimentales.

A partir de cette description du contexte de recherche, l'état de l'art visera justement à mettre en lumière les éléments de la littérature sur lesquels il est possible de s'appuyer pour créer un lien entre fabrication additive et créativité.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART SUR LA FABRICATION ADDITIVE, LA CRÉATIVITÉ ET LA CONVERGENCE DES DEUX

CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART SUR LA FABRICATION ADDITIVE, LA CRÉATIVITÉ ET LA CONVERGENCE DES DEUX

Introduction du chapitre 2

Ce 2ème chapitre s'attache à rapporter les constats issus de la littérature et d'observations de terrain. Cet état de l'art a deux points d'entrée : la fabrication additive d'une part et la créativité d'autre part. Ce double point d'entrée correspond au double contexte décrit dans le chapitre précédent. Cette étude est d'une part ancrée dans une vision techno-centrée sur la fabrication additive, notamment apportée par la société Poly-Shape. D'autre part, elle s'inscrit dans le champ de recherche sur la créativité qui montre, depuis plus de 30 ans, ses capacités à humaniser les technologies pour en projeter les futures applications. Cette expérience de la créativité est apportée par le laboratoire CPI. Notre cheminement vise ensuite à faire converger ces deux thématiques pour observer les méthodologies de conception existantes.
Ce cheminement est illustré avec la figure 10 ci-dessous.

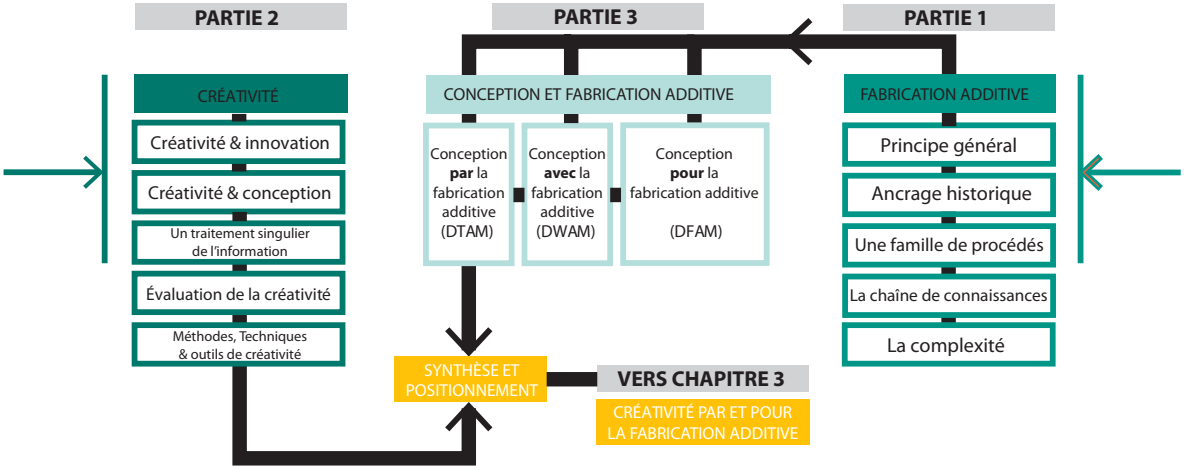


Fig.10 - Synthèse des 3 champs abordés dans notre état de l'art et de notre cheminement

Partie 1 : la fabrication additive

Cette partie 1 détaille, à partir de la littérature et de l'observation du terrain industriel, le principe de la fabrication additive (§2.1) puis son ancrage historique (§2.2). Cette démarche vise à souligner les usages de la fabrication additive, parmi lesquels nous retenons «la démonstration rapide » (§2.2.2). Nous présentons ensuite une synthèse de l'ensemble des procédés réunis sous l'expression « fabrication additive » par une infographie (§2.3.1), avant de faire un focus sur un procédé phare de la fabrication additive Métal : la Fusion de poudre métallique par laser (§2.3.2). Dans la mesure où « fabrication additive » désigne également un ensemble de connaissances mises en œuvre jusqu'à l'obtention de composants prêts à fournir aux donneurs d'ordres, la chaîne de connaissances de la fabrication additive est également présentée (§2.4.). Cette description conduit finalement à souligner une spécificité majeure de la fabrication additive : elle introduit, pour les concepteurs.trices, 4 types de complexité (§2.5).

Partie 2 : la créativité

Cette 2ème partie présente en préambule les principes généraux de la créativité, de manière à souligner sa dimension systémique (§2.6). La créativité est ensuite définie du point de vue de l'entreprise et des modes de management (§2.7). Cette section vise à montrer le lien entre créativité et innovation. Elle fait ainsi émerger la notion d'Exploration pour définir le régime d'innovation correspondant à notre contexte appelé RID pour Recherche-Innovation-Développement. La créativité est ensuite replacée dans le contexte de la conception pour montrer l'évolution de la modélisation du processus de conception, depuis les modèles linéaires et séquentiels, jusqu'aux modèles co-évolutifs (§2.8). Ce point de vue créativité & conception permet de souligner les similitudes importantes entre processus de conception et processus créatif et de distinguer les caractéristiques propres à la créativité.

La section suivante est au cœur de l'approche par la créativité que nous proposerons. Ainsi, les phases du processus créatif seront détaillées de manière à expliciter la phase de collection d'informations (§2.9.2.1), la phase de catégorisation par analogie (§2.9.2.2) puis la phase d'inspiration (§2.9.2.3). Nous détaillons également le moteur qui permet de faire progresser ce processus créatif : la construction de représentations (§2.9.3). Enfin et surtout, nous rapporterons les définitions des rôles et statuts des Objets Intermédiaires (OI) en conception créative (§2.9.4). Ensuite, les critères et modalités qui permettent d'évaluer les idées et les concepts générés dans le cadre de séance de créativité de groupe seront présentés (§2.10). Enfin, des techniques & outils existants de stimulation seront synthétisés pour montrer qu'ils ne sont pas aussi génériques que des recettes à appliquer, qu'il est nécessaire de les adapter (§2.11).

Partie 3 : convergence de la fabrication additive et de la créativité

Cette 3ème partie vise à faire converger les deux thématiques précédemment exposées, de manière à souligner le manque de méthodologie les associant. Ainsi, nous relevons d'abord trois manières d'intégrer la fabrication additive dans le processus de conception : conception pour, avec et par la fabrication additive (§2.12). Les nombreuses méthodologies de conception pour la fabrication additive sont rapportées (§2.13) et analysées au regard de la créativité pour faire apparaître leurs limites quant à la génération d'idées et de concepts créatifs et quant à l'Exploration. Le manque de méthode centrée sur la créativité apparaîtra. En ce sens, nous positionnerons cette thèse dans le cadre du Design Through Additive Manufacturing (DTAM) et proposerons en ce sens la création d'un champ Creativity Through Additive Manufacturing (CTAM), en français créativité par et pour la fabrication additive. Une synthèse est proposée à l'issue de chacune des 3 parties, de manière à souligner les constats retenus pour formuler un modèle de créativité par et pour la fabrication additive.

Document confidentiel

PARTIE 1 : État de l'art sur la fabrication additive

Introduction de la 1ère partie de l'état de l'art

Un état de l'art détaillé sur la fabrication additive pourrait paraître superflu, après tout il y a eu précédemment de nombreuses thèses sur cette thématique. Nous arguons qu'il est nécessaire car :

- Ces travaux s'adressent à un public élargi, notamment issu du champ de la créativité non nécessairement expert de la fabrication additive
- Du point de vue technologique la fabrication additive évolue rapidement, il est intéressant et nécessaire de tenir les connaissances à jour
- C'est grâce à la curiosité et au temps accordé à l'acquisition des connaissances et la mise en pratique de la fabrication additive que nous avons pu conduire cette démarche de recherche-action, c'est donc à la fois un point de départ de cette recherche et son moteur

En ce sens, la fabrication additive est le premier point d'entrée de cette thèse, comme le montre la figure 11 ci-dessous.

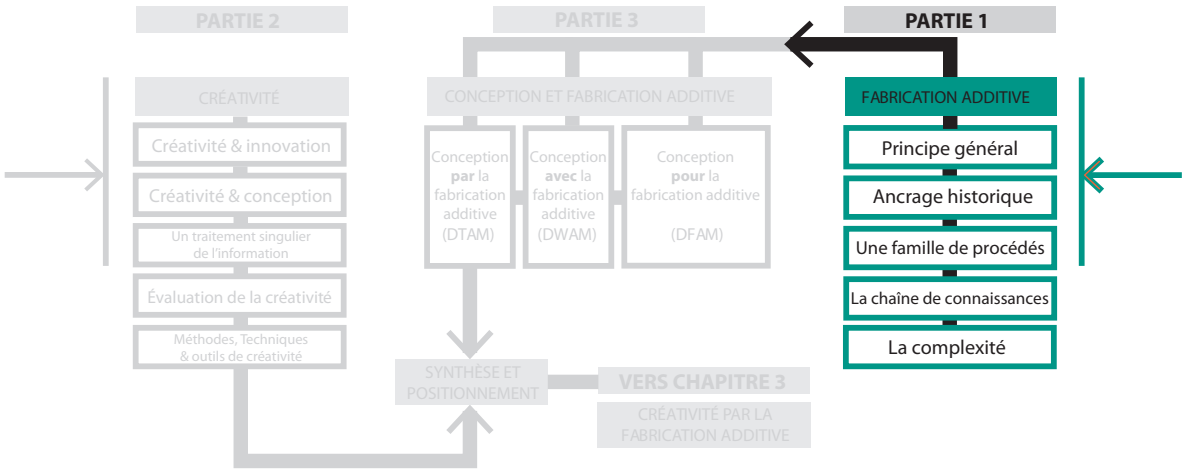


Fig.11 - La fabrication additive, point d'entrée de l'état de l'art

Cette 1ère partie de l'état de l'art présente en préambule le principe général de la fabrication additive et la terminologie (§2.1). Son ancrage historique est ensuite détaillé, notamment pour souligner un de ses usages : la « démonstration rapide » (§2.2). Une synthèse graphique de l'ensemble des procédés de fabrication additive existants est proposée (§2.3.1) avant de mettre le focus sur le procédé de Fusion de poudre métallique par laser. Parce qu'il ne suffit pas « d'appuyer sur un bouton » pour obtenir des composants en fabrication additive, nous présentons la chaîne de connaissances complète qui permet de passer de l'objet numérique à l'objet tangible (§2.4). Cette description conduit à souligner une nouvelle perspective importante pour les conceptrices et concepteurs : l'opportunité d'explorer la complexité (§2.5). Enfin, une synthèse des éléments à retenir de cette 1ère partie de l'état de l'art sera proposée.

2.1 Préambule sur la fabrication additive

2.1.1 Principe de base de la fabrication additive

Le principe additif s'oppose aux procédés de fabrication conventionnels qui procèdent par enlèvement de matière à partir d'une ébauche brute (par exemple l'usinage) ou par mise en forme dans une matrice (par exemple la forge). La fabrication additive désigne donc l'ensemble des procédés qui permettent de fabriquer, par ajout de matière, couche après couche, un objet tangible à partir d'un objet numérique, sans la nécessité d'un moule ou d'outillage spécifique[15]. En ce sens, la fabrication additive est considérée comme une innovation technologique de procédé qui bouleverse la conception et la production traditionnelles.

Ce processus génératif, illustré sur la figure 12, consiste à réaliser un empilement de strates sur un socle de base (i.e le plateau ou substrat) selon deux étapes successives répétées jusqu'à obtenir l'objet tangible. Cet enchaînement est illustré par la figure ci-dessous. La 1ère étape consiste à générer une strate dont le contour, le contenu et l'épaisseur sont définis par l'objet numérique modélisé au préalable. La 2nde étape consiste à positionner la couche suivante au-dessus de la couche précédente de sorte à les empiler. Selon les procédés, soit :

- Seule la matière nécessaire à l'objet fini est déposée **(cas 1)**
- La couche de matière déposée comprend à la fois la matière nécessaire à l'objet fini et la matière nécessaire à sa fabrication, i.e les supports et/ou le lit de matière, sous forme de poudre ou de matière massive **(cas 2)**

Ce processus aboutit à un objet tangible dont la texture, en surface est faite de crêtes et de sillons correspondant à l'empilement des strates.

[15]AFNOR, NF ISO 17296-2 : Fabrication additive, principes généraux - Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières de base, 2015

Document confidentiel

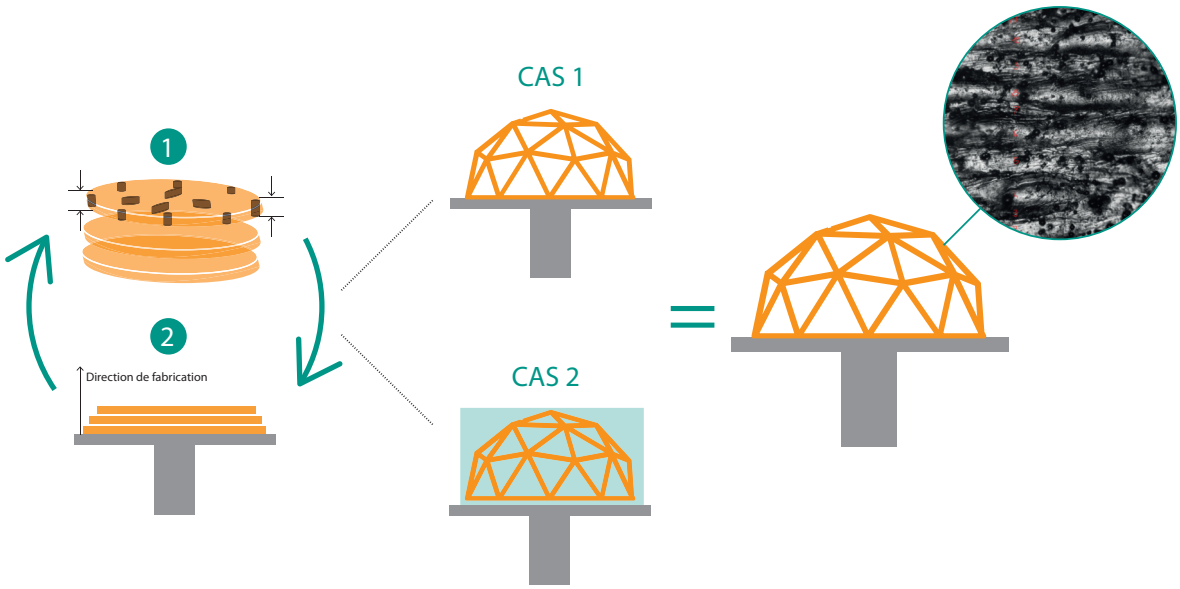


Fig.12 - Principe de la fabrication additive : l'empilement de strates de matière

Cette technologie fait, depuis quelques années, l'objet d'un fort intérêt de la part d'industriels et du grand public. On entend donc parler « d'Impression 3D » autant que de « Fabrication additive ». La section suivante vise alors à clarifier la terminologie.

2.1.2 Impression 3D ou Fabrication additive ? De l'usage du bon terme

La question du vocabulaire utilisé pour décrire cette technologie peut paraître triviale. Pourtant, l'expression que l'on choisit d'utiliser, entre *Impression 3d* ou *Fabrication Additive*, indique certes notre niveau d'expertise du domaine mais surtout notre motivation, en tant que concepteur.trices, à nous approprier les technologies [16] .

L'expression *Impression 3D* c'est d'abord une traduction directe de *3D printing*, une appellation américaine déposée par 3D Systems. Elle est la plupart du temps utilisée pour parler de productions faites par le procédé Extrusion de filament, avec les petites machines que l'on trouve maintenant sur le coin des bureaux. Mais aussi parfois pour désigner des composants réalisés en Stéréolithographie ou en Frittage de poudre par laser. Or, le sens strict de *3D printing* désigne à l'origine précisément le procédé Projection de liant sur poudre. Celui-ci est basé sur l'utilisation de cartouches qui projettent des encres et de la colle sur un support blanc, d'où la proximité avec l'impression 2D sur papier bien connue qui a visiblement glissé, en français, vers *Impression 3D*.

Dans les premières années de développement, des communications au grand public accompagnaient la mise sur le marché des procédés, surtout visibles aux États-Unis. C'est l'exemple de la Stéréolithographie présentée par 3D Systems en 1989 [17]. Puis le nombre de procédés s'est multiplié et certains, comme l'Extrusion de filament, ont été rendus accessibles à un public large. Simplifier *Fabrication Additive* en *Impression 3D* serait donc utile pour vulgariser, rendre accessible les techniques ? Effectivement, Impression 3D est devenu courant dans le langage et dans la pratique d'un public élargi.

Cependant, utiliser *Impression 3D* plutôt que *Fabrication Additive* c'est prendre le risque d'ignorer la richesse des racines historiques, qui puisent dans la Topographie et la Photosculpture du XIXème siècle, une vingtaine de brevets déposés uniquement sur le fonctionnement des procédés eux-mêmes **[48]** et 30 ans d'applications industrielles.

Du point de vue sémantique, utiliser *Impression 3D* c'est ignorer les discussions européennes et américaines qui ont produit les normes NF E 67-001 **[49]**, NF ISO 17296-2 et ASTM F2792-12a **[50]** qui définissent la terminologie et la classification des procédés.

De plus, utiliser *Impression 3D* c'est aussi focaliser l'attention sur une portion réduite à 20% du panel des procédés disponibles, les plus médiatisés. Du point de vue des conceptrices et concepteurs de produits, ce focus masque une partie des possibilités, par exemple l'opportunité de fabriquer des composants en métal. Cela défavorise aussi la prise en compte des dernières améliorations techniques qui font que la fabrication par ajout de couches devient un véritable procédé industriel, au même titre que la fonderie ou l'usinage par exemple (compétitivité pour la productivité, la fiabilité, les coûts, la variété des matériaux disponibles, etc.).

Finalement, employer *Fabrication Additive*, même sans avoir de background en ingénierie, c'est se confronter à la compréhension profonde des technologies et s'approprier une palette très large de possibilités pour explorer de nouvelles grammaires formelles et fonctionnelles.

Prenant le parti de la Fabrication Additive, nous détaillons son ancrage historique dans la section suivante.

[16] Impression 3D ou Fabrication additive de quoi parle-t-on ? http://strabic.fr/Impression-3d-ou-Fabrication-additive
[17] 30 janvier 1989, présentation de la Stéréolithographie dans une émission TV grand public Good Morning America https://www.youtube.com/watch?v=9H1CUQ5U4Xc

Document confidentiel

2.2 Ancrage historique de la fabrication additive

2.2.1 Des origines de la fabrication additive

La 1ère révolution industrielle fut marquée au début du XXème siècle par le passage d'une production artisanale à une production de masse. Favorisée par des progrès techniques tels que la mécanisation et l'électrification, l'industrie se structura pour augmenter la productivité. La division, la spécialisation des tâches et l'organisation hiérarchique et centralisée ont alors permis de répondre aux fortes attentes des marchés en pièces et produits manufacturés.

Avec la crise économique des années 1970, on a vu l'équilibre s'inverser. L'offre étant supérieure à la demande, un contexte de 2nde révolution industrielle se dessinait. Pour stimuler le marché et satisfaire l'exigence des clients en produits correspondants à des besoins individuels, l'industrie est alors passée à la personnalisation de masse. Pour les conceptrices et concepteurs de produits, ce fut un défi à relever : simplifier le produit en supprimant toute singularité qui se répercuterait sur le coût de fabrication des outillages, tout en proposant des produits variés et personnalisés. La stratégie fut axée sur une offre « à options ». A partir d'un stock important de pièces, le client pouvait sélectionner la combinaison qui lui convenait pour composer son produit. Les produits étaient alors constitués d'une base standardisée et d'une palette de déclinaisons à choisir. Cette approche a modifié les circuits d'achat/distribution, mais l'industrie produisait alors toujours en masse des pièces standardisées, à stocker en quantité pour de potentiels utilisateurs. C'était une production de masse, non plus à l'échelle des produits mais de leurs composants. Pour cela, les concepteur.trices devaient innover mais toujours plus rationnaliser les produits, pour faciliter leur déclinaison en variantes faciles à fabriquer et assembler.

Depuis les années 2000, la fabrication additive cohabite et parfois se combine avec la production conventionnelle, dans un contexte de réponse à des besoins de plus en plus spécifiques. Besoins notamment exprimés par des marchés aux exigences techniques spécifiques, tels que l'aéronautique, le spatial, le biomédical ou le sport automobile, à une échelle de productivité différente de la production de masse. Alors la fabrication additive peut-elle motiver une 3ème révolution industrielle ?

L'analyse des usages liés à la fabrication additive décrite dans la section suivante vise justement à souligner comment, progressivement, les concepteur.trices se saisissent de cette innovation de procédé pour transformer leurs activités.

2.2.2 Les usages de la FA : du prototypage, démonstration et fabrication

Depuis les années 1980, la fabrication additive a connu de formidables développements tech-

-niques, notamment la multiplication des procédés et l'apparition des procédés de fabrication métallique. Sans détailler les progrès techniques, deux phases principales apparaissent dans l'usage de la fabrication additive : le prototypage rapide puis la fabrication rapide, qui désormais coexistent **[51]**.

Le prototypage rapide - Des années 80 jusqu'aux années 2000, la fabrication additive a été utilisée presque exclusivement pour du prototypage rapide. En effet, avant l'arrivée de la fabrication additive, les étapes de représentations tangibles du produit étaient fastidieuses, coûteuses et complexes **[52]**. Souvent multiples et réalisées par des méthodes manuelles comme, par exemple le modelage en argile, ces étapes ralentissaient le processus de conception. La fabrication additive pallie ces limites en présentant 4 avantages :

- Obtenir des modèles tangibles plus rapidement
- Permettre les modifications sans avoir à refaire complètement le modèle
- Incarner en un seul modèle tangible plusieurs dimensions du produit à valider (forme, fonctionnement du produit, aspect, ergonomie, assemblages, proportions, tenue mécanique **[53]**)
- Obtenir des modèles de plus en plus réalistes présentant des couleurs, transparences et textures proches du produit final

Ces avantages se sont amplifiés avec les développements de la fabrication additive, notamment avec la diversification des procédés et l'élargissement du panel de matériaux disponibles. En effet, restreinte à la Stéréolithographie et à l'Extrusion de filament au début des années 1980, la fabrication additive ne permettait alors pas de valider certaines caractéristiques du produit telles que les couleurs ou la tenue en durée de vie. La diffusion des procédés de Projection de liant sur poudre et de Frittage de poudre par laser a contribué à dépasser ces limites. Ces avantages restaient toutefois nuancés, notamment à cause du coût élevé du prototypage rapide, la limite des dimensions des machines disponibles, la relative confidentialité de ces technologies et la barrière d'accès représentée par la modélisation numérique 3D, cette compétence nécessitant une phase d'apprentissage.

La fabrication rapide – A partir du milieu des années 1990 et surtout à partir de 2000, les usages de la fabrication additive se diversifient et intègrent la fabrication rapide. Désormais, prototypage rapide et fabrication rapide coexistent. La fabrication rapide désigne la production de composants finis et fonctionnels « en bonne matière » qui peuvent être intégrés dans le produit ou l'environnement d'usage final **[54]**. Autrement dit, la fabrication additive permet d'envisager la production de composants respectant les spécifications imposées dans les cahiers des charges soumis par les donneurs d'ordres industriels.

Ce nouvel usage a été fortement impulsé par les améliorations techniques de la fabrication additive parmi lesquelles on peut citer l'arrivée à maturité de certains procédés, le développement de nouveaux matériaux, par exemple biocompatibles (polymère PEEK), résistants aux hautes températures (polymère ULTEM), et composites, l'accélération des vitesses de fabrication ou encore les plus grandes dimensions des chambres de fabrication des machines. La forte accélération est due au développement des procédés de fabrication additive métallique tels que la Fusion par laser et la Fusion par faisceau d'électrons et au panel d'alliages qu'ils permettent d'exploiter : alliages titanes, aluminiums, aciers, bases nickel, cuivre ou encore chrome-cobalt **[55]**. Depuis 2000, le prototypage rapide reste l'usage le plus répandu mais c'est

Document confidentiel

la fabrication rapide qui intéresse de plus en plus les donneurs d'ordres. En effet, la part des composants produits en fabrication rapide est passée de 4% en 2001 à 28% en 2012 selon Wohlers 2013 **[56]** et augmente rapidement depuis 2010 selon Wohlers 2016 **[10]**. Divers secteurs industriels se sont donc emparés de la fabrication additive. Théoriquement, tous les procédés sont adaptés à la fabrication rapide, sous réserve que le composant obtenu respecte les contraintes spécifiées par le secteur d'application. Ainsi on observe que la Stéréolithographie, à priori limitée au prototypage, peut aussi servir à fabriquer des composants avec une dureté satisfaisante pour la fabrication rapide **[57]**. En pratique, les procédés les plus récemment développés ont encore peu démontré leurs capacités à atteindre la qualité de « composant fini et fonctionnel ». A contrario, on observe de nombreux exemples d'intégration, dans des produits industriels, de composants réalisés avec des procédés plus matures tels que la Fusion de poudre par laser (pour exemple, dans le secteur Spatial, fig.13 ci-dessous).

Fig.13 - Composant fabriqué par Poly-Shape en cours d'intégration dans un satellite de Thales Alenia Space[18]

Finalement, la fabrication rapide présente 4 avantages :

- Libéré de l'étape de conception et fabrication des outillages, le délai de production du composant fonctionnel est raccourci
- Facilite les modifications du composant sans modification coûteuse du moule ou de l'outillage associé

[18] Source : reportage In Situ par France 3 Région http://france3-regions.francetvinfo.fr/provence-alpes-cote-d-azur/ce-soir-dans-situ-poly-shape-l-usine-du-futur-969377.html

- Possibilité de répondre à des besoins spécifiques, y compris sur-mesure
- Obtenir des composants réalistes (propriétés mécaniques, thermiques, vibratoires, masse, aspect de surface, conductivité électrique…)

Comme pour le prototypage rapide, ces avantages sont, dans la pratique, nuancés. Par exemple, en cas de modification demandée sur la géométrie du modèle, la réduction théorique des coûts associée au fait qu'il n'y a pas de moule ni d'outillage à modifier n'est pas toujours effective. Très souvent, la géométrie du composant est tellement spécifique qu'elle ne peut pas être modifiée après production. Il est alors nécessaire de produire à nouveau ce composant avec les modifications apportées. Le premier composant produit ne peut pas être réutilisé pour une autre application, il s'agit d'un rebut, d'une perte sèche qui ne peut pas être absorbée par l'économie d'échelle comme dans la production en série.
Au-delà des deux usages principaux identifiés, nous remarquons également, dans la pratique, un 3ème type d'usage de la fabrication additive. Dans cet usage, prototypage rapide et fabrication rapide semblent se superposer jusqu'à se confondre (fig.14). Nous avons en effet observé un nombre important de composants dits, dans le jargon, « **démonstrateurs** ». Ces composants sont conçus avec des cahiers des charges similaires à ceux des donneurs d'ordres et sont fabriqués avec les procédés et les matériaux qui auraient effectivement été utilisés s'il s'agissait de véritables commandes. Pourtant ils ne sont pas destinés à être intégrés dans des produits mais plutôt à valider la faisabilité technique, à expliquer la technologie et ses capacités et à prouver un niveau de maîtrise. En ce sens, les démonstrateurs seraient plus proches du prototypage rapide. Mais en même temps, ces démonstrateurs présentent les caractéristiques de composants finis et fonctionnels, ils sont réalistes. En ce sens ils correspondent alors plutôt à un usage de fabrication rapide.

Finalement dans cet usage situé au croisement entre prototypage et fabrication rapide, la fabrication additive permet d'obtenir rapidement des objets tangibles réalistes qui jouent un rôle de médiation avec les individus qui les observent et les manipulent. On pourrait nommer cet usage « démonstration rapide » et les produits réalisés pour ce type d'usage seraient donc des « démonstrateurs ».

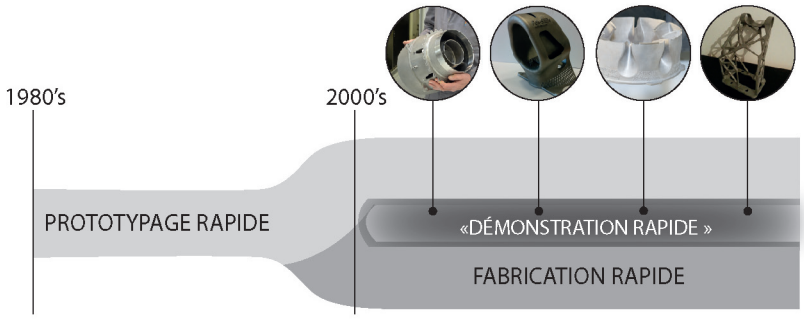


Fig.14 - Les deux usages principaux de la fabrication additive et le 3ème usage observé dans la pratique

Ces différents usages de la fabrication additive sont liés au contexte historique d'apparition de la fabrication additive et de développement des procédés. Sans entrer dans la description détaillée de chacun d'eux, la section suivante présente une synthèse de la famille de procédés groupés sous l'expression « fabrication additive » jusqu'à faire un focus sur un procédé phare : la Fusion de poudre par laser.

Document confidentiel

2.3 La fabrication additive : une famille de procédés

2.3.1 Synthèse de l'ensemble des procédés

La fabrication additive est perçue comme une technologie « nouvelle ». En effet, au regard d'autres procédés de fabrication apparus au début du XVIIIème siècle (les coulées de fonte) ou plus récemment l'usinage à commande numérique (1940), la fabrication additive peut être qualifiée de « jeune » puisqu'elle apparait dans les années 1980. Du point de vue actuel, cela représente tout de même plus de 30 ans d'expérience et donc une forme de maturité pour certains procédés.

Les débuts officiels de la fabrication additive sont souvent marqués autour de 1984 avec la course aux dépôts de brevets sur la Stéréolithographie **[58]**, **[59]**, **[60]**, **[61]**. Pour autant, la fabrication additive puise ses sources au XIXème siècle dans la Photosculpture mise au point en 1860 et la Topographie développée par Blanther en 1892 **[48]**, deux techniques qui permettaient d'obtenir un objet tangible à partir de différentes « tranches » de celui-ci.

Depuis les années 1980, les procédés se sont multipliés. La littérature a donc proposé, au fil des développements, diverses classifications, basées sur la nature des matériaux utilisés, sur la nature des sources d'énergie employées ou encore le type de transformations appliquées **[62]**, **[63]**, **[64]**, **[65]** et de nouveaux procédés sont récemment apparus. Pour harmoniser vocabulaire et définitions, les normes regroupent maintenant les procédés en 7 catégories générales. Cependant, les appellations de chaque procédé restent encore non définies. Nombreuses sont propriété d'entreprises privées, comme par exemple Selective Laser Melting qui est propriété de la société SLM Solutions. De plus, ces appellations sont communiquées en anglais, la traduction laisse donc libre cours à l'interprétation ce qui, finalement, multiplie d'autant le nombre d'appellations employées **[66]**.
En conséquence, nous proposons, dans la figure 15 page suivante [19] , une classification multi-critères de l'ensemble des procédés relevés dans la littérature et au travers d'une veille brevet. Cette classification permet de visualiser, premièrement que la fabrication additive couvre au moins 20 procédés différents. D'autres procédés peuvent avoir été mis au point très récemment [20] et n'apparaissent donc pas. Cette classification est également chronologique, basée sur l'année de mise sur le marché de chaque procédé. Les 4 procédés les plus anciens sont sortis avant 1990 : l'Extrusion de filament, la Stéréolithographie, le Dépôt-découpe de feuilles et la Stratoconception (1er étage en bas sur fig.15). La plupart des procédés ont été introduits entre 1990 et 2010, période qui semble donc marquer le point culminant de l'innovation technologique de procédé. En effet, depuis 2010, nous avons relevé 3 fois moins de nouveaux procédés (4ème étage en haut sur la figure). Même leur caractère « nouveau » est à nuancer, ce sont plutôt des dérivés de procédés existants. C'est le cas, par exemple, de la Fusion de poudre multi-lasers, qui témoigne de l'amélioration technique du procédé plus ancien de Fusion de poudre par laser.
Cette classification fait également apparaître le critère du type de matériau utilisé. Nous notons donc 8 procédés de fabrication additive métallique, tous introduits après 1990 (hachures horizontales). Leur nombre est équivalent aux procédés de fabrication additive polymère, on en compte 8 également. Il est à noter que les autres procédés peuvent transformer plusieurs

matériaux. C'est le cas du procédé d'Extrusion de filament qui peut transformer des polymères mais aussi du béton voire du chocolat.

Les 7 familles définies par la normalisation sont également visibles sur cette classification (numéros de 1 à 7 devant chaque appellation de procédé). Ainsi, 6 procédés sont regroupés dans la famille Fusion sur lit de poudre. En l'absence de normalisation des appellations de chaque procédé, nous proposons des appellations en Français qui s'affranchissent des noms propriétaires :

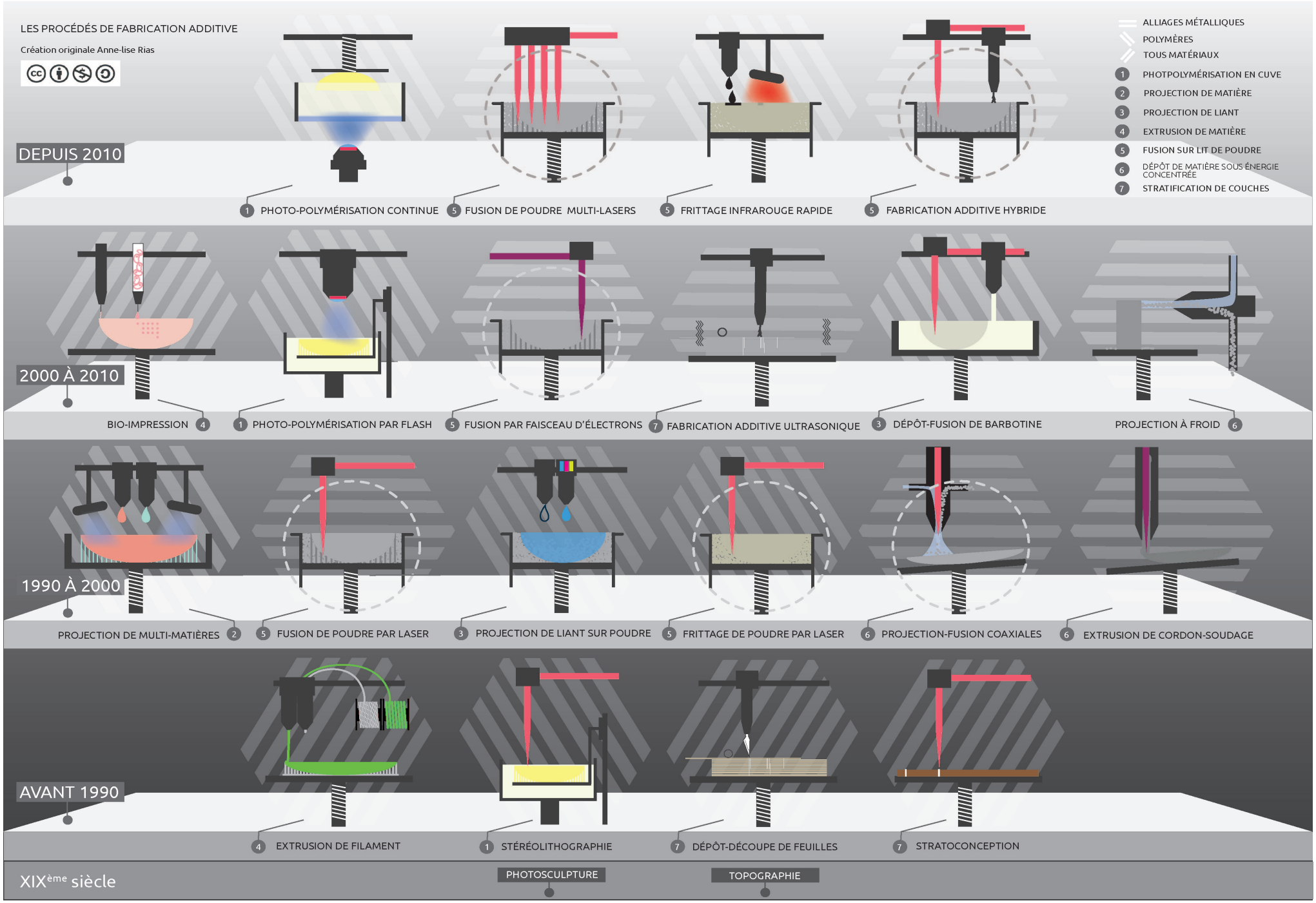
- Frittage de poudre par laser (polymère)
- Fusion de poudre par laser (métallique)
- Fusion par faisceau d'électrons (métallique)
- Fusion de poudre multi-lasers (métallique)
- Frittage infrarouge rapide (polymère)
- Fabrication additive hybride (métallique)

Finalement, cette classification souligne que les procédés de fabrication additive métallique les plus souvent utilisés pour la fabrication rapide **[67]**, ont été introduits il y a plus de 20 ans, notamment la Fusion de poudre par laser mise au point à l'institut Fraunhofer de Aachen dès 1995. **Ils ont donc atteint un point de maturité suffisant pour intéresser les donneurs d'ordres industriels [51]. La Fusion de poudre par laser est emblématique de cette progression. C'est aussi le procédé phare des activités de Poly-Shape, le plus utilisé pour répondre aux commandes des donneurs d'ordres.** Celui-ci est donc détaillé dans la section suivante.

Page suivante : Fig.15 - Proposition de classification de l'ensemble des procédés de fabrication additive

[19] Cette infographie des procédés est Creative Commons, libre au téléchargement http://strabic.fr/Impression-3d-ou-Fabrication-additive
[20] Procédé de gouttes de métal entourées d'un liant polymère mis au point par la société XJet (2016) http://www.xjet3d.com/

Document confidentiel


LES PROCÉDÉS DE FABRICATION ADDITIVE
Création originale Anne-lise Rias
ALLIAGES MÉTALLIQUES
POLYMÈRES
TOUS MATÉRIAUX
1 PHOTOPOLYMÉRISATION EN CUVE
2 PROJECTION DE MATIÈRE
3 PROJECTION DE LIANT
4 EXTRUSION DE MATIÈRE
5 FUSION SUR LIT DE POUDRE
6 DÉPÔT DE MATIÈRE SOUS ÉNERGIE CONCENTRÉE
7 STRATIFICATION DE COUCHES
DEPUIS 2010
1 PHOTO-POLYMÉRISATION CONTINUE
5 FUSION DE POUDRE MULTI-LASERS
5 FRITTAGE INFRAROUGE RAPIDE
5 FABRICATION ADDITIVE HYBRIDE
2000 À 2010
BIO-IMPRESSION 4
1 PHOTO-POLYMÉRISATION PAR FLASH
5 FUSION PAR FAISCEAU D'ÉLECTRONS
7 FABRICATION ADDITIVE ULTRASONIQUE
3 DÉPÔT-FUSION DE BARBOTINE
PROJECTION À FROID 6
1990 À 2000
PROJECTION DE MULTI-MATIÈRES 2
5 FUSION DE POUDRE PAR LASER
3 PROJECTION DE LIANT SUR POUDRE
5 FRITTAGE DE POUDRE PAR LASER
6 PROJECTION-FUSION COAXIALES
6 EXTRUSION DE CORDON-SOUDAGE
AVANT 1990
4 EXTRUSION DE FILAMENT
1 STÉRÉOLITHOGRAPHIE
7 DÉPÔT-DÉCOUPE DE FEUILLES
7 STRATOCONCEPTION
XIXème siècle
PHOTOSCULPTURE
TOPOGRAPHIE

2.3.2 Focus sur la Fusion de poudre métallique par laser

Comme précisé dans la section précédente, le procédé de Fusion de poudre métallique par laser, en anglais Laser Beam Melting, est emblématique de l'usage de la fabrication additive pour la fabrication rapide et pour les démonstrateurs. Il est aussi le procédé phare de l'activité de Poly-Shape. Pour ces raisons, cette section décrit le principe de ce procédé et ses caractéristiques notables. La figure 16 ci-dessous illustre ce procédé.

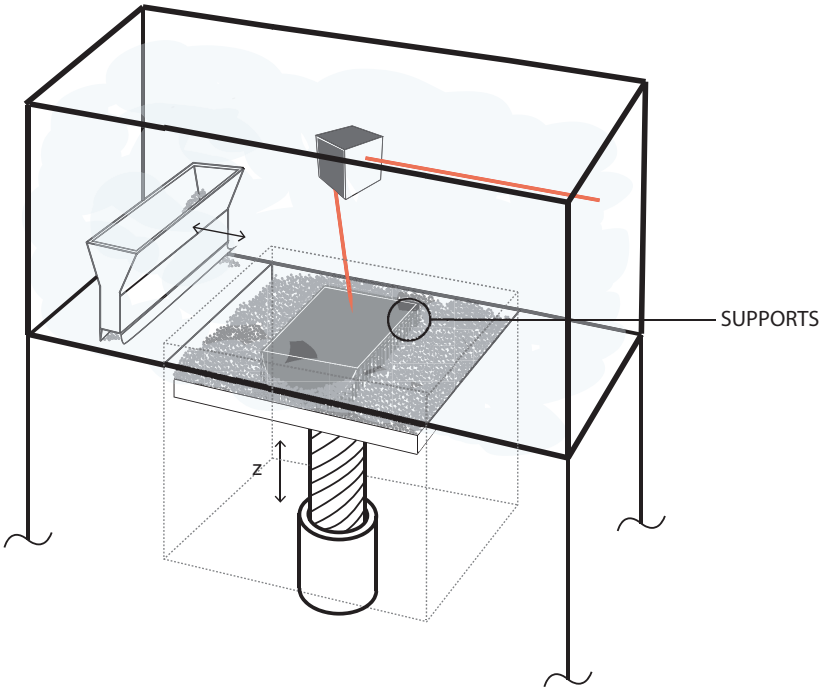


Fig.16 - Procédé de Fusion de poudre métallique par laser

Le procédé de Fusion par laser est basé sur un lit de poudre déposée couche par couche par un « racleur » (élément mobile en translation à gauche sur fig.16). Le laser vient alors fondre la poudre localement, dans les 3 directions x, y, z pour fusionner les grains. Ainsi, en théorie, l'intégralité du volume de la chambre de fabrication (en pointillé sur la figure) est donc accessible. Cela pourrait permettre « d'empiler » plusieurs composants séparés par quelques couches de poudre non fusionnée et donc d'exploiter pleinement les chambres de fabrication des machines qui ont l'avantage d'être de plus en plus grandes [21]. En pratique, le principe de fusion lui-même limite cette possibilité. En effet, le volume de matière fondu est plus dense et lourd que la poudre, il y a donc un risque que ce volume s'effondre ou soit déplacé lors du passage du racleur.

[21] D'une chambre de fabrication de 630x400x500 mm^3 (Xline 1000r) à une chambre de 800x400x500 mm^3 (Xline 2000r) http://www.amaero.com.au/assets/uploads/2016/08/X-line-2000R.pdf

Document confidentiel

De plus, la différence de conductivité thermique entre la matière fondue et la poudre peut engendrer une concentration d'énergie qui peut provoquer des déformations du composant en cours de fabrication **[68]**. Pour pallier ces risques, les composants sont maintenus au plateau par des « supports » (hachures sur la figure) fabriqués en même temps que le composant et dans le même matériau. Cela impose finalement des limites en termes de géométries et de dimensions qui peuvent être fabriquées **[8]**, **[69]**. Les températures induites par le laser, qui peuvent atteindre plus de 2000°C à son point focal, provoquent également des déformations qui nécessiteront alors des opérations de parachèvement à l'issue de la fabrication.

Depuis 1995, le procédé de Fusion de poudre métallique par laser a connu de nombreuses améliorations. Ainsi, nous avons observé la multiplication des lasers passés de 1 sur les machines les plus anciennes, à 2 lasers et 4 sur certaines machines récentes **[70]**. La puissance des lasers a aussi augmentée, de 100 W au début des années 2000 à 1kW aujourd'hui. Au-delà de ces caractéristiques qui peuvent rendre ce procédé plus productif, cette multiplication des lasers donne l'opportunité de piloter de manière indépendante leurs puissances et leurs parcours pour impacter différemment les contours, le remplissage ou la surface. En théorie, il devient ainsi possible d'agir localement, à l'échelle de la microstructure, pour impacter la poudre de manière à engendrer par exemple, des surfusions, des fusions partielles ou des parcours prédéterminés.

Nous remarquons également que les composants fabriqués par Fusion par laser présentent des qualités surfaciques caractéristiques du phénomène d'empilement de couches de matière, une texture faite de creux et de bourrelets. Le pilotage des lasers peut permettre de définir des parcours au cœur de la matière (sa microstructure) mais aussi à sa surface et ainsi d'agir sur les qualités de ces textures. Par exemple, nous avons pris deux clichés des dernières couches fabriquées de deux composants (figure 17 ci-dessous). L'image A présente une texture correspondant à un passage laser sans stratégie particulière. Pour l'image B, le laser a effectué deux fois le même parcours de manière à créer une surfusion. Sans parler des propriétés différentes que cela peut conférer, il est visuellement remarquable que les textures des images A et B sont différentes.

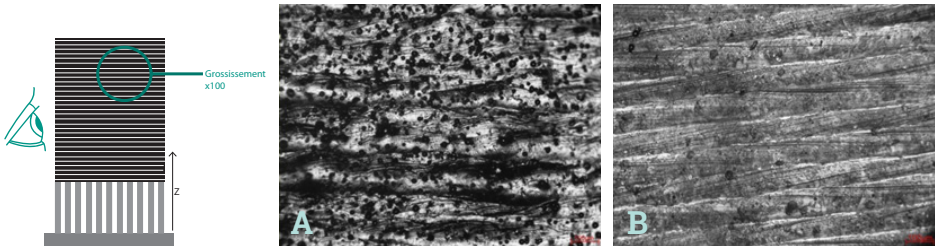


Fig.17 - Textures de surfaces de composants fabriqués en Inconel par Fusion de poudre métallique par laser

Enfin, nous retenons que la Fusion de poudre métallique par laser se déroule sous atmosphère contrôlée. Des gaz comme l'argon ou l'azote sont utilisés pour remplacer l'oxygène dans l'ensemble de la chambre de fabrication. Cette atmosphère évite l'oxydation voire l'inflammation des poudres réactives à l'oxygène. Ces gaz génèrent aussi un flux d'évacuation des particules en suspension telles que scories ou grains non tassés. En pratique, nous avons retenu que la qualité de l'atmosphère est pilotable par la machine.

Ainsi, il est possible d'interrompre une fabrication en cours puis la reprendre car l'atmosphère est contrôlée par les capteurs de la machine avant la mise en marche des lasers. Nous avons exploité cette possibilité d'interrompre la fabrication dans le cadre de projets R&D qui ont contribué à définir le modèle préliminaire et la problématique (§3.2).
Finalement, ce procédé englobe de nombreux paramètres qui peuvent être pilotés, et donc de nombreuses pistes qui peuvent être explorées dans le but de générer des idées et concepts créatifs.
Au-delà du procédé de fabrication en lui-même, le terme « fabrication additive » désigne également l'enchaînement des étapes qui permet de passer de l'objet numérique à l'objet tangible. « Fabrication additive » désigne donc également une chaîne de connaissances variées décrites dans la section suivante.

2.4 La chaîne de connaissances de la fabrication additive

La fabrication additive désigne le principe d'empilement de couches en lui-même mais aussi toute une chaine de connaissances mises en œuvre pour passer d'un objet numérique à un objet tangible **[71]** sans outillage lié. Cette section présente donc la chaîne de connaissances concernant le procédé de Fusion de poudre métallique par laser sans détailler l'étape de la fabrication, déjà décrite dans la section précédente.
La figure 18 synthétise cet enchaînement de connaissances mises en œuvre pour la fabrication de composants en Fusion par laser, bien que certaines des étapes présentées sont communes à l'utilisation d'autres procédés, y compris de fabrication additive polymère. Cette description est issue de la littérature et de l'observation des pratiques conduites chez Poly-Shape.

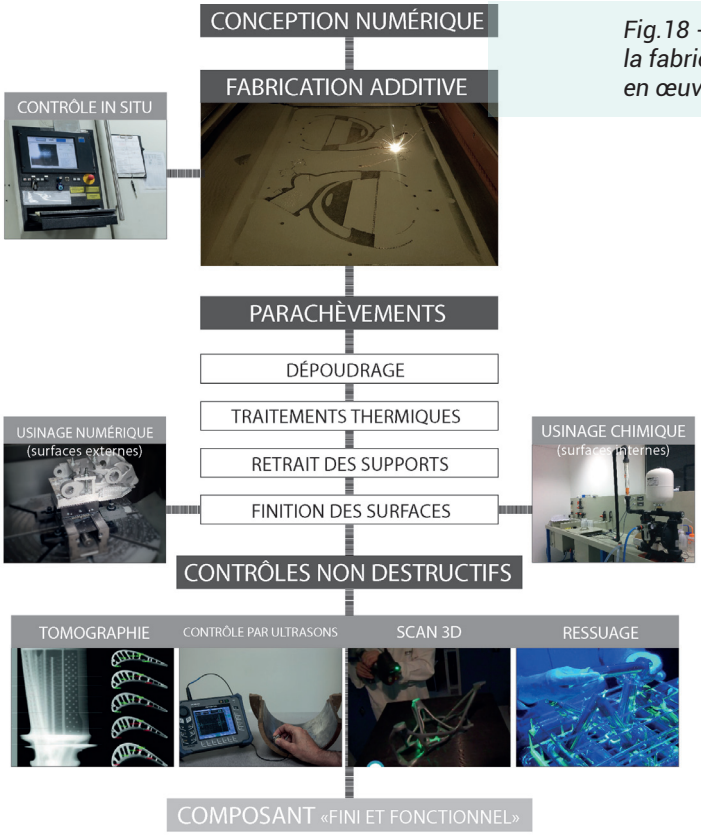


Fig.18 - Chaîne de connaissances de la fabrication additive et outils de mise en œuvre

Document confidentiel

2.4.1 La conception numérique

Le développement de la fabrication additive est concomitant au développement de l'informatique et notamment de la CAO qui a pris son essor dans les années 1960[22]. En ce sens, la fabrication par ajout de couches n'est finalement que l'un des procédés qui lient objet numérique et objet tangible, au même titre que d'autres comme l'usinage numérique par exemple **[72]**. Comme d'autres procédés, la fabrication additive est donc basée sur un flux de données numériques qui définissent le composant jusqu'à sa matérialisation tangible **[73]**. L'outil numérique supporte donc les activités cognitives, complexes pour les humains, de création, visualisation, modification et simulation de vues multiples dans un environnement virtuel **[74]**.

A la différence d'autres procédés conventionnels plus matures, la mise en œuvre de la fabrication additive est encore peu automatisée. En ce sens, la chaîne de connaissances de la fabrication additive combine à la fois des connaissances supportées par des outils numériques et des connaissances tacites incarnées par des personnes, plutôt mises en œuvre dans la seconde partie de la chaîne, à l'issue de la fabrication. La figure 19 ci-dessous présente les étapes de la chaîne numérique.

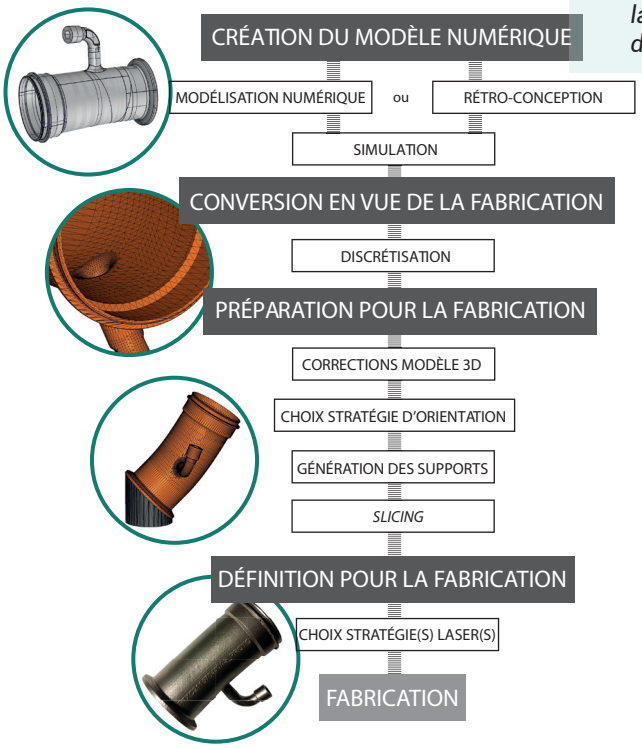


Fig.19 - Chaîne numérique supportant la fabrication additive, illustration : pipe d'admission, Dassault Aviation

[22] En France, Unisurf : la machine à dessiner, 21 février 1969. Les débuts de la CAO, à partir des travaux de Pierre Bézier pour Renault http://www.ina.fr/video/CAF97069446

Le modèle numérique est donc le pré-requis incontournable pour la fabrication additive. Ce modèle numérique 3D peut être obtenu par une démarche de rétroconception qui consiste à reconcevoir un modèle à partir d'un nuage de points définissant ses coordonnées spatiales (généralement issus d'un scan 3D). Il est aussi couramment obtenu par modélisation 3D à l'aide de logiciels tels que, Catia, Pro Engineer ou d'autres (fig.19 étape 1). A l'issue de la modélisation, la simulation, par exemple par la méthode des éléments finis, peut être utilisée pour valider la géométrie vis-à-vis des spécifications attendues. A ce stade, le format de fichier qui définit le modèle dépend du logiciel de modélisation choisi, on parle de format « natif ».

Le modèle numérique 3D est ensuite converti en vue de la fabrication (2ème étape). Historiquement, cette conversion était faite pour la Stéréolithographie. Le format de fichier dédié était le STL créé par 3D Systems, encore prédominant aujourd'hui. Ce format de Standard Tessellation Language impose une discrétisation des surfaces par des triangles, qui définissent contours et bords **[75]**. Le modèle discrétisé est donc une approximation du modèle numérique. Le développement des procédés de fabrication additive et la transition du prototypage rapide à la fabrication de composants fini et fonctionnels ont nécessité une mise en accord des formats qui supportent les échanges de données numériques. Ces nouveaux formats visent à pallier les limites du STL. Arguant que les données imposées par les machines et leur fonctionnement sont peu prises en compte, les travaux de Patil **[76]** puis Bonnard **[77]** proposent une chaîne numérique basée sur le format STEP. Déjà employé pour la fabrication par les procédés à commande numérique traditionnels, ce format permettrait de préciser la génération des parcours lasers et des épaisseurs de couches. En avril 2015, la création d'un consortium entre, entre autres, Microsoft, Dassault Systèmes, Autodesk, GE, Materialise et les constructeurs de machines SLM Solutions et 3D Systemes visait à diffuser le format 3MF comme standard universel [23]. De son côté, le développement du format Additive Manufacturing File (.amf) est soutenu par le comité de normalisation américain ASTM F42. Ce format vise à s'affranchir des formats propriétaires d'une part et, d'autre part, à prendre en compte plus de données liées à la fabrication additive comme les textures, les tolérances géométriques ou encore les gradients de matériaux. De plus, ce format tend à être plus léger que le STL et donc à faciliter les échanges dans cet environnement où la quantité de données explose. Cette multiplication des formats de fichiers, associée aux formats natifs des différents logiciels de modélisation augmente le risque d'incompatibilités lors des échanges de données. Pour pallier ces risques les éditeurs proposent des solutions qui intègrent l'ensemble des étapes dans une suite logicielle unique.

Finalement tous ces formats visent aussi à limiter les erreurs géométriques générées par la discrétisation telles que des surfaces ouvertes ou des triangles se chevauchant **[78]** qui imposent une étape fastidieuse de correction du modèle 3D en amont de la préparation du modèle pour la fabrication (étape 3 sur fig.19).
Une fois le maillage corrigé, le modèle 3D doit être orienté dans l'espace de la chambre de fabrication. Cette orientation est définie en prenant en compte plusieurs facteurs, notamment le volume disponible (un ou plusieurs composants fabriqués en même temps) et les particularités géométriques du modèle (épaisseurs fines, surfaces concaves, etc). Une stratégie d'orientation est un compromis entre assurer la bonne fabrication du modèle 3D et limiter la nécessité de générer des supports pour soutenir la pièce car ils sont synonymes d'augmentation du temps de fabrication, de perte de matière et d'opérations manuelles fastidieuses pour les retirer.

[23] Spécifications du format 3MF par le 3MF consortium http://3mf.io/specification/

Document confidentiel

Une fois le modèle 3D orienté, virtuellement, dans la chambre de fabrication de la machine et positionné, le cas échéant par rapport à d'autres composants à fabriquer en même temps, les supports nécessaires sont générés (fig.20). Ils maintiendront ainsi le composant au plateau pendant la fabrication et permettront la fabrication de toutes les surfaces dites « en contre-dépouille » c'est-à-dire orientées selon un angle inférieur à 45° par rapport au plateau de fabrication **[8]**. Sans support ces surfaces s'effondreraient dans le lit de poudre lors du passage du laser.

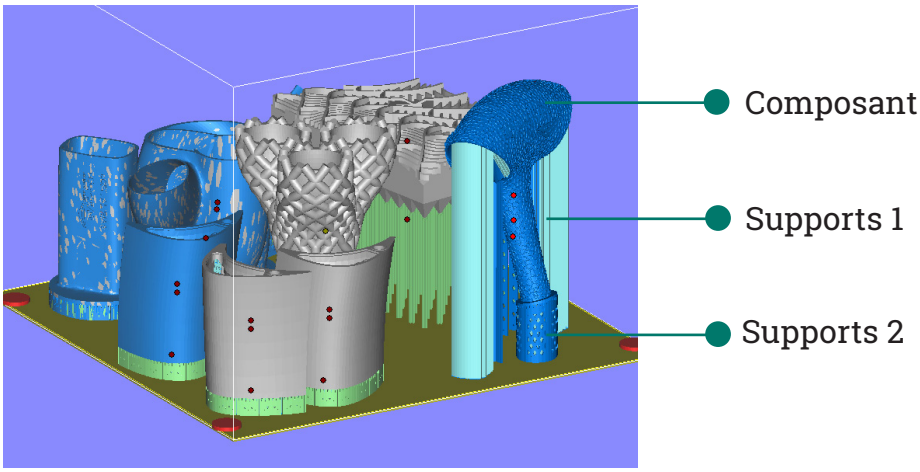


Fig.20 - Composants orientés, positionnés et supportés dans la chambre de fabrication virtuelle

Lorsque la fabricabilité est confirmée, le modèle numérique est converti dans un langage interprété par la machine. Le modèle est alors « tranché » en couches, c'est l'opération dite de slicing. L'épaisseur de ces couches virtuelles correspondant rarement à l'épaisseur réelle de matière qui sera déposée par le racleur mais plutôt à un multiple de l'épaisseur réelle. Le modèle numérique tranché est ensuite envoyé à la machine.

La dernière étape de définition du modèle pour la fabrication (fig.19) est généralement effectuée « au pied de la machine ». Il s'agit alors de sélectionner un ensemble de paramètres de fabrication tels que la puissance laser, la stratégie de parcours et l'épaisseur des couches de matière déposées par le racleur. Lors de la fabrication, la machine appliquera un ensemble de paramètres donnés à une ou plusieurs couches du modèle numérique.

Nous retenons également qu'à travers le dialogue entre objet numérique et objet tangible, ce sont les méthodologies de modélisation en elles-mêmes qui sont questionnées. Le vocabulaire employé dans les logiciels de modélisation traditionnel illustre leurs limites. Par exemple, les fonctions de « perçage », « extrusion » ou « dépouille » du logiciel Solidworks renvoient aux contraintes des procédés soustractifs.

Les concepteur.trices peuvent donc privilégier la modélisation générative. L'approche générative regroupe différentes méthodes qui n'ont pas été développées spécifiquement pour la fabrication additive **[79]**. Les méthodes de modélisation par optimisation topologique et optimisation paramétriques semblent répondre aux capacités de la fabrication additive.

Doutre **[80]** montre qu'en effet, l'optimisation topologique permet de pallier l'inertie psychologique des concepteur.trices et ainsi de générer des géométries auxquelles i.elles ne sont pas habitué.es (voir figure 21 ci-dessous). En ce sens, on peut souligner qu'il existe un outil support qui aide les concepteur.trices à manipuler la fabrication additive dans la phase de conception des architectures des composants.

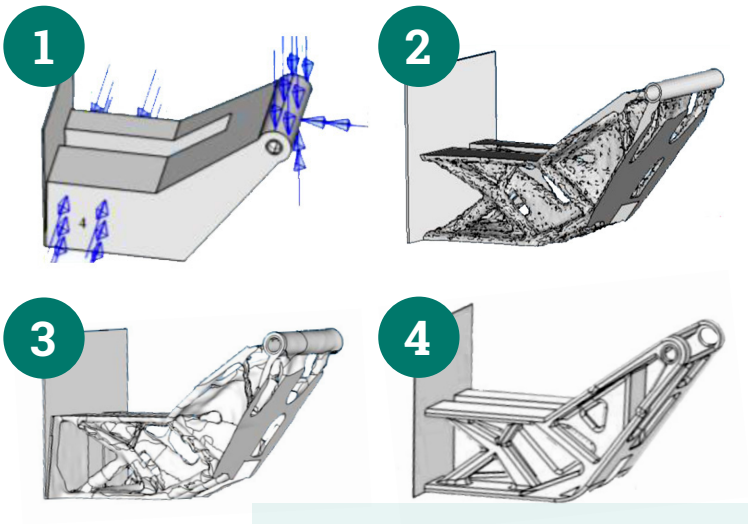


Fig.21 - L'optimisation topologique génère des géométries inhabituelles pour les concepteur.trices, d'après Doutre [80]

2.4.2 La fabrication

L' étape de fabrication par Fusion de poudre par laser est décrite dans la section précédente (§2.3.2). Cette étape incarne le moment du passage de l'objet numérique à l'objet tangible. A ce stade, la visualisation du modèle numérique se fait « en vue du dessus » (plan x, y) directement sur la machine. Cette vue correspond à la définition des couches en cours de fabrication. Il est aussi possible de visualiser ce passage du numérique au tangible « en direct » grâce à des outils de surveillance dits « in situ ». Par exemple, des clichés peuvent être pris à différentes couches fabriquées. Le déroulement de la fabrication peut aussi être suivi à l'aide de caméras.

2.4.3 Les parachèvements

Cette étape de la chaîne de connaissances de la fabrication additive marque la fin de la chaîne numérique et le passage à des opérations essentiellement manuelles, non réalisées assistée d'outils numériques. Des parachèvements sont illustrés sur la figure 18. Si certaines de ces opérations sont caractéristiques de la fabrication sur lit de poudre (aspiration de la poudre non fusionnée, enlèvement des supports) d'autres sont issues de domaines de connaissances existants non spécifiques à la fabrication additive.

Document confidentiel

Par exemple, les traitements thermiques appliqués pour relaxer les contraintes accumulées par la fusion sont connus de la métallurgie et appliqués dans d'autres procédés. L'usinage est également utilisé en parachèvement pour les qualités surfacique et géométrique qu'il permet d'obtenir.

2.4.4 Les contrôles

Pour qualifier le caractère « fini et fonctionnel » du composant, un ou plusieurs contrôles sont appliqués. Un panel d'outils de contrôles non destructifs est présenté dans la figure 18. Ils peuvent être classés en deux catégories : les contrôles qui s'intéressent au composant dans son épaisseur (tomographie, contrôle par ultrasons par exemple) et ceux qui se limitent à sa surface (par exemple scan 3D et ressuage). Comme pour les parachèvements, ces opérations convoquent des connaissances non uniquement spécifiques à la fabrication additive, et pour certaines déjà appliquées dans la production conventionnelle.
Finalement, ce qui est véritablement caractéristique dans cette chaîne de connaissances de la fabrication additive c'est qu'il est désormais possible de traduire la complexité de l'objet numérique au niveau de l'objet tangible. En ce sens la fabrication additive, et notamment la fabrication par Fusion de poudre métallique par laser, représente un potentiel singulier pour les concepteur.trices. Les 4 niveaux de complexité sont synthétisés et illustrés par une typologie formelle dans la section suivante.

2.5 Une nouvelle opportunité pour les concepteur.trices : la complexité

2.5.1 Les 4 types de complexité

Cette 1ère partie d'état de l'art, a souligné 3 caractéristiques majeures de la fabrication additive. Elle est libérée des restrictions imposées par les outillages, elle s'appuie sur des outils numériques qui assistent les humains pour créer, visualiser et éditer des modèles 3D complexes et elle permet de matérialiser fidèlement les modèles numériques créés. Les possibilités de la fabrication additive laissent alors finalement entrevoir de nouvelles opportunités à explorer. En d'autres termes, pointer les connaissances liées à la fabrication additive permet de passer de l'innovation technologique de procédé vers de potentielles innovations de produit **[81]**.

Les travaux de Hague **[82]**, Rosen **[83]**, **[84]** et Gibson **[85]** ont proposé 4 types de complexité définis comme suit :

1. **Shape complexity** : il est théoriquement possible de concevoir et fabriquer toute géométrie. Il est donc possible de réaliser des formes creuses, gauches, d'épaisseurs variables, plusieurs géométries imbriquées, des volumes ajourés ou encore des parois d'une extrême finesse sans recourir à une décomposition en différents éléments à assembler après fabrication

2. **Material complexity** : les matériaux peuvent être appliqués points par points ou par couche. Cela rend possible la conception et la fabrication de composants en multi-matériaux c'est-à-dire présentant une distribution continue (gradient de matériaux) ou discontinue (transition nette entre les matériaux) sans recourir au surmoulage ni à l'assemblage. Il est donc possible de conférer, localement, des propriétés mécaniques, thermiques et électriques singulières pendant la fabrication

3. **Hierarchical complexity** : les composants peuvent présenter des structures d'échelles différentes (de la microstructure en µm à la macrostructure en mm, jusqu'à la mésostructure en m). Avec la fabrication additive, il est en effet possible de concevoir et fabriquer des structures cellulaires, en mailles, en branches ou en treillis qui peuvent être intégrées dans l'épaisseur des composants, à leur surface ou qui peuvent se substituer à leur structure

4. **Functional complexity** : le volume « interne » des composants est accessible à la conception et pendant la fabrication. **Il est donc possible de concevoir des géométries internes accessibles pendant la fabrication puis qui ne seront plus visibles ni accessibles après fabrication. Cette possibilité permet par exemple d'intégrer plusieurs fonctions dans un même composant.**

La demande initiale de l'unité R&D était justement d'explorer la complexité fonctionnelle avec la Fusion de poudre métallique par laser. Nous explicitons donc ensuite l'intégration de fonctions, notamment via l'inclusion de corps étrangers (§3.1).

2.5.2 Typologie de démonstrateurs vis-à-vis de la complexité

La typologie de démonstrateurs (fig.22) réalisés en fabrication additive métallique vise à montrer la continuité entre les 4 types de complexité décrits. En effet, chaque démonstrateur combine au moins deux des types de complexité en une même géométrie. Par exemple, le démonstrateur A (fig.22), présente une forme en « branches organiques » typiquement issue d'un logiciel d'optimisation pour la fabrication additive. Il serait compliqué voire impossible de fabriquer cette forme par un procédé conventionnel. Ce démonstrateur tire donc partie de la complexité formelle (Shape complexity) offerte par la fabrication additive. Dans le même temps, ce démonstrateur présente une structure « en branches », grâce à laquelle les efforts mécaniques sont répartis dans toute la géométrie. C'est donc une exploitation de la complexité au niveau hiérarchique (Hierarchical complexity). Le démonstrateur A « cumule » alors deux types de complexité. Autre exemple, le démonstrateur B (fig.22) cumule deux types de complexité : au niveau hiérarchique et au niveau matériau. En effet, les « filaments » présents dans l'épaisseur de ce démonstrateur seraient impossibles à fabriquer autrement que par la fabrication additive.

Document confidentiel

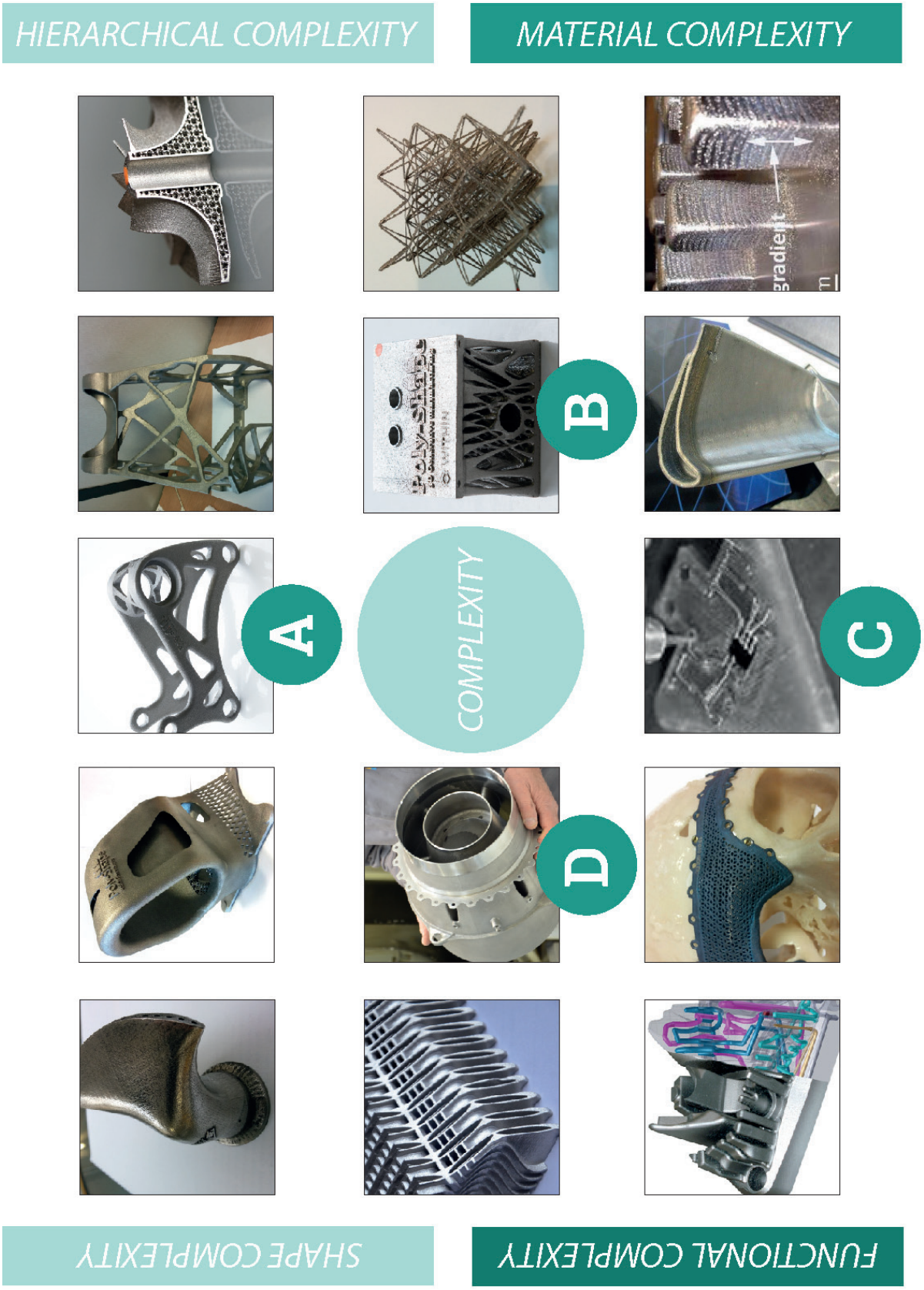
Les plans supérieurs et inférieurs de ce démonstrateur ne présentent pas de caractéristique singulière, ils sont massifs. Ce démonstrateur exploite la complexité au niveau hiérarchique. Dans le même temps, ces « filaments » confèrent des propriétés thermiques particulières pour l'ensemble, ce sont des dissipateurs thermiques. Cette fonction technique est rendue possible car le diamètre de ces « filaments » et leur distribution dans l'espace dédié ne sont pas constants. La matière est distribuée de manière à favoriser, localement la dissipation thermique. En ce sens, ce démonstrateur exploite aussi le type *Material complexity*.

Le démonstrateur C (fig.22) présente aussi deux types de complexité : au niveau matériau et au niveau fonctionnel. Un filament de matériau métallique est déposé localement sur un composant existant. Ce démonstrateur exploite donc la possibilité de fabriquer en multi-matériaux. Dans le même temps, ce matériau métallique est conducteur alors que le reste du composant ne l'est pas. En conséquence de nouvelles fonctionnalités sont apportées localement. La fabrication de ce composant pourrait être poursuivie jusqu'à ce que le circuit métallique conducteur ne soit plus visible, sans que cela n'altère ses fonctionnalités. En conséquence, ce démonstrateur exploite la complexité au niveau fonctionnel.

Le démonstrateur D (fig.22) exploite également deux types de complexité : au niveau formel et au niveau fonctionnel. En effet, ce démonstrateur était auparavant composé de multiples sous-composants, il est désormais fabriqué en un seul composant. La forme qui en résulte est particulièrement complexe. Lors de la conception, des géométries ont été imbriquées au cœur du démonstrateur, elles ne sont ni visibles ni accessibles une fois le composant fabriqué. Ainsi, ce démonstrateur ne peut être fabriqué que grâce à la fabrication additive. En ce sens, il cumule une complexité formelle et fonctionnelle.

Dans chaque cas, la complexité impacte les caractéristiques formelles et fonctionnelles de ces démonstrateurs. La présence de complexité à plusieurs niveaux semble donc être caractéristique de la fabrication additive.

Fig.22 - Typologie de composants existants catégorisés en fonction des 4 types de complexité



Document confidentiel

Synthèse état de l'art – 1ère partie

Cette 1ère partie s'est attachée à faire état des connaissances fondamentales sur la fabrication additive. Elle a été construite à partir de connaissances extraites de la littérature et issue de l'observation de notre terrain industriel. Cette synthèse en présente des points à retenir pour la suite de nos travaux :

La fabrication additive permet d'obtenir rapidement des objets tangibles réalistes qui jouent un rôle de médiation entre la technologie et les individus qui observent et manipulent ces objets. On pourrait nommer cet usage « démonstration rapide » et les produits réalisés pour ce type d'usage seraient donc des démonstrateurs

Certains procédés ont atteint un point de maturité suffisant pour intéresser plus particulièrement les donneurs d'ordres industriels. La Fusion de poudre par laser est emblématique de cette progression. C'est aussi le procédé phare des activités de Poly-Shape, le plus utilisé pour répondre aux commandes des donneurs d'ordres

La présence de complexité à plusieurs niveaux semble donc être caractéristique de la fabrication additive

La partie suivante de l'état de l'art présente le second point d'entrée de cette étude : la créativité. Elle vise à comprendre les mécanismes de la créativité pour pouvoir identifier des leviers sur lesquels agir en vue de proposer une méthode de créativité par et pour la fabrication additive. Cette méthode visera à accompagner l'exploration et l'exploitation des connaissances, afin de favoriser la génération d'idées et de concepts créatifs.

PARTIE 2 : Etat de l'art sur la créativité en conception

Introduction de la 2ème partie de l'état de l'art

Cette 2ème partie de l'état de l'art prend ses distances avec le point de vue techno-centré de la Partie 1 pour puiser dans les sciences humaines, la psychologie et les sciences de l'information. Ainsi les notions importantes de la créativité sont présentées, dans la perspective d'établir un lien entre fabrication additive et créativité (fig.23).

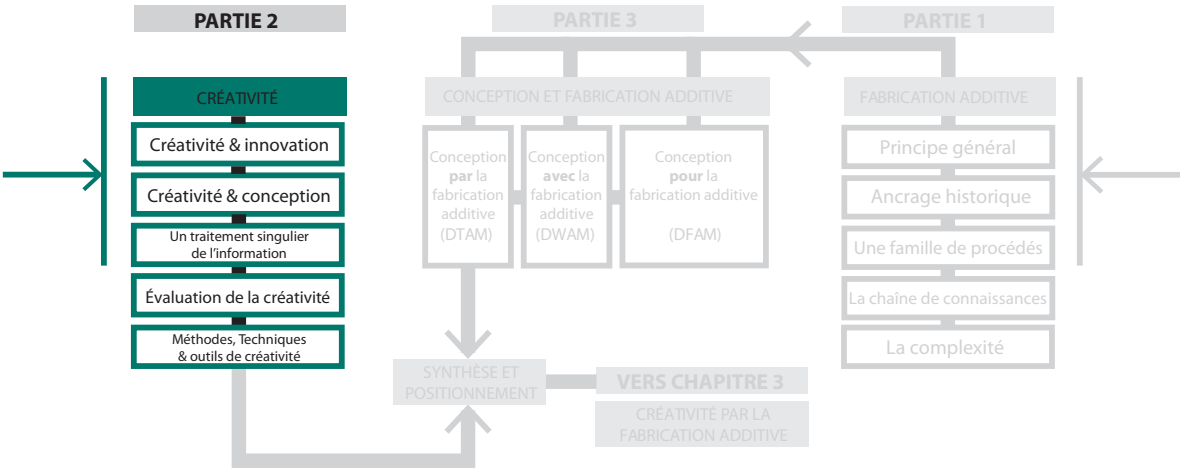


Fig. 23 - La créativité, second point d'entrée de notre état de l'art

Cette 2ème partie présente en préambule les principes généraux de la créativité, soulignant ainsi sa dimension systémique (§2.6). En cohérence avec le contexte industriel, nous nous attachons ensuite à définir la créativité du point de vue des organisations et du management. Cette définition faite du point de vue des entreprises permet de mettre en lumière la notion d'Exploration qui apparaît dans les situations d'innovation poussée par une technologie (§2.7). La créativité est ensuite replacée dans le processus de conception pour souligner leurs similitudes et faire apparaître les caractéristiques de la créativité en conception (§2.8).
La section §2.9 présente les notions qui sont au cœur de la définition de notre approche liant créativité et fabrication additive. Ainsi, le processus créatif est présenté comme un processus singulier de collecte et traitement d'informations (§2.9.2). Nous détaillons aussi le moteur de progression de ce processus créatif : la construction de représentations (§2.9.3). Enfin, nous approfondissons les types, rôles et statuts que prennent les objets intermédiaires au fil du processus créatif (§2.9.4). Cet approfondissement permettra de questionner ces définitions au regard de la fabrication additive.
Nous poursuivons par l'identification des critères et modalités d'évaluation de la créativité en conception (§2.10) puis par une synthèse de techniques & outils existants pour stimuler la capacité créative (§2.11).
Enfin, une synthèse d'éléments à retenir de cette 2ème partie de l'état de l'art est proposée.

2.6 Préambule : principes généraux de la créativité

2.6.1 Tout le monde est créatif

Historiquement, la créativité a d'abord été définie sous l'angle d'un phénomène inconscient et mystérieux. Vu comme une boîte noire incontrôlable, de soudaines « illuminations » appa-

Document confidentiel

-raissaient dans l'esprit de certains individus après une période « d'incubation » **[86]**. Cette approche « psychanalytique » a influencé (et influence encore) la compréhension de la créativité et l'approche « cognitive » à laquelle nous nous intéressons particulièrement. La définition de l'approche psychanalytique ne sera pas approfondie, elle est considérée comme hors du périmètre de cette thèse. Les études issues de la psychologie cognitive ont défini plus finement la créativité, on parle alors « d'approche cognitive ». Il est désormais admis que la créativité est une capacité présente naturellement chez tous les individus : « Tout le monde, sans exception, possède un énorme potentiel créatif. Le problème est que seuls quelques-uns utilisent ce potentiel. La majorité n'a même pas l'idée de l'exploiter » disait Guilford en 1967 **[87]**. En outre, elle est de plus en plus recherchée pour répondre aux problèmes de notre monde complexe en équilibre précaire. En effet, selon De Brabandère **[88]** « là où la logique permet de penser le monde tel qu'il est, la créativité permet de le penser tel qu'il n'existe pas encore ». Selon l'approche cognitive, il est possible d'identifier les facteurs qui influent sur cette capacité.

Pour Chakrabarti **[89]** la créativité résulte de trois facteurs et des interactions entre ceux-ci : la motivation de l'individu, les connaissances que l'individu a d'un domaine et son aptitude à cheminer mentalement entre inconscience et conscience (ses travaux utilisent le terme *Flexibility* à propos de ce dernier facteur qui renvoie à l'approche psychanalytique). Ainsi, pour être « créatif », un individu ne compte pas seulement sur ses prédispositions naturelles, il peut être « poussé » par lui-même ou par des facteurs extérieurs.

Selon Ryan et al. **[90]**, la motivation est déclinée en deux types : *Intrinsic motivations* et *Extrinsic motivations*. Les motivations extrinsèques désignent des situations où l'acte créatif est poussé par une ou plusieurs circonstances externes telles que les pressions sociale et économique ou l'attente d'une récompense. Les motivations intrinsèques désignent les situations où les individus agissent seulement pour l'intérêt et le plaisir qu'ils pensent ou savent trouver en réalisant l'action. Selon Lubart **[91]**, 4 types de facteurs font émerger la créativité : cognitifs (intelligence, connaissances, styles cognitifs), conatifs (traits de personnalité, motivations), émotionnels (états, énergie) et les facteurs environnementaux. Selon Parmentier **[92]** la créativité demande de la part des individus « d'être capables de sortir des sentiers battus et de considérer des alternatives aux solutions évidentes, sans forcément adopter une autre voie mais plutôt pour prendre du recul. C'est une posture critique face à l'habitude et à la routine ». D'après ces définitions, nous retenons qu'il est possible d'aider, de stimuler la capacité créative des individus, en agissant sur différents facteurs d'ordres individuels ou environnementaux.

2.6.2 La créativité : dimension systémique

Notons qu'à ce stade, le terme « créatif » reste ambigu. En effet, il est utilisé pour désigner la capacité humaine (« un individu créatif »), mais aussi un raisonnement (« un raisonnement créatif »), mais aussi un lieu (« un lab créatif ») ou encore des productions (« un concept créatif »). Il est donc important de comprendre le mécanisme commun qui sous-tend ces qualificatifs. Les travaux d'Amabile **[93]**, de Lubart **[91]** et de Bonnardel **[94]**, entre autres, ont participé à éclaircir cette ambiguïté. Selon ces auteur.es la créativité est en effet indissociable de critères qualifiant les productions issues de raisonnements créatifs, en cours ou aboutis, telles que la nouveauté, l'adéquation à un contexte donné ou l'utilité. D'autres travaux ont fait émerger les critères d'originalité **[95]**, de variété et de quantité **[96]** ou encore, selon Yannou **[97]** de valeur pour l'entreprise. La créativité peut alors être mesurée, en focalisant sur trois dimensions :

- la personnalité des individus : mesures du « potentiel créatif » et du « talent créatif » des individus **[30]** (notamment par des questionnaires de personnalité)
- l'efficience du processus de créativité dans un contexte donné (évaluation du déroulement du processus) **[97]**
- la qualité des productions réalisées pour un projet donné (évaluation des idées, des concepts, notamment à travers les dessins, textes…réalisés) **[30]**

La description du contexte industriel a montré que l'intégration d'une approche par la créativité est encore naissante, sans précédent dans cet environnement techno-centré (§1.1.3). L'objet de cette recherche est alors moins d'augmenter la capacité créative des individus que de proposer, dans un premier temps, un système favorable à l'émergence de cette capacité habituellement peu utilisée par les acteur.trices de ce contexte. Il s'agit effectivement, à l'échelle de ces travaux, de faire d'abord la preuve de l'intérêt d'une approche par la créativité. En ce sens, nous nous intéresserons moins à la mesure de la personnalité créative des individus mais nous approfondirons les critères pour l'évaluation de la qualité du processus proposé et des productions ainsi générées (§2.10).

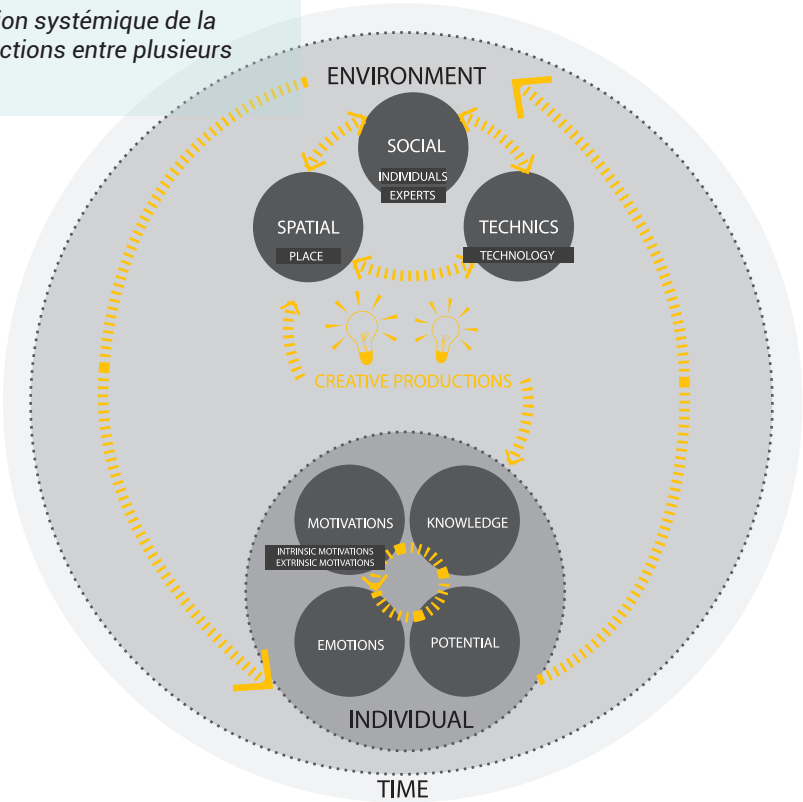
Finalement, la créativité doit être comprise dans sa dimension systémique, mise en lumière par Csikszentmihalyi **[98]** et étendue récemment par Bila-Deroussy **[30]**. En effet, au-delà de l'individu lui-même, il apparaît possible d'agir sur plusieurs dimensions pour favoriser l'émergence de cette capacité créative et ainsi favoriser la génération de productions créatives.

La figure 24 ci-dessous synthétise ce système en faisant apparaître les 2 dimensions principales : **Individu** et **Environnement**. L'environnement, notamment ses composantes sociale et technique, transmets des informations, des connaissances et des compétences à l'individu (flèche descendante). En retour l'individu agit sur son environnement et réalise des productions créatives (flèche montante). L'individu est « poussé » à agir par différents facteurs que sont ses motivations, ses connaissances, ses capacités d'action dans l'environnement, et ses émotions.
Parce qu'elles sont externes à tous les individus, les productions créatives, à leur tour, transmettent des informations à la fois à l'Environnement et à l'Individu. La composante sociale de l'environnement joue également un rôle particulier : elle comprend notamment des individus qui ont autorité pour évaluer la qualité des productions par des jugements.
Enfin, selon Gero **[99]** « *where you are when you do what you do matters* », cette affirmation définit la créativité comme une expérience située et temporelle car elle se trouve dans l'évolution d'idées vers des concepts puis des produits. Cela conduit alors à faire également apparaître la dimension spatiale de l'environnement (i.e lieu(x) où se réalisent les productions créatives) et la dimension **Temps** (zone périphérique sur fig.24).

Favoriser ou stimuler l'émergence de la créativité dans une vision systémique revient donc à agir sur les deux dimensions principales (Environnement et Individu) et donc sur toutes ou parties de leurs composantes.

Document confidentiel

Fig.24 - Représentation systémique de la créativité : des interactions entre plusieurs dimensions



Les sections suivantes s'attacheront à montrer que la créativité est une capacité clé pour l'innovation en entreprise, notamment en Recherche & Développement. Nous soulignerons que le processus créatif présente de nombreuses similitudes avec le processus de conception, avant d'approfondir les caractéristiques de la créativité.

2.7 Créativité et innovation dans les entreprises

2.7.1 De la R&D à la RID : vers un régime d'Exploration

La construction de l'unité R&D proactive au sein de Poly-Shape requiert des objectifs apparemment antinomiques (§1.1.2). En effet, il s'agit d'une part de faire émerger de nouvelles connaissances pour se différencier et, d'autre part, de capitaliser rapidement les connaissances déjà existantes. De plus, ces objectifs sont à atteindre dans un contexte où les donneurs d'ordres expriment difficilement leurs besoins car cette expression est restreinte à l'aune des connaissances qu'ils ont sur la fabrication additive. Cette situation décrit finalement une tension paradoxale entre un besoin de stabilisation et d'accélération de l'entreprise (capitaliser rapidement pour solidifier durablement son assise face à la concurrence) et un besoin de changement, de nouveauté (générer de nouvelles connaissances et de nouveaux concepts pour se différencier de la concurrence et diffuser plus largement la fabrication additive).

Selon Hatchuel et al. **[100]** cela correspond typiquement à un cas où l'activité d'innovation est positionnée à l'articulation entre la Recherche et le Développement. Dans cette organisation, la Recherche est définie comme « un processus maîtrisé de production de connaissances ne cherchant pas lui-même à définir des valeurs » (pour les clients ou pour l'entreprise elle-même). Et Développement est défini comme « un processus maîtrisé qui active les compétences et les connaissances existantes afin de définir un produit ». L'innovation est alors considérée comme une logique transversale structurant ces activités. Ainsi positionnée, l'innovation peut produire « de nouvelles questions pour la Recherche, des idées de produits qui pourront être développés, des idées de produits émergents à divers stades de formalisation, de nouvelles compétences émergentes ou encore de nouvelles connaissances émergentes ». Finalement, la dynamique d'innovation impulsée dans l'unité R&D de Poly-Shape est donc une situation qui relève de la **RID - Recherche Innovation Développement** au sens proposé par Hatchuel et al.

Positionnée à l'articulation entre recherche et développement, la notion d'innovation reste complexe à définir. Selon les travaux fondateurs de Schumpeter **[101]**, l'innovation définirait la rencontre réussie entre un produit et un marché. A sa suite, les travaux de Kelly et al. **[102]** ont précisé que l'innovation désigne le processus qui part d'une invention et conduit à la mise sur le marché de celle-ci. Nous retenons donc que le terme innovation désigne à la fois les « effets », c'est-à-dire les résultats du processus et le processus en lui-même.

Dans un souci d'identifier les caractéristiques d'entreprises dites innovantes, un courant de recherche, initié par Utterback et al. **[103]**, s'est attaché à observer les effets du processus d'innovation. Il en a résulté la formulation de différentes échelles décomposées en degrés témoignant de changements plus ou moins profonds apparus dans l'entreprise elle-même, dans les connaissances, dans les usages ou sur les marchés. Selon Garcia et al. **[4]**, un manque de définitions cohérentes a finalement abouti à pléthore de degrés ambigus (Disruptive, Discontinuous, Radical, Really-new, Architecural, Incremental ...) dont les termes désignent parfois des effets identiques.

Selon Garcia **[4]** et Garel **[104]** définir l'innovation par ces degrés peut être stérile car le caractère radical d'une innovation est constaté a posteriori, une fois que le produit et ses attributs ont effectivement gagné l'acceptation d'un marché. Ces degrés sont souvent définis par comparaison, en mesurant le différentiel de performance apporté par le produit, par rapport aux produits et aux marchés existants, ou en constatant que le produit a créé un nouveau marché **[105]**. Ces degrés ne sont alors pas adaptés pour caractériser l'innovation en cours.

En utilisant la notion d'expansion, Hatchuel **[106]** met plus l'emphase sur le processus lui-même que sur ses effets. Il définit conceptuellement l'expansion comme « le processus qui engendre des découvertes et des apprentissages, surprenants ou non ». Plus prosaïquement, Garel et al. pointent que cette notion d'expansion est particulièrement pertinente dans les situations où le processus d'innovation est conduit à partir d'une technologie qui a déjà montré des développements matures dans des secteurs de pointe mais qui est encore en maturation, et pour laquelle il existe des marchés à créer, une variété d'applications potentielles à découvrir. Dans ce cas, les client.es, qui n'existent pas au préalable, n'ont pas formulé des demandes précise ou leurs besoins **[107]**. En ce sens, l'innovation peut être définie par la notion d'expansion, elle-même décrite par deux dimensions : le potentiel technologique et le potentiel de valeur. Cette notion d'expansion semble donc être adaptée à notre contexte où l'innovation articule « R » et « D » pour la fabrication additive, une technologie présentant les caractéristiques décrites. Dans ce contexte, il s'agit moins d'être radical par rapport à l'existant que de dessiner une réalité à venir.

Document confidentiel

Dans ce paradigme et selon Garel et al **[107]**, le potentiel technologique désigne un corpus de connaissances riches, précises et nouvelles mais non encore transposables en applications. Le potentiel de valeur désigne les performances et nouveaux usages qui peuvent renouveler les marchés établis ou en créer de nouveaux. Dans ce cas, la valeur est définie non pas, a posteriori, lorsqu'il est possible de constater le succès d'un produit sur un marché mais en amont des premiers usages. On note ainsi le terme de « value-network » introduit par Christensen **[105]** que l'on peut traduire par le « potentiel de diffusion dans un réseau ». Ainsi, le processus d'innovation démarre d'une idée et vise à réduire la distance qui la sépare des connaissances sur la technologie et sur la valeur. L'expansion c'est donc le phénomène de réduction de cette distance **[104]**.
A partir des deux dimensions Potentiel technologique et Potentiel de valeur, Garel et al. **[104]** ont défini des régimes d'innovation. Ces différents régimes constituent une typologie représentée en 3 niveaux sur la figure 25 ci-dessous.

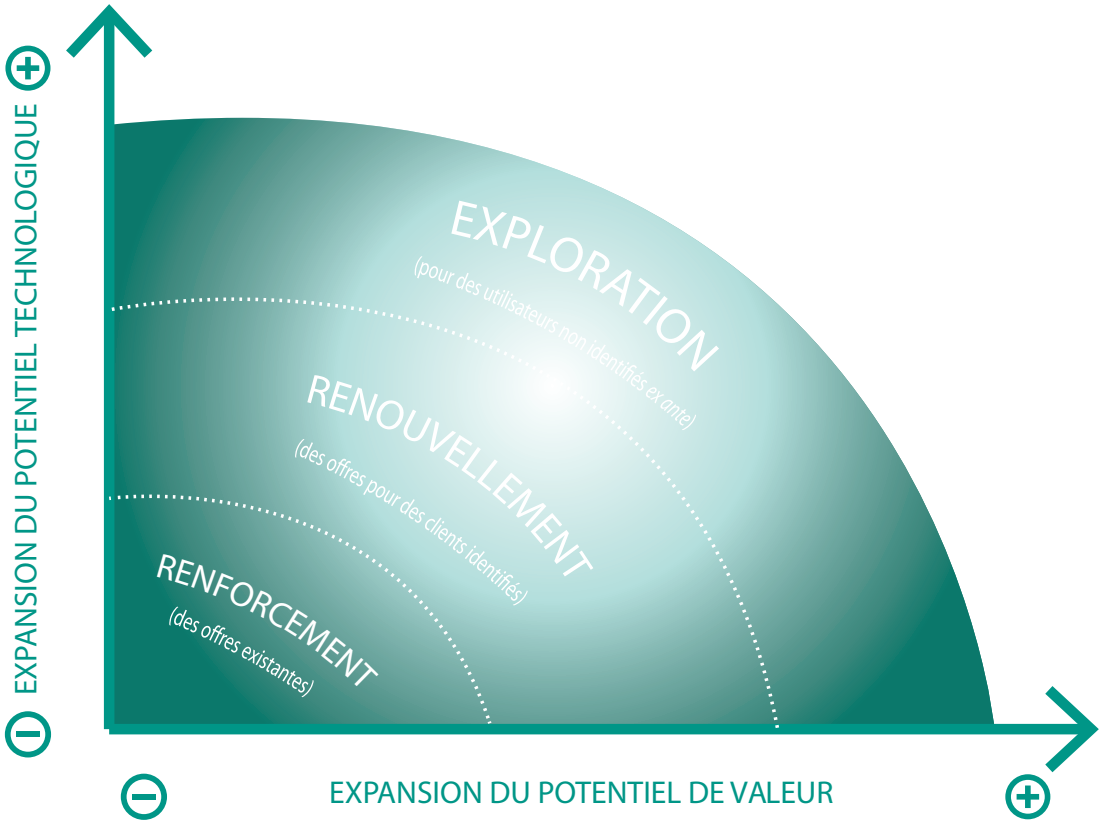


Fig.25 - Typologie des régimes d'innovation [104]

Dans cette typologie, les différents régimes sont définis comme suit :

Régime de renforcement (des offres existantes) – Le développement de produits s'appuie sur des connaissances techniques maîtrisées et des connaissances précises sur les marchés. Un cahier des charges détaillé et une planification rigoureuse peuvent être formulés. Au cours du processus d'innovation, il y a peu ou pas d'expansion sur les deux axes.

Régime de renouvellement (des offres pour des clients identifiés) – De nouveaux produits sont développés à partir de connaissances sur les activités des client.es, et de l'expression de leurs besoins. Au cours du processus d'innovation, l'expansion est moyenne. Le critère de nouveauté est prépondérant pour caractériser les résultats générés dans ce régime. A partir d'un état de l'art conséquent, Garcia **[4]** affirme que la « nouveauté » est déterminée par un ensemble de facteurs scindés en deux perspectives Qu'est-ce qui est nouveau ? (6 facteurs dont « new technology, new process, new uses, new experience » …) et Au regard de qui est-ce nouveau ? (24 facteurs dont « new to the world, to the industry, to the firm, to the customer » …).

Régime d'Exploration (pour des utilisateurs non identifiés ex ante) – Régime souvent assimilé au renouvellement, sauf que les enjeux de la conception sont spécifiques. Il s'agit d'explorer de nouvelles applications alors que, d'une part, les utilisateurs potentiels sont inconnus au départ et impossibles ou difficiles à identifier (car très nombreux et variés) et que, d'autre part, il est difficile, à priori, de définir les connaissances technologiques utiles parmi une grande quantité de connaissances disponibles. Le processus consiste alors d'abord à produire et à rassembler des connaissances pour obtenir « des résultats intermédiaires ou provisoires **[107]** qui peuvent être de nouvelles connaissances, des idées, des concepts, et/ou des « demi-produits », selon le terme proposé par Weil **[108]**. Ni cahier des charges ni objectif précis et planifié ne peuvent être formulés. Selon Garel et al., sont regroupées dans ce régime les situations d'innovation qui vivent une expansion forte selon les deux axes, la technologie et la valeur.

Au regard de cette typologie, en effet, le régime d'Exploration rend la définition par degrés d'innovation inopérante car il ne s'agit pas de situations où des produits rencontrent un marché mais « d'alternatives nouvelles dont les résultats finaux sont incertains » **[109]**. La notion d'expansion annihile également cette gradation car l'innovation n'est pas qualifiée a posteriori mais en cours de processus.
Pour autant, si les travaux de Garel et al. et, plus largement, les travaux sur les notions d'expansion et d'Exploration sont éclairants sur la définition de l'innovation au niveau processus, ils n'éclairent pas sur les modalités de définition au niveau des résultats intermédiaires[24]. Comment qualifier la qualité des résultats engendrés par les processus d'innovation qui relèvent de l'Exploration ?

[24]Cette discussion renvoie aux perspectives ouvertes par les auteurs du livre fondateur du concept de RID sur la définition de la valeur dans la conception innovante, sur la valeur de ce qui est à concevoir ou de ce qui est en train de se concevoir, sur la valeur d'un concept, plutôt que la valeur du produit vis-à-vis des attentes du client.

Document confidentiel

La typologie des régimes d'innovation présentée montre une définition conceptuelle de l'innovation. Ces travaux ont été enrichis par des recherches basées sur des observations de cas et d'entreprises innovantes montrant que le régime d'Exploration couvre, en pratique, un couplage entre deux types d'activités : « l'exploration » et « l'exploitation ».

La définition de ce couple est l'objet de la section suivante. Cette section met également en lumière le rôle de la créativité pour l'innovation dans ce contexte.

2.7.2 Créativité et innovation en RID : le couple exploration-exploitation

La section précédente a présenté une définition conceptuelle de l'innovation, du point de vue processus et du point de vue de ses « effets » (appelés résultats intermédiaires), dans le contexte où l'activité d'innovation est positionnée à l'articulation entre la recherche et le développement. Ces définitions ont fait apparaitre une typologie de 3 régimes d'innovations, parmi lesquels nous avons remarqué le régime d'Exploration.

Positionnée à l'articulation entre « R » et « D », l'innovation fait face, dans les entreprises, à une tension couramment identifiée **[110]**. En effet, elle groupe deux types d'activités contradictoires. D'une part, il s'agit d'explorer de nouvelles connaissances et de nouvelles compétences. Les résultats de cette activité sont incertains, parfois négatifs et obtenus sur le long terme. La priorité est alors mise sur la variété des projets entrepris **[111]**. D'autre part, il s'agit d'exploiter de manière efficace des connaissances et des compétences déjà existantes dans l'entreprise. Les équipes capitalisent des acquis en les formalisant pour les présenter à des utilisateur.trices et des marchés potentiels. Cette activité produit des résultats à plus court terme. La priorité est alors mise sur la rapidité du processus qui va permettre de formaliser les connaissances en vue d'atteindre le marché **[111]**. Ces deux types d'activités, qui permettent de faire face à l'environnement concurrentiel actuel, sont appelés d'une part « exploration » et d'autre part « exploitation » **[109]**.

La nécessité d'un équilibre approprié entre ces deux types d'activités a été conceptualisé par Duncan dès les années 1970 **[112]** puis plus précisément par Tushman et al. **[113]**. Apparaît alors la notion d'entreprises « ambidextres », capables de concilier les impératifs contradictoires de l'exploration et de l'exploitation, soit par des structures distinctes soit par une seule structure ayant une capacité dynamique d'adaptation **[111]**. Si la mise en place, dans les entreprises, de structures favorables à l'ambidextrie semble importante, les modes de management sont un levier fort pour la favoriser **[114]**. En effet, Gibson et al. **[115]** ont introduit l'idée que la capacité à l'ambidextrie relève de l'individu. Les individus seraient les mieux à mêmes de diviser leur temps entre les deux activités contradictoires, ils peuvent être ambidextres. Or dans les entreprises, c'est le management qui décide de la répartition des activités des individus, la mise en place de modes de management adaptés favoriserait donc l'ambidextrie **[114]**.

En étudiant un échantillon de 307 entreprises françaises, Brion **[114]** identifie, du point de vue du management, les facteurs qui favorisent l'ambidextrie. Il souligne que, de manière générale, les modes de management doivent simultanément favoriser l'efficience à court terme et la découverte à long terme. L'augmentation de la performance à court terme nécessite un management qui donne des objectifs clairs et tangibles, adossés à des systèmes d'évaluation.

Cependant, un haut niveau de contrôle et d'évaluation inhibe la capacité à explorer, il y a donc un équilibre à trouver **[115]**. Ces auteurs affirment que, en plus du management pour la performance, « les managers doivent aussi avoir des orientations à long terme à travers la créativité et la prise de risques pour soutenir les activités d'exploration », cela pour inciter à l'exploration même si les résultats peuvent être incertains et négatifs. Cette affirmation renvoie au fait que la créativité est couramment reconnue comme un facteur clé pour l'innovation **[116]**, **[117]**. Selon Brion et al. **[114]**, **[118]**, et Amabile **[116]**, les conditions managériales favorisant la créativité sont flexibles, elles donnent de l'autonomie aux individus et aux équipes sans les laisser totalement libres, elles encouragent la prise de risque, autorisent l'erreur et incitent les individus à acquérir des informations pour renouveler leurs connaissances. Les entreprises mettent en pratique des conditions qui favorisent la créativité, par exemple par des creative slacks **[119]** : des moments prévus pour que les acteur.trices de l'entreprise réalisent des projets qui ne sont pas nécessairement en lien avec leurs missions habituelles mais qui permettent de constituer un réservoir d'idées et de connaissances potentiellement porteuses de valeurs pour l'entreprise.
A partir de ces caractéristiques, il est tentant de penser que la créativité serait adaptée aux activités d'exploration plus qu'aux activités d'exploitation, et que la gestion des performances favorise plus l'exploitation que l'exploration. Or l'étude d'entreprises menée par Brion et al. fait justement apparaître que « la créativité a un effet très positif et très significatif aussi bien sur l'innovation d'exploration que sur l'innovation d'exploitation, et même davantage sur ce dernier type ». Ces constats, également relevés dans les travaux de Audia et al. **[120]**, ont conduit ces auteurs à distinguer deux types de créativité : la créativité « incrémentale » et la créativité « divergente ». La créativité incrémentale correspond à l'amélioration des connaissances et des idées existantes tandis que la créativité divergente a pour objectif de rompre avec les idées et les compétences existantes. La créativité divergente est donc utile pour l'exploration et la créativité incrémentale pour l'exploitation. Les résultats montrent aussi une nuance à cette distinction : les entreprises performantes à la fois sur l'innovation d'exploration et d'exploitation n'incitent pas à la prise de risques sans garantie de retour. Elles sont plutôt dans « l'exploration prudentielle », selon l'expression proposée par Le Masson et al. **[121]**. Les auteurs de ces études en déduisent que l'exploration ne repose pas sur des connaissances ou des compétences entièrement nouvelles, la créativité divergente participerait donc plus à cristalliser ou à faire émerger des associations originales entre des connaissances déjà existantes. En ce sens, la créativité divergente emprunterait alors à la créativité incrémentale. Les deux types seraient donc fortement mêlés. Finalement, en plus d'être une capacité individuelle, ces travaux montrent que la créativité joue aussi un rôle de médiation dans le contexte tendu de l'innovation ambidextre car elle ferait le lien entre deux situations a priori antagonistes, la prise de risque et la performance **[118]**.

2.7.3 Synthèse : créativité et entreprise

Cette section a souligné que la créativité est au cœur de l'innovation, particulièrement dans le contexte de RID – Recherche Innovation Développement. Du point de vue des sciences de gestion et du management, la créativité est en effet vue comme « une capacité dynamique de l'organisation à générer, capter et articuler des idées susceptibles d'apporter de la valeur à cette organisation ». Selon Parmentier **[92]**, le management de cette capacité est un défi que les entreprises doivent relever pour être innovantes.

Document confidentiel

Nous avons vu que mettre en œuvre l'innovation en entreprise c'est donc agir au niveau de la structure et de l'organisation de l'entreprise, mais c'est aussi agir sur les activités. En effet, selon Le Masson et al., il ne peut y avoir innovation sans conception car l'innovation n'est pas due « à un coup de chance de la part d'un génie charismatique », elle est un « output possible » mais non systématique de l'activité de conception **[121]**.

Les sections suivantes traiteront alors de la notion de créativité non pas du point de vue de l'organisation et du management mais du point de vue de la conception, niveau sur lequel nous agissons.

La section ci-après s'attache ainsi à définir, de manière synthétique, la conception, et à replacer la créativité dans ce contexte.

2.8 Créativité et processus de conception

La section précédente l'a évoqué, le contexte fortement concurrentiel nécessite que l'innovation ne soit ni un coup de chance au terme d'une longue démarche d'essais-erreurs, ni un coup de génie dans une démarche chaotique. Elle doit pouvoir être répétée dans le temps, pour différents projets et avec différent.es acteurs et actrices. En ce sens, le processus de conception est reconnu comme étant la colonne vertébrale ou le « squelette » du processus d'innovation **[34]**.
La modélisation du processus de conception vise alors à rendre visible le « métabolisme » des actrices et acteurs de la conception : comment les informations sont collectées et digérées en connaissances. Comment celles-ci sont utilisées et qu'est-ce qui est généré en sortie. Autrement dit, comment passer d'un problème abstrait, flou à des solutions.

2.8.1 Modèles du processus de conception

Cette section présente des méthodologies de conception existantes. Cette description vise à souligner l'existence d'une modélisation plus récente et plus proche de l'activité réelle des concepteur.trices par rapport à des modèles linéaires ou séquentiels précédents **[121]**. Elle vise également à souligner que de grandes similitudes ont été observées entre les étapes mises en œuvre dans le processus de conception et les étapes décrites pour le processus créatif **[122]**, **[123]**.
La littérature propose de nombreuses classifications des modèles existants, comme par exemple celle de Wynn et Clarkson **[124]**. Nous nous intéressons particulièrement à la classification de Howard et al. **[122]** car elle met en parallèle des modèles du processus de conception issus de l'ingénierie et des modèles de processus créatifs issus d'études sur la créativité menées selon l'approche cognitive. Selon Howard et al. **[122]**, mettre en regard processus de conception et processus de créativité permet d'identifier les phases du processus sur lesquelles il faut se concentrer pour favoriser l'utilisation de la capacité créative et favoriser

l'obtention de productions créatives.

Selon Howard et al. **[122]**, la représentation linéaire des modèles reste dominante, à la fois pour les processus issus de l'ingénierie et ceux issus de la psychologie cognitive. En ce sens, la table 1 représente une synthèse de modèles sous forme linéaire. Cependant, des processus plus récents, issus de la théorie C-K ne peuvent, eux, pas être représentés de manière linéaire **[97]**.

La synthèse proposée est moins destinée à être exhaustive qu'à souligner, premièrement, les trois types de modèles identifiés : Linéaire, Séquentiel et Co-évolutifs, ces derniers étant les plus récents. Elle vise ensuite à montrer les phases communes entre processus de conception et processus créatif.
Les processus issus de l'ingénierie montrent traditionnellement une segmentation en 4 à 6 phases :

- **Phase 1 : Définition des besoins** (Establishing a need phase). Les activités visent à mieux comprendre l'état initial d'insatisfaction qui a généré le problème de conception. Par exemple via des études de marchés, des focus groupes de futurs utilisateurs.
- **Phase 2 : Planification des tâches** (Analysis of task phase). Ces activités relèvent essentiellement de l'organisation, elles sont donc couramment supportées par les équipes de management et non directement par les concepteur.trices, bien qu'il y ait interactions.
- **Phase 3 : Conception générale** (Conceptual design phase). C'est une phase importante d'exploration de solutions qui pourraient permettre de résoudre le problème. Les activités visent à générer des idées, à les représenter, à les communiquer et à les évaluer
- **Phase 4 : Conception architecturale** (Embodiment phase). Ces activités visent à préciser (ou « raffiner ») une sélection d'idées parmi celles générées précédemment, jusqu'à obtenir un ou des concepts. « L'architecture » du produit désigne l'agencement des composants qui répond au cahier des charges
- **Phase 5 : Conception détaillée** (Detailed design phase). Ces activités visent à définir très précisément les caractéristiques techniques du (ou des) concept(s) précédemment sélectionné(s), selon un ensemble de contraintes. Le livrable de cette phase est généralement la définition complète du produit à industrialiser.
- **Phase 6 : Implémentation** (Implementation phase). De nombreux auteurs considèrent que cette phase ne relève pas de la conception **[125] [126]**. Les activités sont tournées vers l'industrialisation et la commercialisation

2.8.1.1 Modèles linéaires et séquentiels

Les modélisations fondatrices des sciences de la conception, par exemple celle de Pahl & Beitz **[127]**, envisageaient cet enchaînement de phases de manière linéaire et systématique, où les activités sont réalisées l'une après l'autre. Dans cette vision, la capacité créative est considérée comme apparaissant tardivement dans le processus, en phase de conception détaillée, essentiellement pour des aspects de style **[128]**. Cette vision linéaire a été supplantée, notamment par la contribution de l'ingénierie concourante et de la conception intégrée **[129]**. Correspondant à une réalité plus actuelle, les activités ont donc été modélisées de manière

Document confidentiel

séquentielle et cyclique pour construire des représentations du problème d'une part et générer des solutions d'autre part, et pour les évaluer ensuite. En ce sens, selon Visser **[130]**, la conception relève moins uniquement de la résolution de problèmes que de la construction de représentations, internes et externes, « privées » (i.e destinées à la personne qui les créé) ou destinées à être partagées entre plusieurs acteur.trices de la conception. Ce nouveau paradigme est issu des contributions de la recherche en psychologie qui s'intéresse particulièrement à l'activité cognitive des concepteur.trices **[125]**.
On observe que les modélisations définissent alors les activités à un niveau souvent plus général (c'est-à-dire « macro ») que les modèles linéaires et les représentent sous des formes différentes, comme par exemple le modèle proposé par le Design Council **[131]** en double diamant ou les modèles « en tourbillon » **[124]**. D'autres modèles définissent aussi les activités selon un niveau général doublé d'un niveau plus spécifique (« macro + méso »). En exemple sur la figure 26 ci-dessous, le modèle de N. Cross **[125]** en 4 phases.

Fig.26 - Modèle « macro » du processus de conception proposé par Cross [125]

Ces modèles séquentiels influencés par la psychologie cognitive sont alors caractérisés, au niveau « macro », par 3 types d'activités **[130]** :

- **Génération** (ou divergence) : construction de l'espace problème et recherche dans cet espace
- **Transformation** : génération de solutions
- **Evaluation** (ou convergence) : évaluation des solutions

L'influence de la psychologie cognitive a poussé l'utilisation du terme « analyse » pour qualifier la première phase (au niveau « macro ») du processus de conception **[122]**. Selon Visser, ce terme est ambigu car d'une part, il décrit bien l'activité menée en tout début de processus qui consiste à analyser les contraintes données dans les spécifications du problème initial mais d'autre part, il connote une dimension « logique systématique » qui ne correspond pas à l'activité réelle, qui relève plutôt de « l'interprétation, de l'association ou de l'exploration ». Ce terme d'exploration est celui retenu par Cross dans sa modélisation (voir figure 26 ci-dessus). Ici, le terme « exploration » désigne une phase du processus, il est à distinguer de l'Exploration vue par Garel et al. **[104]** qui désigne un régime d'innovation, c'est-à-dire un point de vue plus global.
Selon Garel et al. **[104]**, les méthodes et outils de créativité sont largement utilisés dans les entreprises pour aider ces trois types d'activités Génération-Transformation-Evaluation. Cependant, ces auteurs rapportent un constat particulièrement intéressant. Ces techniques et outils sont souvent perçus comme des aides « clés en main », prêtes à être appliquées en faisant peu de cas du problème et surtout du contexte de la situation donnée. Est ainsi remarquée la multiplication des « cellules de créativité » et des « plateformes de créativité » qui appliquent des « démarches de créativité » pendant des « séances de créativité ». Or, il apparaît que, si les « démarches de créativité » sont particulièrement utiles dans les situations où de potentiels utilisateurs peuvent être identifiés, elles sont inefficaces dans les situations où ces potentiels utilisateur.trices n'existent pas ex-ante, c'est-à-dire dans les situations qui relèvent du régime d'Exploration caractérisé plus haut (§2.7.1).

En effet, selon Garel et al., les démarches de créativité sont limitées car centrées sur une vision de l'usage des technologies prisonnière de l'activité connue des utilisateur.trices. Or, la définition d'usages possibles implique que les utilisateur.trices réussissent à transposer ces nouveaux usages possibles au sein de leurs activités. L'imagination des possibles est donc dépendante, d'une part, de l'identification d'utilisateur.trices pertinent.es, et d'autre part, il faut que les utilisateur.trices soient déjà convaincu.es des bienfaits d'une technologie alors même qu'i.elles n'ont que très peu de connaissances sur celle-ci. En d'autres termes, les « potentiels » de la technologie sont dépendants des « possibles » que peuvent imaginer les utilisateur.trices pour leurs propres activités. Ces auteurs en concluent rapidement que la créativité peut répondre à « Comment intégrer une technologie holographique dans le téléphone de monsieur-tout-le-monde ? » mais pas à « Quels marchés et quelles applications pourraient valoriser au mieux une technologie holographique ? », autrement dit, ils en concluent que la créativité n'est pas adaptée aux contextes exploratoires, tels que celui que nous traitons pour explorer le potentiel de la fabrication additive en cherchant de nouvelles applications possibles.
Dans les modèles séquentiels, la génération (divergence) et l'évaluation (convergence) sont deux activités distinctes, réalisées de manière séparées et successives puis répétées un certain nombre de fois tout au long des phases d'activités de conception (mécanisme cyclique). Or, selon Visser **[130]**, la psychologie cognitive a montré que cette séparation n'est que théorique. Dans la réalité des activités, l'analyse du problème et l'élaboration de solutions (génération + évaluation) progressent en parallèle, de façon concomitante. Les concepteur.trices génèrent de nouvelles tâches en continu, déforme et re-forme le problème en permanence.

2.8.1.2 Des modèles co-évolutifs

Les contributions de la psychologie cognitive ont donc conduit à l'émergence de nouveaux modèles du processus de conception, plus proche des activités réelles des concepteur.trices. Ce sont les Knowledge space models **[122]** en français « modèles d'espaces de connaissances », ou plus simplement modèle co-évolutifs. Nourris par des recherches antérieures, les travaux de Hatchuel et al. **[106]**, **[132]** ont abouti, en France, à une théorie fondatrice qui renouvelle la modélisation du processus de conception : la théorie C-K. Avec un niveau d'abstraction moins élevé, les travaux de Dorst et al. **[133]** proposent une modélisation du phénomène de co-évolution entre « espace problème » et « espace solution » représentés sur la figure 27 ci-dessous.

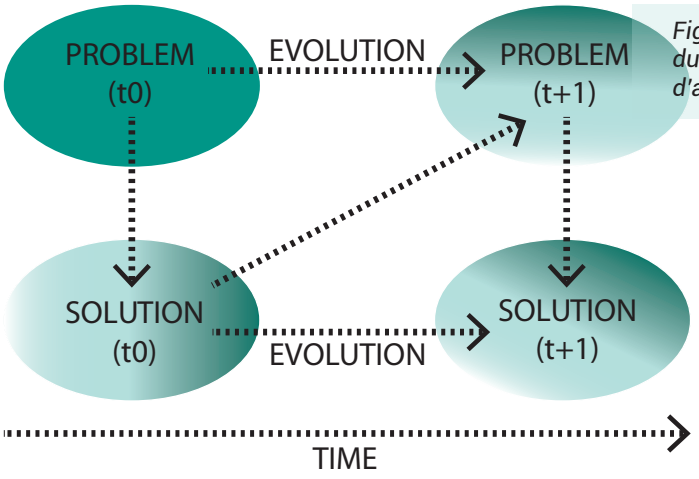


Fig.27 - Modèle co-évolutif du processus de conception, d'après Dorst [133]

Document confidentiel

Dans les modèles co-évolutifs, les concepteur.trices qui font face à un problème mal défini au départ (Problem (t 0) sur fig.26), le définissent en générant des solutions (transformation de Solutions (t0) en Solutions (t+1)) ce qui, dans le même temps, restructure le problème en une nouvelle représentation (Problem (t+1)) et génère à nouveau des solutions, ce qui engendre un nouveau cycle. Ainsi, au cours du processus, un mouvement réalisé dans un espace ne peut avoir lieu sans mouvement dans tous les autres espaces, et ainsi de suite. La mise en évidence de cette dynamique d'évolution confirme que la construction dans un espace est guidée et motivée par les solutions les plus récemment déterminées dans l'espace précédent celui-ci. Cela confirme que la conception de nouvelles solutions est basée sur des connaissances et des solutions préexistantes. Mary Lou Maher **[134]** décrit ce phénomène par la notion d'héritage, similaire à la biologie, où des solutions sont générées car elles « héritent » d'un certain nombre de caractéristiques (i.e. de « gènes ») issues de solutions précédentes.

Finalement, le processus de conception peut être modélisé de manière moins chronologique que les modèles linéaires ou séquentiels présentés dans la section précédente. Cette nouvelle forme de modélisation est alors moins basée sur les activités des concepteur.trices que sur les mécanismes cognitifs qui sous-tendent la conception. Ainsi, le modèle « RID » proposé par Yannou **[97]** et représenté sur la figure 28 ci-dessous, s'organise, au niveau « macro » autour de deux types d'activités : la restructuration du problème (périmètre orange) et la résolution du problème (périmètre vert). Le mécanisme co-évolutif est utilisé pour naviguer jusqu'à un concept faisable. Cette modélisation n'étant pas séquencée en phases, la transition entre les phases d'activités est identifiée lorsque 4 livrables sont formalisés : « *Ideal Need, Perimeter of ambition, Briefs and Concepts* ».

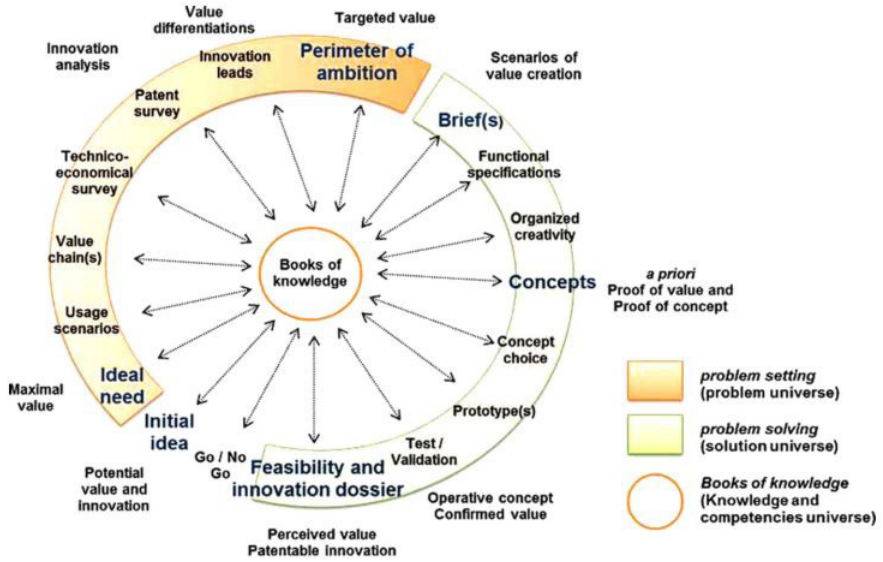


Fig.28 - Modèle du processus de conception proposé par Yannou [97]

Selon ses auteurs, ce modèle favorise aussi la rencontre avec le marché et pas seulement la génération de solutions créatives car, seule, celle-ci ne peut garantir l'innovation. Ainsi, cette modélisation intègre différents facteurs contextuels, tels que : les connaissances et le portfolio de brevets disponibles dans l'entreprise où est mené le projet de conception ou la présence ou l'absence de concurrents directs. Ces facteurs sont considérés comme des données d'entrée à prendre en compte dès les premières phases pour identifier des pistes d'innovation possibles (innovation leads) qui seront ensuite explorées. L'ensemble de ces pistes constituent un « périmètre d'ambition ».

Selon Dorst **[133]**, la dynamique cognitive de co-évolution s'arrête lorsque les concepteur.trices considèrent que la solution est « acceptable et satisfaisante ». Ce statut est substitué à celui de solution « optimale » car les concepteur.trices ne peuvent explorer l'ensemble des solutions possibles. En effet, celui-ci est un ensemble discret mais infini donc impossible à explorer dans son ensemble. Les concepteur.trices doivent alors « se contenter de ce qui est suffisamment bon » **[135]**, **[30]**. Lorsqu'une solution est acceptable et satisfaisante, ce mécanisme cognitif dynamique n'a plus cours, la solution choisie peut être détaillée en vue de la production.

C'est pour cette raison que les phases initiales sont considérées comme déterminantes dans le processus de conception. Selon la représentation de Cross **[125]** (fig.29), c'est en effet dans les toutes premières phases du processus de conception qu'une grande agilité cognitive (une « attention ») des concepteur.trices est requise. Dès que le processus tend vers une solution acceptable, la dynamique cognitive co-évolutive est fortement réduite.

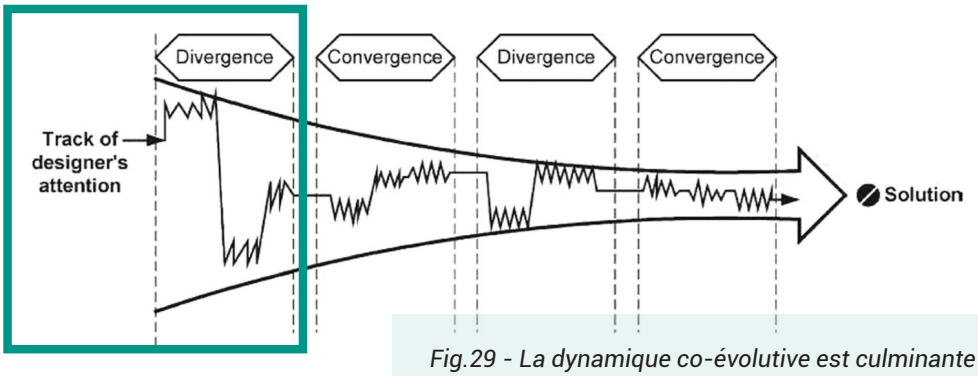


Fig.29 - La dynamique co-évolutive est culminante dans les toutes premières phases, selon Cross [125]

C'est donc dans ces phases initiales que le bon déroulement du mécanisme cognitif décrit doit être assuré. En effet, une phase initiale déficiente conduirait à reprendre la dynamique depuis le départ, au stade de problème mal défini et donc à allonger le temps dévolu à la conception et, par conséquent, les coûts associés **[126]**. En ce sens, dans ces phases, l'apport d'informations peut être guidé, et la créativité peut être structurée par une méthodologie, favorisée par des techniques et supportée par des outils.

Document confidentiel

Les modélisations du processus de conception étant différentes (linéaire, séquentielle, co-évolutive), la définition des phases couvertes par l'expression « phases amont » couramment employée pour désigner les premières phases du processus, est également variable. Ainsi, les travaux relatifs aux modèles linéaires considèrent que les phases amont débutent par la phase de définition et planification du projet de conception et s'arrêtent lorsqu'un tracé préliminaire du produit a été généré (début de *Embodiment design phase*) **[136]**.

Concernant les travaux relatifs aux modèles séquentiels, la définition de « phases amont » varie également. Les travaux de Mougenot **[29]** s'appuie sur la modélisation de N. Cross, et restreignent « les phases amont » à une seule phase du processus, «l'Exploration », qui comprend les activités réalisées depuis la réception des spécifications du problème jusqu'à la génération des premières représentations du concept, c'est-à-dire au moins un cycle de Génération-Transformation-Evaluation (§2.8.1.1). Cependant, selon Pugh **[137]**, la phase de *Conceptual design* (correspondante à la phase Generation du modèle de N. Cross selon la classification de Howard et al.) est incluse dans les phases amont car elle fait partie intégrante de la résolution du problème.

Dans les modélisations co-évolutives non séquencées en phases, telle que le modèle proposé par Yannou **[97]**, l'identification de « phases amont » devient difficile. Ainsi, au-delà d'une définition stricte, nous retenons les éléments qui caractérisent les phases initiales du processus de conception :

- Présence d'un problème mal défini et non encore résolu
- Traitement cognitif d'informations et de connaissances pour répondre au problème
- Les activités cognitives suivent au moins un cycle Génération-Transformation-Evaluation
- La définition du problème évolue en fonction de la génération de solutions, et inversement

La section suivante souligne, à partir de la classification de Howard et al. **[122]**, les fortes similitudes existantes entre processus de conception et processus créatif. Ces similitudes conduisent à souligner que la créativité joue un rôle prépondérant dans les phases initiales du processus de conception.

Table 1 (Page suivante) - Classification de modèles du processus de conception et de modèles du processus de créativité, extraits de Howard et al [122]

Type de modélisation	Auteurs	Phases								
Engineering design		Establishing a need phase		Analysis of task phase	Conceptual design phase	Embodiment design phase		Detailed design phase		Implementation phase
Linéaire	Pahl & Beitz (1984)	Task		Clarification of task	Conceptual design	Embodiment design		Detailed design		X
	Ullman (1997)	Identify needs	Plan for the design process	Develop engineering specs	Develop concept	Develop product				X
Séquentielle	Cooper (1986)	Ideation		Preliminary investigation	Detailed investigation	Development	Testing & validation	X		Full production & market launch
	Design Council (2006)	Discover		Define	Develop		Deliver			X
	Cross (2008)	X		Exploration	Generation	Evaluation		Communication		X
Creative design		Analysis phase		Generation phase		Evaluation phase			Communication / implementation phase	
Séquentielle	Jones (1970)	Divergent		Transformation		Convergent			X	
		Search for data	Understand the problem	Pattern finding	Flashes of insight	Judgement				
	Amabile (1983)	Problem or task presentation	Preparation	Response generation		Response validation			Outcome	
	Isaksen (1994)	Constructing opportunities	Exploring data	Framing problem	Generating ideas	Developing solutions			Building acceptance	Appraising tasks	Designing process
	Basadur (2000)	Problem finding	Fact finding	Problem definition	Idea finding	Evaluate and select			Plan	Acceptance	Action
		Diverge-converge at each stage								
Vers les modèles co-évolutifs (pas de représentation linéaire)										

Document confidentiel

2.8.2 Le processus créatif : similitudes avec le processus de conception

Synthétisée par la table 1 page précédente, la double classification de Howard et al. **[122]** met en regard des modèles de processus de conception issus de l'ingénierie et des modèles de processus créatifs issus de la psychologie cognitive. Ce parallèle fait apparaître 3 phases communes aux deux types de processus : Génération (*Analysis phase*) – Transformation (*Generation phase*) – Evaluation (*Evaluation phase*), parfois complétées par une phase de communication/implémentation. Ces similitudes indiquent que la créativité joue un rôle crucial dans les phases initiales du processus de conception et qu'il est donc nécessaire de l'assister **[138]**. Cela incite également à se poser la question des différences entre les processus qui conduisent à des productions créatives ou pas.

Selon Howard et al. **[122]**, l'approche psychanalytique des années 1930 a trouvé des échos récents dans les modélisations du processus créatif, par exemple dans les travaux de Boden **[95]**. Cependant, l'approche cognitive apporte plus d'informations utiles pour mettre en relation processus créatif et processus de conception. La table 1 présente donc des modèles du processus créatif issus de cette approche cognitive. Etonnamment, même si ces modélisations sont issues de l'approche cognitive, ces modèles sont majoritairement représentés sous des formes linéaires, comme les modèles du processus de conception. Ces modélisations représentent le « métabolisme » qui conduit à l'émergence des idées en le montrant sous une forme structurée. Ainsi, le processus créatif consensuel se décompose en 3 phases **[123] [122]** :

- **Analysis phase** : formuler et reformuler le problème donné pour mieux le définir
- **Generation phase** : générer des solutions possibles pour répondre au problème. Les « solutions » sont aussi couramment appelées « idées » en début de processus puis « concepts » lorsque le problème est mieux défini et donc le processus plus avancé
- **Evaluation phase** : idées et concepts générés précédemment sont évalués selon un certain nombre de critères.

Le temps passé à définir le problème influence positivement la capacité à former mentalement des concepts **[30]**. Ainsi, comme dans le processus de conception, définir le problème est un aspect essentiel du processus créatif. Nous remarquons d'ores et déjà la similarité de ces phases du processus créatif avec les phases initiales du processus de conception telles que décrites dans la section précédente (§2.8.1).

Il est intéressant de noter que l'évolution des modélisations du processus créatif est comparable à celle des modélisations du processus de conception. En effet, selon Howard et al. **[122]**, si les premières modélisations du processus créatif ont été influencées par l'approche psychanalytique, elles se sont ensuite basées sur les activités. Ainsi la modélisation de Jones **[139]** (table 1) a marqué cette transition vers une représentation séquentielle et cyclique. Ce modèle présente des activités réalisées de manière séquentielle, on retrouve donc les notions de divergence-transformation-convergence observées dans le processus de conception. La représentation est également faite sur deux niveaux : le niveau « macro » décrit le flux divergence-transformation-convergence tandis que le niveau « meso » décrit plus précisément les activités, comme dans les modèles du processus de conception. L'aspect cyclique est particulièrement remarquable dans le modèle proposé par Basadur en 2000 **[140]** (table 1). Ce modèle souligne que le flux divergence-convergence est répété à chaque phase du processus.

Un autre modèle est reconnu car souvent enseigné et mis en application dans l'éducation comme dans les entreprises : c'est le modèle CPS (Creative Problem Solving). Selon Alberti **[141]** il a été outillé par plus de 100 techniques de créativité. Ce modèle, souvent vulgarisé pour être diffusé, est illustré par la figure 30 ci-dessous. On remarque deux phases principales : Définition du problème et Définition de l'idée, suivies de la phase de sélection et d'implémentation.

Fig.30 - Modèle de Creative Problem Solving, représentation vulgarisée par Basadur[25]

Influencées par les avancées de la recherche en psychologie cognitive, ces modélisations du processus créatif tendent à passer de séquentielle à co-évolutive, comme l'évolution des modèles du processus de conception. Ainsi, les modèles issus de la théorie C-K, tels que celui de Dorst et al **[133]** sont reconnus à la fois pour la conception et pour la créativité. Les travaux de Bouchard **[19]** proposent également une représentation co-évolutive simplifiée du processus créatif, visible sur la figure 31 ci-dessous. On remarque la présence des deux espaces dans cette représentation.

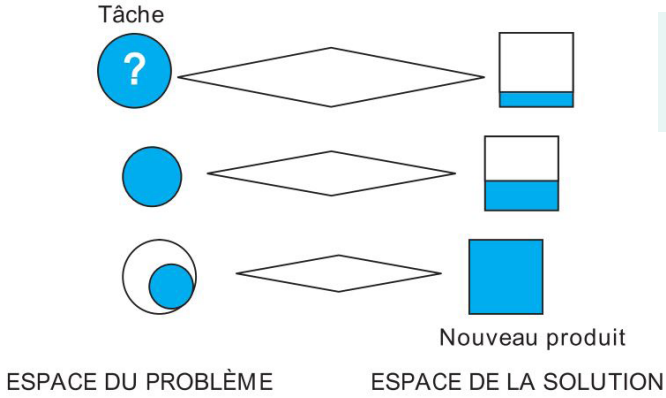


Fig.31 - Représentation simplifiée de la co-évolution proposée par Bouchard [19]

[25] Basadur Applied Creativity http://www.basadur.com/howwedoit/An8StepProcess/tabid/82/Default.aspx

Document confidentiel

Arguant que les modèles précédents imposent un point de départ, Alberti **[141]** propose un modèle plus systémique, en « trèfle fractal » présenté sur la figure 32 ci-dessous. Dans cette modélisation, le processus créatif est représenté par 3 « méta-actions » (Générer- Expliciter – Analyser) décomposées chacune par 3 à 6 actions. Le processus créatif peut ainsi être initialisé par n'importe quel point d'action du modèle, tout en soulignant que les actions sont interdépendantes et donc que la non prise en compte de l'une de ses actions entraîne un risque d'échec du processus créatif. Le terme « Expliciter » utilisé pour désigner l'une des méta-actions renvoie ici à la notion de construction de représentations, qui couvre à la fois des représentations mentales et externes.

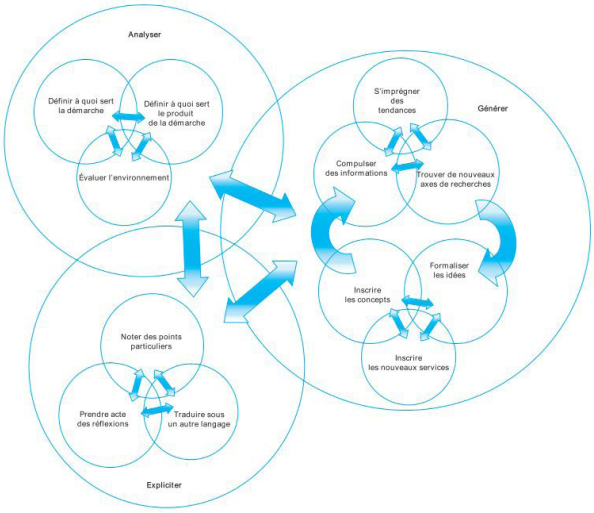


Fig.32 - Modèle en « trèfle fractal » du processus créatif co-évolutif proposé par Alberti [141]

Finalement, selon Howard et al. **[122]**, outre les points communs concernant les types de phases et l'évolution des modélisations, les caractéristiques principales communes au processus de conception et au processus créatif peuvent être synthétisées comme suit :

- Le besoin d'informations, dès le départ du processus
- Le traitement de ces informations, dans les phases initiales du processus
- La construction de représentations, comme moteur de ce traitement d'informations

Les caractéristiques de la créativité sont approfondies dans la section suivante.

2.8.3 Les caractéristiques de la créativité en conception

Des similitudes entre processus de conception et processus créatif ont été relevées. Mais s'ils sont similaires, quels sont alors les facteurs qui font que parfois ces processus aboutissent à des productions créatives et parfois pas ? Car en effet, comme souligné précédemment (§2.8.2), la génération de solutions innovantes est un type de données de sortie possible mais non systématique de la conception **[121]**. Cette section 4 souligne alors les caractéristiques de la créativité.

2.8.3.1 Un processus cyclique à tous les niveaux

Premièrement, du point de vue du processus, Howard et al. **[122]** mettent en lumière un point différenciant entre processus guidant vers une idée créative (« *a creative idea* ») et un processus produisant une idée de routine (« *a routine idea* »). Cette différence émerge lorsque l'on s'intéresse en détail aux activités menées dans les phases de *Conceptual design* et de *Embodiment design*. Il apparaît alors que ces deux phases contiennent chacune les 3 phases du processus créatif (*Analysis-Generation-Evaluation*) et que celles-ci sont répétées de manière cyclique. Nous observons alors que la créativité en conception opère, dans un cas, au niveau « micro », c'est-à-dire au plus proche des activités réelles des concepteur.trices, et dans un second cas, à la fois aux niveaux « micro », « méso » et « macro » du processus, autrement dit à tous les niveaux.

2.8.3.2 Des données de sortie différentes

En deuxième point, Howard et al. **[122]** pointent des différences concernant le type de donnée de sortie attendue, d'une part en conception et d'autre part en créativité. En effet, il est attendu que le processus de conception aboutisse à un produit complet, alors qu'en créativité, seuls des idées et des concepts sont attendus, c'est-à-dire des solutions à un stade de définition moins avancé. Cette différence entraîne des conséquences sur les critères utilisés pour différencier la qualité des données de sortie. En effet, pour être qualifié « d'innovant » un produit doit être original à la fois au niveau de son système, de son architecture et de ses composants et être adopté par un marché **[127]**. Selon Ottosson **[142]** il est possible de définir la qualité créative d'un produit par un pourcentage calculé en fonction de l'originalité des sous-systèmes qui le composent. Mais comment qualifier un concept « d'innovant » alors qu'il n'est, de fait pas suffisamment défini pour que son usage ou son acceptation par le marché soit évalués ? **Les termes « créatif » et son opposé « routinier » semblent donc plus adaptés pour qualifier les productions de la créativité en conception.** D'autre part, en conception, l'utilisation des 3 critères attendus pour la brevetabilité est courante pour évaluer les données. Selon Howard et al. **[122]** deux de ces critères sont également communément utilisés en créativité pour qualifier les données de sortie : les critères d'originalité (au regard de l'historique d'un domaine), et de pertinence (« *appropriateness* »), désignant un concept plus ou moins susceptible d'application dans un ou plusieurs secteurs industriels.

Finalement, ces critères semblent plus adaptés que le qualificatif « innovant » pour désigner les données de sortie du processus créatif, qui restent à l'état d'idées et de concepts.

2.8.3.3 Une alternance individu-collectif

En troisième point, Howard et al. **[122]** soulignent les différences concernant le nombre d'ac-

Document confidentiel

-teur.trices impliqué.es. En conception, ce sont des équipes complètes qui se répartissent les tâches et conçoivent ainsi des produits tandis qu'en créativité les idées et concepts sont générés par des individus seuls, même s'ils interagissent avec d'autres individus pour les générer et les évaluer. Selon Bila-Deroussy **[30]** la créativité en conception est en fait une alternance de phases de travail individuel et collectif. En effet, les changements d'attention dus au caractère cognitif et cyclique du processus créatif requièrent différents modes de travail. Ainsi, les individus produisent individuellement des idées et concepts mais les discutent et les évaluent collectivement. Cette alternance permet d'éviter que la recherche de consensus (i.e une tâche collective) prenne le pas sur la capacité à diverger (i.e une tâche individuelle). Un processus uniquement collectif risquerait d'aboutir à des concepts consensuels alors que, selon Shah **[96]**, un concept est considéré comme « nouveau » lorsqu'il est inattendu par rapport aux autres concepts générés.

2.8.3.4 Des types d'individus différents

Alberti **[141]** complète cette identification des caractéristiques en soulignant que les types d'individus impliqués (i.e les traits de caractères, personnalités) impactent également la créativité. Ainsi, un individu fortement attaché « aux traditions et aux modèles anciens » serait plus favorable à la conception routinière que pour des productions créatives. Une tendance à suivre les leaders d'opinions et à subir le poids des autorités inhiberaient également la créativité en conception, tout comme la peur de transgresser les règles communes (par exemple, peur d'être grossier, peur d'exprimer des connotations déplacées, peur d'utiliser un langage familier). La peur de l'échec et la peur d'être déstabilisé par le changement sont aussi reconnus comme des inhibiteurs de la créativité en conception. Une domination de la raison face à l'original ou à l'inconnu (i.e se raccrocher à des connaissances pour gommer l'inconnu) peut également inhiber la créativité en conception alors qu'elle rend la génération d'idées routinières plus efficace. Nous comprenons alors que la créativité en conception est en permanence soumise au jugement social, soit de la part de l'individu sur lui-même soit de la part de l'environnement social. L'enjeu est donc de se convaincre et/ou de convaincre l'environnement social de la pertinence de l'idée émise.

Finalement, il est nécessaire de permettre une alternance de phases individuelles et collectives. Cette dimension sera intégrée notamment dans l'expérimentation #2 (§4.6). Nous retenons également qu'il est nécessaire de convoquer des profils différents dans le cadre de séances de créativité de groupe et que les critères d'originalité et de pertinence sont requis pour évaluer la brevetabilité de productions.

Les sections suivantes approfondissent le processus qui sous-tend la génération de productions créatives : il s'agit d'un processus singulier de traitement d'informations.

2.9 La créativité : un traitement singulier de l'information

2.9.1 Le raisonnement en conception créative

Dans l'optique de mieux comprendre la dynamique des activités cognitives liées à la conception créative, les travaux de Hatchuel et al. **[132]**, **[106]** ont étudié, à la fin des années 1990, les individus au plus proche de la réalité de leur activité cognitive. Il en est résulté une modélisation, la théorie C-K, mettant en lumière le phénomène d'expansion que le raisonnement des individus génère en cheminant entre deux espaces, Knowledge space et Concepts space, pour résoudre des problèmes.
Selon ses auteurs, cette modélisation ne rend pas caduques les théories existantes de Systematic design, Axiomatic design et General design theory **[143]**. Toutefois, elle permet de les actualiser, et ainsi de montrer le passage de la conception routinière à la conception créative **[121]**.
Les travaux fondateurs de Herbert Simon, considéraient la conception comme une résolution de problème. Ils montraient que des associations de connaissances déjà existantes peuvent faire émerger de nouvelles solutions. Cependant, les actualisations ayant conduit à la théorie C-K ont montré que cette vision ne permettait pas de distinguer deux types de situations courantes. En effet, dans certaines situations de conception, la solution au problème existe déjà parmi les connaissances, la démarche consiste alors à explorer l'espace de connaissances pour la faire émerger (à gauche sur fig.33). Mais dans d'autres situations, la solution n'est pas pré-existante au début du processus de conception, il s'agit alors de l'imaginer (image à droite). C'est dans ce cas qu'est observée l'expansion la plus large des espaces de connaissances et de concepts, que la capacité créative est la plus nécessaire et qu'elle génère des concepts créatifs. Ce cas est alors appelé « conception créative ».

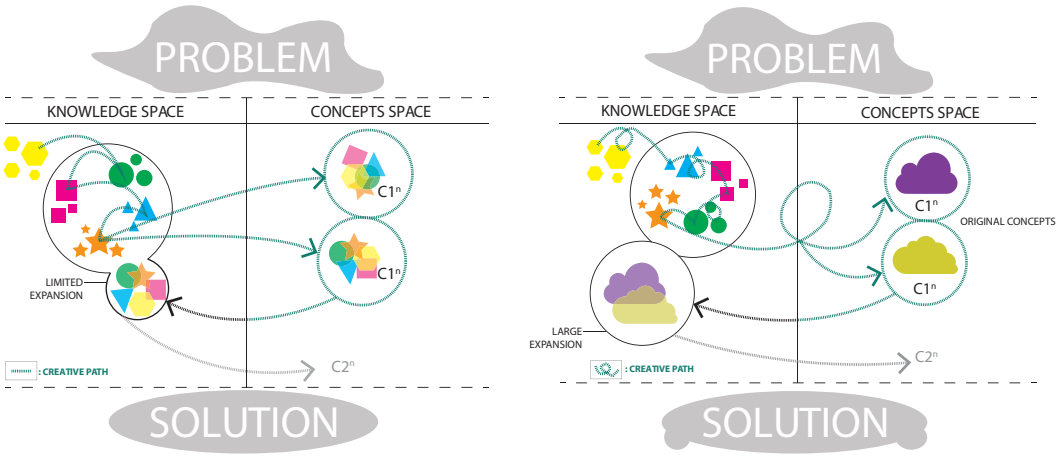


Fig.33 - Raisonnement co-évolutif et manifestation de la créativité

Cette figure 33 illustre deux cas de conception où un raisonnement créatif est utilisé pour passer de problème à solution **[132]**. Dans les toutes premières étapes du processus, le problème est défini par 3 caractéristiques **[144]** :

- L'espace du problème : représentation mentale que l'individu se fait du problème
- L'environnement de la tâche : représentation externe du problème à résoudre
- Les états du problème : contenu de l'espace du problème. Il comporte les connaissances qui évoluent au fil du processus

Document confidentiel

Dans le cas 1, la solution au problème pré-existe parmi les connaissances présentes dans l'espace du problème. Le raisonnement consiste alors à rechercher, de manière systématique, parmi les connaissances existantes pour faire émerger des concepts. C'est la transformation de K en C. Les concepts proposés sont donc composés d'une association de connaissances existantes. La créativité est ici la capacité de l'individu à générer en parallèle des représentations mentales et des représentations externes de ces associations **[19]**. En retour, ces associations peuvent elles-mêmes faire émerger de nouvelles connaissances et ainsi étendre l'espace de connaissance initial (de façon limitée). Ce transfert de C vers K nécessite une certaine expertise pour déterminer des critères de pertinence au regard du problème, autrement dit une capacité à l'évaluation et à la décision **[138]**. La créativité utilisée dans ce type de raisonnement semble renvoyer à la notion de « créativité incrémentale » observée par Brion et al. **[114]** (§2.7). Selon Hatchuel et al, ce type de raisonnement est courant en conception routinière, il est moins favorable à la génération de concepts créatifs.

Dans le cas 2, la difficulté à trouver une solution dans l'espace du problème initial incite à redéfinir celui-ci. Il est alors nécessaire de générer une nouvelle représentation de l'espace problème. A partir de cette nouvelle représentation, les connaissances sont également associées pour générer des concepts mais ici c'est un raisonnement moins centré sur l'efficience que sur l'inattendu qui est suivi. La capacité à construire des liens multiples et souvent insolites est en effet une caractéristique principale de la capacité créative des conceptrices et concepteurs **[145]**. Dans ce cas, les concepts générés sont alors dits nouveaux. Ces nouveaux concepts font eux-mêmes émerger de nouvelles connaissances, issues de domaines plus éloignés que le domaine de connaissances du problème initial. L'expansion est alors plus large que dans le cas 1. En ce sens, la créativité utilisée dans ce cas peut renvoyer à la notion de « créativité divergente » observée par Brion et al. **[114]** (§2.7).

Finalement, la conception créative est une manière singulière de cheminer entre les deux espaces connaissances et concepts (« *creative path* » sur fig.33). Les phases de ce cheminement sont décomposées dans les sections suivantes. La compréhension du processus de traitement des informations, qui sous-tend le raisonnement créatif, permettra de modéliser les phases de notre méthode liant créativité et fabrication additive et de définir des dispositifs qui, nous le supposons, favoriseront ce processus de traitement des informations.

2.9.2 Le processus de traitement des informations

Selon Anolli et al. **[146]**, il existe un consensus sur les phases du raisonnement mis en œuvre pour faire émerger des concepts créatifs. Il peut être décrit comme suit :

1. La collecte (ou perception) d'informations,
2. La catégorisation de ces informations en matrices de connaissances
3. L'évocation de ces connaissances (phase d'inspiration)

Bien que nous présentions ici ces phases de manière séquentielle, ces opérations cognitives sont indissociables et opérées simultanément. De plus, elles sont dépendantes de la phase de génération de représentations décrite à la suite (§2.9.3).

2.9.2.1 La phase de collecte d'informations

La collecte d'informations n'est pas une activité spécifique aux professionnel.les de la conception. En effet, tous les individus, tout au long de leur vie, reçoivent en permanence des informations issues de leur environnement et interagissent avec pour former des « concepts », autrement dit pour les représenter mentalement et explicitement **[30]**. Pour autant, nous nous intéressons ici au cas des concepteur.trices car cette phase est systématiquement réalisée au tout début du processus de conception créative et que, selon Iyer et al. **[147]**, 60% de leur temps est consacré à rechercher des informations.

Dans les phases initiales du processus, le problème est en effet mal défini, « flou » et difficile à comprendre. Pour le préciser et mieux le comprendre, les concepteur.trices collectent alors des informations qu'i.elles transforment en connaissances potentiellement utiles. Ainsi, selon Hicks **[148]**, le processus de conception créative peut être vu comme un processus de traitement d'informations. En conception créative, ces informations sont alors également appelées « références » ou « sources d'inspirations » **[149]**, **[29]**. La collecte d'informations n'est pas effectuée uniquement à l'arrivée d'un nouveau problème, c'est une activité continue couramment appelée « veille », « veille continue » ou « veille informationnelle » **[29]**. En conception créative, les individus ont donc à disposition une grande quantité d'informations.

Cette phase de collecte d'informations reste difficile à observer car elle est essentiellement cognitive et donc peu explicite. Cependant, les travaux de Levy **[150]** ont montré que les concepteur.trices ne collectent pas indifféremment l'ensemble des informations auxquelles i.elles ont accès : cette collecte est subjective et émotionnelle. La collecte est ainsi largement influencée par l'état émotionnel de l'individu et/ou par des émotions déclenchées par la visualisation des informations. Selon Lubart **[91]**, la capacité à relever dans l'environnement des informations pertinentes (encodage sélectif) est l'une des deux composantes essentielles du raisonnement créatif, la seconde composante étant la capacité à observer des similitudes entre des domaines différents, explicité ensuite (§2.9.2.2).

Dans ses travaux, Mougenot **[29]** a identifié des typologies d'informations fréquemment recueillies. Ainsi, il apparaît que les informations visuelles sont les plus souvent collectées. Le type « visuel » comprend les images (2D), les informations sémantiques (mots-clés, phrases courtes) et les informations mixtes (visuel + sémantique). Dans le cas du type « mixte », les informations visuelles et sémantiques se complètent, elles orientent l'encodage sélectif vers un domaine donné (par exemple un domaine d'informations techniques complexes relatives au problème de conception). Pasman **[151]** a par ailleurs souligné que les concepteur.trices collectent aussi des « précédents », c'est-à-dire des artefacts (ou objets tangibles) existants. Nous retenons qu'en conception, la collecte d'informations est donc caractérisée par la quantité mais aussi par le type d'informations, c'est-à-dire la forme sous laquelle les informations sont présentées.

Aujourd'hui, accéder facilement à une grande quantité d'informations n'est pas un problème, notamment grâce à la contribution d'internet. Au contraire, selon Bila-Deroussy **[30]** « face à la diversité, la multiplicité et l'hétérogénéité, les individus sont obligés de trier et classer les informations en catégories et sous-catégories ».

Document confidentiel

2.9.2.2 La phase de catégorisation par analogie

La phase de collecte d'informations est directement complétée de la phase de stockage (ou encodage) de ces informations. **Ce transfert marque le passage « d'informations » à « connaissances » [6]**. Cet encodage est permis par la représentation que l'individu fait de l'information perçue. Cette représentation peut être réalisée sous deux formes, une forme mentale et une forme externe à l'individu.

Nous l'avons souligné, les individus ne collectent pas l'ensemble des informations perçues. L'opération cognitive d'encodage n'est donc pas aléatoire, elle dépend de la capacité de l'individu à observer des similitudes entre des informations issues de domaines différents et à les rapprocher de ce qu'il sait déjà (« abduction » ou « analogie ») pour former mentalement des catégories de connaissances analogues, c'est-à-dire des « matrices analogiques » **[88]**. Toutefois, des connaissances classées dans une catégorie peuvent également l'être dans une autre catégorie si l'individu change (consciemment ou non) les critères qui l'ont poussé à établir la catégorisation initiale. L'encodage peut donc être décrit par des cycles de catégorisation, décatégorisation, re-catégorisation **[30]**, entraînés par un mécanisme analogique.

Pour Koëstler **[152]**, l'essence de la créativité se trouve alors dans l'aptitude à multiplier les croisements entre diverses matrices analogiques. Nous proposons de nommer ces croisements « méta-analogies ». Les recherches plus récentes ont montré que la multiplication des croisements n'est pas suffisante car celle-ci peut devenir une logique routinière qui risque de ne pas aboutir à des concepts créatifs **[30]**. Si la multiplication des croisements ne suffit pas, il s'agit alors de s'intéresser à la **qualité** des informations mises en jeu dans la catégorisation par analogie.
En ce sens, Bonnardel et al. **[153]** puis Mougenot **[29]** ajoutent la notion de « sources » (i.e domaines dont sont issues les informations) vis-à-vis d'une « cible » (i.e l'objectif de conception) pour qualifier le contenu des informations utilisées. Ainsi, les informations sont dites :

- **Intra-domaine** lorsqu'elles contiennent des caractéristiques issues du même domaine que la cible de conception
- **Inter-domaines** lorsqu'elles contiennent des caractéristiques issues d'un domaine différent de celui de la cible de conception
- **Inter-domaines proches** lorsqu'elles contiennent des caractéristiques issues d'un domaine différent de la cible de conception tout en présentant des caractéristiques assimilables au domaine cible
- **Inter-domaines éloignées** lorsqu'elles contiennent des caractéristiques issues d'un domaine différent de la cible de conception et qu'elles n'ont pas de caractéristiques en commun avec la cible de conception

Ces notions de proximité et d'éloignement sont illustrées avec la figure 34 ci-contre.

Dans cet exemple, l'objectif est de concevoir une aube de turbine (image A sur fig.34). Les concepteur.trices auraient alors à disposition des informations issues d'un domaine proche. Par exemple, les images d'un aileron de requin (image B) et d'une tuile (image C) présentent des formes aérodynamiques et des matériaux dont les propriétés permettent d'optimiser la circulation de flux et les échanges thermiques. Les formes et les fonctions techniques données par ces informations (« échanger des flux chaud/froid », « Propulser ») sont communes aux problèmes à résoudre pour la conception d'une aube de turbine. Par opposition, des cartouches d'encre (image D) et une puce RFID (image E) sont considérées comme faisant partie de domaines éloignés de la conception d'une aube de turbine. Les informations transmises (par exemple les fonctions techniques « Laisser une marque colorée », « Emettre des informations ») n'ont a priori rien de commun avec les problèmes posés par la conception d'une aube de turbine.

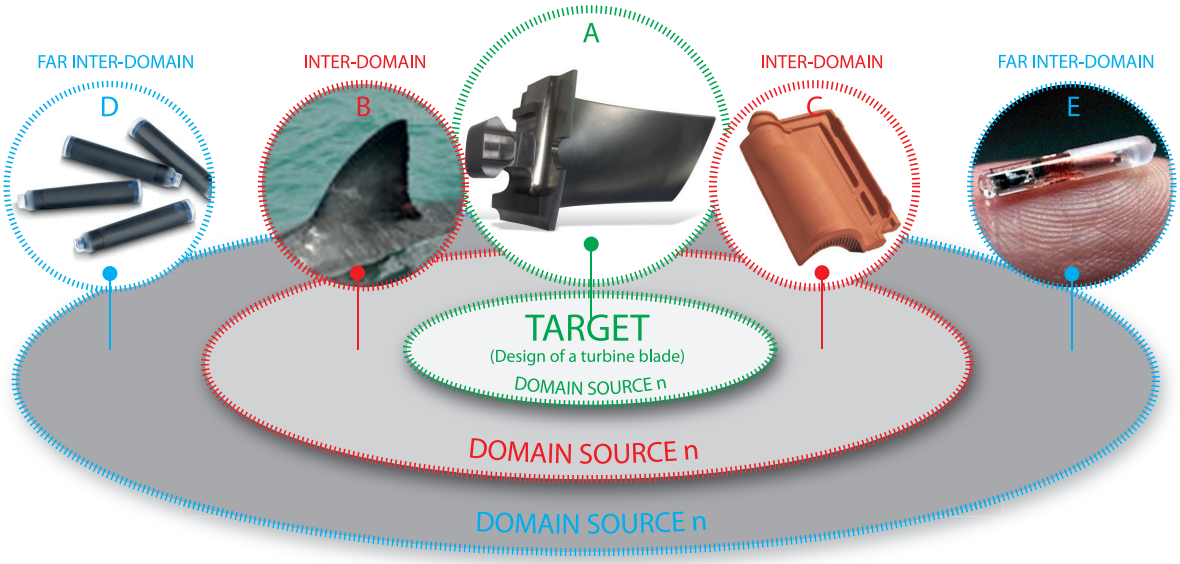


Fig.34 - Distances des sources d'information vis-à-vis d'une cible de conception

Les travaux de Goldschmidt **[154]**, de Bonnardel et al. **[153]** et de Mougenot **[29]** ont montré que l'adaptation des sources d'information visuelles vis-à-vis d'une cible de conception impacte la capacité créative dans les phases initiales du processus. Ainsi, selon ces auteur.es, la variété des sources d'informations favorise la divergence c'est-à-dire la capacité à faire varier les points de vue en dé-catégorisant et re-catégorisant les informations collectées, car elle apporte une variété de contenus.
I.elles montrent également que les analogies faites à partir d'informations inter-domaines augmentent la qualité créative des productions. Le contenu apporté par ces informations est alors qualifié d'« inspirationnel » pour les concepteur.trices.

Ces résultats rejoignent ceux rapportés par Agogué et al. **[155]**, qui distinguent alors les informations « restrictives » des informations « expansives ».

Document confidentiel

Observant différentes situations de conception, ces auteur.es soulignent que l'exposition à des informations peut entraîner un effet de fixation si elles activent des connaissances familières. Au contraire, elles ont un effet de stimulation qui active des connaissances moins spontanément utilisées. Considérant que ce sont les connaissances récemment activées qui sont utilisées dans la génération d'idées puis de concepts, les informations sont dites expansives lorsqu'elles permettent d'apporter des attributs inattendus à l'idée ou au concept en cours d'émergence. A l'inverse, une information restrictive ne changera pas les attributs du concept, elle pourra donc être considérée comme attendue.
Nous retenons l'utilisation de cette opposition attendue/inattendue, en anglais « Expected / Unexpected », dans le cadre de nos expérimentations (§4.4).

En conséquence, la figure 35 ci-dessous synthétise les deux mécanismes de catégorisation par analogie qui sous-tendent le raisonnement créatif. D'une part selon Bonnardel et al. (hémisphère gauche) et d'autre part selon Koestler (hémisphère droit).
Dans l'hémisphère gauche, l'attention est d'abord portée sur la qualité des informations perçues. Puis l'individu définit les distances entre les informations perçues et le problème qu'il doit résoudre.
Dans l'hémisphère droit, l'attention est d'abord portée sur la quantité d'informations utilisée. L'individu multiplie alors les « ponts » ou « croisements » entre ces informations, c'est-à-dire les **méta-analogies**.

Finalement, les connaissances que les concepteur.trices utilisent pour générer des idées et des concepts créatifs dépendent peu de la quantité d'informations disponible en amont mais fortement de la mise en forme de ces informations et du contenu qu'elles donnent à voir. **En ce sens, une sélection des informations pourrait être faite en amont pour favoriser la génération d'idées et de concepts créatifs.**

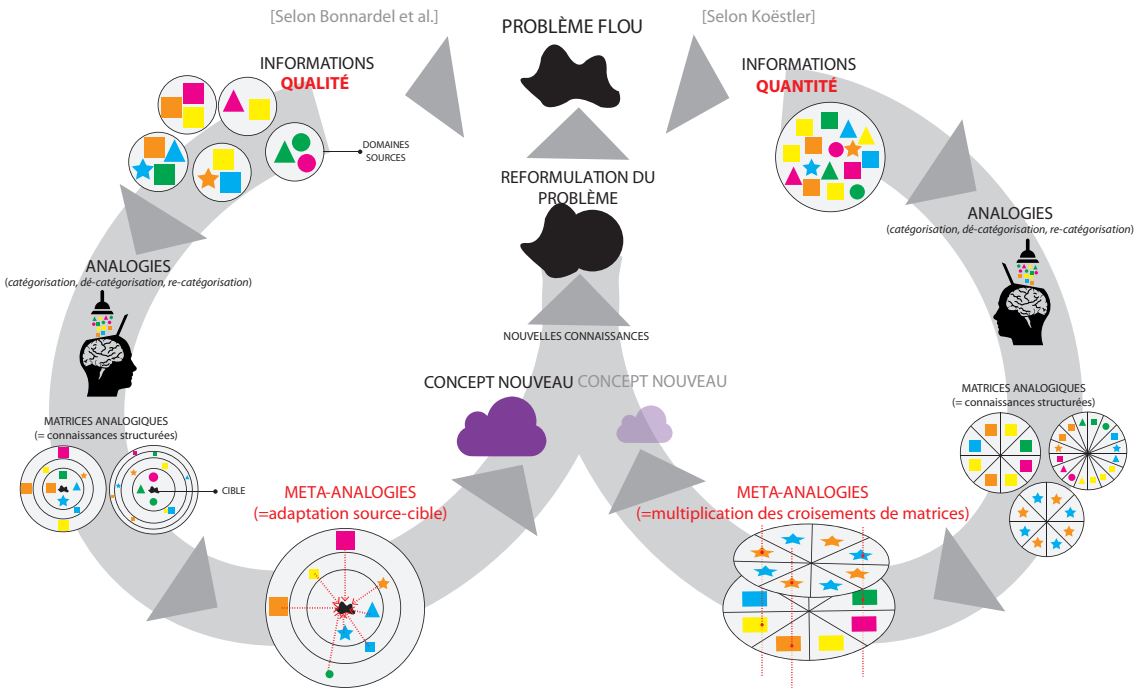


Fig.35 - Deux mécanismes d'analogie dans le raisonnement créatif

2.9.2.3 La phase d'inspiration

A l'issue des phases de collecte et de catégorisation, les individus possèdent donc un ensemble dynamique de connaissances, qui peut être enrichi et re-présenté à chaque nouvelle catégorisation. La phase d'inspiration désigne alors l'instant où les concepteur.trices vont extraire des connaissances parmi ces catégories et la manière dont ils vont les manipuler au regard du problème à résoudre, dans le but de faire émerger des idées. Selon Gero, cette phase relève de «l'émergence » **[156]**.
Nous l'avons vu, les individus catégorisent les informations perçues et créent ainsi leur corpus de connaissances. Ces connaissances peuvent être appliquées à différents problèmes de conception similaires. En ce sens, les connaissances sont des « schèmes » c'est-à-dire des noyaux de connaissances adaptables à un grand nombre de situations. Lorsque les mêmes schèmes de connaissances sont partagés par différents individus, des schèmes communs se forment.

La créativité en conception c'est alors l'acte de perturber ces schèmes communs pour produire des résultats inattendus ou incongrus **[156]**. Ces « perturbations » naissent de la manière dont les individus manipulent les connaissances, plus précisément de la manière dont ils additionnent ou substituent des « variables », c'est-à-dire des caractéristiques (formes, fonctions, couleurs, comportements…) contenues dans les connaissances. De ces manipulations et des nouvelles représentations qui en résultent émerge une nouvelle idée. Des exemples simples montrés dans la figure 36 ci-dessous illustrent ce phénomène. Sur la partie gauche, une représentation (1) montre de manière explicite 3 triangles équilatéraux. Une manipulation des formes contenues dans la représentation (1) fait émerger une nouvelle forme : un trapézoïde. Cette forme de trapézoïde était implicitement contenue dans la représentation (1), elle devient alors explicite dans la représentation (2). Finke **[157]** montre que ce même phénomène peut concerner l'émergence de fonctions. Ainsi, sur la partie droite de la figure 36, une représentation donnée (1) est manipulée. Elle est mise en scène dans différents contextes et fait ainsi apparaître au moins trois fonctions possibles (2,3, et 4).

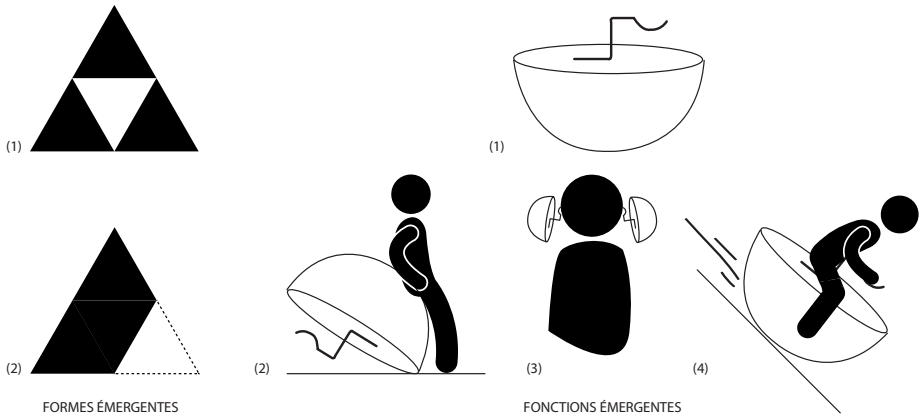


Fig.36 - L'émergence de nouvelles formes ou nouvelles fonctions à partir de caractéristiques données, d'après Gero [156] et Finke [157]

Document confidentiel

Selon Mougenot **[29]**, l'inspiration n'est pas un instant unique, elle est répétée fréquemment pendant la phase d'Exploration (selon le modèle proposé par N. Cross présenté plus haut (§2.8.1.1). Elle est d'abord répétée pour faire émerger de premières idées, puis également répétée pour faire émerger des concepts plus proches du problème à résoudre que les premières idées. Cette progression est aussi nommée « posture sensible » dans les travaux d'Aznar **[158]**. La phase d'inspiration est donc constituée de multiples manipulations d'informations.

Nous l'avons précisé, les 3 phases du processus de traitement d'informations ne sont pas réalisées de manière séquentielle mais simultanément. En ce sens, la phase d'inspiration est souvent confondue avec la phase de catégorisation par analogie présentée précédemment (§2.9.2.2). En effet, elles présentent un mécanisme commun : l'analogie. Cependant, selon Rosenman et Gero **[159]** la phase d'inspiration ne peut être réduite à l'analogie seule, car elle peut être sous-tendue par 4 raisonnements qui permettent de manipuler les informations. Ces raisonnements sont définis et illustrés sur la figure 37 ci-après. Le point de départ est commun à ces 4 raisonnements, il consiste d'abord à analyser les existants (encadré rouge « does one exist ? ») pour identifier si des solutions au problème posé existent déjà ou non. Ceci est cohérent avec l'affirmation et le modèle proposés par Hatchuel **[100]**, le processus créatif est basé sur l'observation d'informations existantes.

- Le raisonnement par combinaison (A sur fig.37) - les concepteur.trices identifient parmi les existants, des caractéristiques qui répondent partiellement au problème. I.elles « importent » ces caractéristiques et les combinent pour faire émerger une nouvelle idée. Ce raisonnement implique la sélection de caractéristiques pertinentes et leur modification pour les adapter à l'objectif de conception.

- Le raisonnement par mutation (B) - les concepteur.trices sélectionnent des existants présentant de nombreuses caractéristiques répondant déjà au problème posé. I.elles modifient une partie des informations, majoritairement les aspects formels, pour répondre à l'objectif de conception.

- Le raisonnement par analogie (C) - remarquons que ce raisonnement est suivi lorsque l'analyse des existants n'a pas permis de repérer des solutions existantes qui répondent au problème posé (No cerclé en rouge). Autrement dit, dans les cas où la capacité créative est la plus nécessaire. Les concepteur.trices étendent alors l'analyse des existants à des domaines d'informations plus éloignés de l'objectif de conception. Cette étape est similaire au mécanisme analogique observé dans la phase de catégorisation des informations et rejoint donc les conclusions de Goldschmidt **[154]**, Bonnardel **[153]** et Mougenot **[29]**. L'utilisation d'informations issues de différents domaines favorise la divergence et augmente la qualité créative des solutions. Le raisonnement par analogie exploite alors des caractéristiques de différents niveaux, conceptuels, structurels, fonctionnels et formels.

- Le raisonnement par principes primitifs (D) – il est conduit face à des problèmes particulièrement inédits ou complexes. Les concepteur.trices établissent alors, à partir des spécifications du problème, une liste des caractéristiques qu'i.elles estiment essentielles pour la solution. Ces caractéristiques sont souvent hiérarchisées et représentées de manière sémantique (mots-clés, verbes). Si des existants peuvent satisfaire les caractéristiques identifiées, le raisonnement devient alors similaire à la combinaison ou à la mutation.

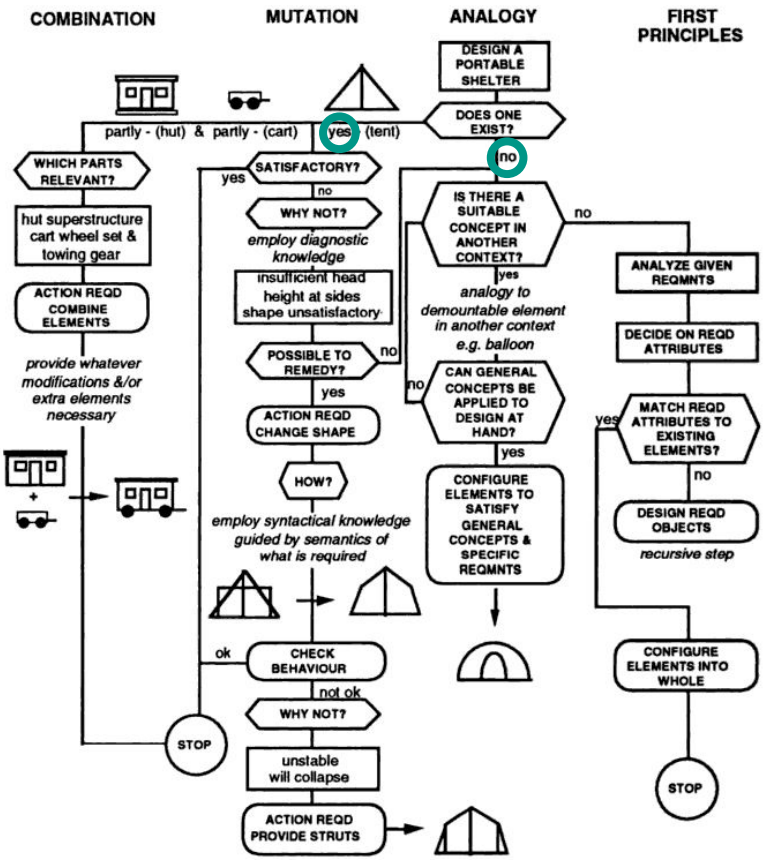


Fig.37 - Les 4 types de raisonnements qui sous-tendent l'émergence, extrait de Rosenman et Gero p.127 [159]

Ainsi, les concepteur.trices conduisent différents raisonnements pour manipuler les informations existantes. En ce sens, le raisonnement est une variable du processus créatif, il est donc possible de stimuler les concepteur.trices pour favoriser la conduite de l'un ou l'autre des raisonnements identifiés.

2.9.3 La construction de représentations

La construction des représentations est le moteur qui fait progresser le processus créatif, elles sont donc construites au fil des phases de collecte d'informations, de catégorisation par analogie et d'inspiration. Elles font progresser le processus par un mécanisme réflexif **[43]**. Ces représentations sont de deux types : mentales et externes aux concepteur.trices. Nous nous intéressons particulièrement aux représentations externes, notamment parce qu'elles aident les concepteur.trices à manipuler les informations, mais aussi car elles permettent d'évaluer les idées et concepts générés et de les capitaliser **[160]**.

Document confidentiel

2.9.3.1 Images mentales et images externes

Selon Bernèche **[161]**, la construction d'images mentales est un réflexe commun à tous les humains qui apparaît dès l'enfance, à partir des sensations vécues dans un environnement donné. En effet, tous les individus forment des images mentales à partir des informations qu'ils perçoivent, grâce à des expériences sensori-motrices c'est-à-dire en les visualisant, en les écoutant, en les sentant, les goûtant et en les touchant. Ainsi, les individus élaborent des « objets perçus » de leur environnement, c'est-à-dire des représentations de ce qui est « eux » et « hors d'eux », chargées de leurs affections, émotions et de leurs motivations. En ce sens, le rapport des individus à leur environnement repose sur une « imagerie mentale », appelée « imaginaire », qui permet d'articuler perceptions objectives (l'environnement tel qu'il est) et perceptions subjectives (l'environnement tel qu'il est compris par l'individu).

Selon Schön **[43]**, le processus créatif est une pratique réflexive car les concepteur.trices ont également besoin de matérialisations extérieures (i.e non mentales), pour leur renvoyer des informations qui les pousseront à re-catégoriser leurs connaissances et ainsi les faire rebondir (retour dans l'espace connaissances selon le schéma co-évolutif). Cette affirmation est confirmée par Bernèche **[161]** qui souligne qu'avec l'enrichissement des connaissances apparaît une diversité de moyens d'exprimer et de communiquer celles-ci : les mots, symboles, signes et comportements. La production des idées et des concepts résulte alors d'une interaction constante entre les diverses sources d'informations et la multiplicité des moyens de communications. Bernèche **[161]** ajoute que la capacité à « donner forme au sensible » via des moyens de communication non verbaux est une caractéristique des individus créatifs.

2.9.3.2 Les images externes : multiples et manipulables

Pour Wenger **[162]**, la prédominance des représentations graphiques parmi d'autres moyens de communication s'explique par le fait que la visualisation d'images favorise le phénomène cognitif de rappel à la conscience des pensées ou des intuitions stockées dans l'inconscient. En ce sens, les travaux étendus d'Oxman **[163]** modélisent l'émergence d'idées et de concepts créatifs selon une répétition d'un cycle de re-représentations. Ce cycle est illustré par la figure 38 ci-dessous. Dans ce cycle, les concepteur.trices externalisent une première fois les connaissances encodées dans leur imaginaire. Cette externalisation consiste à construire de multiples représentations visuelles. La capacité créative des concepteur.trices leur permet ensuite de repérer et extraire des caractéristiques (« des schémas sous-jacents » et des « contenus structurels ») parmi les connaissances contenues dans ces représentations et surtout de les manipuler avant de les représenter une nouvelle fois. En ce sens, la créativité c'est donc la capacité à manipuler les représentations précédentes, et donc à manipuler les informations qu'elles contiennent, de manière nouvelle et inattendue puis à re-représenter les résultats de cette manipulation. Pendant cette activité de manipulation, les concepteur.trices intègrent les contraintes imposées par le problème. I.elles suivent, consciemment ou non, au moins un des types de raisonnements parmi la Combinaison, la Mutation, l'Analogie ou les Principes primitifs puis sélectionnent un ou plusieurs modes de représentations. **La manipulation cor-**

-respond au réflexe de construction d'images mentales qui apparaît dès l'enfance, décrit dans la sous-section précédente, elle passe donc par des expériences sensori-motrices. Ainsi les concepteur.trices créatifs manipulent des informations en continu, à travers des cycles de « re-représentation », qui leur permettent de manipuler les connaissances, jusqu'à faire émerger des idées et des concepts créatifs.

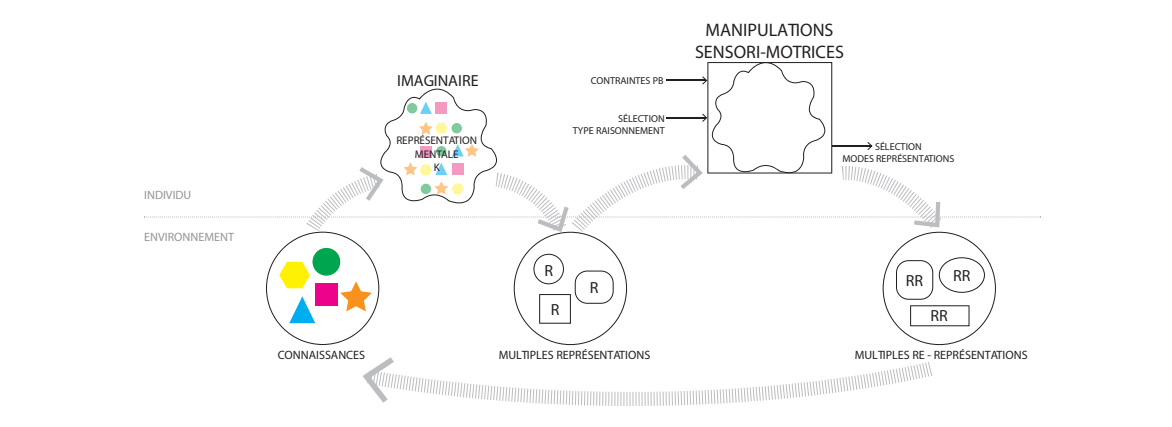


Fig.38 - Cycle d'externalisation des représentations, d'après Oxman [163]

Nous retenons alors que les représentations encodent les informations et les connaissances utilisées dans le processus créatif. Nous retenons également que les représentations sont le medium qui permet à l'individu de manipuler ces connaissances. La construction de représentations et leur manipulation sont donc essentielles au raisonnement créatif.

Selon Goel **[164]** puis Visser **[130]**, la répétition de ce cycle « représentation, re-représentation » au cours du processus créatif conduit à l'obtention de nombreuses représentations. Pour Goel **[164]**, la conception c'est la transformation d'une représentation – le brief – en d'autres représentations : les cahiers des charges (fonctionnels et techniques), maquettes, etc… Celles-ci sont alors appelées « **Objets Intermédiaires** » (OI) ou « **Représentations Intermédiaires** » (RI). La distinction entre les différentes représentations construites au fil du processus, est alors une question de degré de spécification, de rôles et de statuts.
Les sections suivantes approfondissent les types d'objets intermédiaires, leurs rôles et statuts dans le processus créatif. Ceux-ci sont en effet au cœur de l'approche liant fabrication additive et créativité que nous proposerons.

2.9.3.3 Aptitudes et moyens d'aide à la représentation

Observant les différentes traditions professionnelles des concepteur.trices, Hyysalo **[165]** remarque que les aptitudes à la construction de représentations, notamment au dessin, sont inégales selon les métiers. Ainsi, si les designers industriels cultivent traditionnellement

Document confidentiel

cette aptitude, celle-ci apparait moins souvent dans les métiers liés au management ou au marketing, tandis qu'elle est transférée à des outils numériques dans les métiers de l'ingénierie de la conception. Pour Le Gall **[166]**, la construction de représentations repose en effet sur des savoir-faire empiriques et peu instrumentés, donc généralement non standardisés. Or, nous avons souligné que la construction et l'utilisation de multiples représentations externes est un moteur pour le processus créatif. En outre, les représentations externes favorisent la traçabilité du processus créatif, elles permettent de l'archiver. Selon Edwards **[167]**, cette aptitude au dessin peut évoluer et donc faire évoluer l'aptitude perceptive des individus (par exemple, apprendre à dessiner à l'envers permet d'apprendre à voir le problème à l'envers). Cependant, le temps long de l'apprentissage est rarement cohérent avec le temps dévolu aux processus créatifs conduits en entreprises. Nous remarquons alors d'une part un phénomène de recours à des métiers qui cultivent cette aptitude et, d'autre part le développement d'outils d'aide à la représentation.

Le recours à des métiers cultivant une aptitude au raisonnement par re-présentations peut par exemple être observé au sein du FabLab Safran Aircraft Engines[26]. Dans cet espace dédié à l'innovation, l'émergence des projets est accompagnée par des designers, notamment pour la représentation de scénarii d'usages pour la génération de nouveaux services ou produits.
Le développement d'outils d'aide à la représentation favorise la conduite du raisonnement créatif pour des métiers qui n'ont pas particulièrement cette aptitude. Parmi les outils existants, nous relevons le cas des imprimantes 3D d'une part et des gabarits d'aide à la représentation d'autre part.

Ndiaye **[168]** observe les effets de la mise à disposition d'imprimantes 3D dans un processus de conception créative conduit en milieu scolaire. Cette étude fait apparaître que l'imprimante 3D est un outil de « médiation artefactuelle » : une progression de l'activité est constatée après chaque fabrication d'un objet par l'imprimante 3D. L'objet tangible fait donc « rebondir » ces concepteur.trices novices dans leurs activités collectives. Pour la majorité des élèves observé. es, les objets obtenus permettent de valider des hypothèses émises préalablement (usage de type prototypage rapide). Mais un autre usage est observé : une approche « d'impression directe », dans laquelle la simulation numérique de l'objet et l'objectif attendu vis-à-vis de l'objet passent au second plan, au profit du seul plaisir de manipuler et de la satisfaction d'obtenir un objet tangible qui présente des caractéristiques inhabituelles. Ces constats sont nuancés selon le niveau scolaire des élèves. En effet, le manque de maîtrise de la modélisation 3D et le temps disponible réduisent fortement ces motivations intrinsèques. Celles-ci sont dépassées par le temps et l'effort passés à modéliser ou modifier le modèle virtuel.

D'autre part, nous remarquons le développement de gabarits d'aide à la représentation visuelle. Dans l'exemple visible sur la figure 39, le gabarit a pour rôle de guider les concepteur. trices vers un point d'intérêt prédéfini, ici la partie intérieure avant d'un véhicule (image A). Cette représentation incite à générer des idées et concepts en l'augmentant avec de nouvelles représentations ou des modifications de celle-ci (image B).

[26] Les compétences proposées par le FabLab de l'Atelier Innovation Services par Safran Aircraft Engines http://www.usinenouvelle.com/editorial/un-fablab-pour-reinventer-les-services.N319328 et https://www.industrie-techno.com/snecma-le-fablab-accompagne-l-innovation-service-compris.38560

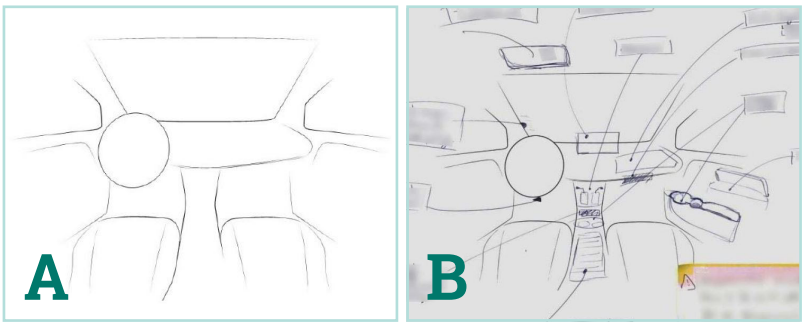


Fig.39 - Gabarits guidant la représentation dans le contexte de l'innovation pour l'automobile, extraits de Bila-Deroussy [30]. A : gabarit vierge, B : complété par un.e concepteur.trice

Nous remarquons un second type de gabarit d'aide à la représentation visuelle : l'outil Stormboard développé par l'agence Nod-A, illustré par la figure 40 ci-après. Ce kit présente des stickers pour compléter un dépliant décomposant un scénario d'usage. Cet outil aide ainsi à représenter les avantages et points faibles d'un concept généré, tout en évacuant la problématique de la maîtrise du dessin.

Fig.40 - Stormboard, outil d'aide à la représentation visuelle de concept, extrait de Makestorming.com[27]

2.9.4 Types d'objets intermédiaires et leurs rôles

Cette section vise à expliciter les types de représentations externes en fonction des rôles qu'elles jouent dans le processus créatif. Comme décrit précédemment, ces travaux s'inscrivent dans le cadre général de la RID – Recherche Innovation Développement, soumise au

[27] Les outils de Makestorming de l'agence Nod-A http://makestorming.com/outils

Document confidentiel

régime d'Exploration (§2.7.1). En ce sens, nous nous intéressons moins aux produits finaux qu'aux **objets intermédiaires**, qui sont au cœur de la définition de notre approche liant fabrication additive et créativité.
Selon Vinck **[160]** la notion d'objet intermédiaire est issue des sciences sociales qui l'utilisent pour « qualifier ces choses qui circulent entre les membres d'un réseau ». Dans sa première théorisation, cette notion ne préjugeait ni de la nature, ni du rôle que les objets intermédiaires jouaient entre les acteur.trices mais elle affirmait qu'ils sont importants parce qu'ils soutiennent, prolongent et transforment les activités menées. Cette première définition mettait alors en lumière le caractère social des objets intermédiaires. Ainsi, la construction de représentations externes, telle que décrite notamment par Oxman **[163]**, n'est pas une activité qui caractérise uniquement la créativité individuelle, elle concerne également la créativité de groupe. En effet, selon Mer **[169]**, les objets intermédiaires permettent de modéliser la réalité et de coordonner la coopération entre les acteur.trices du projet. Les OI permettent donc de partager et transmettre, autrement dit, ils créent un « espace de circulation des connaissances ». De plus, en créant un langage commun à différents métiers, ils permettent d'harmoniser les niveaux de connaissances hétérogènes et de stabiliser et rendre explicites les connaissances utilisées par le groupe pour répondre au problème **[160]**.

En ce sens, l'analyse des OI permet d'observer et d'évaluer la qualité créative ou non des processus de créativité conduits en groupe, au fil de leur avancement. En sciences de la conception, il est alors courant que « l'observateur se transforme en expérimentateur et introdui[se] dans la situation, de nouveaux objets qu'il façonne en fonction d'une hypothèse de Recherche à tester […]» **[160].** Cette démarche proposée par Vinck **[160]** sera appliquée dans ces travaux (§4.6).

A ce stade, il est intéressant de relever l'emploi de deux expressions : « **objets intermédiaires** » et « **représentations intermédiaires** ». Certain.es auteur.es, comme Bouchard et al. **[170]**, emploient plutôt représentations intermédiaires, jugeant que le terme « objet » renvoie à un type précis de représentation : les artefacts tangibles. Alors que « représentations » semble plus général et peut donc englober tous types de représentations, tangibles comme virtuelles, en 2D ou en 3D. Ces définitions sont approfondies de manière à positionner cette recherche sur la création et la mobilisation d'objets intermédiaires.

Dans ses travaux, Pei **[171]** établi une typologie étendue des représentations visuelles construites pendant le processus créatif. D'abord catégorisées selon les modes de représentations (dessin à main levée, modélisation 3D, etc.), ce critère seul est rapidement apparu insuffisant car un même mode de représentation peut être employé avec différentes intentions. Le critère d'intention (« *purpose* ») a donc été ajouté pour décrire les types de représentations du point de vue du ou des individus qui les construisent. Enfin, le critère de précision a été utilisé pour observer l'enrichissement des représentations au regard de l'avancement du processus. **Ainsi, il est montré que les représentations intermédiaires sont, au début du processus, de type non tangible (croquis, mots-clés…) puis de type tangible en aval du processus (maquette, prototype…).**
Cette typologie a été matérialisée sous la forme d'un jeu de cartes. Ces cartes ont également été numérisées pour une application mobile, qui donne un accès facilité à cette typologie conséquente. Des extraits en sont présentés dans la figure 41 ci-contre. Nous remarquons particulièrement le type « *Referential Sketch* » (à gauche). Ce type de représentation est construit dans les phases initiales du processus créatif pour enregistrer des caractéristiques de précédents. Cette démarche permet d'extraire des informations existantes et de les catégorisées. Elles peuvent devenir de futures références inspirantes pour un projet. Ce type de représentation rend explicite le processus de traitement de l'information décrit précédemment. Nous

notons également le type « *Experimental prototype* » (à droite) qui désigne la construction d'un objet tangible destiné à être manipulé. L'objectif est alors de collecter des informations sur les performances du produit qu'il représente. Ces informations ne peuvent être découvertes que par l'usage de l'objet, c'est-à-dire sa manipulation sensori-motrice selon un scénario induit.

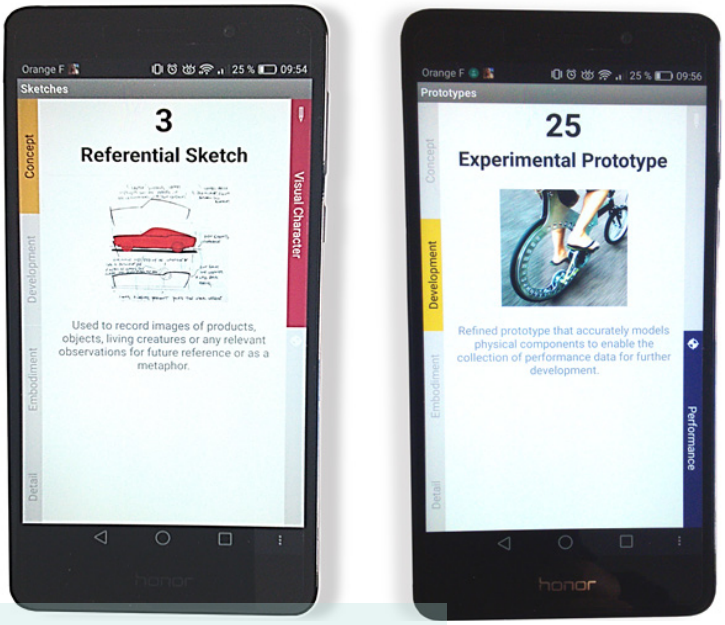


Fig.41 - Extraits de la typologie de représentations intermédiaires proposée par Pei [171]

D'autres auteur.es, comme Vinck et Jeantet **[160]** ou Mer **[169]**, privilégient l'emploi d' Objets Intermédiaires (OI). Ceci peut s'expliquer par le fait qu'i.elles s'intéressent moins au point de vue de l'individu qui construit les représentations qu'aux points de vue des individus qui les reçoivent. Différencier les types de représentations est alors de moindre importance. Selon ces auteurs, « objets intermédiaires » groupe toutes les représentations construites et/ou mobilisées au cours du processus créatif. En effet, les concepteur.trices construisent des OI au fil du processus mais interagissent également autour d'OI préexistants importés dans l'espace de travail, ou autour d'OI précédemment réalisés convoqués verbalement au cours du processus.
Nous préférons également l'emploi de l'expression « objets intermédiaires » plutôt que « représentations intermédiaires ». En effet, le terme « objet » souligne particulièrement leur nature tangible. Or, nous l'avons vu, cette nature tangible stimule les expériences sensori-motrices qui, elles, déclenchent la production d'idées et de concepts. En outre, le terme « objet », fait écho à la fabrication additive, cette technologie qui facilite l'obtention d'objets tangibles aux caractéristiques réalistes en termes de formes, de fonctions, matériaux ou du poids. Nous retenons en ce sens l'emploi de l'expression objets intermédiaires.
Selon Vinck **[160]**, les objets intermédiaires sont, d'une part, des « marqueurs temporels et des opérateurs de changements», et d'autre part, des « marqueurs spatiaux et des opérateurs d'orientation ». Ces deux visions sont développées dans les paragraphes suivants.

Document confidentiel

Les objets intermédiaires : marqueurs temporels et opérateurs de changements

En étudiant les pratiques d'un grand nombre de concepteur.trices, Blanco **[172]** a constaté que plusieurs objets se succèdent et se substituent les uns aux autres. Les uns sont alors délaissés quand de nouveaux objets sont mobilisés ou créés. Certains OI jouent alors un rôle particulier dans cette dynamique temporelle. Ils correspondent à des transitions entre des phases d'activités. En ce sens, les OI sont des marqueurs temporels et des opérateurs de changement. Cette observation indique, d'une part, que les OI peuvent jouer plusieurs rôles et d'autre part, que les OI qui marquent une transition sont singuliers. Il apparaît que les rôles des OI évoluent constamment au cours du processus créatif, pour un même objet. **On ne parle plus alors de « types » d'objets mais de « statuts » que l'objet acquiert et perd au fil du processus.** On comprend alors qu'établir une typologie des objets intermédiaires valable pour tout type de projet de conception et dans tout contexte devient difficile. Selon Vinck **[160]**, le statut de l'objet est finalement coproduit au cours du processus par les acteur.trices en présence, de manière concomitante avec les idées et concepts générés.

5 statuts que peut prendre l'objet intermédiaire au cours d'un processus créatif sont définis ci-après :

Blanco et al. **[173]** et Cruz et al. **[174]** définissent les statuts « ouvert » ou « fermé » des objets. **L'objet intermédiaire ouvert** accepte des modifications et une adaptation nécessaires au contexte du problème donné. Ce statut laisse aux utilisateur.trices de l'objet une marge de manœuvre pour diverger, il incite à l'interprétation. La notion de « précédents » utilisée par Pasman **[151]** et la notion d'exemples utilisée par Agogué **[155]** pour décrire la mobilisation d'objets préexistants renvoient à ce statut. Inversement, un **objet intermédiaire fermé** est très codifié, il ne permet ni ne supporte aucune modification et donc n'autorise pas l'intégration de nouvelles connaissances ou nouveaux points de vue. Il fonctionne dans un registre prescriptif. Un fichier 3D fourni par un bureau d'études à un fabricant est un exemple d'objet intermédiaire fermé. Le fabricant n'est pas invité à modifier ce fichier mais à l'exploiter selon des règles préétablies.

D'autre part, le rôle de médiation que peut jouer, ou pas, l'objet intermédiaire a été particulièrement souligné par Boujut **[175]**. Ainsi, **l'objet médiateur** supporte la confrontation des points de vue des acteur.trices en leur donnant une « prise » à la discussion. A l'inverse de la médiation, un **objet** peut être **commissionnaire [176]**. Il est alors chargé de transmettre fidèlement l'intention que l'acteur.trice qui l'a créé lui a attaché. Il n'a pas vocation à être re-construit (au sens de re-présenté selon Oxman) au fil de discussions au sein d'un groupe.

Nous relevons également le cas particulièrement intéressant de l'**objet instrument** car il peut être à la fois commissionnaire et médiateur, ouvert et fermé. **Selon Vinck [160], l'objet instrument est un artefact tangible qui comporte une matérialité spécifique (i.e une forme) et un schème d'utilisation prédéterminé et connu car correspondant à des schèmes socialement construits (i.e un scénario d'utilisation compréhensible grâce à l'affordance de l'objet). L'objet instrument est à la fois vecteur de l'intention de l'acteur.trice qui l'a créé et, dans l'usage, vecteur de l'intention de son utilisateur.trice.**

Ainsi, Rabardel **[177]** observe un phénomène particulièrement intéressant lors de l'utilisation d'objets instruments pendant le processus créatif : les utilisateur.trices des objets instruments ajoutent aux fonctions initiales de ces objets, d'autres fonctions, d'autres usages qui ne se résument ni aux intentions préalables transmises ni aux schèmes d'utilisation connus, sans toutefois que la forme des objets évolue. Les objets instruments en eux-mêmes restent hétérogènes mais le groupe qui les utilise les équipe de données complémentaires (« métadonnées »)

qui peuvent être comprises par tous les individus du groupe, indépendamment de leur métier ou de leurs connaissances. Ainsi grâce aux métadonnées, chaque acteur.trice du groupe est libre d'explorer les objets instruments comme bon lui semble, le rôle de médiation reste assuré, tout comme le rôle de commissionnaire. Rabardel **[177]** souligne également que l'utilisation d'objets instruments lors d'un processus créatif de groupe est systématiquement accompagné de différents modes de communication comme la réalisation d'une esquisse graphique ou la mise en commun par des explications verbales ou encore par des temps de silence qui peuvent aussi être un mode de communication de groupe.

La définition de ce statut d'objet instrument renvoie à la notion de « *design probes* » proposée par Mattelmäki **[178]**. **En effet, l'objet instrument montre que l'enjeu de la relation entre les individus et les objets dans le processus créatif se situe moins dans l'instant où l'objet est créé que dans les expériences vécues par les utilisateur.trices de ces objets. C'est-à-dire dans les situations, actions, émotions et motivations qui sous-tendent la manipulation des objets utilisés pour explorer un problème.** L'existence d'un lien entre objets instruments et expériences de manipulation est cohérente avec le phénomène précédemment décrit : les expériences sensori-motrices déclenchent la construction d'images mentales et externes qui elles-mêmes sont le moteur du processus créatif.

L'ouvrage de Mattelmäki **[178]** fait état de divers types de *design probes* (« *cultural probes*, *informational probes, empathy probes* » etc.) parmi lesquels nous remarquons les « *technology probes* ». Ce type d'objet intermédiaire, aussi nommé « *experience prototype* » selon Hutchinson **[179]** et Buchenau **[180]**, vise à recueillir les idées et les commentaires qui émergent pendant que les concepteur.trices découvrent, par la manipulation, les potentiels d'une technologie. Nous remarquons qu'en ce sens, les *technology probes* font écho aux *experimental prototypes* identifiés par Pei **[171]** et précédemment décrits (fig.40).

Nous avions précédemment observé, dans la pratique, l'utilisation de **démonstrateurs,** ces objets réalisés en fabrication additive destinés à montrer les capacités des procédés et le niveau de connaissances et de maîtrise d'une entreprise (§2.2.2). Ces démonstrateurs sont en permanence à la disposition de multiples individus (sur des salons professionnels, sur les bureaux des collaborateurs.trices, dans des réunions, etc.) et on observe que leur manipulation déclenche systématiquement des questionnements et des discussions relatives aux informations incarnées dans ces objets. En ce sens, les démonstrateurs peuvent prendre le statut d'objets instruments pour la fabrication additive.

Schön **[43]** dans les années 1980, puis récemment Mattelmäki **[178]** et Cruz **[174]** soulignent que les divers types d'objets instruments présentent des caractéristiques communes :

- **Un caractère exploratoire** : ils décrivent et/ou prédisent des pistes de nouvelles opportunités à explorer et non des solutions abouties répondant à des problèmes identifiés
- **Un caractère ludique** (« *playfulness* ») : ils sont plaisant à utiliser et créent une atmosphère conviviale, les manipulations qu'ils incitent à faire s'apparentent au jeu, ils suscitent des émotions positives
- **Un caractère original** (« *innovativeness* ») : ils présentent des caractéristiques inattendues au regard d'un domaine d'informations donné
- **Un caractère interactif** : ils motivent les acteur.trices à participer, à agir, à les manipuler. Ils ancrent également les acteur.trices dans la réalité, dans le domaine du possible car i.elles peuvent en faire l'expérience dans le monde réel

Document confidentiel

Nous avons présenté différents statuts que peuvent avoir les objets intermédiaires. Nous définissons maintenant le rôle singulier des objets qui marquent un aboutissement du processus créatif. La littérature présente moins de synthèse concernant la définition de ces rôles. Différentes appellations sont utilisées pour désigner ce statut particulier.

La table 2 ci-après présente des appellations relevées avec les auteur.es identifié.es.

Table 2 - Appellations des objets intermédiaires « finaux »

EXPRESSIONS	AUTEUR.ES
« Livrables »	Fait partie du jargon utilisé dans de nombreux métiers liés à la conception ainsi que dans l'académique. La paternité ou maternité du terme n'est pas identifiée par la littérature
« Demi-produit »	B. Weil et al [121]
« Produit-concept »	H. Christofol [181] ; B. Borja de Mozota [182]
« Minimum Viable Product »	E.Ries [183] ; Silberzahn [184]
« Proofs of value, concepts »	Yannou [97]

Ces objets sont dits « finaux » car ils marquent le moment où l'objet intermédiaire est communiqué à des individus n'ayant pas participé au processus créatif. Par exemple, des utilisateur.trices potentiel.les, de nouveaux acteur.trices participants à la conception, des expert.es pouvant évaluer la valeur du concept, etc.

L'appellation « produit-concept » peut être ambigüe car elle combine deux termes couramment utilisés pour désigner deux états d'avancement. « produit » désigne habituellement l'aboutissement final de la conception tandis que « concept » désigne un stade moins développé. Cependant, selon Borja de Mozota **[182]**, le produit-concept est « l'outil le plus efficace pour visionner le futur et susciter des réactions au sein de l'entreprise elle-même et en dehors ». En ce sens, 3 types de produit-concepts sont distingués selon les destinataires visés : les produit-concept de communication, destinés au grand public, les produit-concept marketing, destinés aux futur.es client.es et les produit-concept internes, destinés à partager les connaissances au sein d'une entreprise ou entre des entreprises partenaires.

L'appellation *Minimum Viable Product* est issue des pratiques de Lean Startup **[183]**. Elle a émergé pour faire face à une double problématique : il est impossible de savoir a priori ce que veulent les client.es. Et la nouveauté du concept fait qu'il est également impossible de simplement leur demander (par des questionnaires ou des études de marchés traditionnelles). La solution réside alors dans le « faire » : construire le produit, le mettre dans les mains des client.es et mesurer leur réaction pour ensuite les prendre en compte pour faire évoluer le concept **[184]**. Cette démarche se différencie du prototypage au sens où elle est menée très tôt dans le processus, dès les phases initiales. En ce sens, *le Minimum Viable Product* n'est pas un produit fini mais un objet intermédiaire ouvert aux modifications.

Les appellations « Preuves de valeur, preuve de concept et preuve d'innovation » utilisées par Yannou **[97]** mettent l'accent sur l'entité destinataire des preuves. En l'occurrence, ces objets intermédiaires visent à convaincre les entreprises impliquées dans le processus, en invoquant des notions de valeur marchande et de retour sur investissement.

Les objets intermédiaires : marqueurs spatiaux et opérateurs d'orientations

Jusqu'ici, nous avons décrit les objets intermédiaires comme des marqueurs temporels du processus et des opérateurs de changements entre des phases d'activité. Vinck **[160]** affirme que les objets intermédiaires sont également des marqueurs spatiaux et des opérateurs d'orientations.

En effet, il apparaît que les acteur.trices se répartissent et évoluent dans l'espace où se déroule le processus créatif en fonction de la disposition spatiale des objets intermédiaires, qu'i.elles remettent rarement en cause. Ainsi, l'objet intermédiaire se trouve à la fois au centre de l'espace commun et au centre de l'action. Cela entraîne une orientation et une structuration des différents points de vue des acteur.trices. Par exemple, l'individu positionné le plus proche de l'objet intermédiaire sera souvent tacitement considéré comme étant « **l'animateur** », c'est-à-dire celui qui peut prendre la parole et manipuler l'objet. Un second individu, positionné en face du premier, verra la scène en miroir et sera souvent considéré comme le « répondant » à l'animateur. La parole d'un individu éloigné de la scène sera considérée comme de moindre importance par rapport à celle d'un individu situé au cœur de l'action. Tous les individus qui peuvent accéder et/ou visualiser l'objet sont considérés comme faisant partie de l'espace collectif. Les individus situés hors de cet espace seront eux considérés.es comme étant dans leur espace individuel privé.

Selon Vinck **[160]**, les individus situés hors de l'espace collectif s'entourent d'outils de représentation (crayons, bloc-notes…) et d'outils informationnels (grille d'analyse, légende complétant l'objet…). Une action conduite dans l'espace privé préfigure alors souvent une action dans l'espace collectif. Inversement, une action collective est souvent suivie de plusieurs actions dans les espaces individuels.

Finalement, la disposition de l'objet intermédiaire dans l'espace et dans l'action organise donc les passages entre phases d'activité individuelles et phases collectives. La position de l'objet intermédiaire permet d'orienter les regards et l'action de plusieurs individus dans un groupe. Il peut permettre de faire coopérer des individus (i.e rôle de facilitation, rapprochement, participation, engagement, dialogue) ou au contraire de les inciter à des actions différentes (i.e rôle d'empêchement, dissuasion).

Les travaux présentés par Cruz et al. **[174]** et ceux de Moussette **[185]** sont particulièrement intéressants car ils mettent en œuvre les 4 aspects des objets intermédiaires décrits : marqueurs temporels et spatiaux, opérateurs de changements et d'orientations, lors de séances de créativité de groupe. Des objets instruments, prenant la forme d'objets tangibles, sont conçus et fabriqués préalablement à la séance (fig.42). Ces objets sont introduits au début de la séance dans le but de faire vivre une expérience partagée entre les participant.es, qui infusera tout au long de la séance. Les auteur.es parlent à ce propos d'expérience préliminaire. Les caractéristiques de ces objets incitent à les manipuler, à en faire l'expérience sensori-motrice.

Document confidentiel

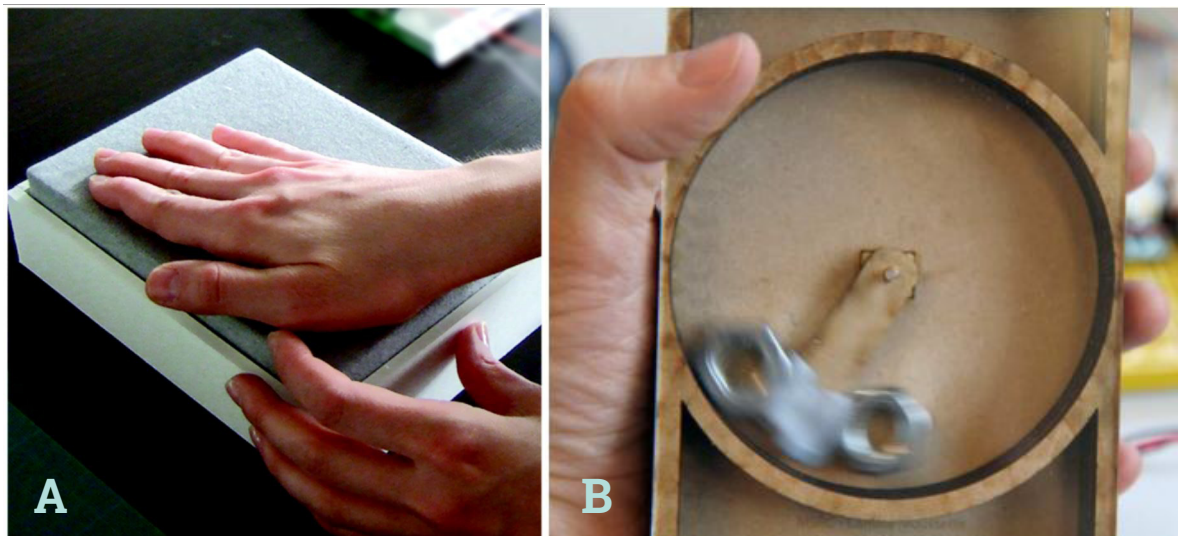


Fig.42 - Objets déclencheurs d'expériences, extraits de Cruz [174] (image A) et Moussette [185] (image B)

Par exemple, l'objet A présenté sur la figure 42 vibre et émet un ronronnement plus ou moins intense sous l'effet de caresses plus ou moins appuyées. L'objet B permet de faire tourner un poids à l'intérieur d'une boîte. Si le poids tourne rapidement, la main ressent des vibrations lentes et cycliques. Si on le déplace séquentiellement, l'individu qui manipule ressent que le centre de masse de l'objet se déplace. Ces effets sont susceptibles de provoquer des émotions, des questionnements et une recherche de références, c'est-à-dire d'expériences similaires déjà vécues. En d'autres termes, ils stimulent le mécanisme analogique. **Ces objets sont alors dits déclencheurs d'expériences** (« *experience triggers* »).

Ces manipulations sensori-motrices sont évocatrices des questionnements et des enjeux liés à la thématique qui va être traitée pendant la séance de créativité. Ainsi, elles visent à inspirer les participant.es en leur faisant découvrir des informations incarnées dans ces objets.
De cette manière, les expériences sensibles permettent de faire passer au second plan les raisonnements uniquement centrés sur la technologie et sur les domaines d'expertises habituels des participant.es pour favoriser l'activation des émotions et des ressentis.

Finalement, les expériences de manipulation permettent de décaler le point de vue des participant.es et favorisent un temps de divergence tout en gardant un pied dans le domaine du possible, du « techniquement faisable ». En outre, ces temps de manipulation en groupe permettent de tisser un lien entre des participant.es qui ne se connaissaient pas avant la séance.

Selon Cruz et al. **[174]**, ce type d'objet intermédiaire n'a pas d'utilité si on le considère comme un produit. En ce sens, les objets déclencheurs d'expériences renvoient à la notion de **parafonctions** (« *parafunctionality* ») proposée par Dunne **[186]**. La fonction de ce type d'objet est de susciter la curiosité pour déclencher une réflexion. Les performances de la technologie passent au second plan pour laisser place à l'expérience, au ressenti, aux émotions et aux

gestuelles induites. Le débat s'oriente alors vers ce que les informations découvertes par la manipulation peuvent apporter à l'exploration d'une thématique de recherche & développement.

Synthèse sur les OI et leurs rôles dans le processus créatif

En synthèse de cette section définissant les différents statuts des objets intermédiaires et leurs rôles dans le processus créatif, nous remarquons que les objets déclencheurs d'expériences sont finalement les articulations entre les composantes de la vision systémique de la créativité présentée dans la figure 24 en préambule (§2.6.2). Cette situation d'articulation est illustrée en actualisant la figure préalable du système créatif (fig.43).

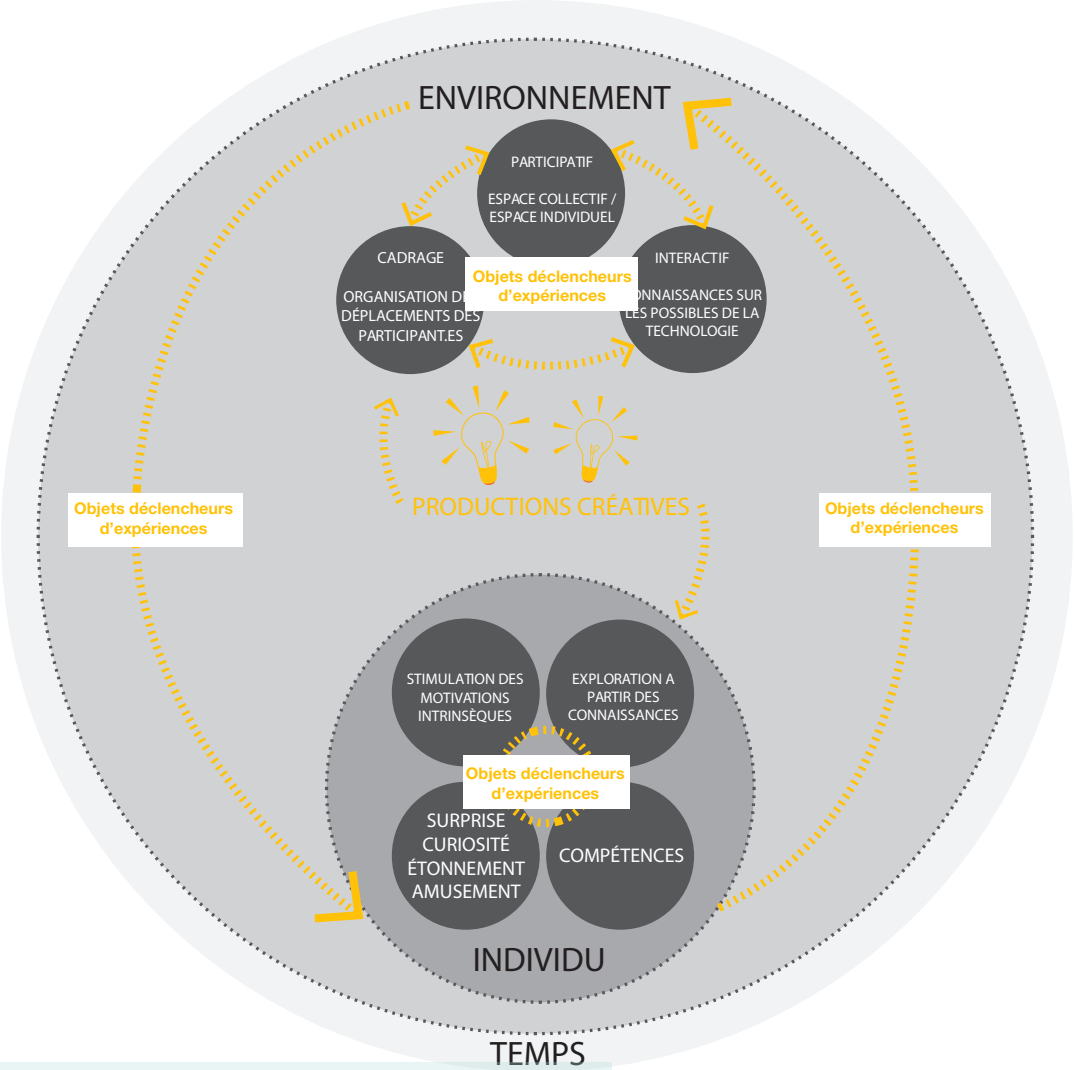


Fig.43 - Les objets d'expériences au cœur de la vision systémique de la créativité

Document confidentiel

Les objets déclencheurs d'expériences peuvent susciter des émotions telles que la surprise, la curiosité, l'étonnement et l'amusement. Ces émotions positives stimulent les motivations intrinsèques des participant.es : i.elles s'attendent à ressentir ces émotions positives, car l'expérience de manipulation est ludique.
De plus, ces objets matérialisent des informations techniques, sous une forme qui les rend accessibles à l'exploration. Cet apport d'informations peut alors contribuer à influencer l'exploration des connaissances, par les biais des facteurs cognitifs et de l'affectivité (flèche montante à droite). Les objets d'expériences permettent également de cadrer l'espace du processus créatif et de guider les comportements. Ainsi, ils incitent les participant.es à s'engager physiquement dans l'action, à s'impliquer, tout en délimitant aussi des espaces individuels privés dans lesquels i.elles peuvent se retirer (flèche descendante à gauche). En jouant le double rôle de transmission d'informations, de médiation entre les participant.es et d'inspiration individuelle, les objets d'expériences permettent aussi de lier l'Individu à son Environnement.

Finalement, utiliser des objets d'expériences pendant les premières activités d'une séance de créativité de groupe permet d'agir simultanément sur plusieurs composantes de la créativité : les motivations, les émotions, l'exploration des connaissances, l'alternance individu/collectif et l'organisation spatiale. Nous retenons ce constat et le transférerons au domaine de la fabrication additive, dans le but de définir des objets déclencheurs spécifiques à la fabrication additive et de les mettre en œuvre dans cette étude comme dispositifs de stimulation de la créativité.

Les phénomènes qui sous-tendent la génération d'idées et de concepts ont été décrits. Il s'agit maintenant de pouvoir évaluer les « effets » de ces phénomènes, c'est-à-dire la qualité des données de sortie du processus créatif. En ce sens, la section suivante met en lumière les critères utiles pour l'évaluation de la créativité en conception.

2.10 L'évaluation de la créativité en conception

2.10.1 Quand est-ce que la créativité est évaluée ?

Comme précisé en préambule, la créativité en conception est indissociable des critères qui permettent de l'évaluer (§2.6). Effectivement, l'évaluation est elle-même l'une des 3 phases du processus créatif décrit : Analysis phase – Generation phase – Evaluation phase (§2.8). Nous avons vu que, dans la réalité des activités, ces phases se chevauchent, la génération d'idées et de concepts n'est pas véritablement distincte de leur évaluation, elles progressent en parallèle. Les concepteur.trices réalisent une évaluation individuelle et subissent aussi une évaluation sociale pour critiquer leurs productions et ainsi prendre des décisions pour faire progresser le processus créatif.
Bonnardel **[138]** souligne alors que le processus créatif suit une dynamique opportuniste, dans laquelle les décisions prises sont motivées par les décisions précédentes.

En ce sens, selon Le Masson **[121]**, la valeur de la conception ne réside pas seulement dans la solution à laquelle le processus aboutit. Les concepts « en suspens » et les connaissances créées au cours du raisonnement ont également de la valeur, notamment pour les concepteur. trices car ils pourront être réutilisés pour répondre à d'autres problèmes de recherche & développement.
Nous retenons que la qualité « créative » peut donc se situer dans les actions, comportements, discussions des participant.es ainsi que dans les objets intermédiaires. En ce sens, il est utile de recueillir ces éléments par des moyens d'annotations, de vidéos, de prises de son ou de photos. A l'issue d'une séance de créativité de groupe, il est donc possible d'évaluer à la fois des éléments relatifs à la capacité créative des individus et les productions générées. Cette évaluation vise à mesurer l'efficacité d'une méthodologie au fil de son déroulement.

2.10.2 Les critères d'évaluation

Selon Howard et al. **[122]**, il y a consensus sur les critères qui définissent la qualité créative d'une idée générée : son originalité et sa faisabilité. Cependant, Boden **[95]** apporte une nuance à la notion d'originalité. En effet, l'originalité peut être mesurée par des juges, en fonction de leurs connaissances personnelles (« P-Creative ») ou au regard de l'historique d'un domaine (« H-Creative »), c'est-à-dire de l'ensemble des existants. Cette discussion illustre le fait que l'évaluation est rarement objective. Elle est le plus souvent réalisée en appliquant des jugements subjectifs, c'est-à-dire fondés sur l'expérience individuelle du juge **[187]**. En ce sens, Shalley et al. **[188]** affirment que les juges doivent être des expert.es de terrain (« *field expert* »), c'est-à-dire des individus présentant un niveau de connaissances, relatives au contexte de la thématique traitée en séance de créativité, reconnu comme étant de niveau intermédiaire ou élevé. Cela force également à limiter l'interprétation des résultats de l'évaluation au contexte spécifique dans lequel le projet est réalisé. **En ce sens, les juges conduisant les évaluations des productions issues des expérimentations sont nommés « Experts ».**

Selon Shah **[189]**, la mesure de l'efficacité du processus créatif peut-être réalisée selon 4 critères définis comme suit :

- **Nouveauté** : à quel point une idée est inattendue par rapport aux autres idées générées pendant la même séance
- **Variété** : mesure de l'espace de solutions exploré. La génération d'idées similaires indique une faible variété et, ce faisant, une plus faible probabilité de trouver de meilleures idées dans le reste de l'espace de solutions. Cette définition renvoie à la notion d'expansion décrite précédemment (§2.9.1)
- **Qualité** : comprend une mesure de la faisabilité technique d'une idée et une mesure de l'adéquation au brief **[29]**, c'est-à-dire de la prise en compte des spécifications d'un brief donné. Dans notre contexte, la faisabilité technique est restreinte aux procédés de fabrication additive (Métal et Polymère).
- **Quantité** : nombre total d'idées discutées et représentées. Un grand nombre d'idées favorise les chances d'apparition de meilleures idées, étant entendu que les premières idées émises ne sont pas forcément les meilleures. Selon Bonnardel **[138]**, ce critère renvoie à la fluidité, c'est-à-dire à la capacité des participant.es à faire émerger plusieurs idées.

Document confidentiel

Au regard de la nuance apportée par Boden **[95]**, il est observé que l'ingénierie utilise le plus souvent l'originalité historique (« H-Creative ») car c'est cette orientation qui ouvre la voie aux démarches de protection intellectuelle, notamment la brevetabilité. Cependant, la littérature sur la créativité s'intéresse aussi à « P-Creative » comme témoin du processus créatif des individus.

Selon Howard et al. **[122]**, la synthèse de ces deux orientations se trouve alors dans 2 critères communs :

- **Originalité** (« *be new* ») : l'invention ne doit jamais avoir été rendue publique en aucune façon, nulle part dans le monde, avant la date à laquelle une demande de brevet est enregistrée
- **Pertinence** (« *be capable of industrial application* ») : l'invention pourrait être fabriquée ou utilisée dans au moins un secteur industriel

Dans ses travaux liés au contexte RID - Recherche Innovation Développement, Yannou **[97]** met l'emphase sur l'évaluation des concepts vis-à-vis des attentes des entreprises impliquées dans le processus. L'objectif est alors de mesurer la valeur, pour les entreprises impliquées, des concepts générés. En ce sens, les critères suivants sont proposés :

- **Valeur de co-développement** : perspective de gains à long terme à la fois pour l'entreprise à l'initiative du projet et pour l'entreprise partenaire de co-développement
- **Quick win** ! : perspective de gains à court terme, tout en limitant les efforts à investir pour aboutir à un produit

Les travaux de Yannou **[190]**, **[97]** soulignent que l'évaluation devrait aussi porter sur la traçabilité du processus. En effet, les séances de créativité se déroulent en temps limité mais, pour les entreprises, elles s'inscrivent dans des perspectives plus durables. En ce sens, il s'agit d'évaluer à quel point la méthodologie et les outils proposés ont permis de représenter fidèlement les idées et concepts, de les conserver, de les mettre en valeur ? Ces travaux mentionnent un exemple de support pour la mesure de la traçabilité : des « *books of design knowledge* ». Ce sont des inventaires des objets intermédiaires générés pendant un projet.

A partir des définitions relevées, nous remarquons la multiplicité des critères d'évaluation de la créativité. En ce sens, la table 3 ci-après présente une synthèse des critères retenus pour l'évaluation des effets de notre méthodologie liant créativité et fabrication additive.

Table 3 - Critères d'évaluation retenus pour cette étude

Evaluation au stade idées	Evaluation au stade concepts
Quantité	Quantité
Fluidité	Adéquation au brief
Adéquation au brief	Originalité + Pertinence
Nouveauté	Valeur de co-développement
Faisabilité	Quick win !
Variété	
Originalité + Pertinence	

2.11 Techniques et outils d'aide pour la créativité de groupe

2.11.1 Une grande variété

Pour une entreprise techno-centrée, s'ouvrir à la créativité signifie prendre le risque d'aborder des méthodologies différentes, de risquer le changement. Il est alors souvent attendu que les résultats, les « effets » de ces méthodologies, montrent une augmentation du nombre de concepts générés, une amélioration de la qualité créative des idées et concepts générés et/ ou des concepts menant effectivement à des produits qui rencontrent le succès, ou encore une augmentation de la capacité créative des concepteur.trices. Pour favoriser ces résultats positifs, la tentation est forte de recourir à des techniques et des outils existants, parfois présentés comme des recettes à appliquer **[30]**. Or il apparaît que ces moyens n'offrent pas de garantie de résultat, notamment s'ils ne sont pas articulés dans une démarche complète. Les phénomènes liés au Design Thinking et au Brainstorming sont des exemples éloquents du fait que l'application systématique de recettes n'est pas adaptée.

Le Design Thinking a été conceptualisé et outillé à la fin des années 1980 par Peter Rowe **[191]**. Sa promotion et diffusion ont été largement assurées par T. Brown co-fondateur de l'agence de design IDEO[28].

[28] IDEO : le design Thinking expliqué et des outils à appliquer http://www.designkit.org/

Document confidentiel

Selon Brown, le *Design Thinking* permettrait à toutes et tous de « penser comme un designer » **[192]**. Des critiques adressées contre le *Design Thinking* soulignent qu'il a été largement mis dans les mains des managers dans une optique d'optimisation des activités créatives et que, ce faisant, il a été dépouillé du désordre, des émotions, des temps de conflit et d'échecs qu'il induit, au profit d'un systématisme et d'une rationalité que les entreprises peuvent plus facilement maîtriser **[193]**. En outre, les critiques rejoignent les observations de Garel et al. **[104]**, les utilisateur.trices potentiel.les d'un produit ne sont pas nécessairement les mieux placé.es pour projeter de futurs applications ou usages car leur vision est prisonnière de la connaissance qu'i.elles ont de leurs activités (§2.7). Leur implication dans le processus n'est donc pas, à elle seule, la clé du succès.

Le second exemple est le *Brainstorming*, qui est sans doute la technique la plus connue et dont l'utilisation, est la plus répandue dans les entreprises. Développé dans les années 1950 par A. Osborn **[194]** pour l'industrie de la publicité, le *Brainstorming* a permis de sensibiliser les entreprises à la pensée créative et d'ancrer la notion de génération d'idées sans jugement prématuré, c'est-à-dire la possibilité de proposer des idées sans que celles-ci soient immédiatement critiquées (« ça ne marche pas, c'est trop cher, c'est irréaliste, c'est stupide, on ne peut pas le faire parce que ça ne s'est jamais fait, nous ne savons pas le faire », etc.). Il est reconnu comme utile pour produire une grande quantité d'idées mais trouve ses limites lorsque l'aspect quantitatif n'est pas un objectif suffisant pour l'entreprise. Utilisé seul, il correspond à une vision de la créativité comme une activité uniquement collective et intuitive pendant laquelle on compte sur un « coup de génie ». Pour dépasser cette vision, au profit d'une créativité plus structurée qui permet d'alterner des phases individuelles et collectives, E. De Bono **[195]** proposait alors d'inscrire l'exercice dans une méthode plus globale appelée « Pensée Latérale » dont la mise en application a été rendue possible par l'outil d'animation « 6 chapeaux » (« *The six thinking hats* » **[196]**) qui attribue des rôles différents aux participant.es pour qu'i.elles défendent, renforcent ou critiquent les idées.

Mettant l'emphase sur le fait que la construction de représentations est un moteur pour le processus créatif, d'autres auteur.es, par exemple, Vidal et al. **[197]** proposent des variantes du *Brainstorming* traditionnel utilisant des phrases (« *sentential-based* »), des stimuli visuels telles que photos, vidéos ou autres (« *visual-based* ») ou des objets tangibles (« *objectual-based* »).

Selon Aznar **[198]** puis Bila-Deroussy **[30]**, les méthodes et leurs techniques & outils associés peuvent être synthétisées en deux types : intuitives et systématiques. La table 4 ci-contre présente cette classification.

Table 4 (pages suivantes) - Méthodes intuitives, méthodes systématiques et techniques & outils associés, d'après Aznar [198], Debois et al. [199] et Bila-Deroussy p.89 [30]

[29] Pitch roulette, un outil aléatoire en ligne http://bemyapp-idearoulette-hack-fly.herokuapp.com/#

METHODES INTUITIVES	
Méthodes	Outils & techniques associés
Brainstorming	Brainwriting : les participant.es écrivent leurs idées
	Brainstorming with Post-it : les participant.es écrivent leurs idées sur des Post-it notes, la Purge
	Visual brainstorming : utilisation de stimuli visuels
	Objectual brainstorming : utilisation de stimuli tangibles (maquettes, prototypes, précédents…)
	Brainsketching : générer des idées en respectant une contrainte de temps, de quantité et de forme
	6-3-5 : générer 3 idées toutes les 5 minutes par 6 personnes
	La carte mentale ou carte heuristique ou Mind mapping
Synectique	L'analogie directe : mettre en parallèle des faits, des connaissances ou des disciplines différentes
	L'analogie personnelle : s'identifier aux termes du problème, Le portrait chinois, Le consultant virtuel
	L'analogie symbolique : vision immédiate du problème, condensée dans une image objective et impersonnelle, esthétiquement satisfaisante ou techniquement pertinente
	L'analogie fantastique : l'expression du désir, la solution magique d'un problème, l'idéal, Rêve éveillé
Détournement	La déformation : Liste de questions SCAMPER, La liste STRETCH, Le concassage, l'inversion, Mots inducteurs, Portraits en creux, La liste de Luc de Brabandère
	Techniques projectives : identification, identique à l'analogie personnelle
	Techniques oniriques : identique à l'analogie fantastique
	Techniques graphiques : identique à l'analogie symbolique
	Rencontres forcées basées sur des techniques aléatoires, L'acronyme, Les syllabuses, Le SPIDER, matrice de combinaison, Le Pitch-roulette [29]

Document confidentiel

METHODES SYSTEMATIQUES	
Méthodes	Outils & techniques associés
Pensée Latérale	Inverser ou exagérer le problème
	Détournement ou distorsion des faits
	Utopie
	Analogies éloignées
	Mots aléatoires glanés dans un dictionnaire
	Les 6 chapeaux de la réflexion : pour éviter les conflits, les oppositions stériles et les jeux de pouvoir
Théorie TRIZ	ASIT suppression : supprimer un composant
	ASIT division : diviser un composant et l'utiliser ailleurs
	ASIT multiplication : dupliquer un composant en lui donnant un autre usage
	ASIT unification : plusieurs usages pour un même composant
	ASIT rupture de symétrie : changer les valeurs des caractéristiques d'un composant
Méthode DKCP	Issue de la théorie C-K : Technique ou outil d'application non identifié dans la littérature
Détournement	Techniques de collecte d'informations : Activity analysis, Diagrammes d'affinités, Competitive product survey, Cross-cultural comparisons, Flow analysis, Long-range forecasts
	Techniques d'observation : A day in the life, Behavioral mapping, Rapid ethnography, Shadowing, Social network mapping, Stillphoto survey
	Techniques de conception : Experience map, Swimlanes, Scénarii
	Techniques de questionnement : Tri de cartes, Collages, Extreme users interviews, Les 5 pourquoi
	Techniques d'évaluation : Bodystorming, Jeux de rôles, Prototypage « quick & dirty », Scénarii d'usages, Empathy tools

Les méthodes intuitives rassemblent des techniques & outils de stimulation majoritairement aléatoires et dont l'un des objectifs est de maximiser le nombre d'idées générées. Leur mise en œuvre peut être rapide car elle nécessite des moyens limités.

Les méthodes systématiques, ou plutôt « moins irrationnelles » selon Aznar **[199]**, rassemblent des techniques & outils basés sur la logique. Elles requièrent une analyse plus fine du problème et proposent une démarche construite et convergente. Elles assurent de manière plus fiable l'exploration d'un espace de conception. Cependant, certains de ces techniques & outils peuvent être plus complexes à mettre en œuvre, comme par exemple les techniques & outils associés à TRIZ car ils sont centrés sur la recherche de solutions techniques pour des problèmes déjà bien définis.

Finalement, le nombre pléthorique de méthodes, techniques et outils de créativité disponibles, issus de la Recherche ou des pratiques en entreprises, peut rendre la sélection difficile et requiert bonne connaissance et maîtrise de cette variété. La diversité des moyens existants est régulièrement répertoriée. Par exemple, le wiki développé par l'entreprise Mycoted en répertorie 193 classés par ordre alphabétique [30]. L'ouvrage de Martin et al. réunit « 100 méthodes de design » **[200]** et celui proposé par Van Gundy détaille 101 techniques pour la créativité et la résolution de problèmes **[201]**.

Les prestataires spécialisés dans la conduite de séances de créativité conçoivent leurs propres outils pour les adapter aux projets qu'ils réalisent. Nous notons l'exemple de la *Creative ToolBox* proposée par Hyper Island[31] qui met en regard les techniques, le nombre de participant.es et la durée des activités. Nous remarquons également le *Design Method Toolkit* proposé par le mediaLABamsterdam[32] qui met à disposition techniques et outils en fonction des étapes du processus de conception pour laquelle la séance opère, de la durée de la séance et des données d'entrée disponibles.

Ces outils, qui apportent des informations importantes pour la conduite du processus créatifs, sont incarnés sous la forme d'objets tangibles, de manière à être manipulés en séances de créativité. Selon Bouchard **[202]**, Moggridge **[203]** puis Ocnarescu **[204]**, la forme de « jeu de cartes » est reconnue et couramment employée pour ses qualités ludiques, pratiques et économiques. Les cartes permettent également de concevoir une logique de découverte des informations qu'elles incarnent et ainsi contribuent à guider le processus créatif.

La figure 44 ci-dessous montre deux exemples de jeux de cartes. A gauche, un jeu proposé par l'agence Ideo pour relancer le processus créatif au fil de son déroulement par la découverte de différentes techniques. A droite, les *Techcards*, outil proposé par Ocnarescu **[204]**. Celles-ci apportent des informations liées à des technologies numériques, c'est-à-dire des informations techniques qui peuvent être explorées au cours du processus.

Nous retenons alors cette forme en « jeu de cartes » pour ses qualités pratiques, ludiques et économiques et parce qu'elle donne la possibilité de découvrir des informations au fil du processus créatif. Nous pourrons donc concevoir un dispositif de type jeu de cartes et le déployer dans cette étude.

[30] Wiki de Mycoted, cabinet dédié à la créativité et l'innovation https://www.mycoted.com/Category:Creativity_Techniques

[31] Kit de techniques pour les séances de créativité par Hyper Island http://toolbox.hyperisland.com/

[32] Design Method Toolkit par le mediaLABamsterdam http://medialabamsterdam.com/toolkit/

Document confidentiel

Fig.44 – Ideo cards et Techcards, outils composés de cartes d'informations techniques, extraits de [203] et [204]

L'ensemble de ces méthodes, techniques & outils associés visent à faire naviguer les participant.es entre le domaine de l'imaginaire (c'est-à-dire celui du rêve, du désir, qui fait place aux idées éventuellement irréalisables et désordonnées) et le domaine de la réalité (i.e celui des contraintes objectives, où l'on a tendance à s'appuyer sur ce qui existe déjà), jusqu'à ce qu'i.elles puissent générer des idées situées dans l'espace intermédiaire entre ces deux univers (fig.45). Les moyens décrits permettent alors d'emprunter de multiples itinéraires. Selon Aznar **[198]**, on peut généralement distinguer deux types de chemins : ceux qui voyagent facilement dans le niveau imaginaire, en mobilisant la dynamique émotionnelle d'un groupe et ceux qui s'évadent prudemment et méthodiquement du rationnel.

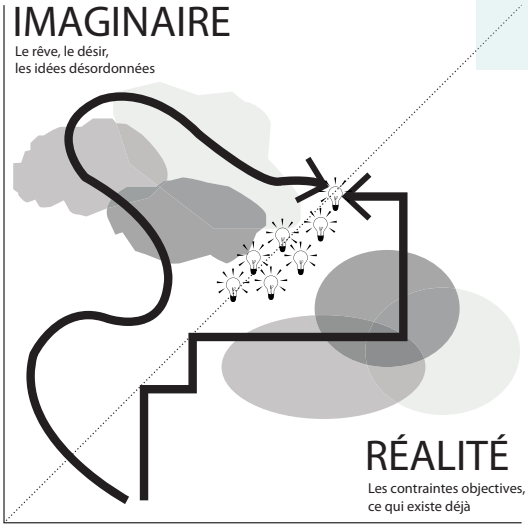


Fig.45 - Navigation entre Imaginaire et Réalité, d'après Aznar [198]

Finalement, ces techniques & outils sont à choisir selon différents formats de séance de créativité tels que par exemple les *Biz Jam*, *Hackathon*, *Sprints*, etc…qui définissent des durées, des quantités de participant.es et des objectifs différents.

2.11.2 Les principes clés de la créativité de groupe : synthèse

La sous-section précédente a montré que répertorier l'ensemble des moyens existants pour la créativité de groupe est une entreprise vaine, d'autant plus que les praticien.nes du domaine adaptent continuellement leurs appellations, leurs formes, leurs usages et leur enchaînement au fil d'une séance. Au-delà d'une typologie de moyens, la littérature souligne alors des principes clés pour encourager la créativité en guidant les participant.es sans qu'i.elles ne se sentent manipulé.es.
Van Gundy **[201]** synthétise ainsi six principes clés pour favoriser l'émergence de la capacité créative en séance de groupe :

1. Différer le jugement collectif
2. Utiliser les représentations externes comme stimuli pour émettre des hypothèses et les tester
3. Eviter les raisonnements habituels
4. Favoriser le déplacement des points de vue ("*create new perspectives*")
5. Contrebalancer la tendance naturelle des individus à la critique négative
6. Permettre la prise de risques (elle est minimum au stade de la generation d'idées, plus élevée en phase d'implémentation)

Selon Chang **[205]**, d'autres leviers ont été identifiés dans le contexte en entreprise, relatifs à des facteurs environnementaux, notamment à l'influence de l'animateur.trice :

1. Les rôles de l'animateur.trice qui surveille, évalue, encourage et guide le processus, et en même temps assure de l'attention à chaque paticipant.e
2. L'anonymat des participant.es qui permet de rejeter la question du statut et la domination hiérarchique potentielle
3. Le suivi d'une procédure structurée (i.e d'un processus de créativité) qui permet d'appliquer des raisonnements définis à l'avance
4. La possibilité d'exprimer des idées sans contrainte et de manière égale pour les participant.es
5. Le timing opportun et la reconnaissance des performances

2.11.3 Favoriser la « créativité ambiante »

Enfin, au-delà de la conduite de séances de créativité destinées à explorer une thématique donnée en un temps défini, des auteur.es ajoutent un autre facteur important pour favoriser

Document confidentiel

l'émergence de la capacité créative dans une entreprise, c'est la création d'un « climat créatif » **[198]** ou d'une « créativité ambiante » **[206]**. La création d'une telle ambiance implique alors notamment d'animer certaines séances de créativité en open space pour que des non participant.es puissent observer les mécanismes, de collecter les idées spontanées, de participer à des colloques de créativité, d'extraire physiquement les individus de leur environnement professionnel habituel ou encore d'intégrer la créativité dans les évaluations professionnelles annuelles.
En ce sens, Aznar **[198]** indique des solutions managériales possibles telles que, par exemple, la création d'une cellule de créativité permanente et de contrats temporaires de production créative. Selon Maisonnier, il s'agit d'entretenir au quotidien l'accès à l'imaginaire pour pouvoir le mettre à profit au moment voulu, c'est-à-dire pendant les séances de créativité. Cela suppose une disponibilité à l'écoute et aux états émotionnels, une confiance mutuelle, la valorisation des propositions des individus qu'elle que soit leur position hiérarchique ou encore une mise à disponibilité pour la réalisation de projets hors cadre ou hors tâches attribuées.

En ce sens, selon Parmentier **[92]**, les nouveaux lieux physiques tels que les tiers lieux (FabLabs, Hacking spaces, Labs d'innovation, Creativ'Labs, espaces de coworking, etc…) et les lieux virtuels (réseaux sociaux, communautés de création, plateforme d'innovation[33], etc…) remettent en cause les frontières de l'entreprise et, par conséquent, posent la question de leur nécessité pour l'émergence de solutions créatives. Ils interrogent ainsi les processus d'ouverture à mettre en place pour favoriser l'émergence d'idées de valeur pour l'entreprise.

Synthèse état de l'art – 2ème partie

Cette 2ème partie de l'état de l'art, a défini la créativité d'un point de vue systémique et les notions essentielles à la compréhension du processus créatif et à sa mise en pratique, notamment dans le cadre de séance de créativité de groupe. Cette synthèse présente les éléments à retenir dans la perspective de modéliser un processus de créativité par et pour la fabrication additive :

L'innovation est positionnée entre Recherche & Développement : Recherche Innovation Développement (RID), où elle est soumise au régime d'Exploration, c'est-à-dire à une situation où les équipes cherchent les applications possibles d'une technologie, **sans pouvoir identifier préalablement les besoins** d'utilisateur.trices potentiel.les, ni l'étendue des marchés

L'apport d'informations « **inter-domaines** » favorise l'expansion et, pour favoriser un effet de stimulation de la capacité créative, ces informations doivent présenter du contenu **inattendu**.

[33] Par exemple, Innocentive, plateforme d'innovation en ligne https://www.innocentive.com/

Les OI de type objets tangibles favorisent les **manipulations sensori-motrices** qui stimulent la construction de représentations et donc l'idéation et la génération de concepts

Les objets instruments et les objets déclencheurs d'expériences désignent deux types d'OI aux caractéristiques singulières :

- Ils présentent aux concepteur.trices des caractéristiques inattendues et donc enrichissent leur connaissance d'un domaine
- Ils favorisent la création d'un socle commun lorsqu'ils sont mobilisés en début de séance de créativité de groupe
- Ils ont un caractère ludique. **Leur manipulation déclenche le vécu d'expériences** procurant des émotions positives qui augmentent les motivations intrinsèques et extrinsèques des concepteur.trices

Dans une séance de créativité de groupe, la manipulation d'objets permet de cadrer l'action dans l'espace et favorise l'alternance activités individuelles / collectives

La construction de représentations visuelles externes peut être guidée par des **gabarits** de représentation

Les jeux de cartes sont des moyens pratiques, ludiques et économiques pour donner à voir et à manipuler des informations au cours d'une séance de créativité

L'ensemble des éléments relevés dans cette Partie 2 sont relatifs au champ de recherche de la créativité, hors fabrication additive. La Partie 3 suivante s'attachera alors à observer, l'intégration -ou effectivement le manque d'intégration- de ces principes de la créativité dans les méthodologies de conception existantes. Cette analyse permettra de positionner plus précisément notre apport au regard de l'existant.

Document confidentiel

PARTIE 3 : Conception et fabrication additive, les méthodologies existantes sous le prisme de la créativité

Introduction de la 3ème partie de l'état de l'art

Cette 3ème partie de notre état de l'art vise à souligner le manque d'études liant créativité et fabrication additive, alors même que nombreuses méthodologies de conception pour la fabrication additive sont développées et qu'elles montrent leurs limites quant à la génération d'idées et de concepts créatifs. Comme l'illustre la figure 46 ci-dessous, cette thèse vise donc à établir un lien entre créativité et fabrication additive.

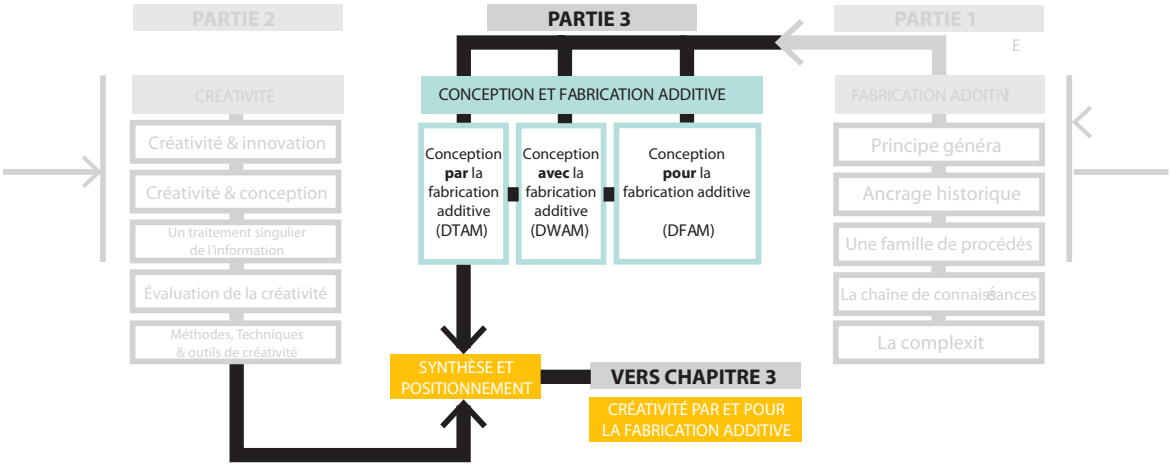


Fig.46 - Convergence entre créativité et fabrication additive, puis positionnement de nos travaux

Tout d'abord, différents liens existants entre conception et fabrication additive sont relevés. Il apparaît que les méthodologies de conception **pour** la fabrication additive sont les plus nombreuses mais que d'autres approches émergent de conception **avec** et **par** la fabrication additive (§2.12). Nous analysons et classifions ensuite plus spécifiquement les méthodologies existantes. Cette analyse montre, d'une part, que celles-ci permettent de générer des concepts partiellement originaux et, d'autre part, qu'elles limitent l'exploration des connaissances (§2.13). A la lumière de principes de créativité précédemment identifiés comme favorisant l'Exploration, nous supposons alors que lier créativité et fabrication additive peut permettre une exploration plus large et favoriser la génération d'idées et de concepts créatifs. En ce sens, nous synthétisons cette 3ème partie de l'état de l'art et illustrons le positionnement de ces travaux. Nous proposerons ainsi de nommer notre approche *Creativity Through Additive Manufacturing*, traduite en créativité **par** et **pour** la fabrication additive.

2.12 Conception pour, avec et par la fabrication additive

Si la conception pour la fabrication additive est désormais reconnue et particulièrement riche en méthodologies **[207], [83], [208], [209], [210], [85], [211], [212], [213], [214], [215], [216], [217], [218]** nous observons également l'émergence d'autres types de relations entre conception et fabrication additive. Les trois types de relations sont détaillées dans les sous-sections suivantes et schématisées dans la figure 47 ci-après.

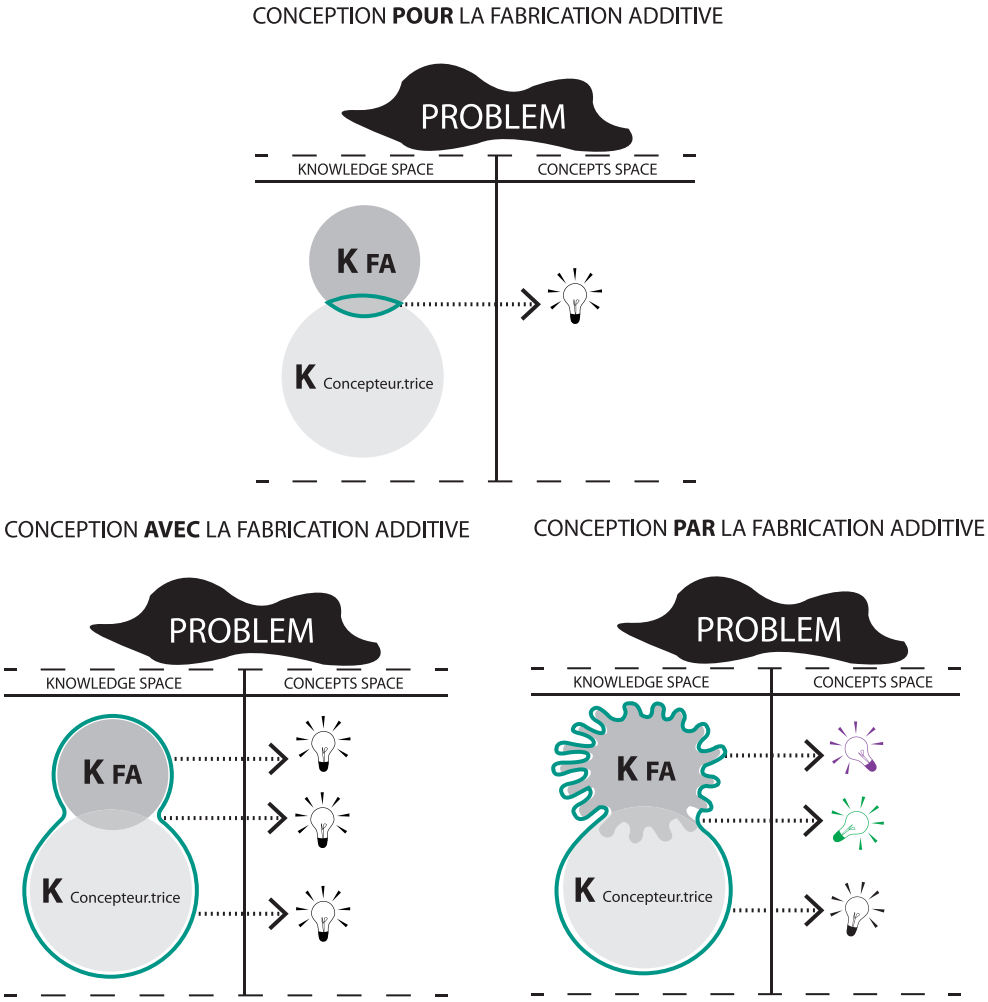


Fig.47 – Liens entre conception et fabrication additive et leurs effets d'expansion

Ainsi, nous remarquons que, lorsque conception et fabrication additive sont liées, les connaissances sur la fabrication additive (KFA) s'ajoutent aux connaissances des concepteur.trices (K concepteur.trice) pour finalement étendre plus ou moins largement les espaces connaissances et concepts.

Document confidentiel

La figure 47 souligne que l'expansion de l'espace connaissances est réduite en conception pour la fabrication additive (DFAM) et plus vaste en conception avec et par (DWAM et DTAM) la fabrication additive. Les méthodologies DFAM génèrent un nombre réduit de concepts mais élargi et plus ou moins varié en DWAM et DTAM.

2.12.1 Du DFX à la conception *pour* la fabrication additive

La conception **pour** la fabrication additive est couramment identifiée sous l'appellation Design For Additive Manufacturing (DFAM) dans la littérature. Le DFAM est une des orientations des méthodologies connues de Design For X (DFX), en français « conception en vue de X », spécifiquement adaptée au paradigme de la Fabrication Additive.

La stratégie DFX a été déployée largement dans les années 1980, lorsque les entreprises ont été confrontées au paradigme de l'innovation intensive, c'est-à-dire à un environnement fortement concurrentiel qui réclamait de minimiser les temps et coûts de développement des produits, de faciliter et d'assurer la fabrication et l'assemblage et de réduire le risque de modifications tardives dans les étapes du processus de conception **[219]**. Il est alors apparu que l'apprentissage de règles de conception aide les concepteur.trices à atteindre ces objectifs.

Des améliorations significatives avaient été constatées, notamment avec le déploiement du *Design For Manufacturing* et du *Design For Assembly* (fig.48). Dans cet exemple, le viseur thermique de Texas Instrument comportait 47 composants et nécessitait 2 heures de fabrication ainsi qu'un temps important pour l'assemblage. Après application d'une méthodologie DFMA, seulement 12 composants et 30 minutes de fabrication étaient nécessaires. Le produit a ainsi été allégé de 45% de sa masse et le temps d'assemblage a été fortement réduit.

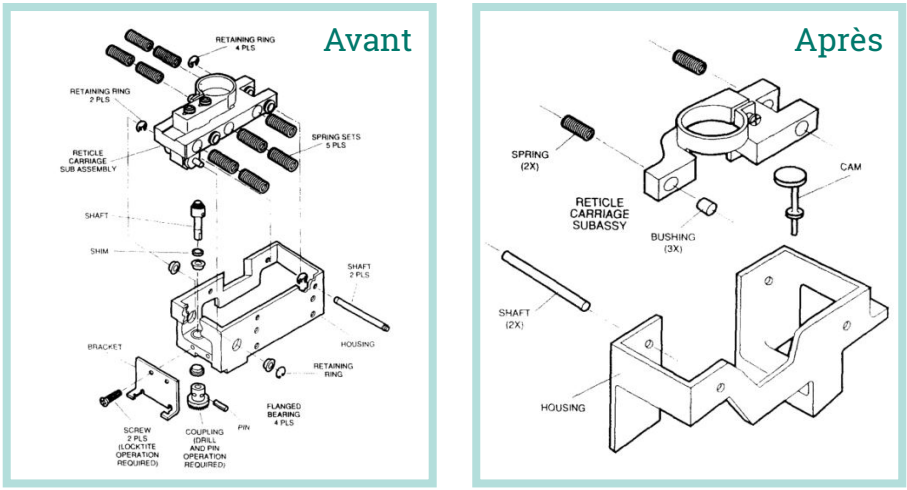


Fig.48 - Design For Manufacture and Assembly, aux origines de la conception pour la fabrication additive, extrait de Boothroyd

Cet exemple illustre le changement dans les pratiques des concepteur.trices. Il s'agit désormais de considérer le produit du point de vue de son architecture pour intégrer dès que possible les contraintes d'assemblage et de fabrication. En d'autres termes, il s'agit de « **faire remonter** », en amont du processus, des informations liées à des contraintes qui concernent habituellement les phases avales du processus, liées à la production. Dans cette approche, l'atteinte des objectifs fixés est donc dépendante des connaissances des concepteur.trices. Ce qui implique de leur apporter les informations nécessaires.
En ce sens, Laverne **[34]** souligne que le DFX vise à utiliser les connaissances nécessaires pour générer des solutions satisfaisant uniquement le problème à résoudre. **En d'autres termes, le DFX restreint l'apport d'informations au juste nécessaire de manière à faciliter leur traitement cognitif par les concepteur.trices.**

Cette démarche DFX est également appliquée à d'autres objectifs tels que les coûts, l'environnement, la qualité, et ainsi à la fabrication additive, voire appliquée à plusieurs de ces objectifs combinés tels que, par exemple : fabrication additive et Environnement **[220]**. Cette orientation a donc conduit à l'expression *Design For Additive Manufacturing* (DFAM). L'exemple figure 49 illustre l'approche DFAM. Elle vise à tirer parti des 4 types de complexité précédemment décrits (§2.5). Ainsi, le composant (A) auparavant conçu pour l'usinage a été reconçu en suivant une méthodologie DFAM. Le modèle (B) issu de la reconception a été allégé de 44% et respecte les contraintes de fabricabilité du procédé Fusion par Faisceau d'Electrons.

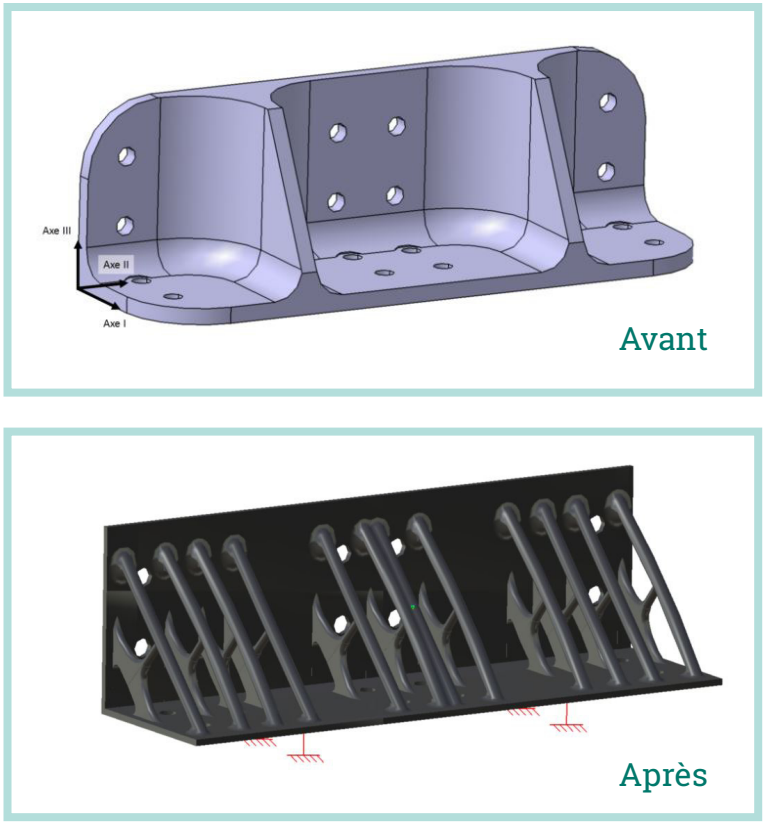


Fig. 49 - Composant reconçu suivant une méthodologie DFAM, extraits de Vayre [68]

Document confidentiel

2.12.2 Du DWX à la conception *avec* la fabrication additive

La conception avec la fabrication additive émerge dans la littérature sous l'appellation *Design With Additive Manufacturing* (DWAM), dont une première conceptualisation est proposée par Laverne **[5]**, **[34]**.

L'approche *Design With X* (DWX) vise à concevoir une solution qui intègre les connaissances relatives à X, tout en élargissant l'espace concepts pendant le processus de conception en proposant, diverses alternatives pour répondre au problème **[221]**. Selon Langeveld **[221]**, le *Design For X* intervient lorsque le processus de conception est avancé, en phase de « *Detailed design* » tandis que le *Design With X* est appliqué au début des phases initiales, après la collecte d'informations. Les informations sont essentiellement collectées en observant les caractéristiques de produits existants et en observant le fonctionnement de procédés de fabrication (« l*ook with designers'eyes to the production method and this experience is applied in the design process* » p.3). Ce positionnement, repris par Laverne **[34]** est illustré sur la figure 50 ci-dessous. On remarque que le DWX favorise la divergence tandis que le DFX est utilisé pour s'assurer que la solution retenue correspond bien aux contraintes imposées par les spécifications du problème.

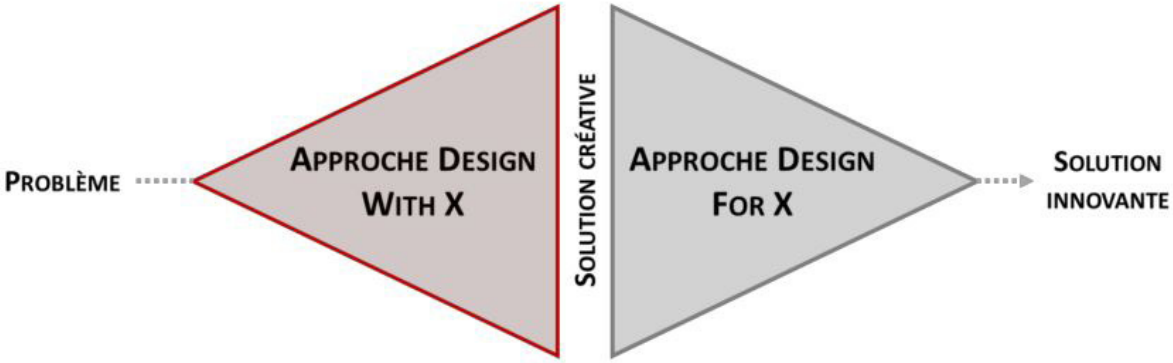


Fig.50 - Approches DFX et DWX vis-à-vis de la conception, extrait de Laverne [34]

Ainsi, contrairement au DFX, le Design With X ne cherche pas à restreindre à un objectif spécifique mais plutôt à explorer les connaissances, c'est-à-dire à diverger dans les espaces connaissances et concepts jusqu'à faire émerger des solutions puis les évaluer. Cette expansion dans les espaces connaissances et concepts fait évidemment écho à la théorie C-K exposée plus haut (§2.8.1.2). Cette approche est donc plus proche d'un modèle co-évolutif de la conception. Finalement, selon Laverne **[34]**, le DWX correspond à une approche dite cumulative des connaissances. **Les connaissances relatives à X, en l'occurrence à la fabrication additive, s'ajoutent aux autres connaissances des concepteur.trices (fig.47). Ces connaissances X amènent à envisager, dans un premier temps, des espaces connaissances et concepts plus vastes. Mais, dans un second temps, ces connaissances issues de X ne seront pas nécessairement utilisées dans la solution qui sera retenue.**

En ce sens, on peut dire que les connaissances relatives à X participent à la conception (d'où « avec ») mais ne représentent pas spécifiquement le but du processus de conception.

L'approche *Design With X* peut être appliquée avec diverses orientations : les matériaux (*Design with Material*), les géométries (*Design with Geometry*) ou les processus de fabrication (*Design with Manufacturing*). Dans le cas du *Design With Additive Manufacturing* (DWAM), l'orientation est donnée à partir de ses caractéristiques spécifiques concernant les capacités des procédés ou les caractéristiques formelles et fonctionnelles des composants qu'elle permet de fabriquer.

2.12.3 Du DTX à la conception par la fabrication additive

La conception par la fabrication additive émerge dans la littérature sous l'appellation *Design Through Additive Manufacturing* (DTAM), dont les premiers principes sont proposés par Bolzan **[222]**.

Cette approche DTAM semble prolonger le DWAM : elle intègre la fabrication additive dans les phases initiales du processus de conception. Mais, dans ce cas, la fabrication additive est considérée à la fois sous forme d'un corpus d'informations défini en amont que les concepteur.trices doivent intégrer et sous la forme d'informations qui émergent lorsque les concepteur.trices « font l'expérience de la fabrication additive ».

L'approche *Design Through X* (DTX) vise à faciliter l'intégration et l'exploration d'informations issues d'expérimentations, c'est-à-dire qui ne sont pas des règles de conception à apprendre et appliquer. Parce qu'elles sont expérimentales, ces informations sont nécessairement nouvelles (ou inattendues) et relatives à la faisabilité, c'est-à-dire à l'état réel et actuel de la technologie. En effet, ces informations n'existent que suite à des expériences dans le monde réel réalisés avec la technologie concernée, dans l'ordre de ce qui est faisable.

En ce sens, Bolzan [222] considère que, dans cette approche, les connaissances relatives à X sont tacites et en mutation permanente et non explicites et figées comme un corpus défini en amont. Selon Moussette [185], l'approche DTX permet effectivement d'intégrer des informations moins usuelles, par exemple liées aux comportements dynamiques des produits, à leur mise en mouvement ou à leurs variations d'états liés à des environnements d'utilisation. Ce type d'informations, très dynamique, peut difficilement être rendu explicite par des descriptions textuelles et schématiques (i.e sous forme d'images et mots-clés) et par des règles générales et immuables à appliquer. Finalement, selon Bolzan et Moussette, l'approche DTX a pour objectif d'aider les concepteur.trices à créer les conditions pour faire émerger des concepts plutôt que pour concevoir la solution elle-même.

L'approche DTX est appliquée couramment dans les domaines de l'architecture (« D*esign Through Making* ») **[223]**, de la programmation informatique (« *Design Through Code* ») P. Atkinson cité par Bolzan **[222]** et du design d'interactions (« *Design Through Haptics* ») **[224]**. Ces différentes orientations de l'approche DTX ont pour point commun d'utiliser des moyens de fabrication « flexibles » pour réaliser des objets tangibles à manipuler. Selon Milgrom cité par Bolzan **[222]**, la flexibilité dans la fabrication peut être vue comme la capacité d'un système à

Document confidentiel

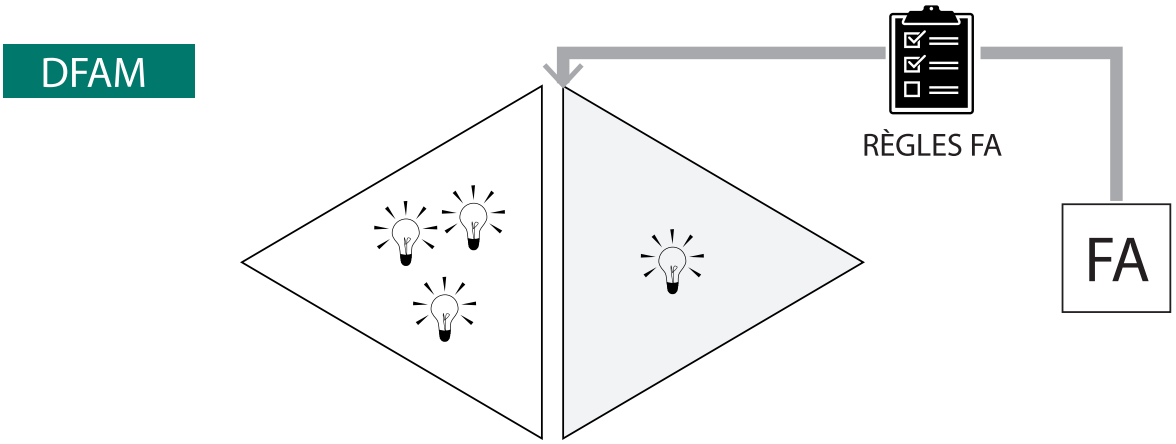
changer, à assumer différents comportements ou états, en fonction de différentes exigences et ce avec peu d'investissement en termes de temps, d'effort ou de coût. En ce sens, selon Bolzan **[222]**, la fabrication additive devrait être une des orientations de l'approche DTX car elle est l'archétype du système flexible (*«from a conceptual point of view, AM is an archetype of a flexible manufacturing system* »). En effet, la fabrication additive permet de fabriquer des objets complexes à l'unité et, en amont, la modélisation 3D autorise les modifications avec peu d'investissement, notamment en termes de coûts répercutés sur la fabrication. **Ceci conduit alors Bolzan à proposer l'expression Design Through Additive Manufacturing, où "through" signifie à travers, ou à la fois par et pour la fabrication additive.**

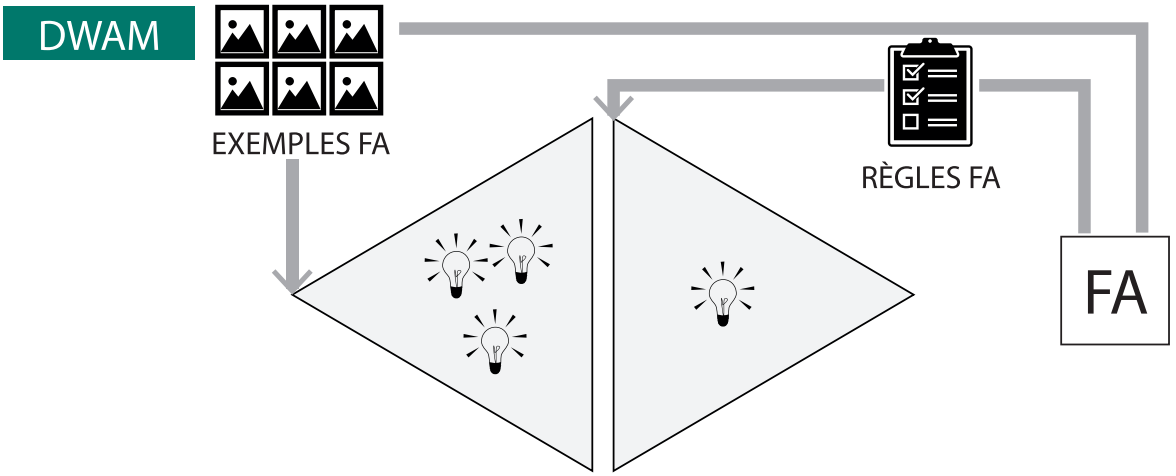
Finalement, les deux approches précédentes, DFAM et DWAM, mettaient en lumière la nécessité de rendre explicites les connaissances relatives à la fabrication additive et de gérer l'apport d'informations afin de guider les concepteur.trices dans la prise en compte et l'exploration de celles-ci. Cette approche DTAM répond alors à la difficulté de rendre explicites des connaissances dynamiques, émergentes et en mutation, à un stade du processus où le problème est particulièrement mal défini et le cahier des charges non formulé, c'est-à-dire lors d'une situation d'Exploration. Elle fait alors apparaître la nécessité de donner aux concepteur.trices la possibilité de manipuler (au sens sensori-moteur) des informations, afin de favoriser le traitement cognitif de celles-ci et une exploration à la fois réaliste et créative des connaissances intégrées.

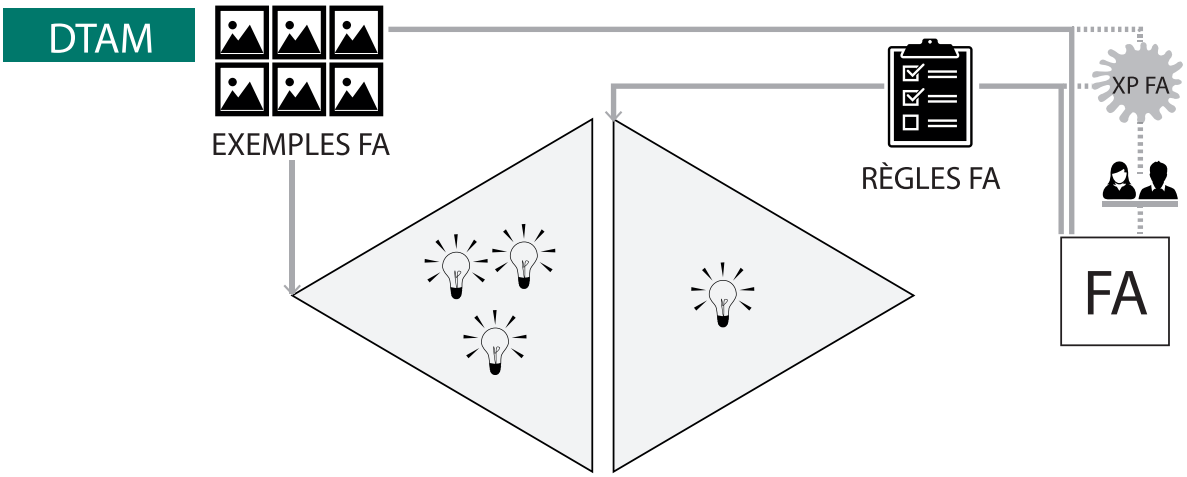
2.12.4 Synthèse des approches

Nous retenons que ces trois approches, DFAM, DWAM et DTAM, proposent des cadres théoriques à la définition de différents liens entre fabrication additive et conception. Nous synthétisons alors sur la figure 51 ci-dessous, ces trois formes et moments auxquels des informations relatives à la fabrication additive sont apportées aux concepteur.trices.

Fig.51 (page suivante) – Moments et formes d'apports des informations fabrication additive aux conceptrices et concepteurs







Document confidentiel

Nous retenons que l'approche DFAM, qui intègre des règles de conception relatives liées à la fabrication additive favorise la convergence (pente descendante). Nous retenons ensuite que l'approche DWAM favorise l'exploration dans un premier temps, en apportant des exemples de composants existants en fabrication additive puis favorise la convergence dans un second temps en convoquant les règles générales à appliquer. **Nous retenons enfin que le travail de Bolzan [222] initie une première définition du DTAM où les règles générales et le corpus d'exemples d'existants sont enrichis, au préalable, par une phase où les concepteur.trices peuvent faire l'expérience de la fabrication additive.** Ces travaux initiaux ne sont toutefois pas assez développés pour indiquer si « faire l'expérience de la fabrication additive » désigne le fait de fabriquer des objets, c'est -à-dire que la possibilité soit donnée aux concepteur.trices de modéliser en 3D puis de fabriquer par un ou des procédés de fabrication additive ; ou si « faire l'expérience de la fabrication additive » désigne le fait de manipuler des objets tangibles en vue de découvrir des informations.

En ce sens, la première orientation de l'approche DTAM (i.e le fait que les concepteur.trices modélisent puis fabriquent) rejoint plutôt les observations faites par Ndiaye **[168]** (§2.9.3.3). La fabrication d'objets par « impression 3D », dans les phases initiales de la conception permet d'évaluer des concepts mais surtout, le fait de « faire » apporte de nouvelles informations, non apportées par l'enseignement de règles définies en amont. Cette orientation semble plutôt adaptée à l'impression 3D qui désigne des procédés faciles à mettre en œuvre et des machines accessibles aux concepteur.trices novices. La fabrication peut s'avérer difficile à mettre en œuvre dans le temps court d'une séance de créativité de groupe et contrainte par le niveau de maîtrise de la modélisation.

La seconde orientation de l'approche DTAM (i.e le fait de manipuler des objets tangibles) rejoint alors plutôt les observations faites par Moussette **[185]** à propos des objets tangibles à manipuler. Cette orientation rejoint également les définitions et constats émis par Vinck **[160]** sur les objets instruments puis par Cruz **[174]** sur les objets déclencheurs d'expériences (§2.9.4). Les objets incarnent des informations dont la découverte ne peut passer que par la manipulation de ces objets dans un contexte donné. Cette seconde orientation sur les objets tangibles à manipuler semble également plus facile à mettre en œuvre dans le cadre de séances de créativité de groupe.
L'étude de Bolzan **[222]** conclue en constatant le manque de méthodologies relatives à l'approche Design Through Additive Manufacturing: « *one of the most interesting insights emerging from the analysis of these case studies is the lack of a shared method* ". **Nous rejoignons ce constat et inscrivons cette thèse dans le cadre théorique global de la seconde orientation de l'approche DTAM : faire l'expérience de la fabrication additive par la manipulation d'objets tangibles.**

En vue de préciser ce positionnement théorique général en concentrant cette étude sur la créativité, nous analysons, dans la section suivante, les méthodologies existantes au regard de la créativité.

2.13 Analyse des méthodologies au regard de la créativité

Le champ des méthodologies de conception pour la fabrication additive est sans conteste le

plus riche dans la littérature par rapport au DWAM et au DTAM. Il apparaît toutefois que cette appellation *Design For Additive Manufacturing* recouvre des méthodologies ayant des objectifs différents. Elles sont définies dans les sous-sections suivantes.

2.13.1 Objectifs du DFAM

Selon Rosen **[83] [84]**, le challenge du DFAM est : « de nouveaux espaces de conception doivent être formulés et explorés, nécessitant une créativité et une innovation importantes pour d'abord définir de nouveaux principes de conception et les mettre en place dans la pratique ». Rosen **[84]** observe qu'il existe peu de méthodologie globale permettant d'explorer l'ensemble de l'espace de conception mais plutôt des méthodologies « de niches » qui permettent une exploration réduite à une partie des spécificités de la fabrication additive. L'auteur relève ainsi deux types de méthodologies :

- *Design for functionality* : méthodologies destinées à maximiser les performances des produits, à les optimiser, notamment dans un but d'allègement. Par exemple, méthodologies pour concevoir des « matériaux cellulaires » (treillis, nids d'abeilles, mousses métalliques...)
- *Design for production considerations* : méthodologies proches du Design For Manufacturing (DFM), destinées à prendre en compte les spécifications dues à la fabrication et à l'assemblage. Sont comptées dans cette catégorie les méthodologies pour la conception de composants en multi-matériaux et de composants et d'assemblages multifonctionnels

Poursuivant cette observation, Laverne **[34]** relève alors qu'il existe des méthodologies DFAM orientées vers la génération de concepts, et des méthodologies DFAM orientées vers l'évaluation des concepts générés. Dans le cadre des DFAM pour l'évaluation, les concepteur.trices n'ont pas vocation à remettre en question les concepts générés au-delà de considérations technico-économiques. I.elles questionnent essentiellement leur fabricabilité avec les procédés de fabrication additive. Observant plus précisément les orientations des méthodologies DFAM, Laverne **[225], [34]** souligne également que parmi les méthodologies DFAM orientées vers la génération de concepts, trois types peuvent être distingués : les **méthodologies opportunité, les méthodologies contrainte et les méthodologies globales** qui combine les deux précédents. Cette typologie est détaillée ci-après.

2.13.2 Typologie des méthodologies DFAM

Les méthodologies de type « Opportunité »

Ces méthodologies DFAM s'appuient sur une approche opportuniste : elles visent à exploiter le plus possible le potentiel de la fabrication additive. Elles encouragent alors les concepteur.

Document confidentiel

trices à laisser de côté leurs connaissances liées aux procédés conventionnels pour donner la priorité à l'exploration des 4 types de complexité spécifiques à la fabrication additive (§2.5). Il s'agit alors de considérer d'une part, qu'il n'existe pas de géométrie impossible et, d'autre part, que la complexité géométrique n'impacte pas le coût de fabrication **[82], [211]**. Les outils associés à ces méthodologies supportent la création des objets intermédiaires, notamment à l'aide de logiciels de modélisation générative et d'optimisation topologique. Finalement, ces méthodologies favorisent la divergence dans un espace de conception étendu à l'ensemble des possibles de la fabrication additive. Parmi ces méthodologies, on trouve notamment des travaux liés à l'optimisation (topologique **[226]** ou paramétrique **[216]**) et les travaux liés au déploiement des treillis, des matériaux cellulaires ou bio-inspirés **[227]** dans les composants.

Les méthodologies de type « Contrainte »

A l'inverse des opportunistes, ces méthodologies s'appuient sur une approche restrictive : elles considèrent en priorité les limites imposées par la fabrication additive pour assurer aux concepteur.trices que les concepts générés seront réalistes et fabricables. En ce sens, elles apportent des informations restrictives sur les matériaux (panel disponible, propriétés mécaniques, thermiques ou acoustiques obtenues, états de surface, etc…), sur les dimensions possibles (en fonction des procédés et des machines) et sur les différentes contraintes liées aux procédés (déformations, présence de supports, etc…) et donc des post-traitements à envisager. Ces méthodologies n'encouragent pas les concepteur.trices vers la génération de concepts créatifs. Elles aident à garantir la progression depuis des représentations idéales du composant (i.e. non réalistes), jusqu'à l'obtention d'un modèle 3D réaliste anticipant les contraintes (par exemple les déformations géométriques dues aux variations de températures). Les outils associés à ces DFAM Contrainte supportent la création de ces représentations réalistes et leur évaluation, par exemple grâce à des logiciels de simulation numérique. Finalement, ces méthodologies favorisent la convergence du processus.

Les méthodologies de type « Globales »

Les méthodologies globales combinent donc les deux approches précédentes: elles conduisent à explorer le potentiel de la fabrication additive, et ce de manière réaliste. Elles guident donc à la fois pour la génération, avec l'approche de type opportunité, et pour l'évaluation, avec l'approche de type contrainte. Nous avons vu précédemment que, dans la pratique, l'évaluation n'est pas une activité réellement distincte de la génération et la représentation des concepts pendant le processus créatif mais qu'elle est menée de façon conjointe, selon des cycles répétés dans un modèle co-évolutif (§2.8.1). Cette combinaison des deux approches semble alors être plus souhaitable pour le processus créatif car plus cohérente avec les pratiques des concepteur.trices.
Nous remarquons ici la proximité du type global avec le modèle proposé par Laverne **[34]**, figure 52 ci-dessous. Dans un premier temps, c'est une approche DWAM qui est mise en œuvre pour explorer l'espace de conception. Les connaissances des concepteur.trices sont enrichies par l'apport d'images de composants en fabrication additive existants (phase divergente n°1). Cette phase correspond au type opportunité décrit. Dans un second temps, c'est une approche DFAM qui est appliquée. Des informations relatives aux limites des procédés sont apportées aux concepteur.trices sous formes d'images et de vidéos (phase convergente n°2). Au sens de sa filiation avec le *Design For Assembly & Manufacture*, cette approche correspond alors au type contrainte. Cette alternance Opportunité-Contrainte aboutit à la génération d'un concept qui pourra ensuite être détaillé.

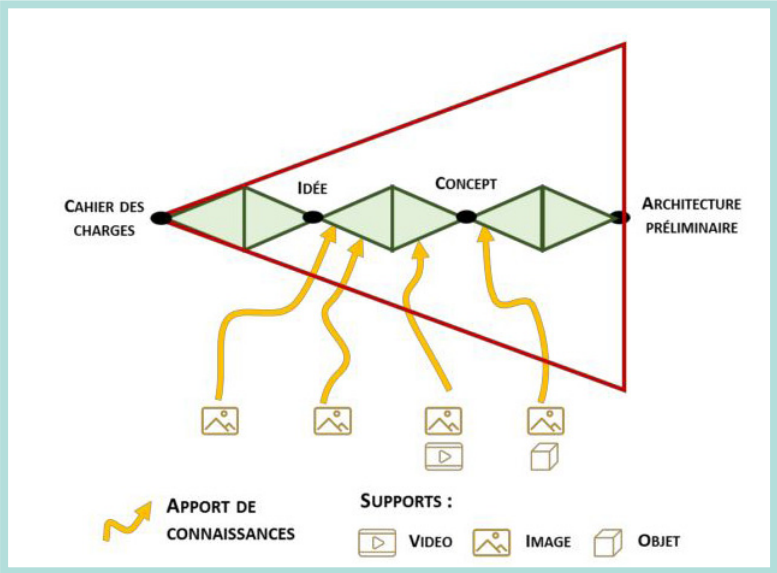


Fig.52 - Apport de connaissances FA dans les phases initiales, extrait de Laverne [34]

Puisqu'il semble que les méthodologies globales soient plus souhaitables pour la génération et l'évaluation des idées et des concepts, nous analysons plus précisément dans la section suivante les travaux de Munguia **[209]**, Chu **[210]**, Maheshwaraa **[208]**, Vayre **[216]**, Rodrigue **[228]**, Maidin **[213]**, Boyard **[215]**, Ponche **[217]** et Tang **[229]**, au regard des principes de la créativité décrits dans la partie 2 de cet état de l'art (§2.6.1). Cette analyse fera alors apparaitre les limites des méthodologies existantes quant à la génération d'idées et de concepts créatifs.

2.13.3 Une classification des méthodologies au regard de la créativité

A travers l'état de l'art sur la créativité, nous avons vu que la capacité créative des concepteurs. trices est nourrie par l'apport d'informations. Ainsi, la variété des informations influence la créativité : la combinaison d'informations intra-domaines et inter-domaines est plus favorable que l'utilisation d'informations intra-domaines seules. Cette variété favorise l'apport d'informations inattendues au regard du domaine. Nous avons également vu que la mobilisation et la construction de représentations externes est le moteur de progression du processus créatif et que celles-ci sont alors appelées objets intermédiaires. Concernant ces OI, nous avons vu que les objets tangibles incarnent des informations, permettent les manipulations sensori-motrices génératrices d'émotions positives, sont déclencheurs d'expériences et augmentent les motivations intrinsèques favorables pour la génération d'idées et de concepts. Enfin, nous avons vu que les objets intermédiaires sont des témoins du processus créatif conduit.
En ce sens, leur analyse permet d'évaluer, en partie, les effets de celui-ci. A la lumière de ces enseignements, nous analysons les méthodologies relevées en observant les informations que

Document confidentiel

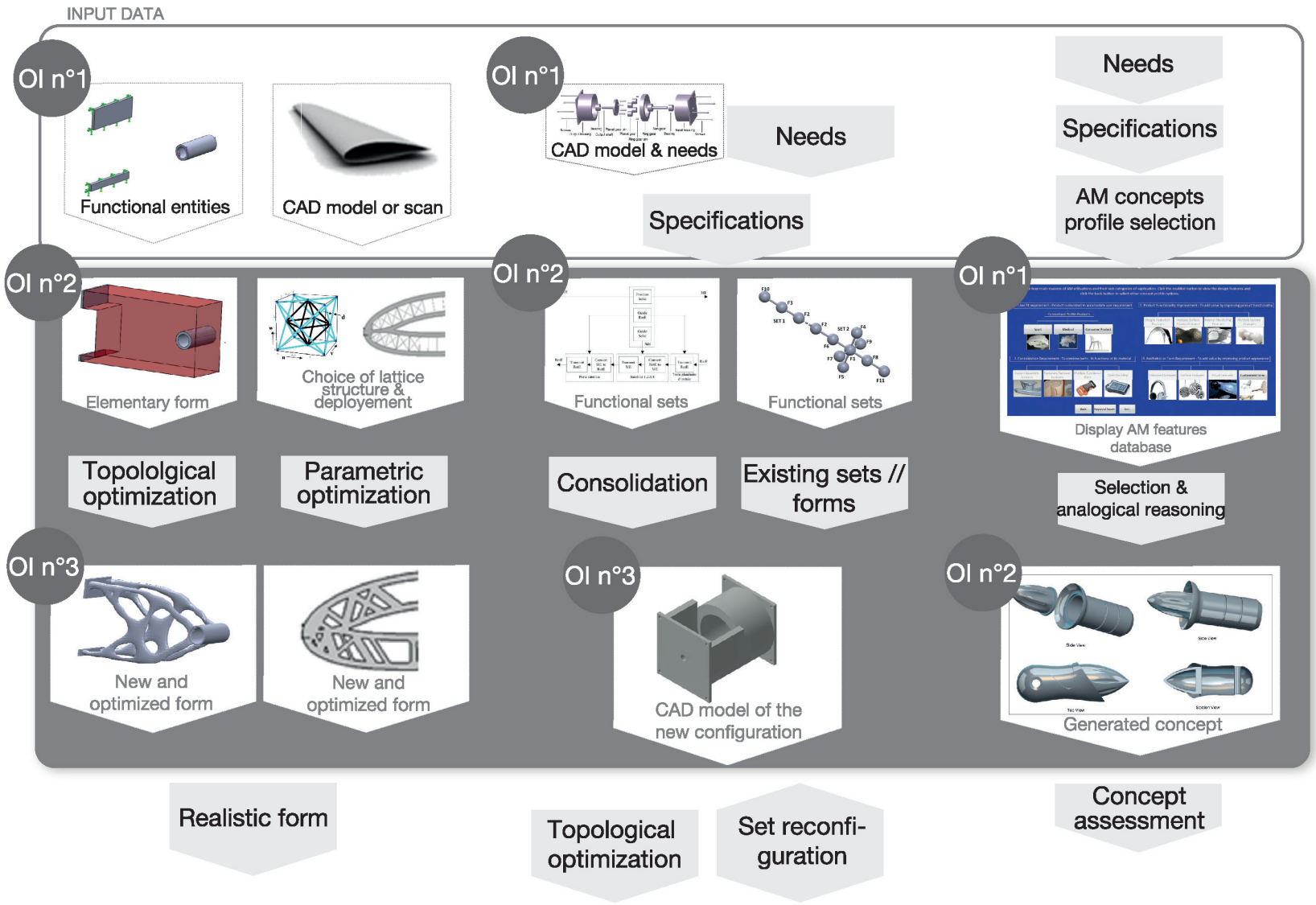
celles-ci requièrent comme données d'entrée, leur orientation et la qualité des objets intermédiaires créés **[230]**. Cette analyse est limitée aux phases initiales de ces méthodologies, pendant lesquelles la capacité créative est particulièrement sollicitée. En somme, nous conduisons une analyse au regard de la chaîne d'objets intermédiaires qui sous-tend les méthodologies de conception pour la fabrication additive. La figure 53 ci-dessous illustre cette analyse en groupant les méthodologies selon trois niveaux correspondants à l'impact que ces méthodologies produisent sur les concepts générés :

- **Niveau 1** : Nouveauté formelle
- **Niveau 2** : Reconfiguration des fonctions
- **Niveau 3** : Implémentation de formes et fonctions spécifiques à la fabrication additive

Les sous-sections suivantes s'attachent à détailler ces trois niveaux. Au préalable, la définition des termes de description d'un produit est nécessaire.

Selon Henderson et al. **[2]**, pour désigner un produit dans son ensemble on parle d'un « système », et de « composants » (ou « pièce » dans le jargon) pour désigner les éléments qui le constitue. Un « assemblage » est alors un ensemble de composants ayant des caractéristiques et des comportements propres. Actuellement, peu de systèmes complets sont réalisés en fabrication additive, nous retenons alors les notions d'assemblage et de composants. Assemblages et composants sont couramment décrits selon leurs propriétés (« *features* »), c'est-à-dire selon ses principales fonctions et formes, où « fonctions » désigne ce que le composant fait et « formes » comment cela est permis. « Formes » désigne tous les aspects des caractéristiques physiques : les lignes, la géométrie, le(s) matériau(x) ou encore les dimensions. A noter qu'il peut exister plusieurs formes possibles pour réaliser une même fonction **[126]**. Certains auteurs des méthodologies DFAM globales utilisent plus précisément les termes de caractéristiques intérieures et extérieures **[228]** ou de caractéristiques internes et externes **[213]**. Ils distinguent ainsi les fonctions et les formes qui définissent les limites ou frontières du composant (externes) de celles qui ne sont pas situées à l'interface avec l'environnement, ou avec d'autres composants dans le cas d'un assemblage.

Fig.53 (page suivante) - Méthodologies et objets intermédiaires créés dans les phases initiales des DFAM Globales, d'après [230], [217] et [208] (à gauche), [214] et [215] (au centre), [213] (à droite)



Document confidentiel

2.13.3.1 Niveau 1 : nouveauté formelle

Le niveau 1 regroupe les méthodologies proposées par Rosen **[83]**, Maheshwaraa **[208]**, Chu **[210]**, Vayre **[68]**, Ponche **[217]** et Tang **[229]**. Ces méthodologies sont destinées à la re-conception de composants existants. Les concepteur.trices démarrent en connaissant la plupart des caractéristiques du composant. Les formes et fonctions internes et externes sont connues, ainsi que la fonction principale. La démarche consiste alors à redéfinir ces caractéristiques pour les rendre pertinentes et optimisées pour la fabrication additive. Les informations requises en entrée sont des formes, des fonctions et des contraintes mécaniques extraites du composant existant à l'étude. Le premier objet intermédiaire (OI n°1) est alors soit créé à partir de ces informations (modèle 3D nommé « *Functional entities* » fig. 53), soit directement mobilisé car pré-existant (« CAD model » ou modèle issu d'un scan 3D selon Tang **[229]**).

Nouvelle forme interne

Les méthodologies proposées par Rosen **[83]**, Maheshwaraa **[208]** et Chu **[210]** adoptent ensuite une approche opportuniste. Selon Chu **[210]**, pour exploiter la complexité spécifique à la fabrication additive, les concepteurs.trices sont invité.es à « importer » dans leur projet des connaissances issues de la Nature. Ainsi, i.elles peuvent s'inspirer des structures cellulaires, cristallines, orthogonales ou autres qui croissent naturellement, par exemple dans les coraux, les nids d'abeilles ou les os humains. Un motif est donc choisi parmi celles-ci puis déployé au sein du modèle 3D pré-existant convoqué comme information d'entrée. Cette étape engendre un objet intermédiaire (OI n°2) qui présente une forme interne nouvelle par rapport au composant existant. Une méthode d'optimisation paramétrique est ensuite appliquée pour répartir le motif dans le modèle 3D de manière optimale au regard des contraintes mécaniques imposées. Cette répartition génère alors l'objet intermédiaire final des phases initiales (OI n°3). Il s'agit alors d'un modèle 3D représentant le composant initial mais sous une forme nouvelle et optimisée. La méthodologie s'appuie ensuite sur une approche contrainte pour obtenir un modèle réaliste vis-à-vis des capacités de la fabrication additive.

Nouvelles formes interne et externe

En parallèle, les méthodologies proposées par Ponche **[217]** et Vayre **[68]** adoptent également une approche à la fois opportuniste et contrainte, mais à partir d'informations d'entrées différentes. La figure 54 ci-dessous montre la méthodologie proposée par Vayre et les objets intermédiaires associés.

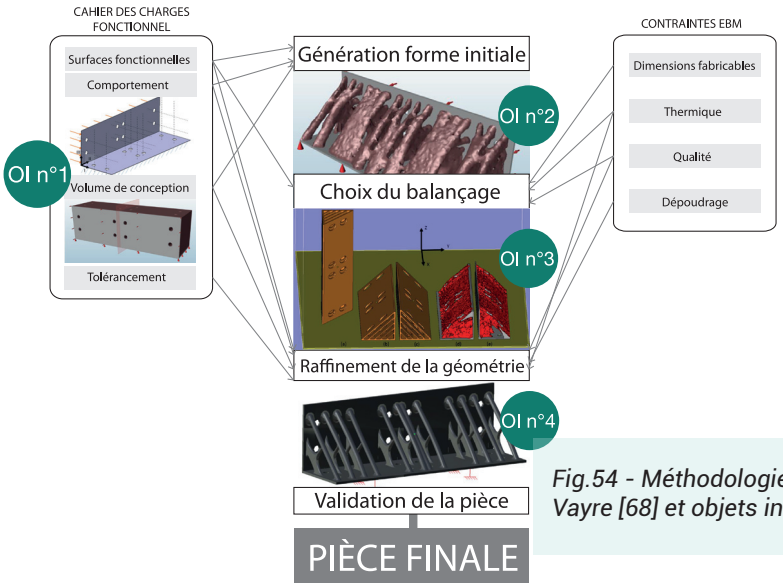


Fig.54 - Méthodologie proposée par Vayre [68] et objets intermédiaires créés

Pour encourager les concepteur.trices à ne pas se limiter à leur approche habituelle, cette méthodologie s'appuie sur la génération automatique d'une forme initiale (OI n°2, fig.54), basée sur les surfaces fonctionnelles, plutôt que sur un modèle 3D pré-existant. Selon Vayre **[68]**, la définition des surfaces fonctionnelles, réalisée à partir des spécifications du cahier des charges, ne devrait pas être exhaustive. En effet, les procédés de fabrication ne sont pas toujours performants pour réaliser parfaitement des géométries simples mais ils permettent de fabriquer des géométries plus complexes. Ainsi, une surface cylindrique traditionnellement conçue avec une section circulaire peut désormais l'être avec une section « en goutte d'eau » ou « en étoile », tout en maintenant le respect des spécifications. L'objet intermédiaire ainsi généré (OI n°1) présente alors la peau (*skin*) et le squelette (*skeleton*) du composant. Selon Ponche **[217]**, une forme élémentaire (OI n°2 fig.53) est obtenue en combinant peau et squelette, c'est-à-dire une représentation des frontières des formes et fonctions du composant. Dans ces deux méthodologies, Ponche et Vayre, une méthode d'optimisation topologique est utilisée pour générer une représentation du composant (approche opportunité), qui est ensuite raffinée selon des contraintes imposées par le procédé (approche contrainte) jusqu'à obtenir un modèle réaliste au regard de la fabrication additive.

Dans ces méthodologies, la génération des objets intermédiaires est prise en charge par des logiciels de modélisation générative. Ainsi, ils présentent à la fois une forme interne nouvelle et une forme externe nouvelle. Tandis que les méthodologies de Rosen **[83]**, Maheshwaraa **[208]** et Chu **[210]**, qui considèrent un modèle 3D pré-existant comme information d'entrée, permettent de générer des objets intermédiaires présentant seulement une forme interne nouvelle, tandis que la forme externe reste inchangée.
Nous remarquons que l'ensemble des méthodologies classées dans cette catégorie ne permettent pas de remettre en question les fonctions des composants. Celles-ci ne sont pas réévaluées au regard de la fabrication additive.

Document confidentiel

2.13.3.2 Niveau 2 : reconfiguration des fonctions

Cette catégorie regroupe les méthodologies proposées par Munguia **[209]**, Rodrigue **[228]**, et Boyard **[215]**. Ces méthodologies sont destinées à la conception ou la re-conception d'assemblages existants.

Re-conception d'assemblages

L'objectif des méthodologies proposées par Munguia **[209]** et par Rodrigue **[228]** (Niveau 2 fig.53) est de consolider les assemblages, c'est-à-dire de réduire le nombre de composants dans des assemblages existants. Cette démarche, d'abord de type opportunité puis ensuite contrainte, vise à explorer l'une des spécificités apportées par la fabrication additive : la possibilité de fabriquer des assemblages en une seule fois, sans montage a posteriori.
Un premier objet intermédiaire est mobilisé comme source d'information pour initier le processus. Il s'agit d'un modèle 3D d'un assemblage existant (OI n°1 fig.53). Les spécifications sont extraites à partir de cet OI, selon deux critères : « les composants doivent-ils être séparés pour des besoins de maintenance ? » et « l'assemblage est-il mobile ? Si oui, où est-ce que les mouvements sont situés ? ». Cette démarche opportuniste permet d'identifier des composants qui peuvent être éliminés ou unis. Elle génère un second objet intermédiaire : un set fonctionnel (OI n°2 fig.53). Cette représentation est de type sémantique, le modèle 3D existant étant laissé de côté. Cet OI n°2 présente une reconfiguration des fonctions des composants, tout en conservant les mêmes fonctions au niveau de l'assemblage. S'appuyant ensuite sur une approche de type contrainte, des diagrammes de flux sont appliqués pour prendre en compte les spécifications (par exemple « minimiser le transfert de chaleur vers le moteur »). L'objet intermédiaire généré à l'issue de cette démarche (OI n°3 fig.53) est un modèle 3D présentant cette reconfiguration des fonctions des composants qui entraîne des variations formelles mineures à l'échelle de l'assemblage. Cet OI est ensuite raffiné à l'aide d'une méthode d'optimisation.

Conception d'assemblages

En parallèle, la méthodologie proposée par Boyard **[215]** considère les besoins du secteur industriel d'application comme information d'entrée (« *Needs* » fig.53). La première phase consiste à regrouper les fonctions répondant à ces besoins pour définir des « sets fonctionnels ». L'objet intermédiaire qui en résulte est un graph 3D (OI n°2 fig.53) dans lequel les points représentent des fonctions et les segments entre les points représentent les liaisons d'assemblages. Cette configuration des fonctions peut être modifiée au cours de discussions entre les acteur.trices de la conception. La définition des formes permettant de réaliser ces fonctions s'appuie sur une base de données répertoriant des solutions existantes et les représentations correspondantes. Ces solutions ne sont pas spécifiques à la fabrication additive. Le mécanisme utilisé pour transférer les cas existants au cas à traiter est basé sur l'analogie : chaque nouveau set fonctionnel est comparé à la base de données pour identifier ou non des sets similaires. Si un set similaire est identifié, le modèle 3D qui le représente est extrait et appliqué ou adapté pour le set en cours de conception, indépendamment du secteur indus-

-triel visé. Si aucun set similaire n'est identifié, soit le set initial est modifié soit un nouveau modèle 3D est conçu puis intégré dans la base de données. L'objet intermédiaire généré à l'issue de cette phase est un modèle 3D d'un assemblage, composé de plusieurs modèles 3D préexistants (OI n° 3 fig.53). Selon une approche contrainte, ce modèle 3D est ensuite évalué pour obtenir une configuration formelle et fonctionnelle réaliste au regard de la fabrication additive et du cahier des charges donné.

Nous remarquons que cette méthodologie ne guide pas pour questionner, au regard de la fabrication additive, les besoins exprimés au départ. Ni pour questionner les fonctions spécifiées dans le cahier des charges ni les modèles répertoriés dans la base de données. Elle conduit donc plutôt à une reconfiguration de fonctions et de formes (internes et externes) déjà existantes, hors secteur fabrication additive.

2.13.3.3 Niveau 3 : implémentation de formes et de fonctions spécifiques FA

Cette catégorie regroupe les méthodologies initiées par Burton **[207]** puis poursuivie par Maidin **[213]** et celle proposée par Laverne **[34]**. Celles-ci sont destinées à la conception ou la reconception de produits.

Une approche Contrainte puis Opportunité

Dans la méthodologie proposée par Burton **[207]**, les besoins recueillis sont d'abord mis au regard de la fabrication additive, à l'aide d'un questionnaire **[231]**. Cette étape située en amont de la rédaction des spécifications du cahier des charges vise à recommander, ou non, la fabrication additive en fonction de critères tels que : le nombre de composants à produire, la qualité d'état de surface attendu, les dimensions du produit, ou encore la résistance mécanique souhaitée. On remarque alors que cette approche est plutôt de type contrainte dès les toutes premières phases. En effet, si les réponses au questionnaire indiquent que les capacités des procédés de fabrication additive ne peuvent pas répondre au besoin exprimé à un instant t, le projet est rejeté.
La méthodologie proposée par Maidin **[213]** guide les phases suivantes. Une fois les spécifications rédigées, les concepteurs.trices sont invité.es à intégrer des caractéristiques formelles et fonctionnelles spécifiques à la fabrication additive. Il s'agit alors d'une approche opportuniste. En ce sens, i.elles peuvent sélectionner un profil similaire à leur projet dans une base de données informatisées regroupant des produits déjà réalisés en fabrication additive. Cette base est constituée d'images de produits et de mots-clés nommant les profils. Pour exemple, la figure 55 ci-dessous présente un extrait de cette base. Cette section est proposée aux concepteurs.trices lorsque la définition du profil a montré que l'objectif principal du projet est d'explorer l'intégration de fonctions en fabrication additive (« *Product Functionality Improvement* »). En cliquant sur cette section, une liste déroulante de caractéristiques formelles et fonctionnelles est alors proposée (« *internal cable route, internal flow path* », etc.). Cette liste est constituée à partir de l'observation de cas existants en fabrication additive.

Document confidentiel

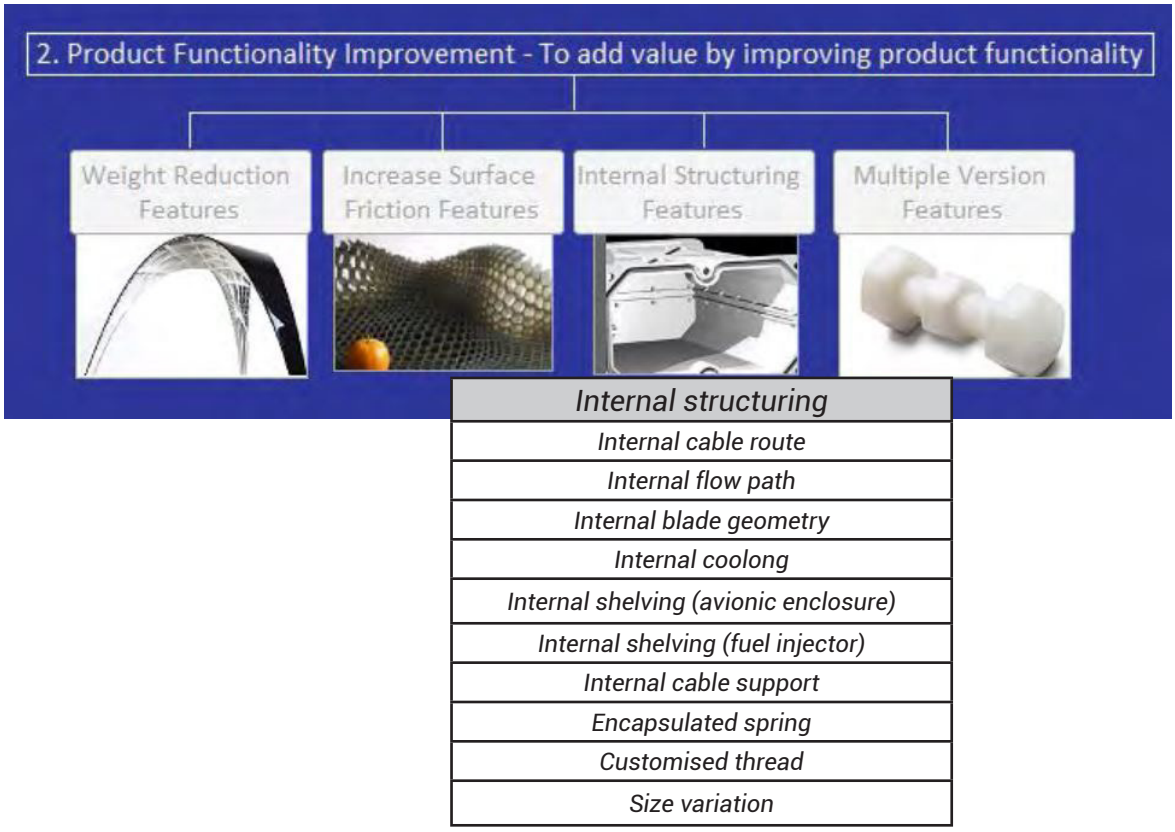


Fig.55 - Extrait de la base de cas spécifiques à la fabrication additive, Maidin [213]

Ensuite, les concepteurs.trices sont invité.es à extraire des caractéristiques de cette base pour générer des concepts de produits. L'objet intermédiaire ainsi généré (OI n°2 fig.53) présente des caractéristiques formelles et fonctionnelles pertinentes au regard de la fabrication additive. Les concepts générés sont ensuite évalués selon les exigences initiales du cahier des charges. Le concept retenu est ensuite détaillé dans les phases avales du processus.

Une approche Opportunité puis Contrainte

La méthodologie proposée par Laverne **[34]** est similaire à celles de Burton **[207]** puis Maidin **[213]**, mais de manière inversée, en guidant d'abord vers une approche opportuniste (DWAM) puis ensuite vers une approche contrainte (DFAM). En effet, ayant repéré les difficultés que les concepteurs.trices rencontrent pour intégrer, dès le départ du processus, un grand nombre de contraintes liées à la fabrication additive (choix du procédé, dimensions des chambres de fabrication, précision qui influe sur l'état de surface, etc.), elle propose de les intégrer plus tardivement. Dans les premières phases du processus, des informations non restrictives sont apportées aux concepteur.trices via une base de fiches informatisées (fig.56). Cette base présente des représentations visuelles de composants ou de systèmes existants. Les concepteur.trices sont donc invité.es à intégrer ces informations dans leurs connaissances et à s'en ins-

-pirer pour générer des concepts. Nous remarquons alors ici que cette méthodologie est basée sur les raisonnements par combinaison ou par mutation précédemment identifiés (§2.9.2). Elle a donc un point commun avec le raisonnement créatif.

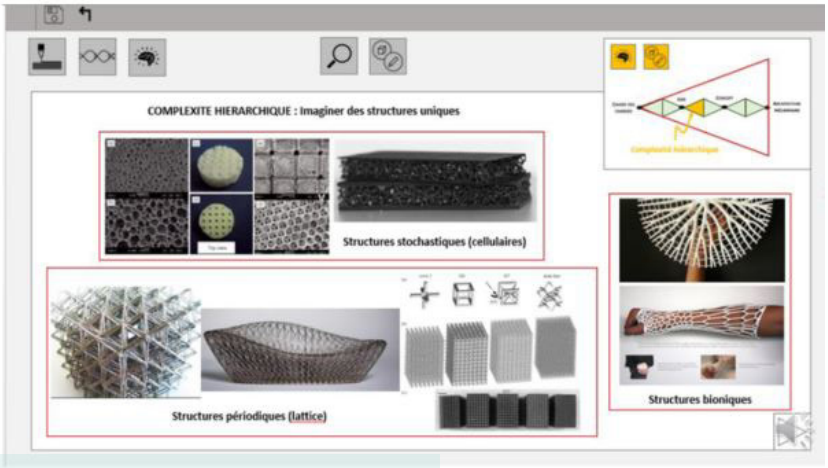


Fig.56 – Fiche d'informations sur la fabrication additive, extrait de Laverne [34]

Dans un second temps, la base propose des fiches d'informations sur les contraintes imposées par les procédés. Il s'agit alors d'une démarche de type contrainte. Les concepteur.trices peuvent alors évaluer les concepts générés au regard de ces contraintes. Cette évaluation peut montrer que l'un des concepts est adapté à la fabrication additive, auquel cas sa définition peut être détaillée dans les phases suivantes du processus. Mais cette évaluation peut également montrer que le concept qui répond le mieux au cahier des charges n'est pas pertinent pour la fabrication additive et qu'un autre procédé conventionnel serait préférable. Les concepteur.trices sont alors invité.es à s'intéresser à des informations liées à ces procédés conventionnels pour poursuivre le processus de conception.

Finalement, toutes les méthodologies classées dans ce Niveau 3 guident les concepteur.trices vers l'implémentation de caractéristiques formelles et fonctionnelles existantes, identifiées comme spécifiques à la fabrication additive et répertoriées, en amont, dans un corpus défini et identique pour chaque projet.

2.13.4 Limites quant à la génération de concepts créatifs

La classification des méthodologies DFAM et DWAM en trois niveaux présentée montre que la génération d'idées et de concepts créatifs dépend de :

Document confidentiel

- L'orientation générale de la méthodologie (conception ou re-conception)
- Du type d'informations apportées aux concepteurs.trices et du moment auquel ces informations sont fournies
- Du type d'objets intermédiaires générés

Nous observons ces méthodologies au regard des principes de créativité identifiés précédemment dans l'état de l'art.

2.13.4.1 Limites au regard de l'originalité

Si l'originalité, au sens de Boden (H-creative) **[95]** et de Howard **[122]** n'est pas le seul critère attendu pour qualifier les concepts issus d'un processus créatif, nous avons vu que c'est cette qualité qui ouvre d'abord la possibilité, pour une entreprise, de se démarquer de sa concurrence et la possibilité de protéger les idées et concepts générés par des brevets. En ce sens, nous relevons ici les limites des méthodologies DFAM globales au regard de l'originalité.
Selon Laverne **[34]**, les méthodologies globales représentent 30% des méthodologies existantes. Parmi celles-ci, la majorité sont destinées à la re-conception de composants ou d'assemblages existants et non à la conception de nouveaux composants ou assemblages. Il semble donc que ces méthodologies guident peu au-delà de refaire l'existant, pour une exploration plus large des possibilités de la fabrication additive.
Observant la chaîne d'objets intermédiaires générés dans ces méthodologies, nous remarquons que, sur un critère quantitatif, celles-ci semblent limiter le nombre de représentations externes. En effet, l'utilisation de logiciels de modélisation générative dès les premières phases (tels que par exemple Inspire ou Optistruct) permet effectivement de dépasser les limites que les concepteur.trices s'imposent à cause de leurs pratiques liées aux procédés conventionnels, cependant, ces outils favorisent une convergence rapide vers une unique représentation et donc une exploration limitée de l'espace de conception. Le modèle 3D issu de ces logiciels est en effet considéré comme « optimal » c'est-à-dire comme étant la solution la plus adéquate pour répondre au problème. Les concepteur.trices ne sont alors pas amené. es à explorer d'autres solutions ni à générer d'autres représentations. I.elles sont plutôt guidé.es pour raffiner le modèle généré sans le mettre en question. L'utilisation de logiciels d'optimisation dès le début du processus semble donc suggérer qu'il n'existe qu'une solution pour répondre au problème sans favoriser l'émergence d'un nombre important de concepts variés parmi lesquels plusieurs solutions peuvent émerger. Nous avons vu précédemment qu'une phase de divergence riche de plusieurs concepts et de diverses représentations favorise l'émergence de concepts originaux vis-à-vis de l'existant et favorise aussi la génération de concepts qui peuvent être utiles pour un problème futur (expansion large des connaissances). Nous retenons donc que l'utilisation précoce de logiciels d'optimisation ne favorise pas la construction de multiples représentations et la génération de concepts originaux et variés.
Par ailleurs, bien que des logiciels de modélisation 3D soient utilisés dès les premières phases de ces méthodologies, les représentations virtuelles ne sont jamais traduites en objets tangibles pendant les phases initiales. Or, nous avons vu précédemment que l'objet tangible, parce qu'il autorise les manipulations sensori-motrices, permet de déplacer le point de vue des concepteur.trices et de déclencher de nouveaux questionnements. Dans ces méthodologies, l'objet tangible est attendu seulement comme représentant de la solution finalement retenue, comme « produit final », donc non généré pendant les phases initiales.

La table 5 ci-dessous présente une synthèse de la qualité des concepts générés par les méthodologies de niveaux 1, 2 et 3 présentées. Dans cette table, l'originalité est comprise au sens de Boden **[95]** et Howard **[122]** et exprimée avec les termes proposés par Garcia **[4]**. On souligne donc l'originalité ou l'absence d'originalité des caractéristiques formelles et fonctionnelles (« *New what* ») et de quel point de vue est-ce original (« *New to* »). Il apparaît que l'ensemble des méthodologies relevées conduisent à générer des concepts seulement partiellement originaux et donc non susceptibles d'être brevetables.

Table 5 - Synthèse comparant l'originalité des OI générés par les DFAM classées aux niveaux 1, 2 et 3 (X = Non original, O = Original)

Qualité des OI générés		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
"New what"	Fonctions (25%)	X	O	O
	Formes (25%)	O	O	O
"New to"	Industrie de la fabrication additive (25%)	X	X	X
	Industrie conventionnelle (25%)	O	O	O
Nouveauté permise par ces méthodologies		50%	75%	75%

Les méthodologies classées au niveau 1 ne permettent pas de questionner les fonctions imposées dans le cahier des charges fourni. En ce sens, les fonctions des concepts générés ne sont pas originales au regard de l'existant. Cependant, en s'inspirant de structures naturelles ou en laissant au logiciel de modélisation générative la faculté de générer la forme correspondant aux fonctions attendues, ces méthodologies conduisent à la génération de concepts présentant des formes internes et/ou externes originales. Si ces formes bioniques ou en treillis sont originales pour l'industrie conventionnelle, elles sont déjà connues et couramment réalisées dans l'industrie de la fabrication additive. Ces concepts ne sont donc pas originaux du point de vue de l'industrie de la fabrication additive, bien qu'ils le soient du point de vue de l'industrie conventionnelle. En somme, nous retenons que les méthodologies de niveau 1 permettent de générer des concepts présentant un niveau d'originalité de 50%.
Dans les méthodologies de niveau 2, les fonctions d'assemblages existants peuvent être questionnées au regard de la fabrication additive. La nouvelle configuration des fonctions résultante de cette analyse est donc considérée comme originale au regard de l'existant. La nouvelle configuration fonctionnelle entraînant une redéfinition des formes permettant de réaliser cette configuration, les formes générées sont originales au regard de l'assemblage existant. Cependant, la consolidation d'assemblage est une opportunité donnée par la fabrication additive déjà connue et couramment exploitée. On retient donc que ces méthodologies ne conduisent pas à des concepts originaux du point de vue de l'industrie de la fabrication additive, bien qu'elles permettent de dépasser les concepts réalisés dans l'industrie conventionnelle. Les méthodologies de niveau 2 conduisent finalement à la génération de concepts présentant un niveau d'originalité de 75%.

Document confidentiel

Dans une démarche similaire, les méthodologies de niveau 3 permettent de questionner les fonctions au regard de la fabrication additive. La nouvelle définition des fonctions entraîne alors une nouvelle définition des formes internes et externes. Ces caractéristiques formelles et fonctionnelles tirent parti des spécificités connues de la fabrication additive, elles sont donc originales du point de vue de l'industrie conventionnelle. Cependant, ces méthodologies sont basées sur l'utilisation d'une base d'informations montrant des composants existants. En d'autres termes, ces méthodologies conditionnent l'originalité aux caractéristiques déjà existantes et reconnues dans l'industrie de la fabrication additive. Elles ne guident pas pour l'exploration de connaissances émergentes, non encore reconnues. En somme, les méthodologies de niveau 3 conduisent à générer des concepts ayant un niveau d'originalité de 75%.
Restreindre l'exploration aux seuls existants réalisés en fabrication additive alors que les concepteurs.trices ont encore peu de recul vis-à-vis de ces procédés apparaît peu robuste et limitant au regard de l'affirmation de Rosen **[83]**, **[232]** selon qui un large espace de conception reste à explorer. Il est alors nécessaire de donner l'opportunité aux concepteur.trices d'explorer les possibilités de la fabrication additive au-delà des fonctions et formes déjà couramment connues dans cette industrie.

2.13.4.2 Limites au regard de l'Exploration

Nous avons précédemment décrit les conditions du régime d'Exploration conduit à partir d'une technologie (§2.7.1). L'Exploration requiert à la fois l'exploitation de connaissances déjà identifiées et l'exploration de nouvelles connaissances, non guidées par un cahier des charges précis et des besoins identifiés à l'avance. Plus l'exploration est importante, plus l'expansion dans le domaine de conception est large.
En cohérence avec ces principes soulignés dans l'état de l'art, nous analysons alors l'expansion permise par les méthodologies de niveaux 1, 2 et 3. La figure 57 ci-dessous illustre cette expansion plus ou moins élargie selon la classification des méthodologies.

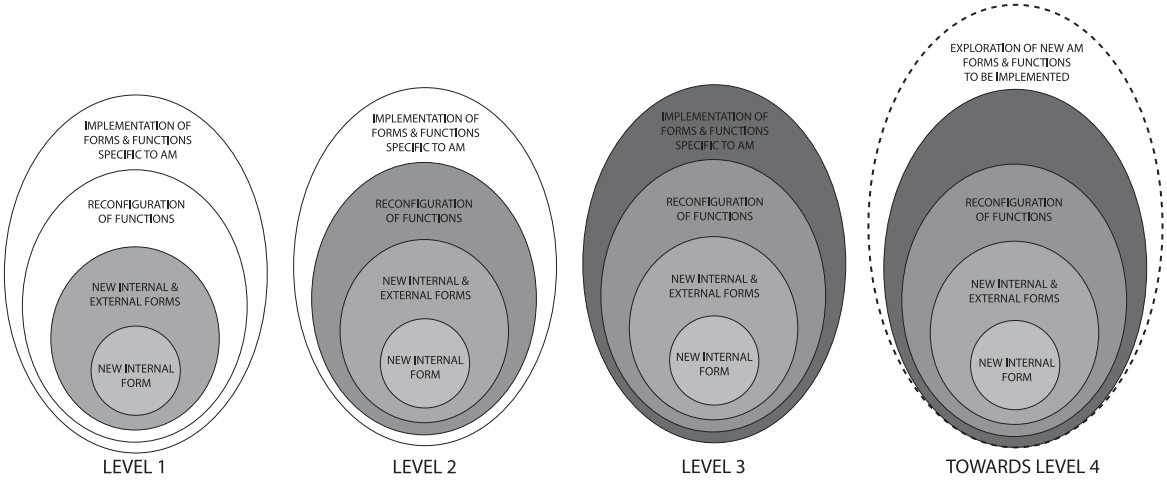


Fig.57 – Expansion plus ou moins large dans le domaine de conception de la fabrication additive

Les méthodologies de niveau 1 permettent de tirer parti des spécificités de la fabrication additive pour générer de nouvelles formes internes et externes dans des composants. En ce sens, l'expansion est circonscrite aux premiers cercles de l'espace de conception de la fabrication additive (Niveau 1 fig.57). Les méthodologies de niveau 2 permettent de tirer parti des spécificités de la fabrication additive pour reconfigurer les fonctions d'assemblages et génèrent donc de nouvelles formes internes et externes. En ce sens, l'expansion dans l'espace de conception de la fabrication additive est élargie à l'exploration de nouvelles caractéristiques fonctionnelles (Niveau 2). Les méthodologies de niveau 3 permettent de tirer parti des spécificités de la fabrication additive au niveau systémique le plus élevé, c'est-à-dire pour la conception ou la re-conception des fonctions et formes de systèmes. Avec ces méthodologies, l'expansion dans l'espace de conception de la fabrication additive est alors la plus large (Niveau 3). Cependant, nous avons souligné que ces méthodologies conduisent à autoriser l'expansion uniquement jusqu'aux limites des caractéristiques déjà connues et réalisées en fabrication additive, ou en d'autres termes dans les limites d'un corpus d'informations défini en amont et qui ne peut être élargi pendant le processus.

En suivant les principes du *Design Through Additive Manufacturing* proposés par Bolzan **[222]**, favoriser une expansion plus large dans l'espace de conception de la fabrication additive consisterait alors, en amont des méthodologies existantes, non pas à concevoir un composant ou un système pour la fabrication additive mais d'abord à explorer les spécificités de la fabrication additive en faisant l'expérience de la fabrication additive, dans le contexte précis du projet donné, de manière à élargir les connaissances existantes au-delà du corpus déjà connu (Vers Niveau 4 fig.57) et en vue d'ajouter celles-ci au corpus à explorer.

Finalement, l'analyse des méthodologies existantes fait apparaître leurs limites quant à l'expansion de l'espace de conception de la fabrication additive. Ces constats, mis en parallèle des constats issus de notre pratique dans le cadre de deux projets de Recherche & Développement présentés dans le chapitre suivant, conduiront alors à présenter ensuite un modèle permettant de faire l'expérience de la fabrication additive en vue de découvrir des informations sur la fabrication additive.

Synthèse état de l'art – 3ème partie et positionnement

Cette 3ème partie de l'état de l'art a montré trois types de liens entre conception et fabrication additive puis analysé les méthodologies existantes. Cette synthèse présente des éléments à retenir pour le positionnement théorique de nos travaux par rapport aux méthodologies existantes :

On observe 3 types de liens entre conception et fabrication additive : Conception pour la fabrication additive (DFAM), Conception avec la fabrication additive (DWAM) et Conception par la fabrication (DTAM)

L'approche DTX permet d'intégrer des informations non habituelles, par exemple liées aux comportements dynamiques des produits, à leur mise en mouvement ou à leurs variations d'états liés à des environnements d'utilisation. Ce type d'informations, dynamique, peut difficilement être rendu explicite par des descriptions textuelles et schématiques et par des règles de conception générales et immuables à appliquer. La fabrication additive correspond à cette situation.

Le DTAM favorise l'expansion des connaissances en proposant aux concepteur.trices de faire l'expérience de la fabrication additive pour acquérir de nouvelles informations. Cette approche encore émergente semble dessiner deux orientations. Une orientation plutôt adaptée à l'impression 3D où les concepteur.trices sont amené.es à modéliser et fabriquer des objets, et une seconde orientation, plutôt adaptée à la fabrication additive, où les concepteur.trices peuvent manipuler des objets tangibles pour acquérir des informations sur la fabrication additive.

Ces constats conduisent à adopter le positionnement suivant comme cadre théorique de cette thèse. La figure 58 ci-dessous illustre ce positionnement.

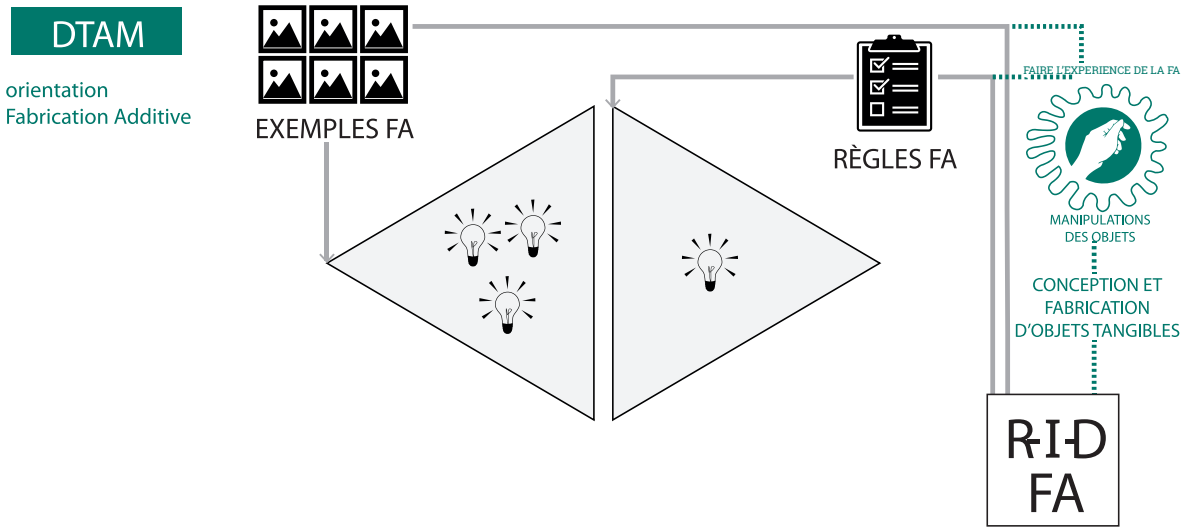


Fig.58 – Positionnement de cette thèse dans le cadre théorique du DTAM

Nous inscrivons alors cette thèse dans le cadre théorique du Design Through Additive Manufacturing, en dessinant une orientation sur la créativité adaptée à la fabrication additive dans un contexte industriel. Dans ce cadre, nous proposerons de donner l'opportunité aux concepteur.trices de faire l'expérience de la fabrication additive en manipulant des objets tangibles en amont du processus.
Le chapitre 3 qui suit présente deux projets de R&D conduits en parallèle de l'état de l'art. Comme la littérature, ceux-ci ont fait émerger des constats. La convergence des constats de la littérature et des constats issus de la pratique conduira à la formulation de la problématique, du modèle liant créativité et fabrication additive et de deux hypothèses.

CHAPITRE 3

PROJETS R&D, PROBLÉMATIQUE, MODÈLE PRÉLIMINAIRE ET FORMULATION DES HYPOTHÈSES

CHAPITRE 3 : PROJETS R&D, PROBLÉMATIQUE, MODÈLE PRÉLIMINAIRE ET FORMULATION DES HYPOTHÈSES

Introduction du chapitre 3 : à l'origine, une demande de la R&D

Comme décrit dans la partie contexte de ce document, nous avons conduit une démarche de recherche-action pour réaliser cette thèse (§1.2.2). L'un des principes de cette démarche est que la problématique et les hypothèses émergent d'une analyse conjointe de la littérature et de pratiques de terrain. Nous avons mis en lumière, dans le chapitre 2, les connaissances scientifiques liées à notre question de recherche générale. Ce chapitre 3 décrit alors les projets pratiques de R&D qui ont contribué à l'émergence de notre problématique et de nos hypothèses de résolution. Ces projets correspondent au cas d'application de notre étude : l'exploration de l'intégration de fonctions en fabrication additive. La figure 59 ci-dessous illustre cette articulation entre réalisation de projets et recherche.

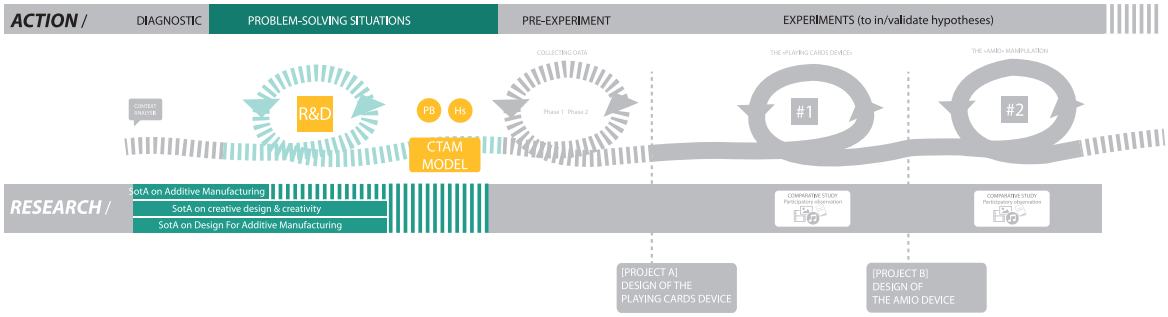


Fig.59 - Positionnement des projets R&D dans notre démarche de recherche-action

La demande initiale de la R&D était d'explorer la thématique de l'intégration de fonctions en fabrication additive. A l'issue d'une veille technique, il est apparu que l'inclusion de corps étrangers est un des moyens d'intégrer des fonctions qui reste peu exploré avec les procédés de fabrication additive Métal alors que ceux-ci sont phares dans l'industrie aujourd'hui (§3.1). Pour répondre à cette demande R&D, nous avons conduit deux projets, avec deux approches différentes. Le projet R&D1 visait à faire l'expérience de la fabrication additive via différents objets tangibles, notamment des fiches d'informations (§3.2.1). Le projet R&D2, a permis de faire l'expérience de la fabrication additive à travers la pratique, la fabrication d'objets (§3.2.2). Ces deux projets ont fait émerger des constats, notamment relatifs à des outils d'application. En réunissant les constats exposés précédemment dans l'état de l'art et les constats issus des projets R&D, nous formulerons alors une problématique de recherche : « Comment faire l'expérience de la fabrication additive afin de favoriser la génération d'idées et de concepts créatifs ? » (§3.3).

Dans l'optique de confronter cette problématique au terrain expérimental, nous formaliserons un modèle préliminaire de créativité par et pour la fabrication additive, ainsi que deux hypothèses de résolution (§3.4). Enfin, une synthèse de ce chapitre 3 est proposée pour en retenir les éléments clés mis ensuite en œuvre dans les expérimentations.

3.1 Cas d'application : l'intégration de fonctions en fabrication additive

L'état de l'art a souligné une opportunité singulière amenée par la fabrication additive : les quatre types de complexité qu'elle permet, aux niveaux formel et hiérarchique, aux niveaux des matériaux et des fonctions (§2.5). L'intégration de fonctions en fabrication additive est directement liée à l'exploration de ces 4 types de complexité. Cette demande de la R&D constitue le cas d'application de cette thèse.

3.1.1 Principes de l'intégration de fonctions

Une série de trois études menée par le *Direct Manufacturing Research Center* en 2012 **[233]** avait identifié les futures applications potentielles de la fabrication additive métallique , à horizon 2022, dans des secteurs industriels clés comme l'Aéronautique, le Spatial, l'Automobile et l'Electronique. Au travers d'enquêtes et d'ateliers conduits avec des expert.es des secteurs industriels concernés, la 3ème étude de cette série a formalisé les axes d'innovations potentielles et présenté leur évaluation selon un critère double opportunité-risque **[234]**.

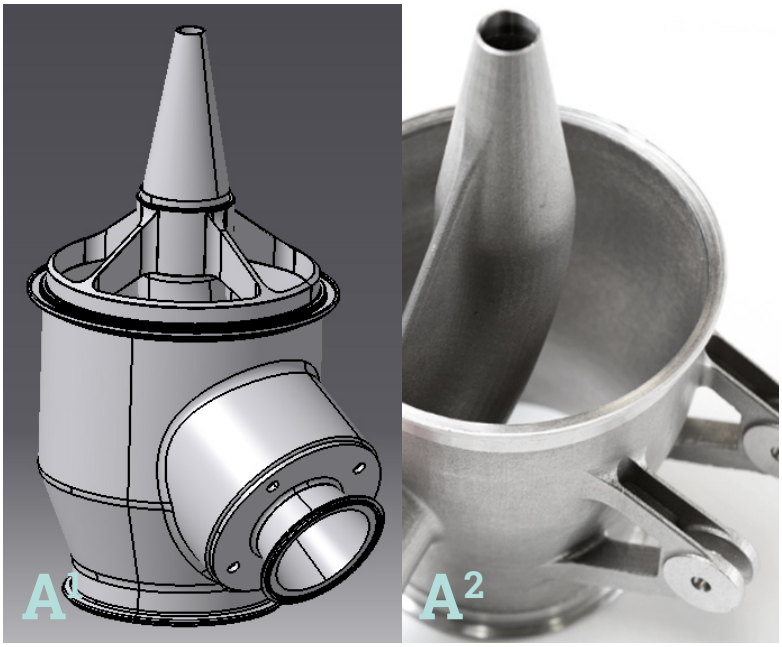
Il est apparu que l'intégration de fonctions est un axe pertinent pour le développement de nouvelles applications de la fabrication additive Métal. De manière générale, cette étude dessine en effet une tendance forte allant vers des composants multifonctionnels, c'est-à-dire des composants qui, grâce aux procédés de fabrication additive, regroupent plusieurs fonctions en une forme, fabriquée en une seule fois. Une veille technique a permis d'identifier plus précisément trois types d'intégration de fonctions :

- **La consolidation** (terme anglais non traduit)
- **La substitution**
- **L'addition**

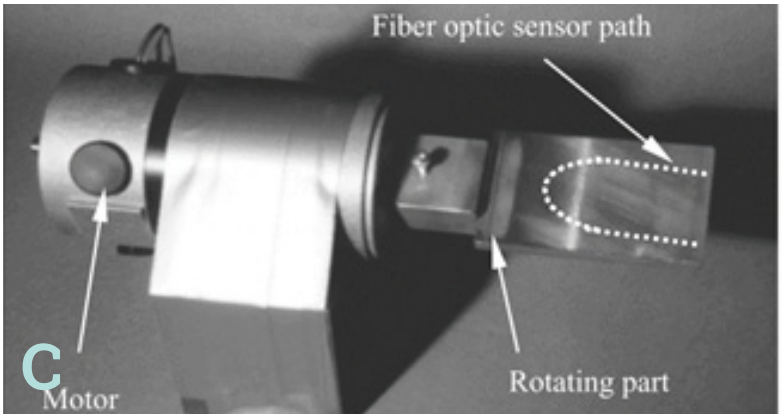
La figure 60 ci-dessous présente des composants illustrant ces trois types d'intégration de fonctions.

Fig.60 (page suivante) - Les types d'intégration de fonctions en fabrication additive, sources Poly-Shape & Dassault Aviation (A), Poly-Shape (B) et Li [235] (C)

Document confidentiel


A1
A2

B


Fiber optic sensor path
C
Motor
Rotating part

L'exemple A présente un cas d'union de cinq composants auparavant assemblés après fabrication (A1), désormais fabriqués en une seule fois grâce à la fabrication additive (A2). Les fonctions du composant (A2) restent inchangées par rapport au composant original (A1) et l'objectif de cette conception n'était pas d'optimiser le mélange des flux. En conséquence, c'est un cas d'intégration de fonctions par **consolidation**.

L'exemple B présente une structure alvéolaire interne à un composant qui, sans cela, aurait été massif. Cette géométrie complexe a donc été substituée à une géométrie initiale, c'est un cas d'intégration de fonctions par **substitution**.

Enfin, **l'exemple C** présente un composant dans lequel est inclus un capteur à fibre optique. Ce composant électronique a été ajouté au composant en cours de fabrication. Sans cette inclusion de capteur, le composant n'aurait pas pu réaliser les fonctions apportées par ce capteur. En d'autres termes, l'inclusion de ce corps étranger au composant initial permet d'ajouter une ou plusieurs fonctions à celui-ci. C'est donc un cas d'intégration de fonctions par **addition**.

Ces 3 types d'intégration de fonctions représentent finalement autant d'opportunités qui restent à explorer.
La sous-section suivante fait apparaître que, parmi ces trois types, l'inclusion de corps étrangers, est connue en fabrication additive mais encore peu explorée en fabrication additive Métal. Cette étude sera alors centrée sur cette orientation.

3.1.2 L'inclusion de corps étrangers en fabrication additive

Une veille brevet et une veille technique conduites en amont des projets R&D ont révélé un catalogue varié de corps étrangers qui pouvaient être inclus dans des composants (fig. 61). Toutefois, cette veille rapportait peu de cas d'inclusion de corps étrangers en fabrication additive Métal et, en particulier, aucun cas, à notre connaissance, d'inclusion avec le procédé de Fusion de poudre par laser.

Ainsi, les travaux de Geving **[236]**, Kataria **[237]** et De Laurentis **[238]** montrent la possibilité d'inclure des inserts métalliques tels que écrous et vis dans des composants fabriqués par Stéréolithographie. Nous avons également observé des inclusions de ressort métallique, de fibre optique (image A fig.60), d'aimants, et de résistances avec un procédé de projection de matière polymère **[239]**. Les travaux antérieurs de Cham **[240]** démontraient l'inclusion d'inserts métalliques, de câbles électriques, de jauges de déformations et de composants électroniques. A sa suite, Li **[235], [241]** a montré la possibilité d'inclure un capteur à fibre optique dans un composant tournant réalisé en fabrication additive hybride. Ce même corps étranger a été exploré plus tard par Maier **[242]**.

Les travaux de Lopes **[243]** ont montré l'inclusion de divers composants électroniques fonctionnels dans des composants fabriqués par un procédé combinant stéréolithographie et Direct Writing i.e dépôt de cordons métalliques conducteurs (image B fig.60). Dans sa synthèse, Isanaka **[244]** présente également l'inclusion de jauge de déformation dans un composant métallique en fabrication additive par ultrason. Le capteur permet de recueillir des informa-

Document confidentiel

-tions sur les variations de température et d'efforts au sein du composant, dans son contexte d'usage. L'auteur présente aussi un démonstrateur ressemblant à un doigt dont les mouvements sont actionnés grâce à l'inclusion de câbles **[245]** en fabrication Polymère.

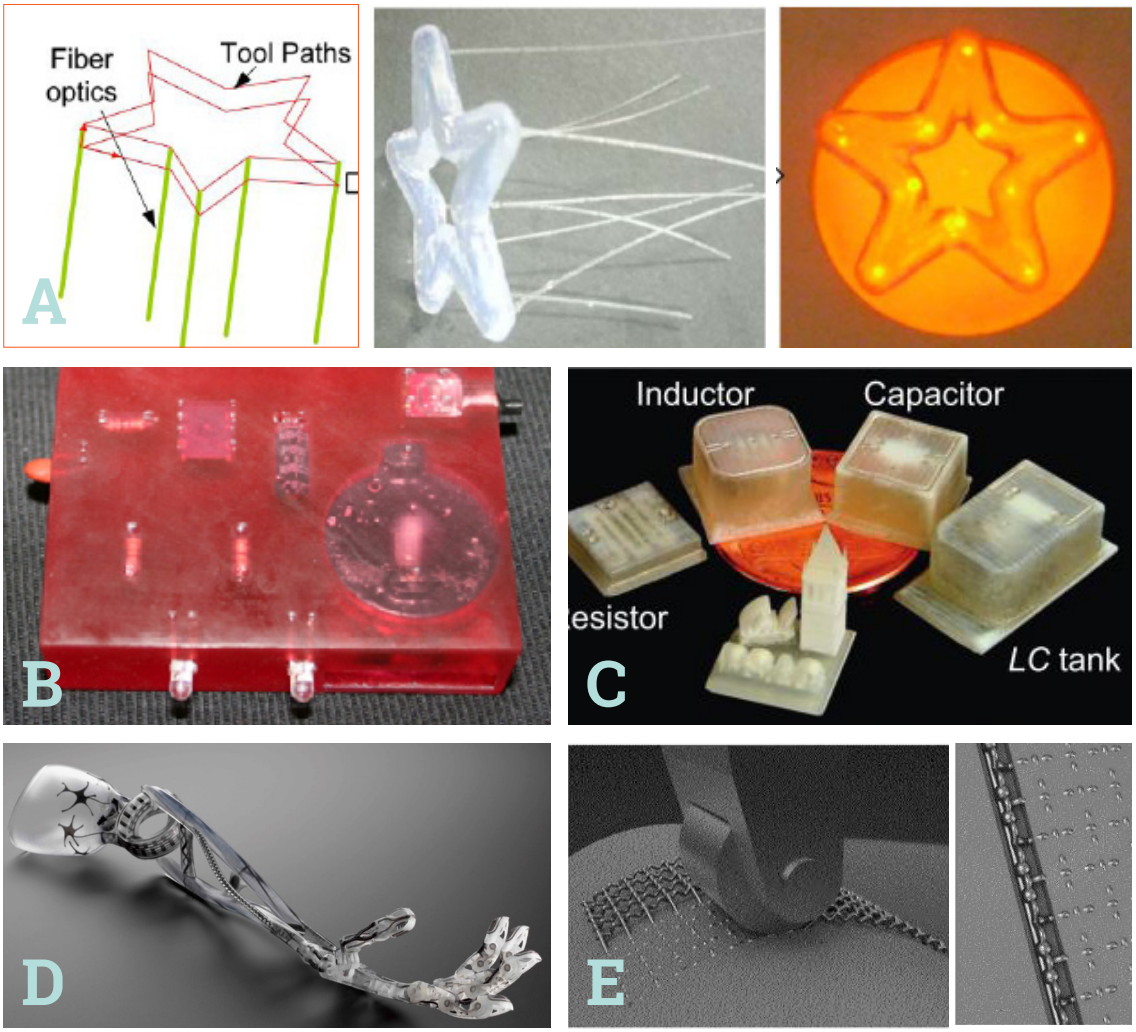
Le bras mécatronique de Panesar **[246]** (image D) montre un système fabriqué en une seule fois par Projection de multiples matières polymères. En plus des mouvements de rotations du bras et des doigts, les composants électroniques inclus permettent de commander l'exécution d'un mouvement et, au bout des doigts, de capter des informations. Egalement pour l'inclusion d'un capteur, le brevet déposé par Nardi **[247]** montre sa faisabilité technique avec la combinaison de deux procédés de fabrication additive métallique.

Le brevet américain déposé par Ryan **[248]** montre l'inclusion de filaments et de mailles métalliques dans des composants fabriqués en polymère (image E). Enfin, plus récemment, les travaux de Wu **[249]** ont montré la possibilité d'inclure des liquides visqueux contenant des particules d'argent dans des composants fabriqués en polymère (images C1 et C2), notamment pour une application de « bouchon intelligent » destinée à l'industrie agroalimentaire.

A travers ce catalogue de cas, nous remarquons que ces publications sont assez anciennes (années 1990's pour les premières) au regard du développement des procédés de fabrication additive. Cela pourrait alors indiquer que l'inclusion de corps étrangers a déjà été largement explorée. Pourtant, nous avons relevé peu de cas d'exploration avec des procédés Métal. Nous retenons alors que l'exploration semble possible car une partie de ces connaissances sont accessibles depuis de nombreuses années mais semblent dormantes **[107]** et une seconde partie (relative à la fabrication Métal) a été peu explorée. Finalement, la veille technique conduite en amont des projets R&D a permis de révéler une somme de connaissances existantes et un espace d'exploration potentiel.

Afin d'explorer ce croisement entre la problématique technique donnée, « l'authentification de composants » et l'inclusion de corps étrangers, deux projets de R&D, nommés R&D1 et R&D2, ont été conduits avec deux approches différentes, décrites dans la section suivante.

Fig.61 (page suivante) - Inclusions de corps étrangers dans des composants polymère, extraits de [246], [239], [248], [243], [249]



3.2 Description des projets R&D1 et R&D2

Le projet R&D1 proposait de faire l'expérience de la fabrication additive à travers un corpus d'informations présenté sous la forme de différents objets tangibles. Les concepteur.trices pouvaient alors manipuler ces objets pour explorer la problématique technique soumise. Adoptant une approche différente, le projet R&D2 proposait de faire l'expérience de la fabrication additive par la pratique, la fabrication d'objets. Ces deux projets ont fait émerger, pour la R&D, des solutions et des principes qui ont donné lieu à deux dépôts de demande de brevets. Au-delà, ils ont fait émerger des constats liés au processus d'exploration et la prédominance de certains outils, rapportés ci-après.

Document confidentiel

3.2.1 Projet R&D1 : faire l'expérience de la fabrication additive par la manipulation d'objets tangibles

Seules les phases du projet dont l'observation a éveillé des questionnements pour cette thèse sont présentées ici. Cette description comporte donc des ellipses.

3.2.1.1 Population et supports

Nous avons conduit ce projet dans le cadre du challenge Fest'Innov 2014 organisé par l'école ECAM Lyon [35]. Ce challenge réunissant 200 étudiant.es pour rechercher des solutions innovantes à des problématiques soulevées par des entreprises, cela en seulement 24 heures, nuit comprise, dans une même salle. En ce sens, ce challenge peut être considéré comme une séance de créativité de groupe. La 6ème édition, à laquelle nous avons fait participer Poly-Shape, a convié 12 sociétés de secteurs industriels différents tels que, Fermob, Salomon, Alstom Transport, Volvo Trucks, ou encore le groupe SEB.
Un groupe de 11 étudiant.es était dédié à Poly-Shape pour répondre au problème suivant : « quelles solutions pour authentifier un composant en fabrication additive afin de lutter contre la contrefaçon ». La population participante est détaillée dans la table 6 ci-dessous.

Table 6 - Population participante au projet R&D1

Nombre	F	H	Cursus	Niveau de connaissances FA			
				Aucun	Débutant	Intermédiaire	Expert
7	2	5	Ingénierie généraliste (3ème et 4ème année)	X	-	-	-
				X	-	-	-
				X	-	-	-
				X	-	-	-
				X	-	-	-
				X	-	-	-
2	1	1	Design industriel	X	-	-	-
				X	-	-	-
2	1	1	Sciences de gestion	X	-	-	-
				X	-	-	-

[35] Fest'Innov le challenge innovation étudiants/entreprises http://www.ecam.fr/blog/festinnov-challenge-innovation-etudiantsentreprises-revient/

La majorité des participant.es était dans un cursus d'ingénierie mais cette équipe était aussi pluridisciplinaire : deux designers industriels et deux étudiant.es en sciences de gestion. L'ensemble des participant.es a déclaré n'avoir aucune connaissance sur la fabrication additive préalable à l'évènement. L'ensemble a également déclaré ne jamais avoir pratiqué l'impression 3D sur de petites machines domestiques ni la fabrication additive industrielle avant l'évènement.

Ainsi, dans ce projet R&D1, un corpus d'informations sur la fabrication additive pouvaient être manipulé, par ces concepteur.trices novices, grâce à divers objets tangibles. En amont de l'évènement, nous avions donc constitué ce corpus à partir d'informations issues de Poly-Shape et de la littérature. Nous avons présenté ce corpus aux participant.es sous les formes montrées dans la figure 62 ci-dessous. **2 posters** présentaient des photographies de composants existants et une illustration des secteurs industriels d'application correspondants. Le 3ème poster présentait, sous forme d'**une frise**, les étapes d'un processus de conception d'un composant pour la fabrication additive par Fusion de poudre par laser. **10 démonstrateurs** montraient les capacités des procédés de fabrication additive et des caractéristiques formelles et fonctionnelles possibles. **25 fiches d'informations** (annexe 1) sur la fabrication additive présentaient des Matériaux (x5), des Procédés (x5), des Post-traitements (x4) et des Contrôles (x6). Enfin, **5 vidéos** montraient les procédés en action.

Fig.62 – Objets tangibles incarnant les informations. De haut en bas, frise processus, démonstrateurs, poster et fiches d'informations

Document confidentiel

Les différents objets tangibles visaient à faciliter la manipulation des informations et l'intégration des connaissances pour inspirer les participant.es tout au long du projet. Le temps et les modalités de diffusion des informations sont représentés par la figure 63 ci-dessous.

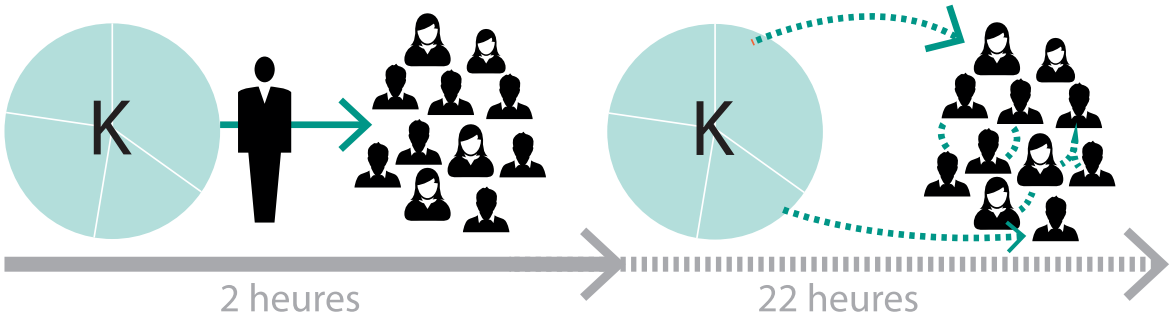


Fig.63 - Temps et modalités de diffusion des informations

Au début de l'évènement, 2 heures ont été dédiées à des présentations et explications orales des informations incarnées dans les objets. Dans la suite de l'évènement (soit 22 heures), les participant.es pouvaient enrichir leurs connaissances de manière autonome et individuelle par exemple en visionnant plusieurs fois les vidéos, en observant et manipulant les démonstrateurs, en lisant les versos des fiches A5 (extrait fig.64, complet en annexe 1) ou encore en croisant les fiches d'informations.

Fig.64- Les fiches « Contrôles » recto (à gauche) et verso (à droite)

I.elles pouvaient également enrichir leurs connaissances par des interactions sociales : en échangeant les informations avec leurs cooéquipier.es, en s'interrogeant mutuellement et en interrogeant une référente technique présente pour répondre aux questions des participant.es tout au long de l'évènement.

3.2.1.2 Observations et résultats du projet R&D1

A l'issue de cette introduction, le déroulement de la séance n'était pas imposé. Nous avons alors observé que les participant.es ont d'abord conduit un exercice de « purge ». Il s'agissait de réunir rapidement un maximum de solutions existantes pour authentifier des produits. Cet exercice a abouti à la formulation, par des mots-clés notés sur des Post-it, de 34 solutions existantes, regroupées en 8 familles selon leur similarité, relatives à différents secteurs tels que le Prêt-à-porter, le Luxe, la Santé, ou encore l'Automobile de grande série. Cette phase 1 est représentée sur la figure 65 ci-dessous.

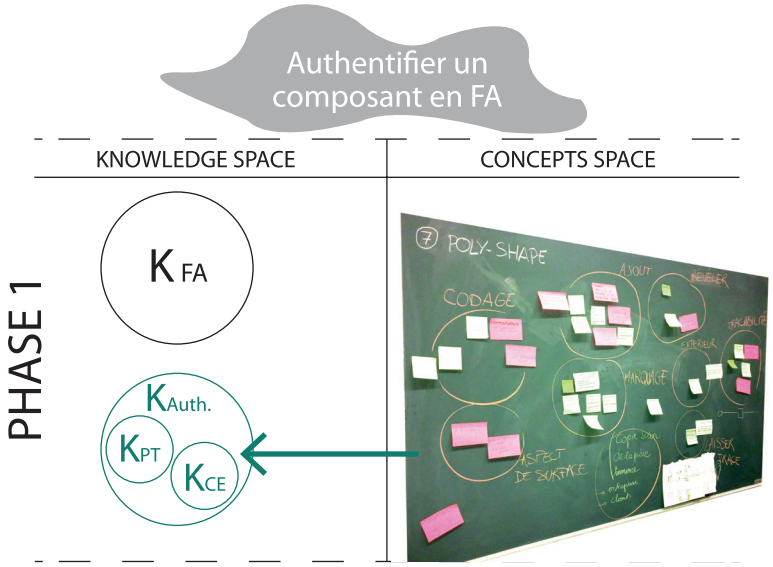


Fig.65 - Exploration des connaissances en Phase 1 du projet R&D1

Cette phase 1 leur a donc permis de constituer un corpus de connaissances sur l'authentification (K Auth. fig.64), relatif à des corps étrangers (K CE) et à des principes techniques existants (K PT). Bien que conduite immédiatement après la présentation des informations sur la fabrication additive (K FA), les informations réunies à l'issue de cet exercice étaient complètement dissociées de la fabrication additive.
Les participant.es sont ensuite entré.es dans la seconde phase de leur projet. I.elles ont alors conduit des cycles Génération-Représentation-Evaluation de différents concepts. L'observation de ce déroulement a permis de relever deux constats, d'une part relatifs aux objets tangibles apportés et d'autre part aux concepts générés.

Document confidentiel

Nos observations portaient d'abord sur l'utilisation des objets introduits en début de séance, elles sont visibles dans la figure 66 ci-dessous. Nous avons ainsi remarqué que les posters et la frise ont été peu questionnés et peu mobilisés par les participant.es au cours de la séance. A l'inverse, les fiches d'informations sont restées au centre de l'organisation spatiale. Elles ont été mobilisées à de multiples reprises par les participant.es pour argumenter et convaincre les autres de la pertinence de l'idée proposée au regard de la fabrication additive. Ces fiches ont également été consultées lorsque les participant.es « ne trouvaient plus d'idée », comme une source d'inspiration pour relancer un nouveau cycle Génération-Représentation-Evaluation. Les fiches « Post-traitements » et « Contrôles » ont été plus souvent mobilisées pour mettre en doute la faisabilité des idées proposées. Enfin, nous avons observé que 5 des participant.es associaient régulièrement un objet démonstrateur à des fiches d'informations pour argumenter leurs idées.

Fig.66 - Argumentation, Inspiration et associations entre démonstrateurs & fiches d'informations

Concernant les démonstrateurs apportés, nous avons observé que ceux-ci se situaient rarement au centre de l'organisation spatiale, ils ont plutôt été « éparpillés » dans l'espace dédié au groupe. Dans cette situation, les démonstrateurs n'ont donc pas joué le rôle de cadrage

spatial contrairement aux observations de Vinck **[160]** explicitées dans l'état de l'art (§2.9.4). Toutefois, 2 des dix démonstrateurs étaient régulièrement convoqués au centre des interactions sociales. Ceux-ci ont été régulièrement mobilisés pour contribuer à l'argumentation des idées. Nous avons également observé que 3 des participant.es manipulaient les démonstrateurs de manière inattendue, en les détournant de leurs fonctions techniques et/ou en les associant entre eux. Ces comportements ont entraîné un regroupement des participant.es autour des situations de manipulations inattendues et des questionnements sur les démonstrateurs.

Nous retenons alors que les démonstrateurs peuvent jouer un rôle dans le cadrage spatial s'ils sont « mis en scène » et si leur manipulation provoque de l'étonnement et des questionnements. Nous retenons également que les objets tangibles sont complémentaires d'autres formes tangibles, en l'occurrence des fiches d'informations. Les démonstrateurs semblent « augmenter » les informations apportées par les fiches. Fiches et démonstrateurs peuvent donc être associés. Enfin, nous retenons que les fiches d'informations associées à des démonstrateurs semblent permettre à des concepteur.trices novices de faire l'expérience de la fabrication additive. La manipulation aisée de ces supports semble alors contrebalancer le niveau élevé des connaissances à intégrer.

Nos observations ont ensuite porté sur le processus créatif conduit. Ainsi, nous avons relevé que les participant.es ont aisément associé les informations relatives à la fabrication additive découvertes en début de séance aux informations réunies lors de la phase de « purge » alors qu'aucun outil ne les orientait vers ce lien. Nous avons également remarqué que les concepts associant des informations sur des corps étrangers et des informations sur la fabrication additive ont fait l'objet de plus de discussions (argumentation / contre-argumentation) que les concepts générés à partir d'associations entre des principes techniques et des informations sur la fabrication additive. Les participant.es ont exprimé de fortes incertitudes sur la faisabilité des concepts intégrant des corps étrangers. I.elles ont estimé que les informations sur la fabrication additive apportées par les fiches d'informations étaient insuffisantes. I.elles ont également exprimé un besoin « d'avoir les corps étrangers à disposition » pour « tester leurs effets ». En conséquence, les concepts comportant des corps étrangers n'ont pas été retenus alors que, dans le même temps, les participant.es approfondissaient les concepts ne comportant pas de corps étrangers. Finalement, la figure 67 ci-dessous synthétise le processus conduit au regard de l'expansion dans les espaces connaissances et concepts.

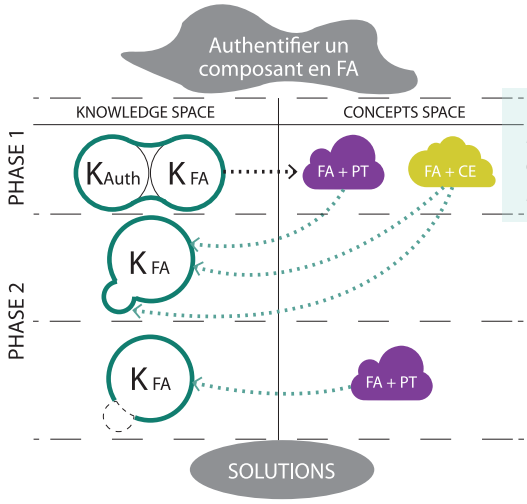


Fig.67 - Expansion des domaines connaissances et concepts dans le projet R&D1

Document confidentiel

En phase 1, les concepteur.trices ont associé deux domaines sources d'informations à priori éloignés et ont généré des concepts à partir de cette association. Cela a donc augmenté l'espace de connaissances apporté initialement. En phase 2, les concepts retenus comme étant à développer ne contenaient pas de connaissance relative aux corps étrangers. En conséquence, les concepteur.trices ont restreint leur exploration a une portion de l'espace de connaissances disponible alors que celui-ci avait été précédemment étendu. Cette portion de l'espace de connaissances utilisé pour retenir, finalement, trois solutions, est similaire à l'espace de connaissances apporté initialement par le corpus d'informations. En d'autres termes, ce projet R&D1 a exploité des connaissances déjà existantes. La traduction tangible de ces informations, notamment par les fiches information et les démonstrateurs, ont rendu ces connaissances explicites et ont permis leur exploration. Ce projet R&D1 a finalement abouti au dépôt d'une demande de brevet [36]. Les revendications de ce brevet sont relatives à une solution technique qui exploite les connaissances fabrication additive telles qu'elles sont déjà connues et non à des mises en œuvre possibles de l'expansion obtenue à l'issue de la Phase 1. Au regard de la typologie de régimes d'innovation explicité dans l'état de l'art (§2.7.1), on peut alors qualifier ce résultat de « brevet d'exploitation ».

3.2.1.3 Synthèse projet R&D1

Nous retenons finalement que, faire des associations entre des sources d'informations éloignées semble être un comportement spontané des concepteur.trices dans la première phase du processus créatif. Cette observation est cohérente avec les constats de notre état de l'art sur l'association de domaines sources comme principe de base de la créativité (§2.9.2.2). Mais il existe un risque que l'exploration ne soit pas conduite si ce comportement n'est pas encouragé ou facilité au fil du processus créatif. Il semblera alors nécessaire d'intégrer, dans notre modèle de créativité par et pour la fabrication additive, un dispositif stimulant ces associations entre des sources d'informations éloignées. Ce projet R&D1 a fait émerger une manière de faire l'expérience de la fabrication additive : par la manipulation d'objets tangibles incarnant des informations, notamment des fiches connaissances associées à des démonstrateurs.
En parallèle, nous avons conduit un second projet de R&D, noté R&D2. Celui-ci visait à faire l'expérience de la fabrication additive, par la pratique, par le fait de fabriquer des objets.

3.2.2 Projet R&D2 : faire l'expérience de la fabrication additive par la fabrication d'objets

Comme pour le projet R&D1, ne sont présentées que les phases du projet R&D2 dont l'observation a éveillé des questionnements relatifs à la définition d'un modèle de créativité par et pour la fabrication additive. Cette description comporte donc des ellipses.

[36] Demande de brevet n°1661707, novembre 2016. Inventeur.trices : Anne-lise Rias et al., titulaire : Poly-Shape

3.2.2.1 Population participante

L'exploration de la problématique R&D soumise a été réalisée dans ce projet R&D2 en faisant l'expérience de la fabrication additive par le « faire », c'est-à-dire en intervenant dans la fabrication. Ce projet a été conduit avec les ressources accessibles chez Poly-Shape. En ce sens, quatre concepteur.trices ont participé ainsi qu'un opérateur de production pour la mise en œuvre du procédé de Fusion de poudre métallique par laser. Cette population est synthétisée dans la table 7 ci-dessous.

Table 7 - Population participante au projet R&D1

Rôle	F/H	Niv. Connaissances FA
Conception	H	Intermédiaire
Conception	F	Intermédiaire
Conception	H	Débutant
Conception	H	Débutant
Fabrication	H	-

3.2.2.2 Conception et fabrication des objets

Les concepteur.trices ont d'abord réalisé une veille technologique pour réunir des informations sur les solutions existantes d'authentification, avec l'apport de corps étrangers ou sans. Cette phase est similaire à l'exercice de « purge » conduit par les participant.es du projet R&D1. Ainsi, les concepteur.trices ont pu créer un second pôle de connaissances, s'ajoutant à leurs connaissances sur la fabrication additive.

La seconde phase du projet visait à mettre en œuvre l'inclusion de corps étrangers en cours de fabrication additive. Ces corps étrangers ont été choisis selon ce que les concepteur.trices pouvaient se procurer aisément et selon la capacité de ces corps à réagir à un élément extérieur. Par exemple, le sulfate de cuivre anhydre devient bleu lorsqu'il est mis en présence de H2O. La liste de ces corps étrangers est présentée dans la table 8 ci-dessous.

Table 8 (page suivante) - Corps étrangers à inclure en Fusion de poudre métallique par laser

Document confidentiel

Modèles	Corps étranger(s) inclus
A	Sulfate de cuivre anhydre
B	Aimant
C	Pastille effervescente
D	Bille métallique
E	Huile + bille métallique
F	Liquides colorés
G	Fibres optiques
H	Jauges de déformations

Dans ce but, i.elles ont conçu des modèles géométriques très simples, de petites dimensions, suffisants pour maintenir en place les corps étrangers à inclure pendant la fabrication (notés A à G fig.68). Ces modèles n'ont pas d'autres fonctions que permettre de valider la bonne conservation des corps étrangers inclus.

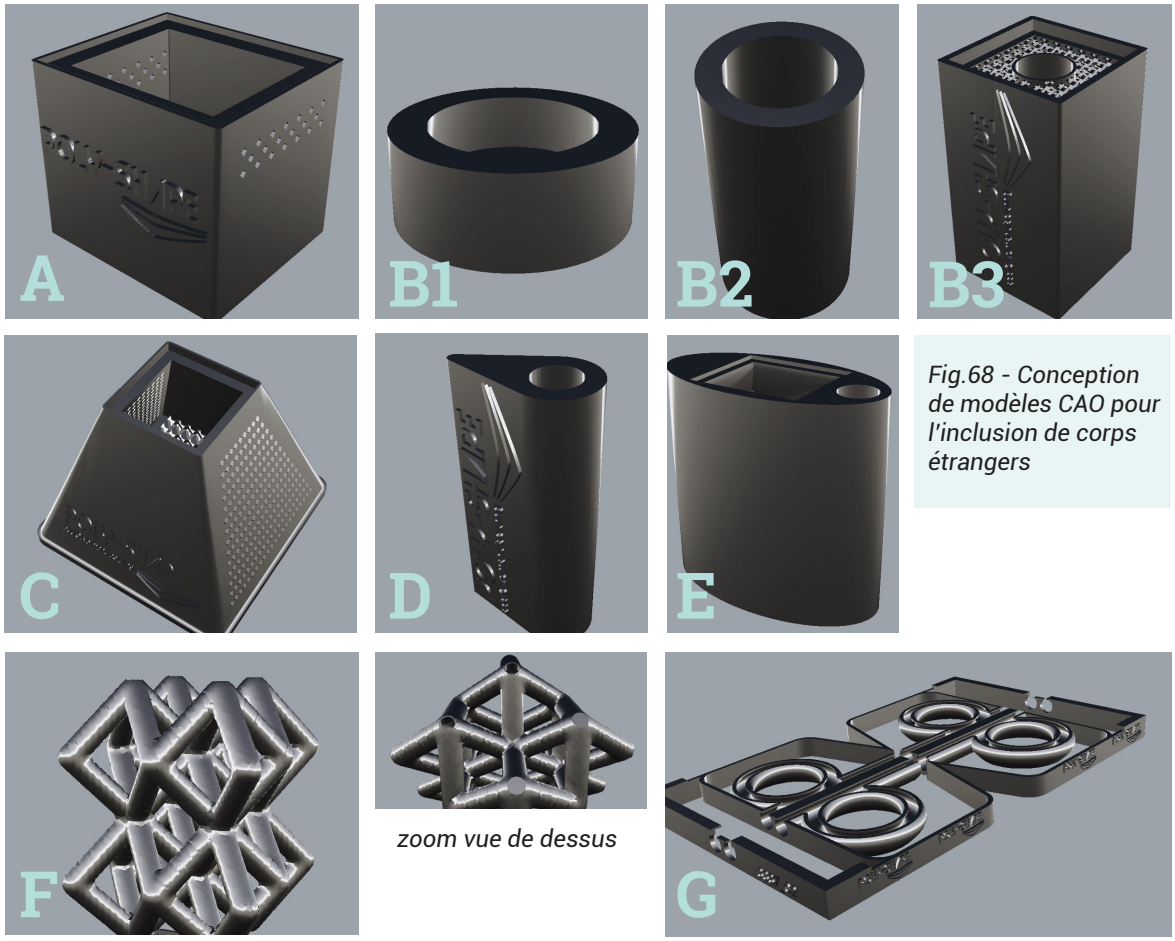


Fig.68 - Conception de modèles CAO pour l'inclusion de corps étrangers

Dans le même temps, nous avons mis au point un procédé d'interruption de la fabrication permettant d'inclure des corps étrangers en Fusion de poudre métallique par laser. Les grandes étapes de ce procédé sont illustrées sur la figure 69 ci-dessous. Ce procédé fait l'objet de notre dépôt de demande de brevet n°1661092.

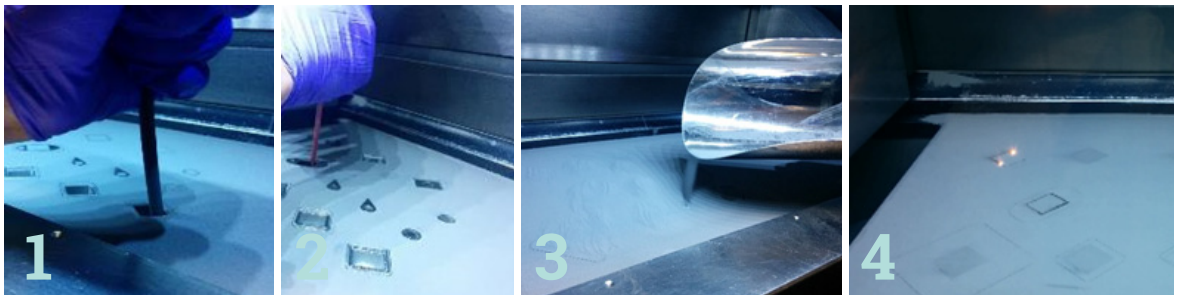


Fig.69 – Etapes principales du principe d'inclusion de corps étrangers en fusion de poudre métallique par laser

Il s'agit d'abord d'interrompre la production en cours pour accéder au lit de poudre. La poudre logée dans les cavités conçues, au préalable en phase de modélisation, pour accueillir le(s) corps étranger(s) peut alors être aspirée (image 1). Le corps étranger peut être inclus dans la cavité dépoudrée (image 2) avant que celle-ci ne soit refermée. La surface est ensuite repoudrée (image 3), de manière à pouvoir relancer la production avec les passages du laser (image 4).
Les deux premiers corps étrangers inclus (A et B, table 8) avaient été identifiés dans la phase de veille technique comme potentielles solutions pour l'authentification de composants. Mais, à l'issue de la fabrication réussie de ce premier lot, nous avons observé que les concepteur. trices ont souhaité explorer l'inclusion d'autres corps étrangers qui n'avaient pas été identifiés précédemment (C à H). Ainsi, l'approche « par le faire » a conduit à étendre l'exploration au-delà de la problématique technique initiale centrée sur l'authentification de composants, vers une exploration plus générale des possibilités de la technologie.
En ce sens, la figure 70 ci-dessous illustre l'expansion dans les espaces connaissances et concepts permise par cette approche.

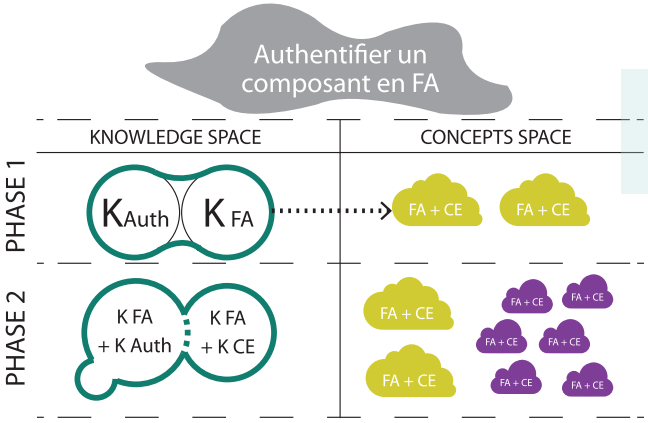


Fig.70 - Expansion par l'expérience de la fabrication

Document confidentiel

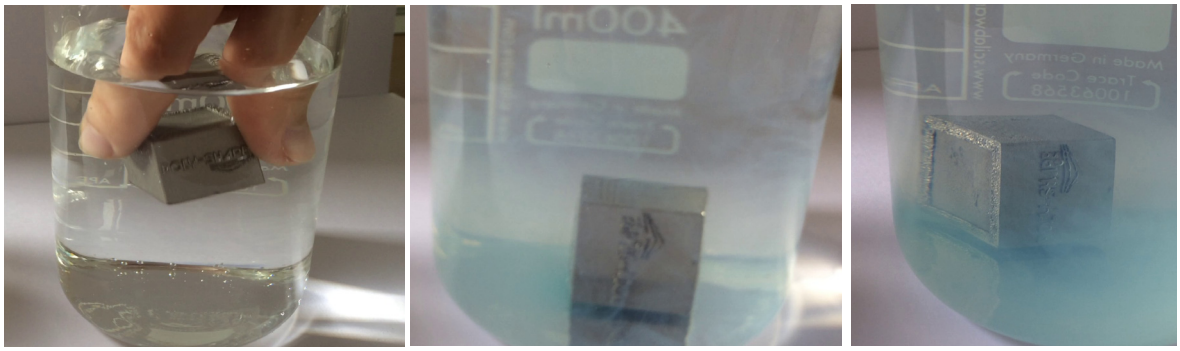
En phase 1, deux domaines sources d'informations ont été associés pour générer des concepts. Des modèles ont été conçus en vue de fabriquer ceux-ci. Les concepteur.trices ont donc pu faire l'expérience de la fabrication additive par la pratique. Le fait que la fabrication de ce premier lot ait abouti à décalé le point de vue des concepteur.trices au-delà de la problématique initiale. La problématique de l'authentification devenait un objectif parmi d'autres potentiels. Cette divergence a alors conduit à une expansion des connaissances, non seulement dans l'espace relatif à la problématique mais aussi dans un espace voisin, relatif à l'inclusion de corps étrangers en fabrication additive, sans lien avec l'authentification (Phase 2). Cette phase a abouti à l'obtention de multiples concepts ayant pour point commun le principe technique de l'inclusion et non l'authentification de composants.

Toutefois, cette approche « par la pratique », donc de type essais-erreurs, a également conduit à des échecs. Par exemple, l'inclusion de jauges de déformations n'a pas été fructueuse, leur manipulation étant délicate à cause de leur petite dimension. En ce sens, les informations liées à cette inclusion n'ont pas pu être explorées. Faire l'expérience de la fabrication additive par la pratique conduit donc aussi à réduire l'exploration selon les frontières de ce qui est techniquement réalisable.

3.2.2.3 Manipulation des objets obtenus

A l'issue de la fabrication, ces objets ont effectivement été testés pour in/valider la conservation des propriétés des corps étrangers inclus. **Nous avons alors observé que, au-delà de l'évaluation de la faisabilité technique, cette phase de manipulation des objets a déclenché des états de curiosité, d'étonnement et de surprise liés à la découverte des différents comportements de ces objets.** Ces états ont été observé chez les collaborateur.trices initialement impliqué.es dans le projet mais aussi plus largement dans l'entreprise. La manipulation de ces objets, présentée dans la figure 71 ci-après à spontanément provoqué des questionnements et des propositions de concepts, y compris par des collaborateurs non initialement impliqués dans le projet. Le caractère ludique de ces expériences a également été souligné. Ainsi, au-delà de la fabrication en elle-même, cette phase de manipulation des objets obtenus rejoint les constats de Mattelmäki **[178]**, Cruz **[250]** et Moussette **[185]** explicités dans l'état de l'art (§2.9.4). Ces objets déclenchent des expériences, par des manipulations sensori-motrices, qui elles-mêmes stimulent l'acquisition d'informations nouvelles et des émotions positives.

Fig.71 (page suivante) - Expériences de manipulation des objets comportant des corps étrangers

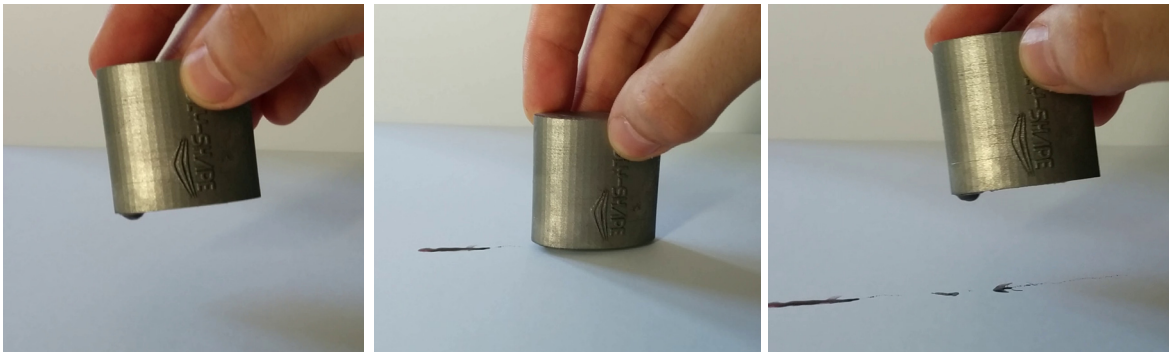


EXPERIENCE A

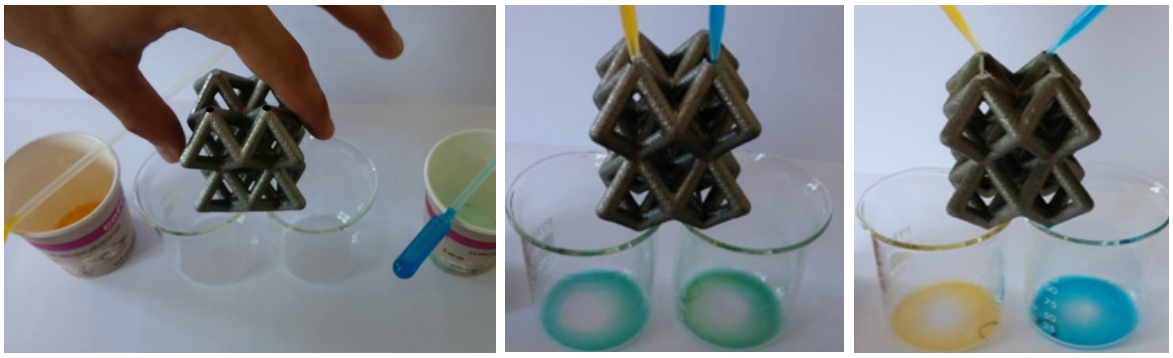
EXPERIENCES B1, B2 et B3

EXPERIENCE C

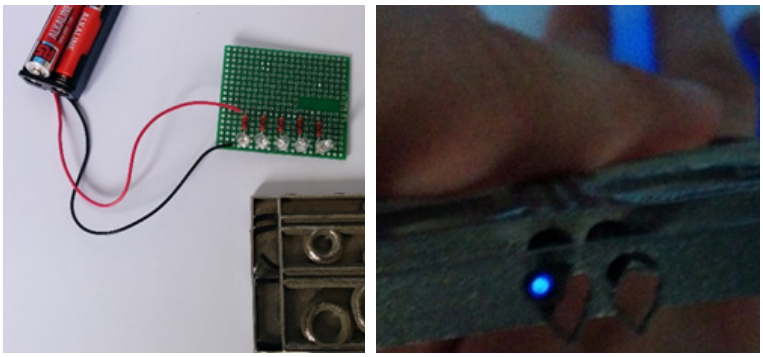
EXPERIENCE D



EXPERIENCE E



EXPERIENCE F



EXPERIENCE G

Fig.71 - Expériences de manipulation des objets comportant des corps étrangers

3.2.2.4 Observations et résultats du projet R&D2

Finalement, le processus créatif conduit par les acteur.trices du projet R&D2 a montré que l'inclusion de corps étrangers était en effet un moyen de répondre à la problématique initiale mais que cette exploration pouvait également répondre à d'autres problématiques, non formulées dans le cadre du projet R&D2.

En ce sens, la figure 72 ci-dessous synthétise le processus conduit au regard de l'expansion dans les espaces connaissances et concepts.

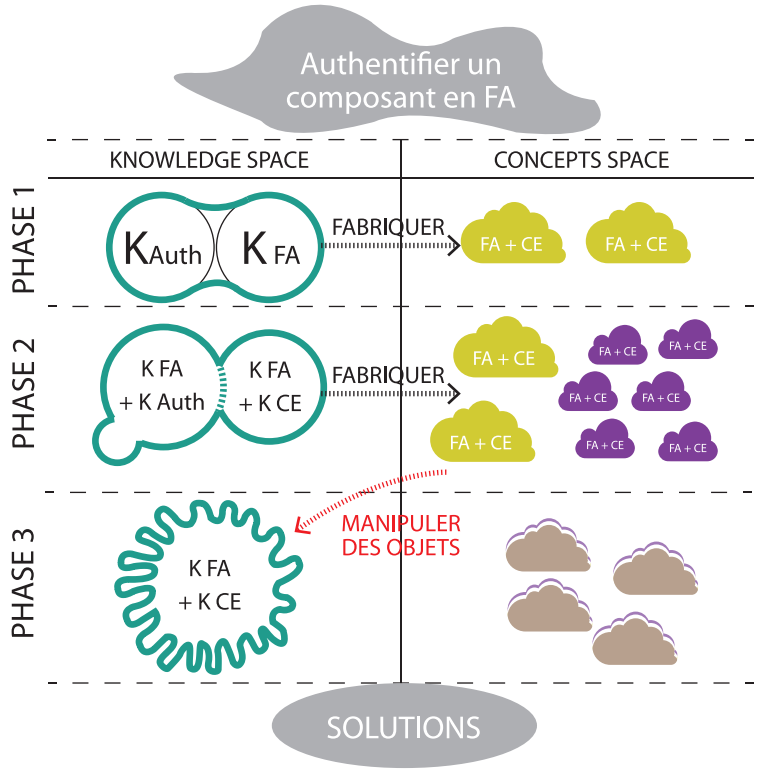


Fig.72 - Expansion dans les espaces connaissances et concepts pour le projet R&D2

En phase 1, les concepteur.trices ont associé des informations issues de deux domaines différents. La pratique de la fabrication additive a ensuite joué deux rôles. D'une part, cet outil a permis la construction de représentations externes des concepts. Ces représentations externes ont apporté des informations expansives et des informations restrictives au sens de Agogué **[155]**. En effet, l'obtention de ces objets a montré aux concepteur.trices qu'il est possible d'inclure des corps étrangers dans le procédé de Fusion de poudre métallique par laser, connaissances qu'i.elles n'avaient pas au début du projet, donc expansives. L'obtention d'une partie de ces objets et l'échec d'autres essais à également défini les frontières de la faisabilité technique de l'inclusion, donc restrictives. D'autre part, le fait de fabriquer a conduit les concepteur.trices à diverger au-delà de la problématique initiale. La multiplication des corps étrangers inclus a alors conduit à l'expansion des connaissances liées à la problématique mais aussi des connaissances initiales relatives à la fabrication additive (Phase 2).
En phase 3, La manipulation des objets obtenus par la fabrication a apporté de nouvelles informations aux concepteur.trices. Ces informations, bien que liées à la fois à la fabrication additive et aux corps étrangers, n'étaient pas disponibles avant cette phase de manipulation des objets. Disposant de nouvelles informations, les concepteur.trices ont une nouvelle fois généré des concepts.

Document confidentiel

Certains répondaient à la problématique donnée tandis que d'autres ne répondaient pas à cette problématique de l'authentification mais à d'autres, que les concepteur.trices avaient identifié durant leurs activités. Finalement, le processus créatif conduit a abouti au dépôt de 8 enveloppes Soleau ainsi qu'au dépôt d'une demande de brevet[37]. Les revendications de ce brevet sont relatives à plusieurs solutions techniques de mises en œuvre de l'expansion des connaissances obtenues par la conduite de ce processus créatif. Au regard de la typologie de régimes d'innovation explicité dans l'état de l'art (§2.7.1), on peut alors qualifier ce résultat de « brevet d'exploration ».

3.2.2.5 Synthèse projet R&D2

Nous retenons que faire l'expérience de la fabrication additive par la manipulation d'objets tangibles réalisés en fabrication additive semble déclencher des interprétations, des réactions qui dépassent la simple acquisition de nouvelles informations. Toutefois, nous avons également constaté que cette démarche nécessitait un temps particulièrement long et des moyens spécifiques, et que l'accès aux informations dépend de la réussite technique de la fabrication. En ce sens, faire l'expérience de la fabrication additive par la fabrication d'objets ne semble pas pertinent dans le cadre de séances de créativité de groupe, mais la manipulation d'objets tangibles semble être un moyen pertinent de faire l'expérience de la fabrication additive.
La section suivante s'attache à réunir les constats issus de notre état de l'art et les constats issus des projets R&D, dans le but de formuler notre problématique de recherche.

3.3 Formulation de la problématique et des hypothèses

Comme présenté précédemment, cette thèse suit les principes de la recherche-action (§1.2.2). L'un de ces principes indique que la problématique émerge conjointement de la littérature et de la pratique de terrain. En ce sens, cette section s'attache, dans un premier temps, à synthétiser les constats retenus de l'étude bibliographique et de l'étude terrain puis, dans un second temps, à formuler la problématique de recherche.

[37] Demande de brevet n° 1661092, novembre 2016. Inventeur.trices : Anne-lise Rias et al., titulaire : Poly-Shape

3.3.1 Synthèse des constats

La littérature liée à la fabrication additive a mis en évidence que :

Sur le terrain, un usage de la fabrication additive émerge aux côtés du prototypage rapide et de la fabrication rapide, que nous nommons « démonstration rapide ». Les composants utilisés en ce sens sont alors appelés « démonstrateurs ».

La littérature liée à la créativité a mis en évidence que :

La créativité est un système dont les composantes sont interdépendantes. Agir sur les motivations individuelles, les émotions, l'exploration des connaissances, l'alternance individuel/collectif et l'organisation spatiale permet d'agir sur l'ensemble du système créatif

Le processus créatif est co-évolutif, il est nécessaire de permettre l'expansion à la fois dans l'espace des connaissances (K) et dans l'espace des concepts (C)

L'expansion est nourrie par l'apport d'informations inter-domaines comportant du contenu inattendu. Les concepteur.trices associent ces différentes sources d'informations par un mécanisme d'analogie à un niveau plus ou moins élevé

La manipulation d'objets intermédiaires permet d'apporter des informations en faisant vivre des expériences. Elle déclenche des émotions positives et une augmentation des motivations intrinsèque et extrinsèque

La littérature liée aux méthodologies de conception a mis en évidence que :

Les méthodologies existantes de conception pour la fabrication additive (DFAM) limitent fortement l'exploration de l'espace de connaissances de la fabrication additive

Les méthodologies existantes de conception avec la fabrication additive (DWAM) permettent l'exploration de l'espace de connaissances mais en limitant celui-ci à un corpus de connaissances défini en amont, sans permettre son expansion

L'approche DTAM (Design Through Additive Manufacturing) favorise l'expansion des connaissances en proposant aux concepteur.trices de faire l'expérience de la fabrication additive pour acquérir de nouvelles informations

Cette thèse se positionne dans ce cadre théorique du Design Through Additive Manufacturing

La réalisation de deux projets de R&D a mis en évidence que :

Les concepteur.trices combinent spontanément différentes sources d'informations au début du processus créatif mais que l'exploration des possibilités données par ces combinaisons n'est, elle, pas spontanée. Elle doit être guidée.

Deux formes de traduction tangibles des informations fabrication additive sont complémentaires : les fiches d'informations et les démonstrateurs

Faire l'expérience de la fabrication additive par la manipulation d'objets fabriqués au préalable permet aux concepteur.trices de découvrir de nouvelles informations mais pas seulement. Cela déclenche aussi le ressenti d'émotions positives et l'initiation d'un nouveau cycle de génération de concepts

3.3.2 Problématique et hypothèses de résolution

Au début de ce document, l'observation et l'analyse du double contexte – industriel et académique- dans lequel s'inscrit cette thèse nous avaient conduit à formuler la question de recherche générale suivante : comment intégrer la créativité en innovation pour la fabrication additive, dans un contexte de co-développement ? A la suite, l'étude bibliographique et de terrain ont permis de souligner les leviers d'actions possibles pour répondre à cette question générale. Ainsi, les constats synthétisés dans la section précédente conduisent alors à préciser la question en formulant la problématique de recherche suivante :

« Comment faire l'expérience de la fabrication additive afin de favoriser la génération d'idées et de concepts créatifs ? »

« Faire l'expérience de la fabrication additive » renvoie directement au cadre théorique proposé par Bolzan **[222]** dans lequel s'inscrit la méthodologie que nous proposerons : le *Design Through Additive Manufacturing* (DTAM). Le terme *through* ou « au travers de » indique cette notion d'expérience. Par la notion d'expérience, cette problématique induit une remise en question des statuts des objets intermédiaires qui articulent les différentes dimensions du système créatif. Ce questionnement engendrera une nouvelle définition des objets intermédiaires au regard de la fabrication additive.

Pour répondre à cette problématique, deux hypothèses sont formulées et présentées ci-dessous. Elles seront testées dans le cadre d'expérimentations en terrain industriel.
Avec la première hypothèse (H1) nous présumons que, pour favoriser la génération d'idées créatives, il est nécessaire de stimuler le processus en manipulant des cartes d'informations augmentées de démonstrateurs (que nous synthétisons sous l'expression « Cartes-Objets). Nous formulons alors l'hypothèse comme suit :

H1 : la stimulation par la manipulation d'un objet instrument de type « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées créatives

Avec la seconde hypothèse, nommée H2, nous présumons que stimuler le processus de créativité par et pour la fabrication additive avec un dispositif permettant à des concepteur.trices de manipuler des objets réalisés en fabrication additive pour découvrir les informations qu'ils incarnent permettrait de favoriser la génération d'idées puis de concepts créatifs. Nous formulons alors l'hypothèse comme suit :

H2 : la stimulation par la manipulation d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise la génération d'idées et de concepts créatifs

Dans la section suivante, nous formalisons notre proposition d'un modèle de créativité par et pour la fabrication additive.

3.4 Proposition d'un modèle de créativité par et pour la fabrication additive

Cette étude mixte entre état de l'art et étude terrain a permis de remarquer que, à notre connaissance, il n'existe pas de méthodologie liant créativité et fabrication additive ; ni de méthodologie de créativité donnant aux concepteur.trices l'opportunité de faire l'expérience de la fabrication additive. En ce sens et à partir des constats rapportés, nous modélisons une **méthode de créativité par et pour la fabrication additive** en cinq phases, illustrée par la figure 73 ci-après. Ce modèle est destiné à accompagner l'exploration d'une thématique de recherche & développement, lorsque celle-ci est menée par un département de RID (Recherche-Innovation-Développement). En conséquence, il est destiné aux situations de co-développement entre une entreprise initiatrice et une entreprise partenaire. Plus précisément, il est destiné à guider les activités de concepteur.trices utilisant habituellement peu leur capacité créative et à des acteur.trices d'entreprises industrielles non expert.es de la conception, de la fabrication additive ou de la créativité.

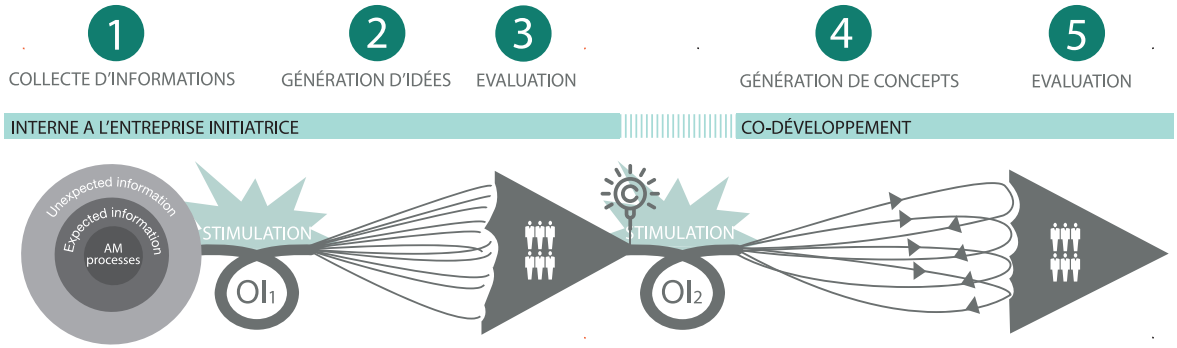


Fig.73 – Modèle préliminaire de la créativité par et pour la fabrication additive

Document confidentiel

Nous avons décrit les caractéristiques de l'innovation lorsqu'elle est placée à l'articulation de la recherche et du développement (§2.7.1). En cohérence avec ce régime nommé Exploration, les phases 1, 2 et 3 devraient se dérouler au sein de l'entreprise initiatrice du projet d'exploration (en l'occurrence Poly-Shape). Ces trois premières phases devraient alors aboutir à une capitalisation de connaissances et/ou d'idées par le dépôt de brevets. A la suite, les phases 4 et 5 se dérouleraient alors en co-développement, c'est-à-dire avec une entreprise partenaire. Ces phases visent à mettre à disposition d'une entreprise partenaire des informations recueillies dans les phases précédentes. Ce partage vise à accompagner la génération d'idées et de concepts créatifs pour projeter de nouvelles applications de la fabrication additive dans le secteur industriel impliqué. Chaque phase est détaillée ci-après.

Phase 1 : collecte d'informations

La première tâche consiste à s'assurer que les concepteur.trices disposent des connaissances de bases de la fabrication additive : le principe de la fabrication par couches et les différents procédés. Les concepteur.trices sont ensuite invité.es à collecter des informations attendues au regard de la fabrication additive (i.e *Expected*) et des informations issues d'autres domaines, à priori éloignés de la fabrication additive (i.e *Unexpected*).

OI1 : conception et fabrication d'un dispositif

Ce projet consiste à concevoir une traduction tangible des informations recueillies dans la phase 1. Cette traduction tangible vise à mettre les informations *Expected* et *Unexpected* à disposition des concepteur.trices de l'entreprise initiatrice du projet pour favoriser leur exploration. Selon les constats réunis par l'état de l'art et le projet R&D1, ce dispositif devra comporter en priorité des cartes d'informations augmentées d'objets tangibles.

Phase 2 : génération d'idées

Dans la phase 2, les concepteur.trices sont invité.es à associer des informations *Expected* et *Unexpected* pour générer des idées répondant au brief de R&D soumis. Nous présumons qu'il est alors nécessaire de stimuler dans cette tâche les concepteur.trices ayant peu l'habitude d'utiliser leur capacité créative. En ce sens, nous proposons d'utiliser le dispositif tangible conçu précédemment comme outil de stimulation. Dans cette optique, le dispositif de stimulation aura pour rôle, en plus d'incarner des informations, de stimuler le raisonnement créatif. Selon les constats réunis par l'état de l'art sur la créativité et les projets R&D, le dispositif devra stimuler par la logique de rencontres forcées aléatoires. Selon les principes soulignés dans l'état de l'art, la représentation des idées devrait être guidée par l'utilisation de gabarits. En ce sens, plusieurs fiches idées sont attendues comme données de sortie de cette phase. La phase suivante visera alors à évaluer ces fiches idées.

Phase 3 : évaluation

L'évaluation est conduite par 6 expert.es de la fabrication additive, issu.es en priorité de l'entreprise initiatrice et éventuellement d'expert.e extérieur.e, sous couvert d'accord de confidentialité. L'évaluation vise à identifier les idées qui peuvent être capitalisées par la propriété intellectuelle. Autrement dit, cette phase devrait aboutir à une capitalisation par dépôt de brevets.

OI2 : conception et fabrication d'un dispositif

Ce projet consiste à concevoir une traduction tangible des informations et idées générées et sélectionnées dans les phases 2 et 3. Cette traduction tangible visera à mettre le contenu à disposition des partenaires de co-développement pour favoriser leur exploration.
Selon les constats réunis par l'état de l'art sur les objets déclencheurs d'expériences et par le projet R&D2, ce dispositif devra comporter en priorité des objets tangibles réalisés en fabrication additive, qui devront être manipulés pour découvrir les informations qu'ils incarnent.

Phase 4 : génération de concepts

Cette phase marque la transition entre un processus mené en interne et les phases de co-développement. Elle représente le cœur de cette démarche de créativité par et pour la fabrication additive. Les partenaires de co-développement sont invité.es a exploré les informations relatives à la fabrication additive apportées pour générer des concepts créatifs projetant de futures applications destinées au secteur industriel impliqué. Comme vu dans l'état de l'art, le concept est un niveau de définition plus avancé que l'idée. Cette phase commence donc par la génération d'idées qui conduiront à la génération de concepts, tâche qui nous intéresse. Nous présumons qu'il est nécessaire de guider les acteur.trices dans cette phase car i.elles sont novices en conception, en fabrication additive et utilisent peu leur capacité créative dans le cadre de leurs activités habituelles. En ce sens, nous proposons d'utiliser le dispositif tangible conçu précédemment comme outil de stimulation. Dans cette optique, le dispositif de stimulation aura pour rôle d'incarner des informations techniques mais aussi de stimuler la capacité créative. Selon les constats réunis par l'état de l'art et le projet R&D2, les manipulations du dispositif devront provoquer des états de surprise, d'étonnement et de satisfaction. Egalement selon les principes soulignés dans l'état de l'art, la représentation des concepts devrait être guidée par l'utilisation de gabarits. Cette phase devrait donc aboutir à un portfolio de fiches concepts dont la valeur pour ces deux entreprises sera évaluée dans la phase suivante.

Phase 5 : évaluation

L'objectif de cette phase est d'identifier au moins un concept créatif pour le secteur industriel concerné, ainsi que d'évaluer la valeur des idées et concepts « suspendus » selon l'expression de Yannou **[190]**, **[97]** c'est-à-dire ne répondant pas au brief soumis mais valables pour d'autres briefs. L'évaluation est réalisée par 6 personnes mélangeant expert.es de la fabrication additive et expert.es du secteur impliqué. L'évaluation concerne d'abord les idées, pour identifier celles qui peuvent être capitalisées par des dépôts de brevets. La valeur pour capitalisation est ensuite évaluée au stade des fiches concepts, ainsi que leur valeur de co-développement.

Lorsque au moins un des concepts pertinents a été identifié, le processus de conception créative peut être poursuivi de manière conventionnelle, par du prototypage, etc. Ce modèle de créativité par et pour la fabrication additive ne traite pas ces phases avales du processus.

Document confidentiel

Synthèse du chapitre 3

Ce chapitre 3 a rapporté des constats observés par la réalisation de deux projets R&D, que nous avons associés aux constats mis en évidence par l'état de l'art. Nous avons également introduit le cas d'application que nous traiterons en phases expérimentales : l'exploration de l'intégration de fonctions par l'inclusion de corps étrangers en fabrication additive. Nous avons ensuite formulé la problématique de recherche suivante : « comment faire l'expérience de la fabrication additive afin de favoriser la génération d'idées et de concepts créatifs ? » et proposé un modèle de créativité par et pour la fabrication additive en cinq phases, destiné à des concepteur.trices et des acteur.trices de projet qui utilisent habituellement peu leur capacité créative. Pour stimuler leur capacité créative, en vue d'explorer une thématique de R&D, nous avons formulé les deux hypothèses suivantes :

- **H1** : la stimulation par la manipulation d'un objet instrument de type « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées créatives
- **H2** : la stimulation par la manipulation d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise la génération d'idées et de concepts créatifs

Le chapitre suivant présentera les phases expérimentales confrontant au terrain industriel le modèle de créativité par et pour la fabrication additive proposé. Nous décrirons donc une pré-expérimentation puis les expérimentations #1 et #2, entrecoupées de la conception et fabrication des deux dispositifs de stimulation nécessaire au déroulement de ce modèle.

CHAPITRE 4

EXPÉRIMENTATIONS, RÉSULTATS ET MODÈLE ENRICHI

CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTATIONS, RÉSULTATS ET MODÈLE ENRICHI

Introduction du chapitre 4

Comme illustré sur la figure 74 ci-dessous, les projets R&D1 et R&D2 présentés dans le chapitre précédent ont contribué, avec l'étude bibliographique, à formuler la problématique, les hypothèses de résolution et le modèle préliminaire de créativité par et pour la fabrication additive.

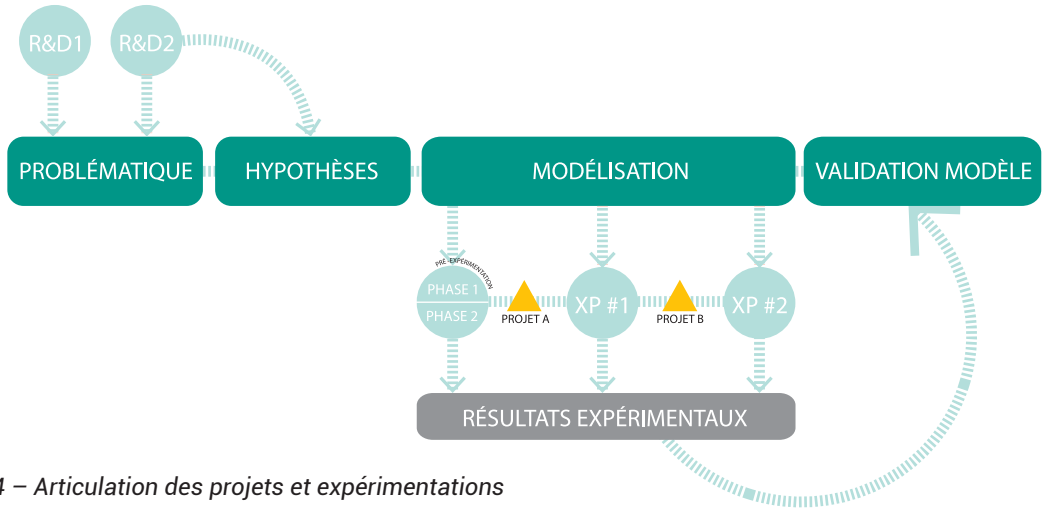


Fig.74 – Articulation des projets et expérimentations

En conséquence, ce chapitre 4 présente la mise en application, sur le terrain industriel, du modèle de créativité par et pour la fabrication additive proposé dans le chapitre précédent. Ainsi, nous présentons d'abord le plan expérimental projetant une pré-expérimentation en deux phases puis les expérimentations #1 et #2 (§4.1).

La pré-expérimentation, correspondant à la phase 1 du modèle proposé, visait à collecter des informations *Expected* et *Unexpected* (§4.2). Ces informations seront utilisées comme données d'entrée de l'expérimentation #1. Dans cette optique, ces informations seront traduites sous la forme d'un dispositif tangible. [Projet A] décrit la conception et fabrication de ce dispositif, correspondant à « OI[1] » sur le modèle proposé. Ce dispositif sera nommé « Cartes-Objets » (§4.3). L'expérimentation #1 décrite à la suite visera à observer les effets de la stimulation par ce dispositif, dans le cadre d'une séance de créativité conduite avec les collaborateur.trices de Poly-Shape (§4.4). Les résultats seront présentés et discutés.

La section [projet B] décrira ensuite la conception et fabrication du second dispositif, nommé « AMIO », pour *Additive Manufacturing of Intermediate Objects* (§4.5). Nous rapportons à la suite protocole, résultats et discussion de l'expérimentation #2. Celle-ci visera à observer les effets de la stimulation par le dispositif « AMIO », dans le cadre d'une séance de créativité de groupe conduite avec une entreprise partenaire de co-développement (§4.6).
Enfin, les résultats expérimentaux sont synthétisés pour présenter une version enrichie du modèle de créativité par et pour la fabrication additive proposé (§4.7).

4.1 Plan expérimental

Le plan expérimental prévu pour tester le modèle de créativité par et pour la fabrication additive et les deux hypothèses compte trois étapes, articulées par la réalisation des projets A et B (fig. 75).

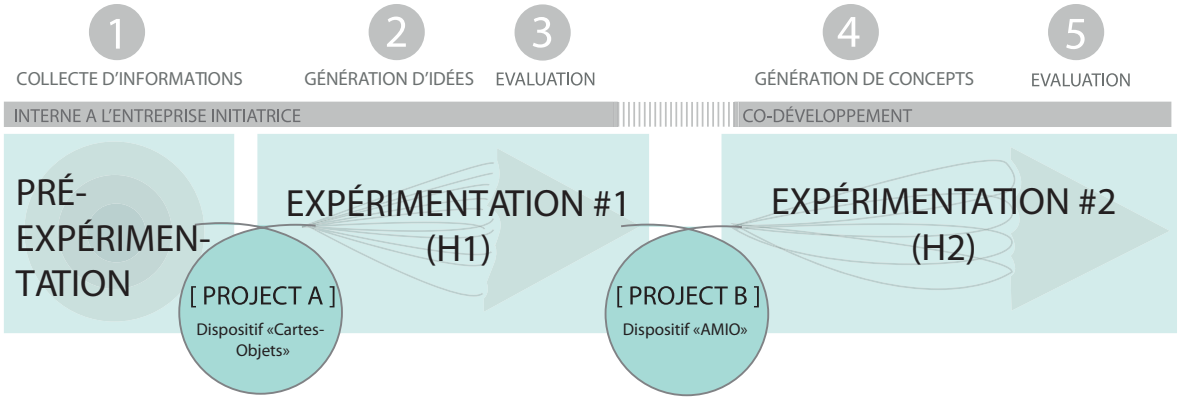


Fig.75 - Plan expérimental

La première phase de notre modèle « Collecte d'informations » n'est pas observée dans le cadre de ces travaux, elle fait donc simplement l'objet d'une pré-expérimentation visant à recueillir les informations attendues et inattendues nécessaires pour explorer la thématique de l'intégration de fonctions en fabrication additive.

Document confidentiel

L'expérimentation #1 concerne les phases 2 et 3 du modèle, c'est-à-dire la génération d'idées et leur évaluation. Nous conduirons une étude comparative entre une population test et une population témoin pour observer les effets de la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » selon l'hypothèse H1 : la stimulation par la manipulation d'un objet instrument de type « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées créatives. Cette étude sera conduite lors de séances de créativité conduites chez Poly-Shape, avec une démarche d'observation participante. La validation de l'hypothèse H1 sera conduite au regard des critères de :

- La quantité de fiches idées générées
- La fluidité des participant.es à la séance
- L'adéquation des fiches idées vis-à-vis du brief donné
- La faisabilité en fabrication additive
- La nouveauté des fiches idées
- La variété des fiches idées
- La brevetabilité des fiches idées

L'expérimentation #2 concerne les phases 4 et 5 du modèle, c'est-à-dire la génération de concepts et leur évaluation. Nous conduirons une étude comparative pour observer les effets de la stimulation par le dispositif « AMIO » conçu au préalable, selon l'hypothèse H2 : la stimulation par la manipulation d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise la génération d'idées et de concepts créatifs. La validation de l'hypothèse H2 sera conduite au regard des critères de :

- La quantité de fiches idées générées
- L'adéquation des fiches idées au brief donné
- La valeur de co-développement des fiches concepts
- La brevetabilité des fiches idées et des fiches concepts
- La mise en situation en co-développement entre l'entreprise initiatrice et l'entre--prise partenaire

Ainsi, le modèle de créativité par et pour la fabrication additive proposé sera confronté à un projet d'exploration réel : l'intégration de fonctions en fabrication additive par l'inclusion de corps étrangers, tel que décrit précédemment (§3.1).

4.2 Pré-expérimentation : « La collecte d'informations »

4.2.1 Objectif

Cette pré-expérimentation visait à appliquer les constats de Bonnardel **[153]** puis Mougenot **[29]**. L'adaptation des sources d'informations à une cible de conception favorise le mécanisme d'analogie (§2.9.2). Il s'agissait alors de collecter les informations *Expected* et *Unexpected*, nécessaires à l'exploration de la thématique d'intégration de fonctions par inclusion de corps

étrangers. En vue de circonscrire aux hypothèses émises le temps consacré aux expérimentations, cette phase a été conduite sous la forme d'une pré-expérimentation, avec des populations d'étudiant.es et non professionnelles.
Cette pré-expérimentation s'est déroulée en 2 phases. La phase 1 visait à collecter les informations « *Expected* » selon les définitions identifiées dans l'état-de-l'art (§2.9.2). Dans notre cas d'application, il s'agit plus précisément des formes et fonctions typiques de la fabrication additive. La phase 2 visait à collecter les informations « Unexpected ». Dans notre cas, il s'agissait de types de corps étrangers qui pourraient être inclus, leurs propriétés et fonctions possibles.

4.2.2 Phase 1 : collecte des informations « Expected »

La méthode de collecte utilisée est basée sur les définitions de Ullman **[126]** et les travaux de Maidin **[213]**. Selon Ullman **[126]**, un composant peut être défini par les relations formes/fonctions qu'il présente. Cette relation est appliquée aux composants illustrés par les images fournies dans cette phase 1. Par ailleurs, Maidin **[213]** montre que des caractéristiques formelles et fonctionnelles peuvent être extraites à partir d'une base de données d'images de composants existants réalisés en fabrication additive. Cependant, la base d'images proposée par Maidin présente plus d'existants réalisés par les procédés Polymère que par les procédés Métal, alors que ces derniers ont été identifiés comme étant phares et prometteurs. En outre, cette base présente une majorité d'existants qui concernent des secteurs industriels trop éloignés du champ de nos travaux tels que le Mobilier ou la Bijouterie.
En ce sens, nous avons réuni une base d'images de composants existants réalisés par des procédés Métal et relatifs à 7 secteurs industriels : Aéronautique, Médical, Outillage, Spatial, Automobile, Robotique et Energie.

4.2.2.1 Population et lieu

Cette phase 1 a été réalisée avec une population de 22 concepteur.trices novices, plus précisément des étudiant.es de Master 2 en Conception de produits & Innovation, âgée.es de 22 à 31 ans. Les profils étaient variés comme suit :

- 14/22 issu.es d'un cursus Ingénierie
- 8/22 issu.es d'un cursus Design industriel
- 5 femmes et 17 hommes

La tâche donnée était individuelle. Ces concepteur.trices présentaient un niveau de connaissance en fabrication additive évalué comme faible pour la majorité de cette population.

Document confidentiel

4.2.2.2 Dispositif pour la phase 1

Le dispositif utilisé pour la phase 1 comprend des images de composants existants et un questionnaire en ligne (fig.76).

Nous avons réuni 52 images différentes de composants existants réalisés en fabrication additive, en postulant qu'elles étaient représentatives des 7 secteurs industriels mentionnés. Nous avons ensuite constitué des **séries de 4 images** de manière aléatoire, représentant à chaque fois quatre secteurs industriels différents. Nous considérons que ces images sont des représentations visuelles mixtes au sens où elles présentent une photo au recto et une légende textuelle donnant l'appellation du composant et sa source au verso.
Nous avons également conçu un **questionnaire en ligne** [38] comptant 16 questions. Les 3 premières questions visent à recueillir des informations sur le profil du ou de la répondant.e. Les 9 questions suivantes les guidaient pour extraire les caractéristiques formelles et fonctionnelles typiques de la fabrication additive. Enfin, les 4 dernières questions permettent de recueillir des feedbacks sur l'activité elle-même, c'est-à-dire sur l'extraction d'informations à partir d'images.

Fig.76 - Dispositif utilisé pour la pré-expérimentation (Phase 1)

4.2.2.3 Tâches, durées et données attendues

La tâche durait 30 minutes pour chaque répondant.e. Après l'introduction expliquant la tâche à réaliser, il était demandé de décrire les caractéristiques formelles particulièrement remar-

[38] Questionnaire Les stéréotypes de la fabrication additive https://anneliserias.typeform.com/to/pPo8vj

quables dans les images données, en écrivant 1 à 3 adjectifs et/ou noms par image. Les caractéristiques fonctionnelles remarquables devaient ensuite être identifiées et nommées par 1 à 3 verbes par image. Cela permettait aux répondant.es d'exprimer des synonymes pour préciser les caractéristiques identifiées. Les réponses au questionnaire étaient recueillies de manière à conserver les liens entre les qualificatifs formels et fonctionnels tels qu'écrits par les répondant.es. Nous parlerons alors ici de « couples formes/fonctions ».

A l'issue du recueil des réponses, le degré de « typicalité » a été défini selon la fréquence d'occurrence des couples exprimés. Les formes et fonctions les plus souvent exprimées seront alors considérées comme étant typiques de la fabrication additive. Ces caractéristiques typiques seront ensuite incarnées dans des objets modélisés puis fabriqués. Les objets obtenus à l'issue de la fabrication additive seront alors appelés « **objets typiques** ».

4.2.2.4 Résultats : 8 couples formes/fonctions typiques de la fabrication additive

Finalement, nous avons recueilli 242 termes exprimant les caractéristiques formelles et 251 termes exprimant les caractéristiques fonctionnelles. Selon Maidin **[213]**, les fonctions et formes de la fabrication additive peuvent êtres communes à plusieurs secteurs industriels. En conséquence, nous réalisons un codage lexical basé sur la proximité sémantique pour regrouper les termes et former une taxonomie plutôt qu'une catégorisation par secteur industriel.

Au total, 383 couples formes/fonctions ont été exprimés. Cette taxonomie fait alors apparaître 31 familles de caractéristiques formelles et 39 familles de caractéristiques fonctionnelles.

Le codage par fréquence d'occurrence, synthétisé sur le diagramme ci-dessous (fig.77), fait apparaître les couples formes/fonctions les plus souvent exprimés par les répondant.es.

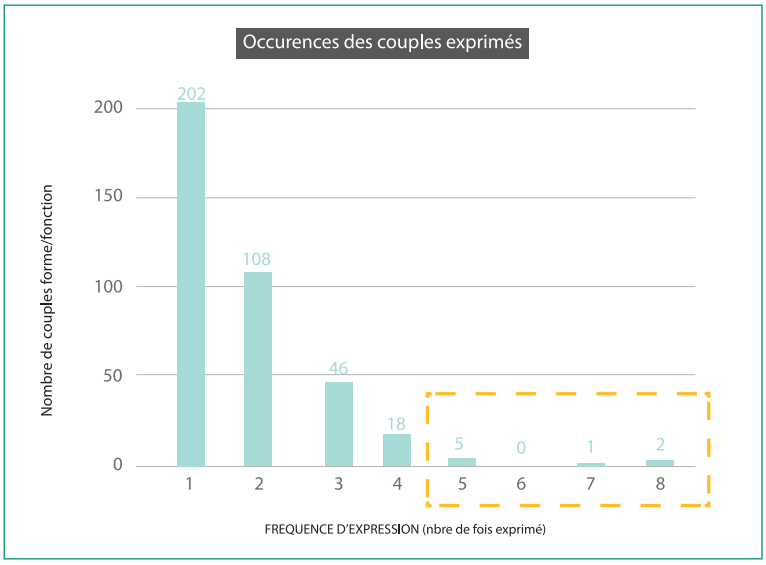


Fig.77 - 8 couples formes/fonctions typiques de la fabrication additive

Document confidentiel

L'abscisse indique le nombre de fois qu'un couple a été exprimé. L'ordonnée correspond au nombre de couples exprimés. Il apparaît que la majorité des couples formes/fonctions (202) n'ont été exprimés qu'une seule fois. On en déduit que ceux-ci ont un très faible degré de typicité. A l'opposé, (encadré pointillé sur le diagramme), 5 couples ont été exprimés 5 fois, 1 couple exprimé 7 fois et 2 couples exprimés 8 fois, à chaque fois par des répondant.es différent.es. **Nous en déduisons alors que ces 8 couples formes/fonctions peuvent être considérés comme typiques de la fabrication additive.** Il est donc très probable que ces caractéristiques formelles et fonctionnelles soient courantes dans les différentes industries qui explorent la fabrication additive.
La table 9 ci-dessous détaille ces 8 couples apparus comme typiques de la fabrication additive, tels que formulés par les répondant.es.

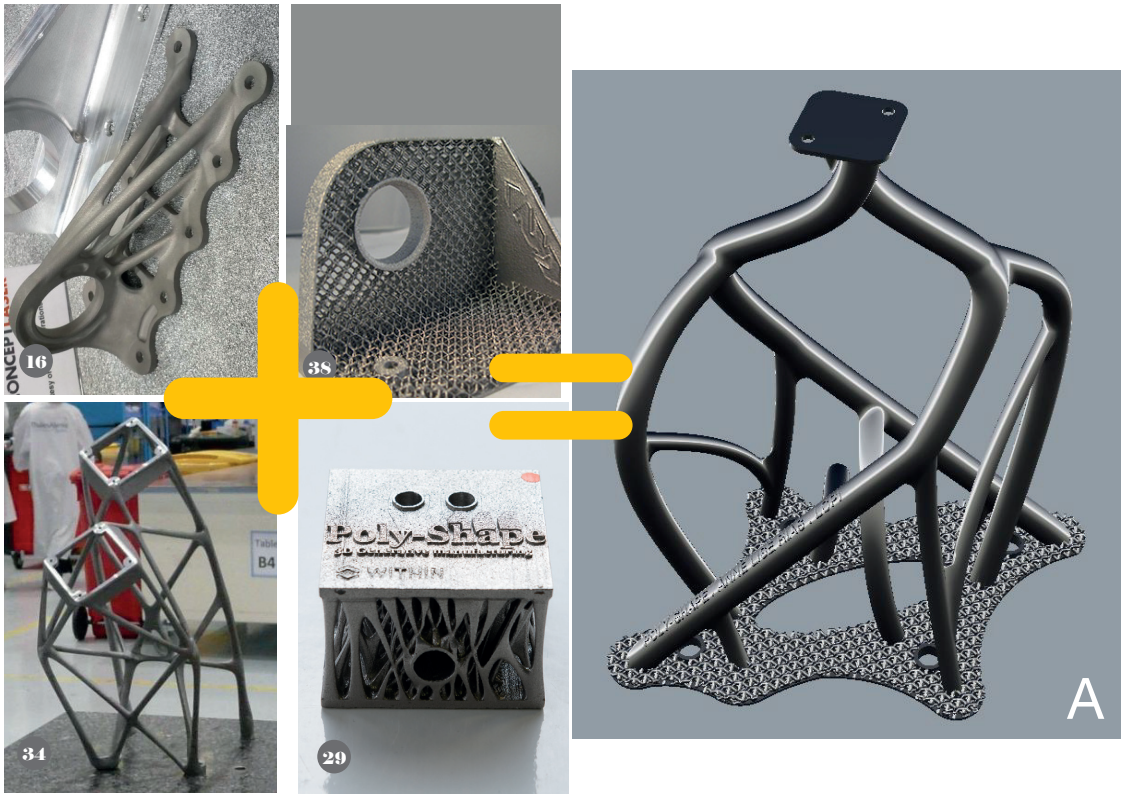
Table 9 - Les 8 couples formes/fonctions typiques de la fabrication additive

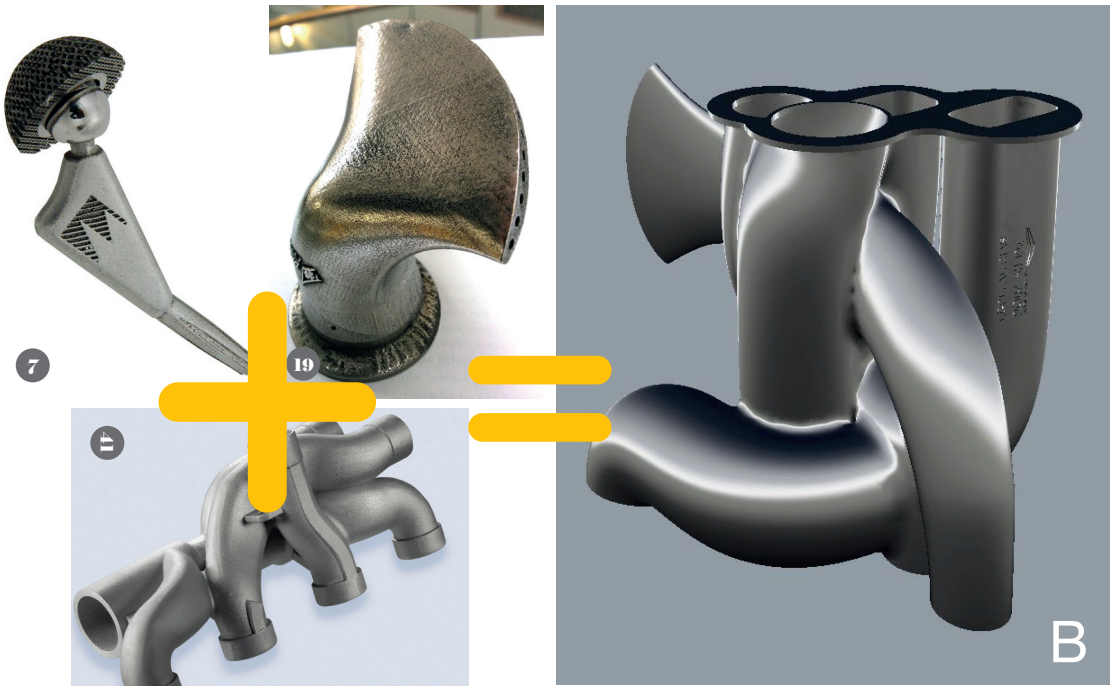
Couple A	« A la fois courbe et raide + Alléger »
Couple B	« Formes évolutives + Assembler par insertion »
Couple C	« Surfaces courbées + Mettre en forme »
Couple D	« Renfort gainé nervuré + Se fixer sur une surface »
Couple E	« Formes évolutives + Mélanger des flux »
Couple F	« Formes évolutives + Alléger »
Couple G	« Surfaces texturées (dentelé, cannelé, rugueux, granuleux) + Alléger »
Couple H	« Solides mobiles en rotation + Faire circuler des flux »

Ces couples formes/fonctions typiques sont retenus comme étant les informations « *Expected* », c'est-à-dire les informations attendues, au regard de notre thématique sur l'exploration de l'intégration de fonctions en fabrication additive. Il est en effet très probable que tout acteur.trice, expert.e ou non, ait déjà rencontré ces caractéristiques.

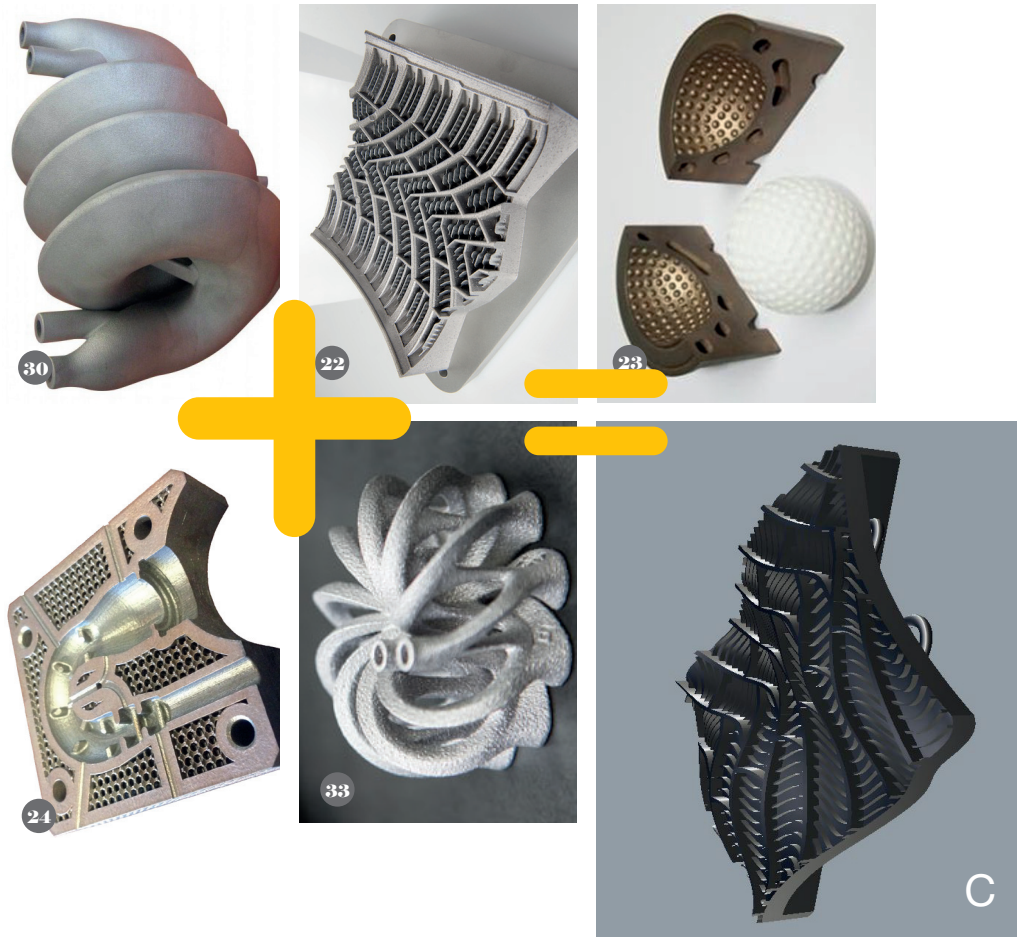
A l'issue de cette phase 1, ces couples ont été utilisés pour modéliser en 3D et fabriquer les objets tangibles incarnant ces informations. La figure 78 détaille la démarche ayant conduit à la conception des objets typiques.

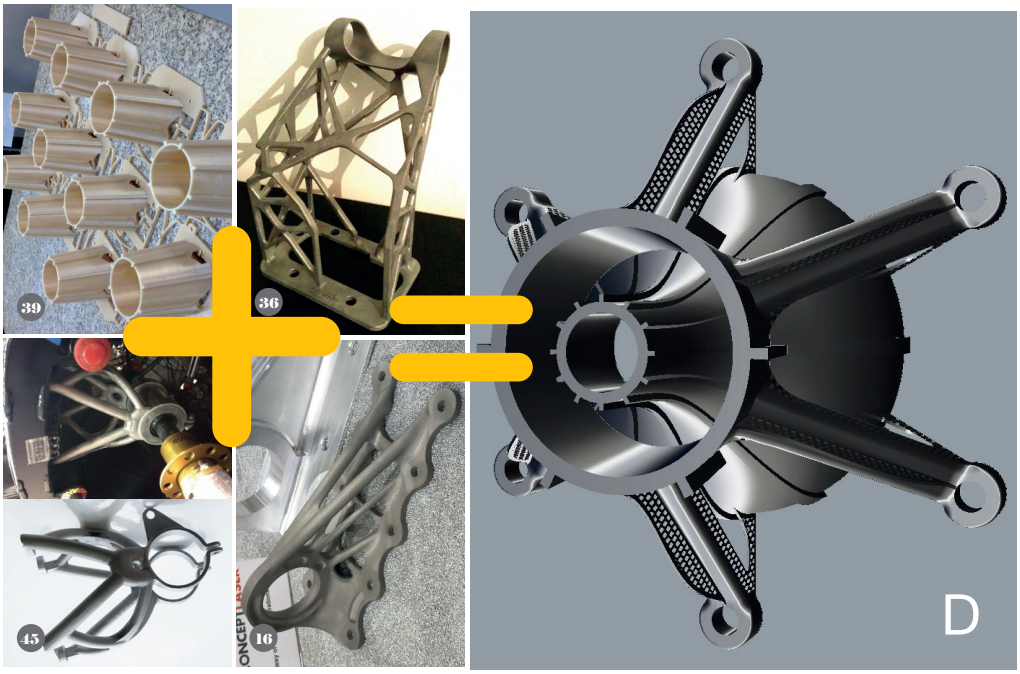
Fig.78 - Démarche de conception des objets typiques (pages suivantes)

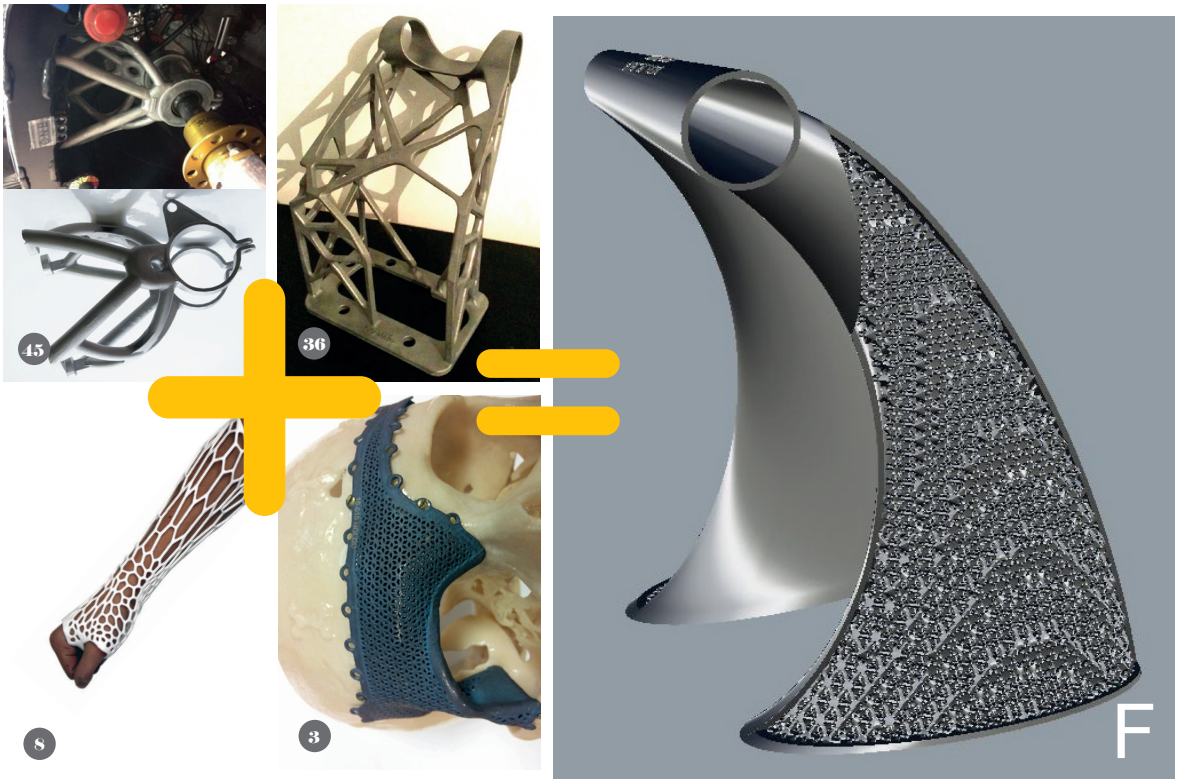




Document confidentiel


30
22
23
24
33
C


39
36
45
16
D

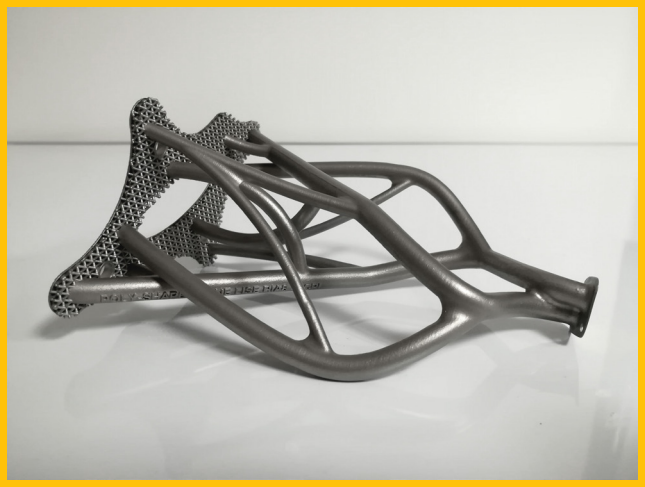


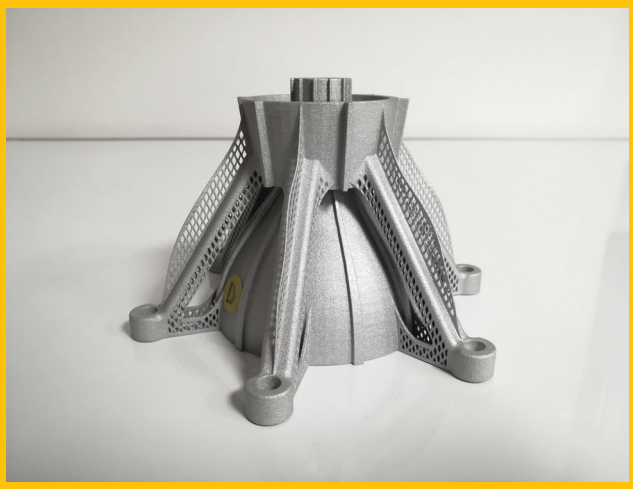
Document confidentiel

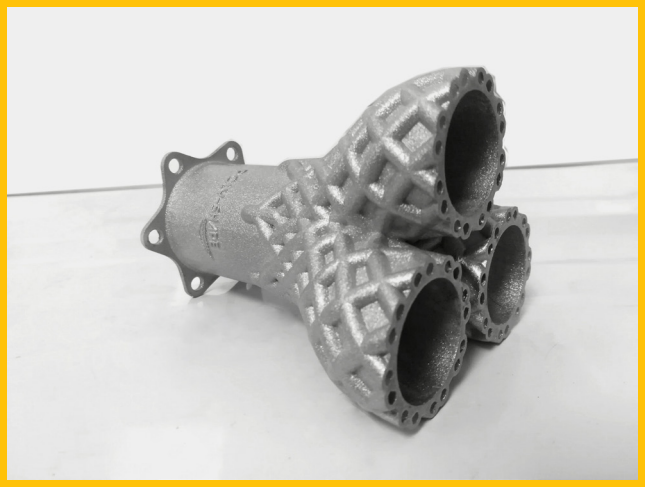
Pour la modélisation, des caractéristiques formelles et fonctionnelles ont été extraites des séries d'images puis composées pour définir un modèle selon les termes relatifs exprimés par les répondant.es au questionnaire. On identifie alors par exemple, pour la conception du modèle A, des « branches », des « surfaces en mailles » et « deux plans à l'interface d'efforts mécaniques ». Ces termes ont été écrits par les répondants concernant le couple A.
Cette même démarche a été appliquée pour la conception des 8 modèles. Ces modèles sont alors des hybrides réunissant des caractéristiques formelles et fonctionnelles de plusieurs composants existants en fabrication additive. Nous nommons cette série « objets typiques ».

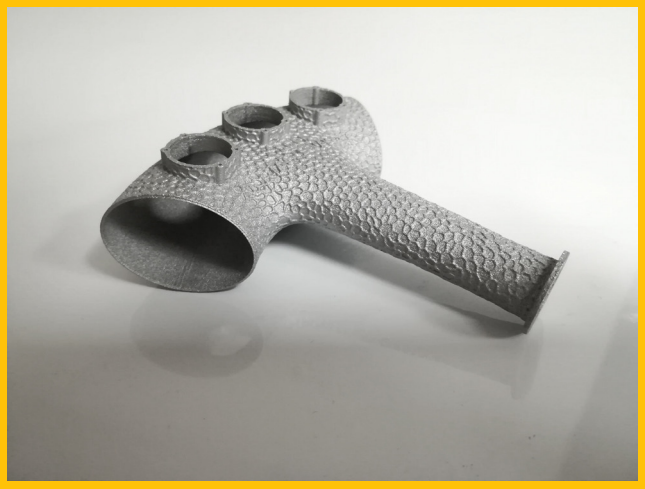
En vue de les utiliser dans le cadre de l'expérimentation #1, ces modèles ont été réalisés en fabrication additive. Cette version tangible de chaque modèle est visible dans la figure 79 page suivante.

Fig.79 – Version tangible des 8 objets typiques de la fabrication additive (page suivante)









POLI-SHAPE
ALJMS 10

Cette Phase 1 a donc effectivement permis de collecter des informations *Expected*, c'est-à-dire attendues au regard de la fabrication additive. Ainsi, elle a permis de définir des caractéristiques formelles et fonctionnelles typiques de la fabrication additive, puis de les synthétiser dans des modèles numériques qui ont ensuite été fabriqués. La Phase 2 de la pré-expérimentation visera alors à collecter les informations *Unexpected*.

4.2.3 Phase 2 : collecte des informations « Unexpected »

La phase 2 visait à collecter les informations « *Unexpected* », c'est-à-dire les informations inattendues, au regard de la fabrication additive. Dans le cadre de notre thématique d'exploration, il s'agit alors d'informations liées à des corps étrangers qui pourraient être inclus en fabrication additive, à leurs propriétés et aux fonctions permises par ceux-ci.

4.2.3.1 Population en phase 2

Cette phase 2 a été conduite avec 22 concepteur.trices novices, plus précisément des étudiant.es en Master 1 en Design, dont 9 femmes et 13 hommes. Leur niveau de connaissances sur la fabrication additive a été évalué comme faible en moyenne. Cette population était divisée de manière aléatoire en 6 groupes de trois participant.es et 1 groupe de 4 participant.es.

4.2.3.2 Dispositif pour la phase 2

Cette phase s'est déroulée dans le cadre d'un workshop organisé sur 3 jours. Nous présentons ici uniquement les phases du projet qui concernent le recueil d'informations. Cette description comporte donc des ellipses.
Dans la perspective de favoriser la productivité des participant.es, des outils de représentations simples ont été fournis. Ainsi, seul un format de Post-it contraint à 76 x 127 mm était fourni. Les participant.es devaient utiliser leur medium de sketching habituel (feutre, stylo, crayons, etc…). La quantité de supports disponibles était illimitée. Ce dispositif est illustré dans la figure 80 ci-après. Ces supports étaient ainsi faciles à dé/catégoriser au cours et à l'issue du recueil d'informations.

Fig.80 - Dispositif utilisé pour la Phase 2 de la pré-expérimentation

4.2.3.3 Déroulement de la phase 2

Après une présentation des principes de base de la fabrication additive et de ses procédés (2 heures), il était d'abord demandé aux participant.es de nommer et/ou représenter des corps étrangers qui pourraient être inclus en fabrication additive. Il leur a également été demandé d'imaginer les effets (i.e les fonctions) rendus possibles par ces inclusions. Des représentations pas mots-clés et sketchs simples étaient attendues comme données de sortie.
Enfin, il était demandé aux participant.es de mettre en commun les représentations générées, de manière à identifier les similitudes voire les doublons pour catégoriser ces informations selon les types de corps étrangers identifiés.

4.2.3.4 Résultats de la phase 2

Les participant.es ont généré **229 principes**, soit un très grand nombre de fonctions qui pourraient être explorées. Plus de la moitié des participant.es a choisi la forme de **scénarii** comme permettant de représenter au mieux les comportements dynamiques des corps étrangers (fig.81).

Document confidentiel

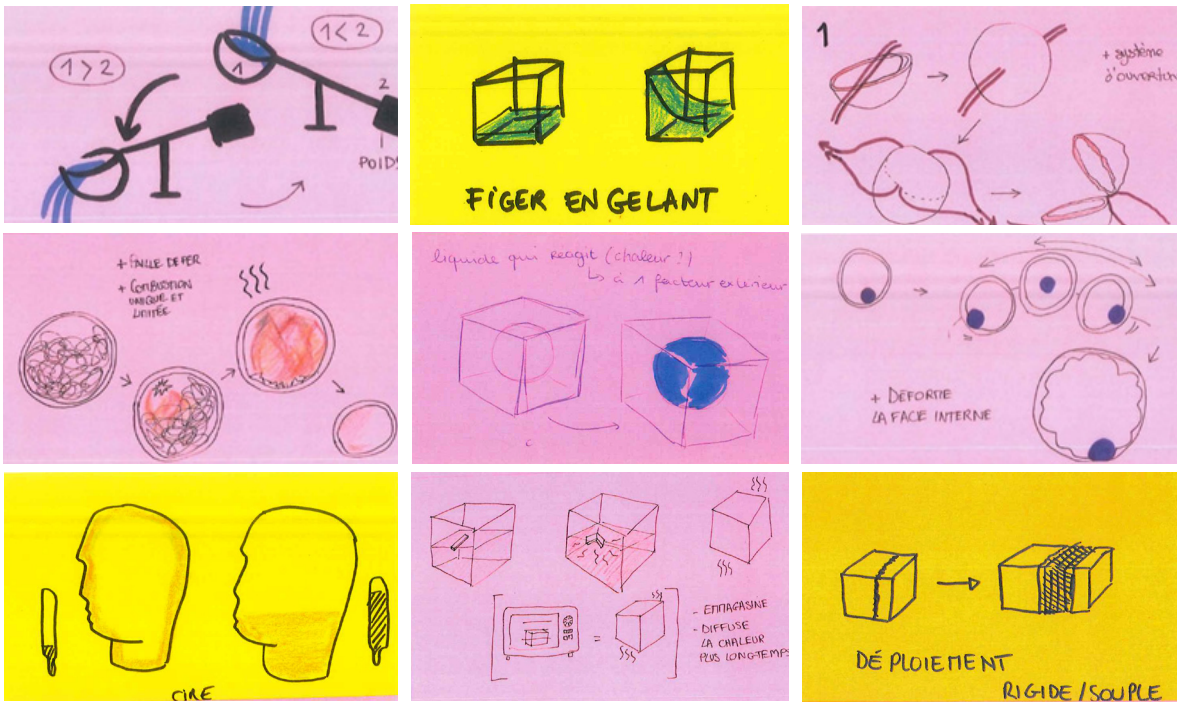


Fig.81 - Scénarii construits en Phase 2

Cette phase de recueil d'informations « Unexpected » a finalement permis d'identifier 40 corps étrangers différents et fonctions associées. Certaines fonctions sont apparues comme étant communes à plusieurs corps étrangers. Les corps étrangers ont été réunis par types. Ainsi, le diagramme ci-dessous représente les 6 types de corps étrangers identifiés : les solides, les liquides, les fils & fibres, les composants électroniques, les gaz et les poudres. Et les fonctions associées (fig.82).

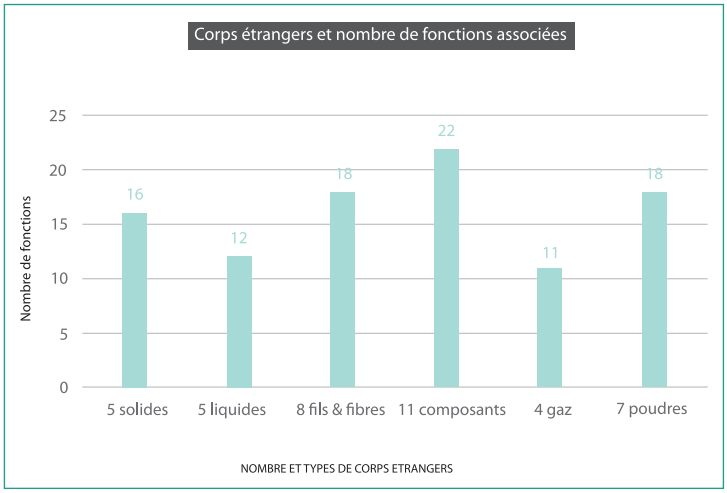


Fig.82 - Types de corps étrangers et nombre de fonctions possibles

Nous remarquons ainsi que, pour 4 gaz différents identifiés, 11 fonctions possibles ont été proposées. Il semble alors que l'inclusion de ce type de corps étrangers représente un fort potentiel à explorer. De la même manière, pour 5 solides et 5 liquides différents identifiés, au moins 3 fonctions ont été proposées pour chacun de ces corps. L'inclusion de ceux-ci semble donc recouvrir un potentiel à explorer.

Finalement, si les Post-it fournis ont facilité la catégorisation des corps étrangers pendant la pré-expérimentation, leur réutilisation n'est pas aisée. En vue de faciliter la manipulation de ces informations dans le cadre de séances de créativité de groupe, une traduction tangible de ces informations apparait donc nécessaire. En ce sens, la conception du dispositif « Cartes-Objets » est présentée (§4.3).

4.2.4 Synthèse de la pré-expérimentation

Cette pré-expérimentation, conduite en deux phases, a effectivement permis de collecter des informations « *Expected* » et des informations « *Unexpected* » relatives à la thématique de l'intégration de fonctions en fabrication additive par inclusion de corps étrangers. Pour les informations *Expected*, huit couples formes/fonctions ont été retenus comme étant typiques de la fabrication additive.

Ils ont été incarnés dans huit composants fabriqués et nommés objets typiques. Comme information *Unexpected*, 40 corps étrangers ont été retenus et catégorisés en six types (solides, liquides, fils et fibres, composants électroniques, gaz, poudres) qui peuvent être inclus en fabrication additive et 97 fonctions associées. Cette collecte d'informations correspond à la réalisation de la première phase nommée « Collecte d'informations », du modèle de créativité par et pour la fabrication additive proposé. En ce sens, cette pré-expérimentation valide la première phase de ce modèle, représentée en vert sur la figure 83 ci-dessous.

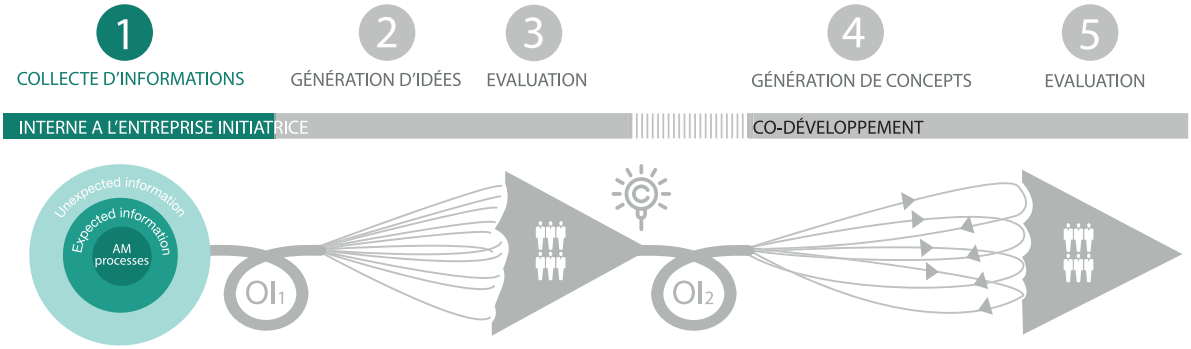


Fig. 83 – Validation de la première phase du modèle proposé

La section suivante décrit la conception du dispositif « Cartes-Objets » incarnant ces informations recueillies et permettant leur manipulation selon une logique de rencontres forcées aléatoires mise en évidence dans l'état de l'art (§2.11).

Document confidentiel

4.3 [PROJET A]

CONCEPTION DU DISPOSITIF « CARTES A JOUER »

4.3.1 Fondement et objectifs du Projet A

Comme énoncé précédemment, cette thèse relève de la recherche-action. En ce sens, il paraît important de décrire la conception du dispositif incarnant les informations issues de la pré-expérimentation et qui sera utilisé comme outil de stimulation dans l'expérimentation #1. Cette description pourrait paraître triviale du point de vue des contributions pour la recherche mais elle fait sens dans cette démarche où la pratique nourrit la recherche.
Ce dispositif est conçu selon les constats issus de l'état de l'art, les projets R&D et les informations recueillies dans la pré-expérimentation :

- Il est nécessaire d'apporter des informations inter-domaines aux concepteur.trices pour favoriser le raisonnement créatif
- Guider l'inspiration, à partir de ces informations, via une logique de rencontres forcées aléatoires aide les concepteur.trices à exploiter leur capacité créative en favorisant les analogies de bas niveau
- Les objets instruments sont exploratoires, ludiques, originaux et interactifs. Ils déclenchent le vécu d'expériences communes au groupe qui les manipulent
- Apporter ces informations sous la forme de représentations visuelles mixtes (graphique + sémantique) facilite le raisonnement créatif
- Les objets tangibles « augmentent » les représentations visuelles mixtes
- L'outil « cartes » est couramment utilisé en créativité car il est pratique, ludique et économique
- Dans le contexte de la fabrication additive, les informations intra-domaine sont des couples formes/fonctions typiques et les informations inter-domaines éloignées sont des corps étrangers et des fonctions associées

Le dispositif « Cartes-Objets » doit donc synthétiser l'ensemble de ces constats et doit les incarner sous une forme qui en facilite l'accès aux concepteur.trices. Les sous-sections suivantes présentent alors les composantes du dispositif « Cartes-Objets » qui permettent d'incarner les constats mentionnés.

4.3.2 Contenu du dispositif « Cartes-Objets »

Ce dispositif, illustré dans la figure 84 ci-dessous, comprend donc **52 cartes augmentées des 8 objets typiques (d'où « Cartes-Objets »)** issus de la pré-expérimentation et précédemment décrits (§4.2.2.4). L'ensemble de ces cartes est visible en annexe 3. Le dispositif comprend également un plateau support, un chronomètre et des règles de jeu.
Ce dispositif est destiné à des concepteur.trices qui ont peu l'habitude d'utiliser leur capacité créative mais qui ont un niveau intermédiaire de connaissances sur la fabrication additive, dans le cadre de séances de créativité de groupes conduites par un.e animateur.trice. Ces éléments sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

Fig.84 - Le dispositif « Cartes-Objets »

4.3.2.1 Les cartes « Expected »

Le verso de ces cartes porte uniquement la mention « *Expected* ». Les faces recto de chacune des **8 cartes** présentent des représentations graphiques des objets typiques identifiés pendant la pré-expérimentation. Ces représentations ne donnent pas d'indication quant à l'orientation de l'objet (rendering sans ombre portée). Elles sont déconnectées de tout contexte de manière à laisser aux concepteur.trices la liberté de manipuler et interpréter les informations données. Ces représentations sont complétées par des lettres A à H, incitant les concepteur.trices à faire un lien direct avec l'objet tangible correspondant.
Ce lien est illustré sur la figure 85 ci-dessous.

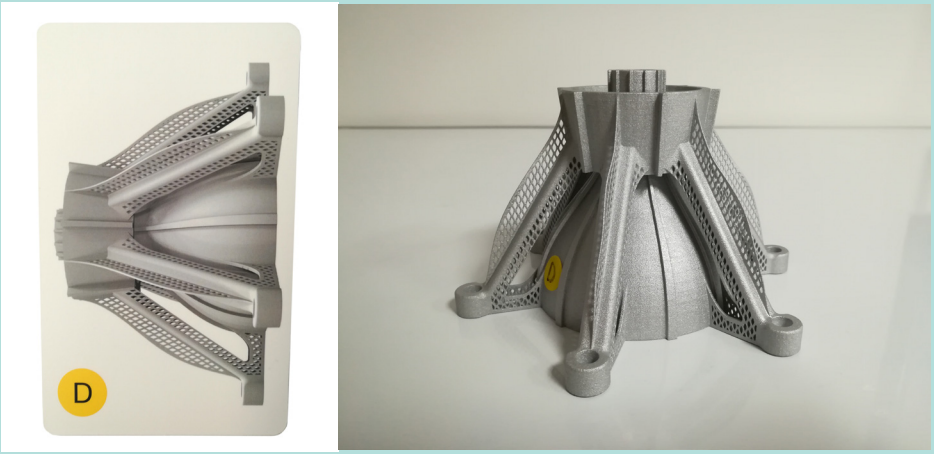


Fig.85 - Exemple de carte « Expected » (à gauche) et lien avec l'objet typique correspondant

4.3.2.2 Les cartes « Unexpected »

Le dispositif comprend également **44 cartes** *Unexpected*. La figure 86 ci-après présente l'une de ces cartes, tirée de la famille Composants électroniques.

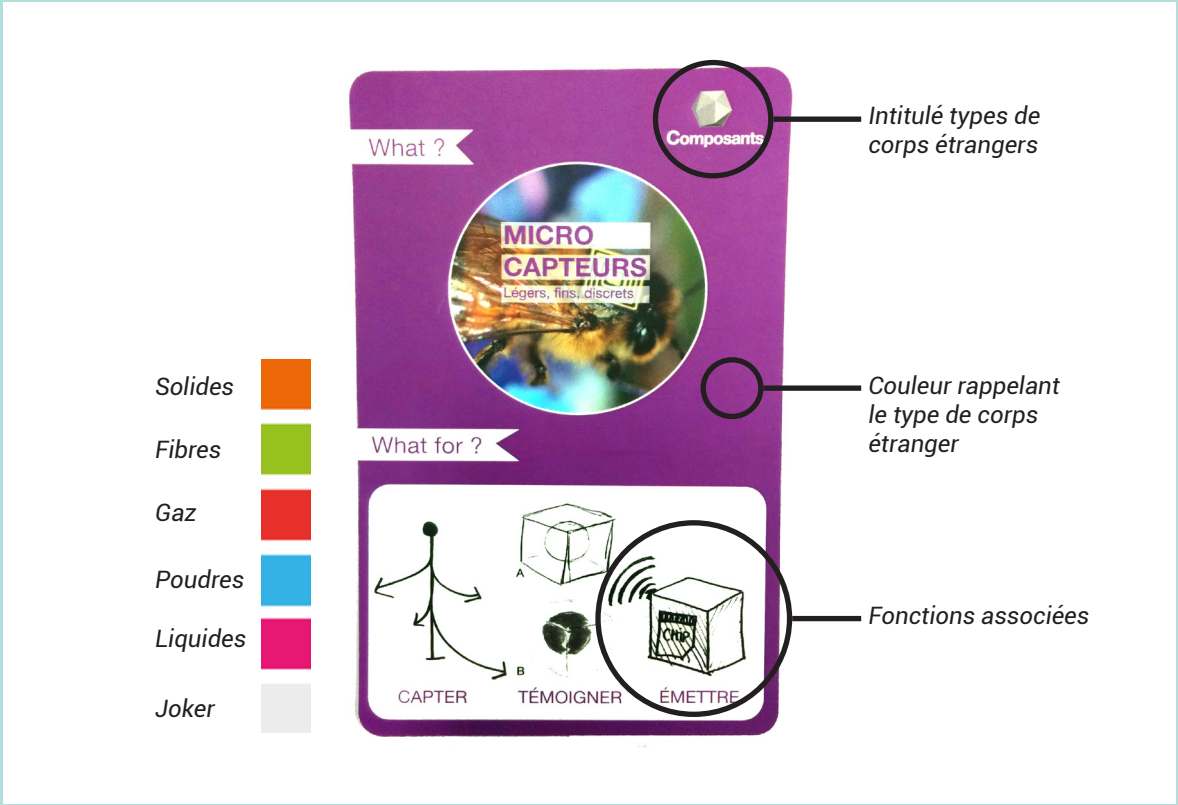


Fig.86 - Exemple de carte « Unexpected » (recto)

Le corps étrangers « Micro-capteurs », catégorisé dans le type Composants est associé aux fonctions « Capter, Témoigner et Emettre ». Les représentations graphiques complétant le verbe de fonction ont été construites durant la phase 2 de la pré-expérimentation. Le fond coloré permet d'identifier rapidement le type de corps étranger concerné, offrant ainsi un deuxième niveau de lecture, plus rapide. Ainsi, ce jeu est composé comme suit :

- Composants électroniques (synthétisé en Composants) : 11 cartes
- Solides : 5 cartes
- Fils & Fibres (synthétisé en Fibres) : 8 cartes
- Gaz : 4 cartes
- Poudres : 7 cartes
- Liquides : 5 cartes

4 cartes Joker sont également ajoutées à celles-ci de manière à éviter une éventuelle fixation des concepteur.trices sur un corps étranger qui n'aurait pas été proposé et anticipe la mise à jour du dispositif.

4.3.2.3 Le plateau de jeu

Le dispositif comprend également un plateau (fig.87). Ce support vise à renforcer l'incitation à la logique de rencontres forcées aléatoires. Les règles du jeu proposent de disposer, au cœur de ce plateau (n°1), l'objet typique correspondant à la carte Expected découverte à chaque tour. Les cartes Expected devaient être disposées en éventail sur le cercle périphérique (n°2). Les cartes Unexpected devraient être disposées en éventail sur le second cercle périphérique (n°3). Les cartes Joker devraient être disposées en dehors de ces cercles, faces cachées (n°4), de manière à être disponibles mais pas visibles en première lecture. Comme dans un jeu de casino, cette disposition vise alors à associer la roue des cartes Expected à la roue des cartes Unexpected, à mesure que celles-ci sont découvertes.

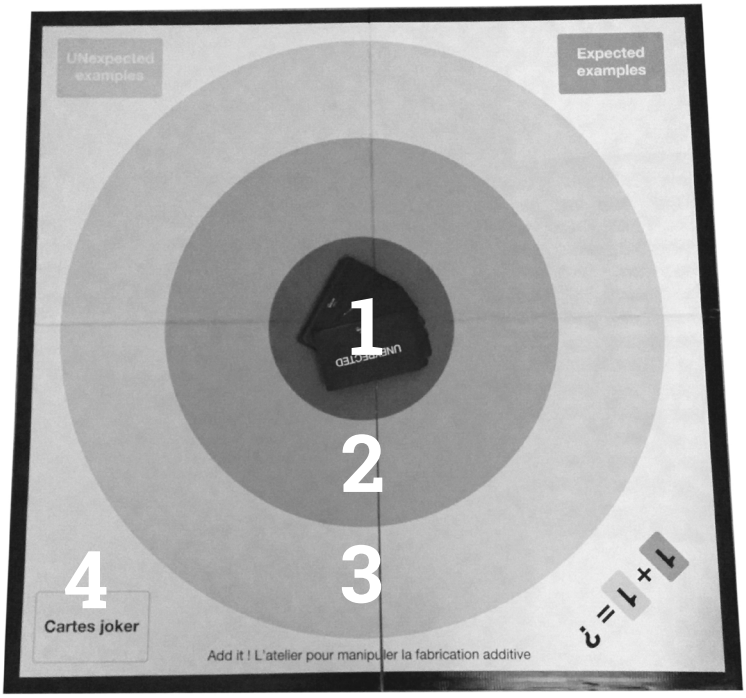


Fig.87 - Plateau de jeu favorisant les rencontres forcées aléatoires

La section suivante présente l'expérimentation #1 qui visait à observer les effets de la stimulation par ce dispositif « Cartes-Objets » sur la génération d'idées créatives pour la fabrication additive.

4.4 Expérimentation #1 : stimulation par le dispositif « Cartes-Objets »

4.4.1 Objectif

Par cette expérimentation, nous cherchons à observer l'influence de la stimulation du dispositif « Cartes-Objets » sur la capacité créative de concepteur.trices peu habitué.es à utiliser celle-ci, dans le cadre de séance de créativité de groupe centrée sur l'intégration de fonctions en fabrication additive. Le dispositif basé sur des cartes d'informations augmentées d'objets typiques de la fabrication additive incarne des informations inter-domaines et une logique de rencontres forcées aléatoires. Nous souhaitons donc tester ces principes de base de la créativité, à l'aune de la fabrication additive. En d'autres termes, nous cherchons à in/valider l'hypothèse n°1 : « la stimulation par la manipulation d'un objet instrument de type « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées créatives ».

4.4.2 Population et lieu

L'expérimentation #1 a été conduite avec une population de 12 collaborateurs.trices de Poly-Shape, répartie en duos. Soumise à la contrainte de leurs disponibilités et des salles, elle s'est déroulée en 6 séances réparties sur 3 jours. Elles sont ici synthétisées sous l'expression « la séance de créativité de groupe ». Les profils des participant.es sont détaillés ci-après.

4.4.2.1 Des novices en créativité

Comme présenté en amont du document, la définition d'un modèle de créativité par et pour la fabrication additive est une première approche dans le contexte d'une entreprise techno-centrée (§1.1.3). Nous souhaitons donc convoquer des participant.es non familiers du raisonnement créatif. En ce sens, nous avons soumis un questionnaire aux collaborateur.trices (annexe 3) pour **recueillir leur perception de la créativité et leur niveau d'expérience**. Leurs réponses sont synthétisées ci-après :

- **4/12** participant.es répondent **NON** à « selon vous, sommes-nous tous des individus créatifs ? »
- **3/12** participant.es répondent **NON** à « selon vous, êtes-vous une personne créative ? ». Selon un de ces répondant, cela s'explique par le fait que le trait de caractère « créatif »

Document confidentiel

est inexistant par nature chez certaines personnes. Pour les autres, c'est parce qu'il est difficile d'exprimer sa créativité et qu'un entraînement est nécessaire pour dépasser le jugement social

- 9/12 participant.es répondent OUI à cette même question mais 3 en nuançant. Pour l'un il n'est tout de même pas facile d'avoir des idées « qui sortent de l'ordinaire », le second dit ne pas être « la personne la plus créative » et le troisième dit être créatif mais sur des thématiques non liées à la fabrication additive.

Ensuite, à la question « quelle est votre définition de la créativité ?», les répondant.es expriment un lien avec l'imagination (4/12), un lien avec le fait de mobiliser des connaissances existantes (5/12), un lien avec la construction de représentations mentales et externes (4/12) et enfin un lien avec les caractères « nouveau », « innovant » ou « disruptif » (7/12). Enfin, concernant l'expérience des participant.es vis-à-vis des séances de créativité de groupe :

- 9/12 participant.es n'avaient jamais participé ni animé une séance de créativité de groupe
- 2/12 participant.es avaient déjà participé à des séances dans le cadre de leur cursus d'études, dont 1 avait déjà animé une séance et déjà participé à une séance sur une thématique liée à la fabrication additive
- 1/12 participant.es avait déjà participé à des brainstormings dans le cadre d'activités professionnelles précédentes, hors fabrication additive

Nous retenons donc que les **12 collaborateur.trices intérrogé.es sont novices au regard de la créativité.** 1/3 de ce groupe pense que tous les individus ne sont pas créatifs et ¼ pense ne pas être créatif.ve. Toutefois, i.elles possèdent des notions théoriques de bases, cohérentes avec l'état de l'art : leur termes décrivent la créativité comme une capacité qui peut évoluer par l'entraînement et l'aide méthodologique, pour laquelle mobiliser des connaissances est nécessaire ainsi que construire des représentations. Nous retenons également qu'i.elles n'ont pas d'expérience de séance de créativité de groupe sur la fabrication additive.
Ces 12 participant.es correspondent donc au profil attendu dans les phases 2 et 3 du modèle, objets de cette expérimentation #1.

4.4.2.2 Des groupes pluridisciplinaires

En vue de former des duos équilibrés, nous leur avons soumis un questionnaire permettant de mieux connaître leur nombre d'années d'expérience dans l'entreprise, si leurs fonctions relève d'un secteur industriel (« Spécialité »), le niveau de connaissances sur la fabrication additive qu'i.elles déclarent (échelle : Débutant (1)-Intermédiaire (2)-Expert (3)) et enfin, l'orientation de leurs activités liées à la fabrication additive (parmi Matériaux, Procédés, Produits ou l'ensemble).
La table 10 synthétise leurs réponses et montre la répartition choisie pour équilibrer les duos. Dans notre contexte industriel, cette répartition tient également compte de la disponibilité des collaborateurs.trices.

Table 10 - Profils des participant.es à l'expérimentation #1

DUOS	PARTICIPANT-ES	ANNEES XP	NIVEAU FA	ORIENTATION FA	SPECIALITE
A	P1	Moins d'1 an	Intermédiaire	Ensemble	Médical
	P2	Moins d'1 an	Intermédiaire	Produits	Non
E	P3	1 à 5 ans	Intermédiaire	Procédés + Produit	Non
	P4	Moins d'1 an	Débutant	Produits	Médical
C	P5	Moins d'1 an	Expert	Produits	Non
	P6	1 à 5 ans	Intermédiaire	Produits	Aéro+ Outillage
F	P7	Moins d'1 an	Intermédiaire	Produits	Automobile
	P8	Moins d'1 an	Intermédiaire	Procédés + Produit	Non
B	P9	Moins d'1 an	Intermédiaire	Procédés + Produit	Non
	P10	1 à 5 ans	Intermédiaire	Produits	Médical
D	P11	Moins d'1 an	Intermédiaire	Ensemble	Non
	P12	Moins d'1 an	Expert	Produits	Médical

Le niveau de connaissances fabrication additive est déclaratif, il peut donc être relativisé. Par exemple, P12 déclare un niveau « *Expert* » alors que P11, qui déclare un niveau intermédiaire a la même ancienneté dans l'entreprise. P3, qui a plus d'ancienneté (1 à 5 ans), déclare un niveau « Intermédiaire » mais P2 déclare également ce même niveau « Intermédiaire » en ayant moins d'1 an d'ancienneté. Finalement, nous retenons que cette population a en moyenne un niveau de connaissances « Intermédiaire ». En ce sens, s'i.elles sont novices en créativité (i.e débutante), i.elles ne le sont pas en fabrication additive. Par ailleurs, une forte proportion de participant.es est spécialiste du secteur Médical. Pour limiter l'influence de cette spécialité sur la génération d'idées, ces participant.es sont répartis dans des duos différents. Ainsi, dans chacun des duos se trouve un.e spécialiste d'un secteur industriel.

4.4.2.3 Lieu d'expérimentation

L'expérimentation #1 puis son évaluation par les Experts ont été conduites dans les locaux de Poly-Shape, dans des espaces que les participant-es fréquentaient régulièrement pour leurs activités (2 salles de réunions). Ce choix est soumis à une contrainte imposée par notre contexte. En effet, l'approche par la créativité étant naissante, il n'y a pas dans l'entreprise de lieu particulièrement neutre identifié pour les activités liées à l'innovation, à la créativité et permettant d'éviter de rappeler aux participant.es les situations de stress, bruits et tensions de leurs activités habituelles.

Document confidentiel

4.4.3 Dispositif de l'expérimentation #1

Cette expérimentation #1 mets en œuvre le dispositif « Cartes-Objets » présenté précédemment (§4.3).

4.4.3.1 Organisation

Cette étude est menée par comparaison entre une population témoin (duos A, B et F) et une population test (duos C, D et E), illustrée en figure 88. La stimulation du processus créatif était assurée, pour la population témoin, seulement par les 8 objets typiques et pour la population test, par le dispositif « Cartes-Objets » complet soit : les cartes augmentées des objets typiques et le plateau. Nous ne convoquons pas de population neutre, c'est-à-dire ne disposant ni des objets typiques ni du dispositif « Cartes-Objets ». Ce choix a été orienté par les résultats des travaux de Laverne **[34]** (pages 112 à 114). En effet, ils montrent que les objets tangibles sont des supports de connaissances pertinents pour les phases initiales d'un processus de conception orienté sur la fabrication additive, notamment pour une population de profils « ingénieur.e ». En ce sens, nous avons considéré ici que disposer d'objets tangibles est un pré-requis pour la génération d'idées créatives en fabrication additive.

En cohérence avec la recherche-action, nous avons déployé une méthode d'observation participante en assurant l'animation de cette séance. Un appareil photo/vidéo/son a permis de recueillir les comportements des participant.es et des indicateurs sur leur état émotionnel, leur verbalisation pendant la génération d'idées.

Les participant.es n'avaient pas accès à une source extérieure d'information. L'étude était ainsi circonscrite aux connaissances des participant.es et à celles qu'i.elles pouvaient construire à partir des informations apportées lors de la séance.

Fig.88 - Etude comparative en séance de créativité de groupe

4.4.3.2 Variable observée : stimulation par le dispositif « Cartes-Objets »

Nous présumons que les informations et la logique de rencontres forcées aléatoires incarnée dans le dispositif « Cartes-Objets », peuvent favoriser la génération d'idées créatives. En ce sens, nous présentons à la population test la logique de manipulation induite par le dispositif « Cartes-Objets », permettant les rencontres forcées aléatoires (fig.89).

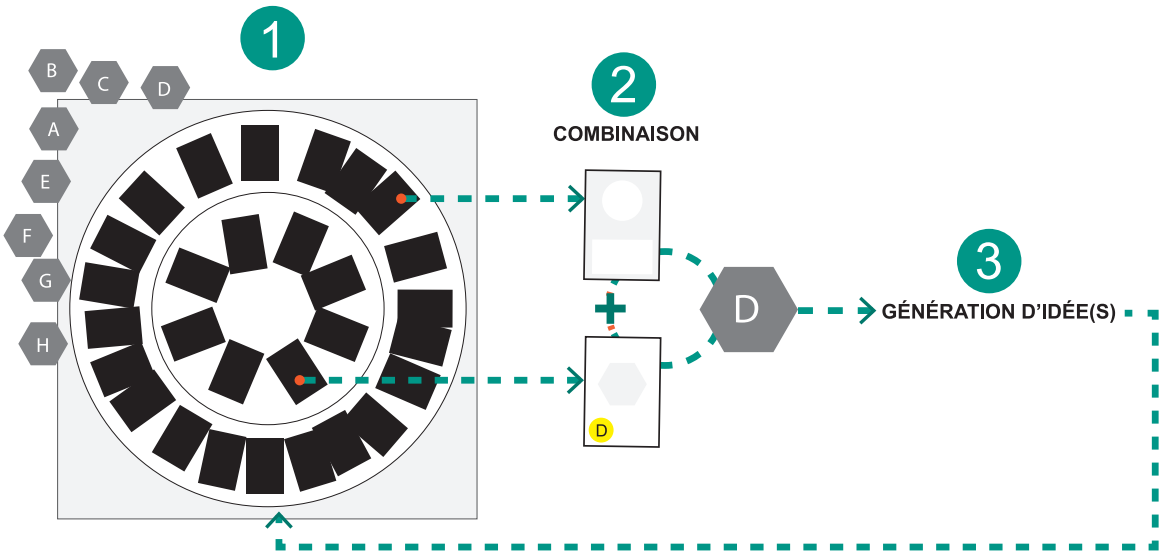


Fig.89 - Logique de manipulation pour les rencontres forcées aléatoires

Dans un premier temps, les 44 cartes « *Unexpected* » étaient disposées **faces cachées** sur le cercle périphérique du plateau. De la même manière, les 8 cartes « *Expected* » étaient d'abord disposées faces cachées (étape 1). Les 8 objets typiques, notés A à H étaient disposés librement autour du plateau. Au lancement du chronomètre, le duo devait **découvrir en même temps 1 carte Unexpected et 1 carte Expected** puis mettre l'objet typique correspondant au centre du plateau (2). A partir de ces informations découvertes, le duo devait **générer au moins 1 idée** répondant au brief donné et créer les représentations externes mixtes jugées nécessaires pour la compréhension de l'idée par d'autres acteur.trices non impliqué.es dans cette phase (3). Aucune consigne n'était donnée quant au choix du membre du duo chargé.e des représentations. Une fois le temps écoulé, les deux cartes découvertes étaient replacées dans le jeu faces cachées. Cette séquence était relancée à chaque nouveau lancement de chronomètre.
Ainsi, 320 associations différentes étaient rendues possibles par cette manipulation du dispositif selon la logique de rencontres aléatoires forcées.

Document confidentiel

4.4.3.3 Des supports pour l'ensemble des participant.es

L'état de l'art préconisait de faciliter la construction de représentations externes, par exemple par l'utilisation de gabarits (§2.9.3). En ce sens, tous les participant.es disposaient des gabarits présentés dans la figure 90 ci-dessous. Dans la phase de génération d'idées, seul le gabarit [Fiche Idée], de format A5, était mis à disposition, en quantité illimitée (gabarit A). Celui-ci est destiné à des représentations de type mixte (graphique et textuelles) à construire rapidement. Sur ce gabarit, des conseils précisent le type d'information attendu dans ces représentations. Un seul gabarit [Notre coup de cœur], de format A4, était ensuite introduit au cours de la phase de génération de concepts (gabarit B). Ce gabarit guidait la représentation du concept sélectionné par le duo à l'issue de la phase de génération d'idées.
Cette expérimentation #1 étant centrée sur la génération d'idées, les représentations réalisées sur ce gabarit sont hors du périmètre de cette étude.

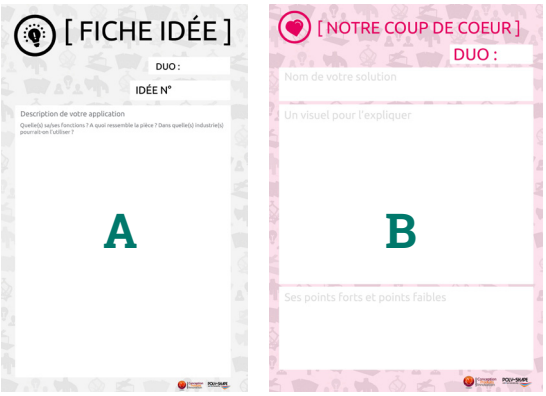


Fig.90 - Gabarits guidant la construction de représentations pour les idées (A) puis les concepts (B)

Conformément aux principes de créativité présentés dans l'état de l'art, ces gabarits visent à favoriser la prise en compte du brief, la traçabilité du processus créatif, la conversation réflexive des participant.es et leurs interactions sociales. Ces supports étaient donc disponibles pour l'ensemble des participant.es.

4.4.4 Tâches, durées et données attendues

La séance de créativité a duré **2 heures** pour chaque duo, organisée selon les phases du protocole illustré par la figure 91 ci-dessous.

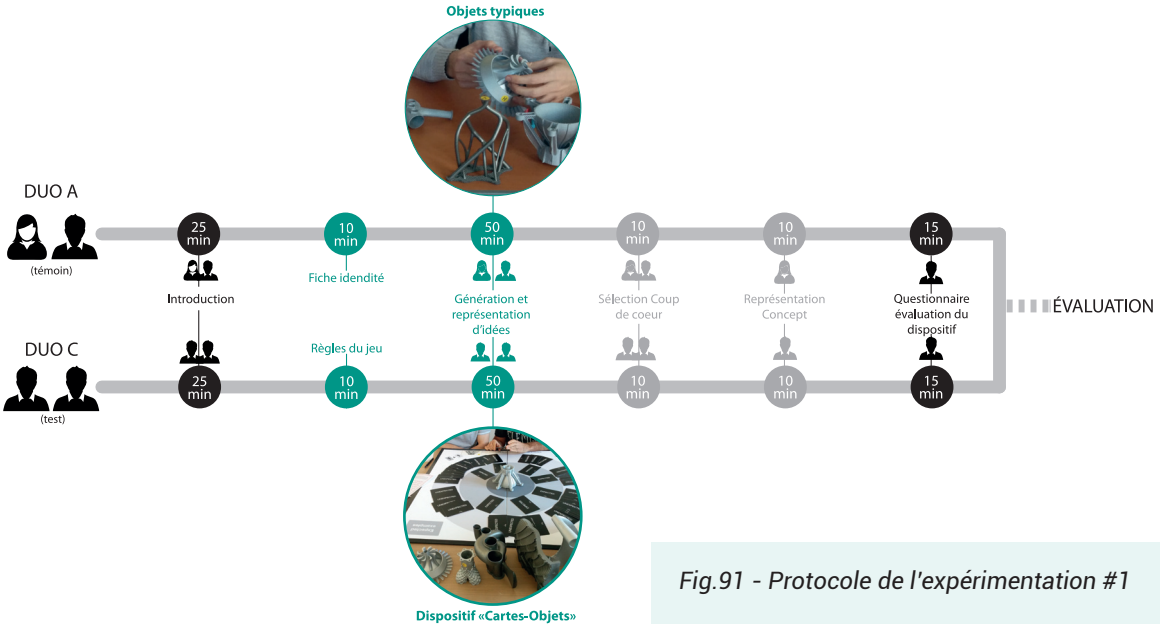


Fig.91 - Protocole de l'expérimentation #1

25 minutes étaient d'abord consacrées à l'introduction de la séance. Il s'agissait d'introduire le brief donné (fig.92), de présenter le contexte et les objectifs de la séance. L'introduction visait aussi à fournir le même niveau d'informations sur la fabrication additive à l'ensemble des participant.es, quel que soit leur niveau déclaré en amont. La variable d'étude, le dispositif « Cartes-Objets », était ensuite introduite dans les duos test et les règles d'utilisation de ce dispositif expliquées (10 minutes). En parallèle, les duos de la population témoin complétaient un questionnaire sur leur profil.

50 minutes étaient ensuite consacrées à la génération d'idées, découpées en 8 séquences de 6 minutes et 2 minutes de battement. Toutes les 6 minutes, le chronomètre était relancé et une nouvelle association de cartes était découverte. Ce même séquençage de 6 minutes était appliqué à la population témoin, sans le dispositif. Chaque duo pouvait proposer une ou plusieurs idées, discuter celles-ci, les éliminer ou au contraire choisir de les retenir et de les représenter sur les fiches idées. Nous retrouvons ainsi les cycles du processus créatif Génération-Evaluation-Représentation présentés dans l'état de l'art. Au moins 1 fiche idée était attendue par association de cartes.

Les deux étapes suivantes du protocole sont en dehors du périmètre de cette expérimentation. Il était demandé aux duos de sélectionner leur idée « coup de cœur » (10 minutes). Ni la méthode ni les critères de sélection n'étaient imposés. Une fois l'idée « coup de cœur » sélectionnée, il était demandé d'en préciser la définition pour aller jusqu'au concept et le représenter sur le gabarit de fiche concept (10 minutes). 1 fiche concept était attendue par duo.
Pour clore la séance, un questionnaire d'évaluation du dispositif et du déroulement de la séance était soumis aux participant.es pour recueillir leurs feedbacks. Il leur était demandé de le compléter de manière individuelle (15 minutes). L'évaluation par les Experts n'est pas comptabilisée dans ce protocole. Celle-ci sera présentée dans la section suivante.

Document confidentiel

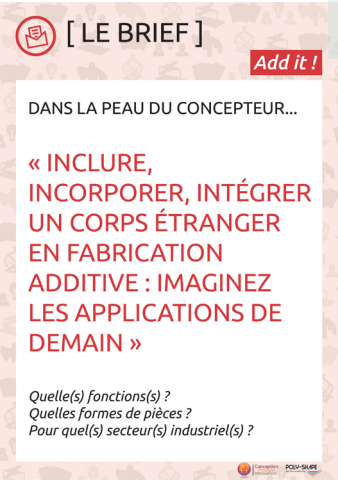


Fig.92 - Le brief soumis aux participant.es de l'expérimentation #1

4.4.5 Evaluation : population, dispositif et critères

Nous menons en priorité une analyse quantitative puis qualitative des fiches idées générées. Nous nous intéresserons en perspective aux effets du dispositif sur les états individuels et les interactions sociales.
6 Experts de Poly-Shape n'ayant pas participé à l'expérimentation ont été convoqués. Ils ont évalué la qualité des fiches idées créées indifféremment par les populations test et témoin. Ces Experts présentent deux niveaux de connaissances sur la fabrication additive, correspondant à leurs fonctions et/ou à leurs années d'expérience chez Poly-Shape.
La table 11 ci-dessous synthétise leurs profils. Ces évaluateurs ne sont pas experts du processus créatif. Leur expérience et/ou leur fonction leur permet d'avoir une connaissance de l'ensemble des procédés et de leurs limites, de la diversité de fonctions et formes déjà réalisés.

Table 11 - Profils des Experts pour l'évaluation

Niveau d'expertise	Experts	F/H	Années XP	Fonctions	Expertise créativité
Niveau 1	Expert 1	H	10 ans	Dirigeant	Non
	Expert 2	H	3 ans	Responsable R&D	Non
	Expert 3	H	5 ans	Responsable BE	Non
Niveau 2	Expert 4	H	2,5 ans	Ingénieur production	Non
	Expert 5	H	1 an	Ingénieur dév. procédé	Non
	Expert 6	H	1 an	Doctorant R&D	Non

L'évaluation s'est déroulée en une séance de **2 heures**. En amont, les fiches idées ont été anonymisées et désignées par un numéro attribué de manière aléatoire. Les fiches idées crées par la population test ne pouvaient donc pas être distinguées de celles créées par la population témoin. Pendant la séance d'évaluation (fig.93), il était demandé à chaque Expert, individuellement, d'évaluer les fiches idées selon 4 critères identifiés dans l'état de l'art (§2.10).

Fig.93 - Dispositif d'évaluation des Fiches Idées de l'expérimentation #1

Ces critères sont de nouveau détaillés ci-après :

- **La nouveauté**, c'est-à-dire « à quel point une fiche idée est-elle inattendue par rapport aux autres fiches ? » Les Experts devaient alors positionner les fiches **sur une échelle de Likert à 7 degrés,** où 1=absence de nouveauté et 7=haut niveau de nouveauté (les fiches idées complètement inattendues)
- **La variété**, c'est-à-dire le degré de similarité entre les fiches idées. Les Experts devaient positionner les fiches parmi **12 catégories proposées.** Ces catégories étaient nommées par des verbes de fonctions choisis en amont.

Document confidentiel

- Les Experts pouvaient également créer une ou plusieurs catégories et les nommer avec des verbes, si aucune des catégories présentées ne satisfaisait la répartition souhaitée
- **La brevetabilité**, c'est-à-dire **l'originalité** du point de vue de l'historique en fabrication additive couplé au critère de **pertinence** (« la fiche idée est-elle susceptible d'application industrielle dans un ou plusieurs secteurs industriels ? »). Les Experts devaient positionner les fiches dans les 2 colonnes correspondant à l'originalité ou à l'absence d'originalité. Les fiches jugées originales devaient également être réparties sur **une échelle de pertinence allant de 0 à 3**, où 0=très faible pertinence et 3=très forte pertinence.
- **La faisabilité**. Il s'agissait d'évaluer au plus tôt, dès le stade fiche Idée, de la faisabilité potentielle au regard des procédés de fabrication additive. Les Experts avaient à disposition l'infographie des procédés (§2.3.1) et les appellations des procédés réparties en 3 colonnes (fabrication Métal, fabrication Polymère, fabrication Autres matériaux). Ils devaient alors surligner les procédés avec le(s)quel(s) la fiche idée présentée semblait faisable. Aucun procédé surligné signifiait que la fiche était jugée infaisable en fabrication additive

4.4.6 Résultats quantitatifs et analyses

4.4.6.1 Quantité de fiches idées et fluidité des participant.es

Nous cherchons d'abord à évaluer l'influence du dispositif « Cartes-Objets » sur la productivité des concepteurs.trices. En ce sens, nous observons la **quantité de fiches idées** produites par la population test par rapport à la quantité produite par la population témoin. Comme montré sur le diagramme ci-après (fig.94), nous constatons que l'utilisation de notre dispositif a permis de produire **2x plus de fiches idées** (2,3). Ainsi, 56 fiches ont été produites par la population test (en rouge) alors que 24 fiches ont été produites par la population témoin (en bleu). Nous pouvons donc affirmer que **le dispositif est efficace pour la génération d'une grande quantité d'idées.** Dans le cadre de la séance de créativité menée, le temps d'utilisation du dispositif a permis d'explorer 24 associations de cartes parmi les 320 associations possibles.

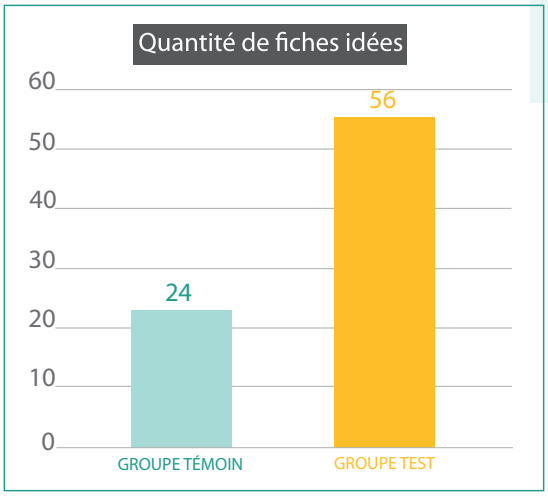
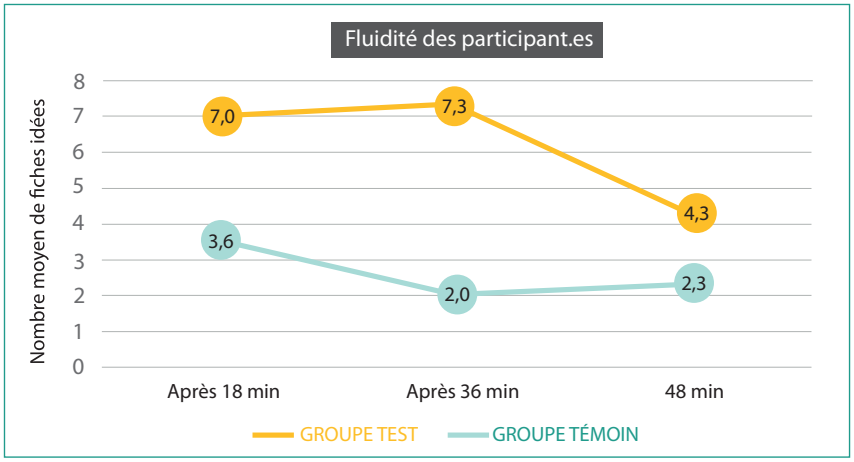


Fig.94 - Comparaison de la quantité de fiches idées générées sans notre dispositif (à gauche) et avec (à droite)

A la vue de cet écart important, il est intéressant d'observer également la fluidité des participant.es, c'est-à-dire leur capacité à générer plusieurs idées **[138]**. Nous observons alors la répartition de cette quantité au fil de l'avancement de la génération-représentation d'idées. Les données sont portées dans la figure 95 ci-dessous. L'avancement de la séance est séquencé en trois périodes notées « Début séance » (à 18 minutes), « Milieu séance » (à 36 minutes) et « Fin séance » (à 48 minutes).

Fig.95 - Nombre de fiches idées générées au fil de la séance



La population et la quantité de données récoltées sont insuffisantes pour pouvoir affirmer qu'un temps d'utilisation plus long de notre dispositif permettrait de générer un nombre de fiches idées en constante augmentation. Toutefois, la tendance montre que, même si le temps de génération-représentation était allongé (par exemple à 60 minutes), les concepteur.trices non stimulé.es par le dispositif ne parviendraient pas à accroître leur productivité de manière à réduire cet écart. Par ailleurs, l'extrapolation montrerait que le nombre de fiches générées tendrait à diminuer après 17 heures d'utilisation du dispositif (NB : 10 heures suffiraient pour explorer les 320 associations possibles). Plus raisonnablement, il semble que, dans un temps d'utilisation normal, la quantité de fiches idées générées augmente au fil de l'avancement de la phase de génération d'idées. Cette tendance est d'autant plus probable que, dans le cadre de notre séance, seulement 2,5% des associations possibles ont été explorées. Notre dispositif serait donc suffisant pour stimuler 40 duos de concepteurs.trices pendant 48 minutes.

Finalement, la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » crée une dynamique qui augmente la productivité des concepteurs.trices tout au long de la phase de génération-représentation d'idées.

Document confidentiel

4.4.6.2 Adéquation au brief : une meilleure exploration des connaissances

Nous évaluons ensuite l'adéquation au brief donné, ici par une analyse quantitative. En ce sens le brief peut être décomposé en 4 sous-objectifs à atteindre :

1. Inclure un corps étranger
2. Valeur(s) ajoutée(s)
3. Formes possibles
4. Secteur(s) industriel(s) projeté(s)

Nous nous attachons alors à observer les informations contenues dans les fiches idées, comme autant de témoins de la prise en compte du brief. La figure 96 ci-dessous présente l'une des fiches générées. Dans celle-ci, les quatre sous-objectifs du brief ont été atteints, ils sont visibles. De cette manière, nous observons l'ensemble des fiches idées en considérant que si l'un ou plusieurs de ces informations n'apparaît pas, cela indique que l'une (ou plusieurs) des dimensions du brief n'a pas été prise en compte et donc qu'un ou plusieurs des sous-objectifs mentionnés n'ont pas été atteints.

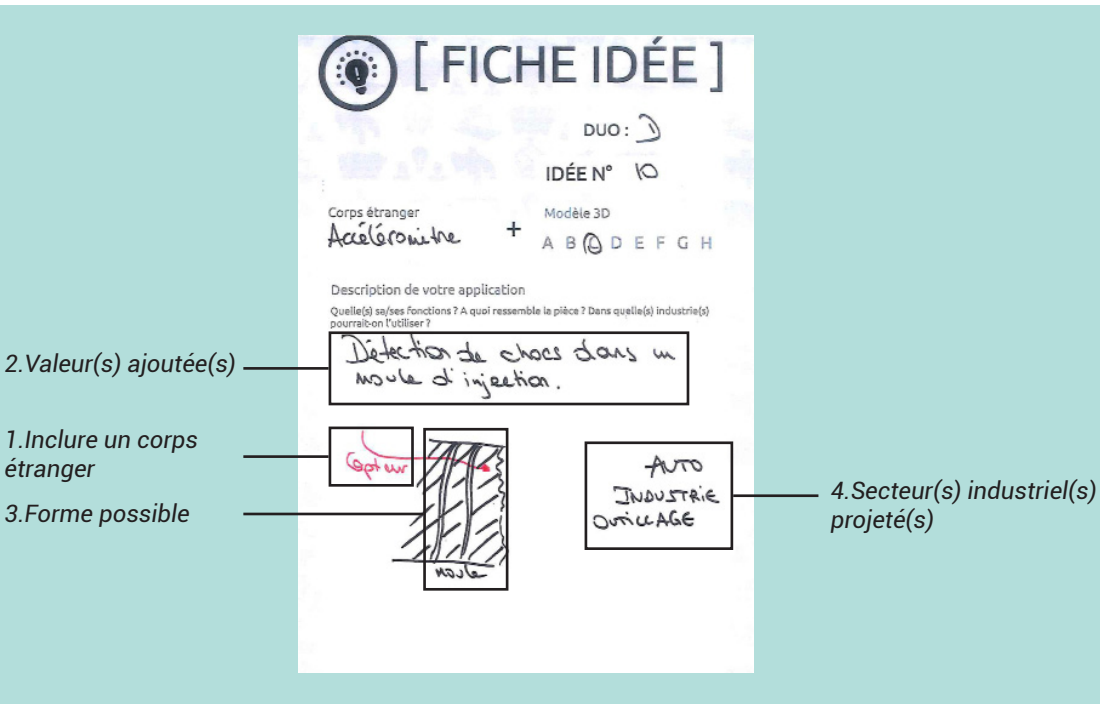


Fig.96 – L'une des fiches Idées générées

La table 13 ci-dessous synthétise alors l'atteinte des sous-objectifs au regard des représentations créées sur les fiches idées générées par l'ensemble des duos.

Table 13 – Evaluation de l'adéquation au brief

DUOS	Sous-objectifs du brief			
	1	2	3	4
A	4/5	2/5	3/5	4/5
B	9/11	6/11	11/11	7/11
C	19/19	14/19	19/19	2/19
D	19/19	16/19	16/19	14/19
E	18/18	14/18	15/18	3/18
F	5/8	2/8	8/8	3/8

Nous observons d'abord que la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées à valeur ajoutée (colonne 2). En effet, la valeur ajoutée des idées générées est mentionnée sur plus des ¾ des fiches idées créées par la population test (en jaune). Ce n'est pas le cas des fiches créées par la population témoin. Sur près de la moitié d'entre elles la valeur ajoutée de l'idée générée n'apparait pas.

Cependant, nous observons ensuite que la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » semble ne pas avoir d'impact sur la projection des idées dans de secteurs industriels potentiels (colonne 4). En effet, seulement 1/3 des fiches idées créées par la population test mentionnent des secteurs industriels. Ce résultat est cohérent avec la définition de l'Exploration décrite dans l'état de l'art (§2.7) et donc avec la séparation, marquée dans notre modèle, entre phases conduites en interne à l'entreprise initiatrice du projet et phases conduites en co-développement avec une entreprise partenaire. Effectivement, les collaborateur.trices de l'entreprise initiatrice ont, par définition, peu de connaissances relatives aux applications de la fabrication additive dans les secteurs industriels, notamment à cause de leur grand nombre et de leur variété. Nous remarquons en ce sens que les participant.es spécialistes du secteur médical ont projeter leurs idées uniquement dans ce secteur. Cette influence ne semble donc pas souhaitable.

Finalement, nous retenons que la stimulation par le dispositif favorise la génération d'idées à valeur ajoutée et pour des géométries pertinentes au regard de la fabrication additive. Ce dispositif favorise donc l'exploration de la problématique technique de l'inclusion de corps étrangers.

La section suivante présente les résultats de l'analyse qualitative des fiches idées générées.

4.4.7 Résultats qualitatifs et analyse

L'analyse qualitative a été conduite au regard des critères de nouveauté, faisabilité, variété et brevetabilité. En effet, au-delà de la quantité d'idées générées, il est important pour une

Document confidentiel

entreprise de s'assurer que le processus créatif ouvrira des perspectives qui lui permettront de se démarquer de ses potentiels concurrents. En ce sens, nous cherchons à vérifier que la quantité supplémentaire de fiches idées générée grâce à notre dispositif est de bonne qualité, c'est-à-dire porteuse de valeurs pour l'entreprise.

4.4.7.1 La nouveauté : plus d'idées, plus nouvelles

Les Experts ont d'abord évalué la **nouveauté des fiches idées**, sur une échelle allant de 1= nouveauté minimum à 7=nouveauté maximum. Les résultats sont représentés dans le diagramme ci-après (fig.97). En abscisse sont portées les moyennes des degrés attribués par les 6 Experts. Remarquons que le degré 7 n'apparaît pas, en effet, aucune des moyennes obtenues n'est supérieure à 6. L'ordonnée représente le nombre de fiches idées ayant obtenu chacune des moyennes.

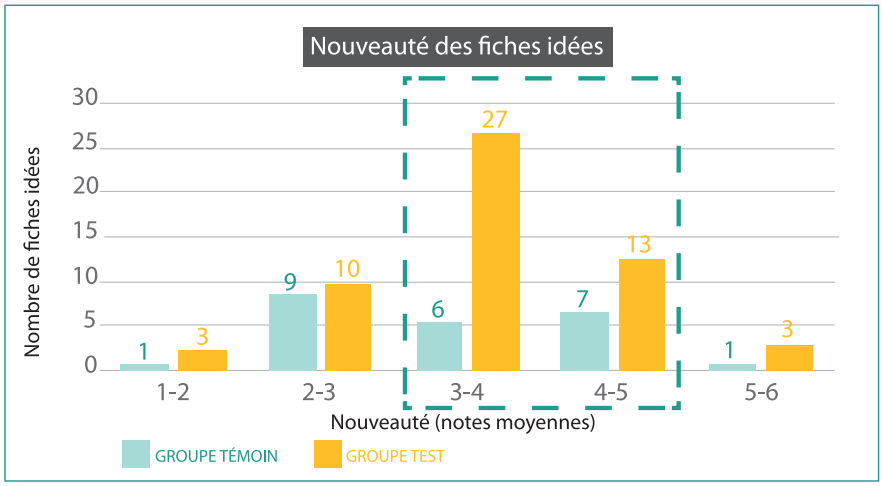


Fig.97 - Degré de nouveauté des Fiches Idées

Ainsi, nous observons que, non seulement le dispositif favorise la génération d'un plus grand nombre de fiches idées, mais en outre, il apparaît que **ces fiches supplémentaires sont en majorité d'un niveau de nouveauté moyen à élevé** (moyennes 3 à 5 encadrées). Stimulé.es ou non par le dispositif, les participant.es ont généré une même quantité de fiches idées peu nouvelles (moyenne 2-3). A contrario, la population stimulée par le dispositif a généré 2x plus de fiches idées ayant un degré de nouveauté élevé (4-5). La stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » a donc un effet positif sur la génération d'idées plus nouvelles.

4.4.7.2 Nouveauté et faisabilité : un impact positif

Pour une entreprise techno-centrée, la génération d'idées nouvelles reste insuffisante si celles-ci ne peuvent pas ouvrir à des développements avec les technologies. En ce sens, nous nous intéressons à vérifier l'influence positive du dispositif sur la faisabilité des fiches idées jugées plus nouvelles. Les résultats sont présentés sur le diagramme ci-dessous (fig.98), relatif aux procédés de fabrication additive Métal. L'abscisse représente les notes moyennes de nouveauté attribuées précédemment. L'ordonnée représente les notes moyennes de faisabilité.

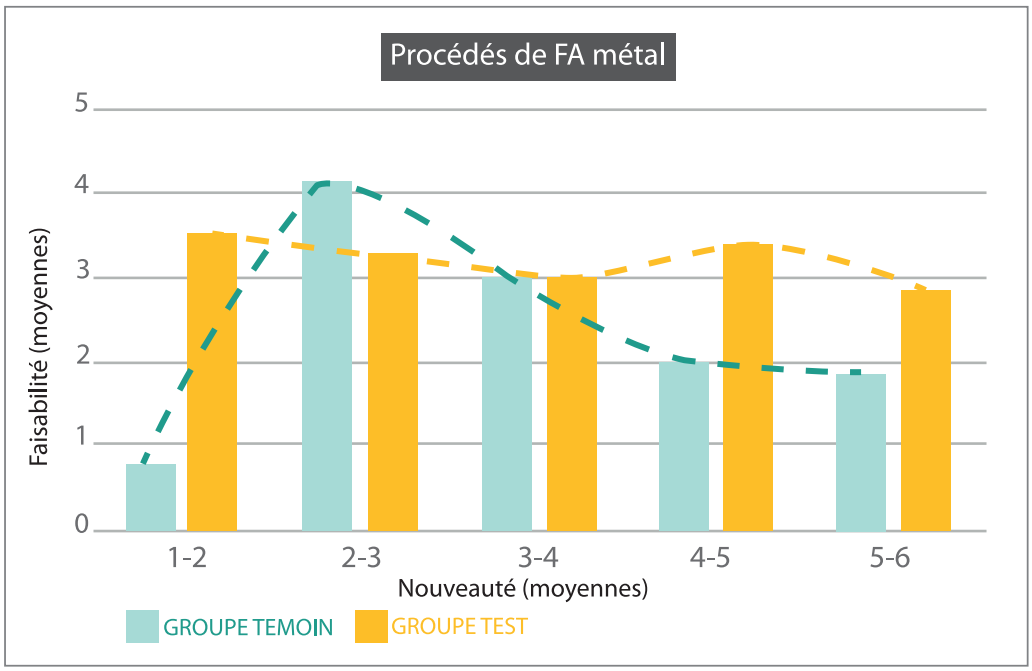


Fig.98 - La nouveauté au regard de la faisabilité

Ainsi, nous observons que la stimulation par le dispositif permet de conserver une constance de faisabilité, vis-à-vis des procédés Métal et des procédés Polymère. Nous remarquons que sans stimulation plus les fiches idées sont nouvelles (i.e classées de 3 à 6), moins elles sont faisables. A l'inverse, avec stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » (en rouge) les idées jugées plus nouvelles sont aussi faisables que les idées jugées peu nouvelles. Nous retenons alors que le dispositif « Cartes-Objets » permet de conserver une qualité de faisabilité même lorsque les idées sont particulièrement nouvelles.

Document confidentiel

4.4.7.3 La variété : probablement pas d'impact

Nous cherchions ensuite à observer la variété des fiches idées créées, c'est-à-dire le degré de similarité entre les idées, comme indice de l'ampleur de l'expansion réalisée dans le domaine d'exploration lié à la thématique de l'intégration de fonctions en fabrication additive. Les résultats de la catégorisation réalisée par les Experts sont présentés dans le diagramme ci-dessous (fig.99). L'abscisse représente le nombre de catégories dans lesquelles les fiches idées ont été classées.

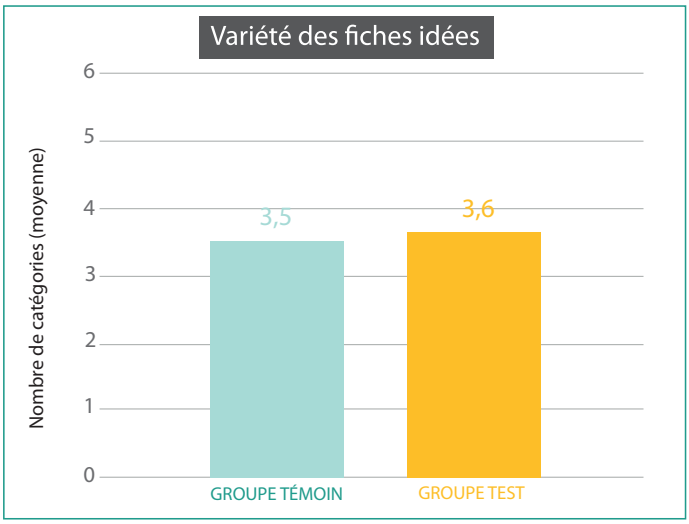


Fig.99 - Variété des fiches idées créées

Sur les 12 catégories proposées initialement aux Experts, seules 6 apparaissent ici, correspondantes aux jugements des 6 Experts. Ce résultat est donc relatif au nombre d'Experts engagés. Un plus grand nombre d'Experts permettrait d'observer la tendance sur l'ensemble des catégories.

La comparaison des moyennes (fig.98) montre que la répartition des fiches idées est semblable concernant celles créées après stimulation et celles créées sans. En d'autres termes, selon cet échantillon, le dispositif « Cartes-Objets » semble ne pas avoir d'influence sur la variété des idées générées. Il n'est donc pas assuré que le dispositif permette une exploration plus large dans l'espace de conception qu'un processus créatif stimulé uniquement par les objets typiques.

On retient alors qu'il n'est pas possible, au regard des données disponibles, de déterminer une influence positive ou négative du dispositif sur la variété des idées.

Dans la perspective d'améliorer cette évaluation, nous pourrions augmenter le nombre d'Expert. es mais aussi s'assurer de la bonne formulation des intitulés des catégories proposées aux Experts et donc de leur bonne compréhension. Ces intitulés choisis en amont peuvent en effet être sujets à interprétation ou confusion, notamment au regard de la proximité sémantique des intitulés. Par exemple, une catégorie était intitulée « Surveiller » et une autre « Contrôler ». La proximité sémantique des deux termes a pu perturber leur compréhension et donc engendrer un « bruit » lors de l'évaluation.

4.4.7.4 La brevetabilité : augmentation du potentiel

Nous avons vu qu'il est crucial pour une entreprise de pouvoir identifier, au plus tôt, les idées susceptibles de faire l'objet d'une protection par des démarches de propriété intellectuelle. Nous avons vu que, selon Howard **[122]**, en conception créative, la brevetabilité correspond à la mesure de l'originalité associée à la mesure de la pertinence. En ce sens, nous souhaitions in/valider le fait que la stimulation par notre dispositif favorise la génération d'idées susceptibles de faire l'objet d'un dépôt de brevet et, dans un second temps, qu'il est possible de repérer les idées susceptibles de faire l'objet d'une demande de dépôt de brevet parmi la grande quantité de fiches idées créées. Nous montrons les résultats par le diagramme ci-dessous (fig.100). L'abscisse représente l'originalité (-1 : pas original et 1 : original). L'ordonnée représente la pertinence sur une échelle 0 à 3.

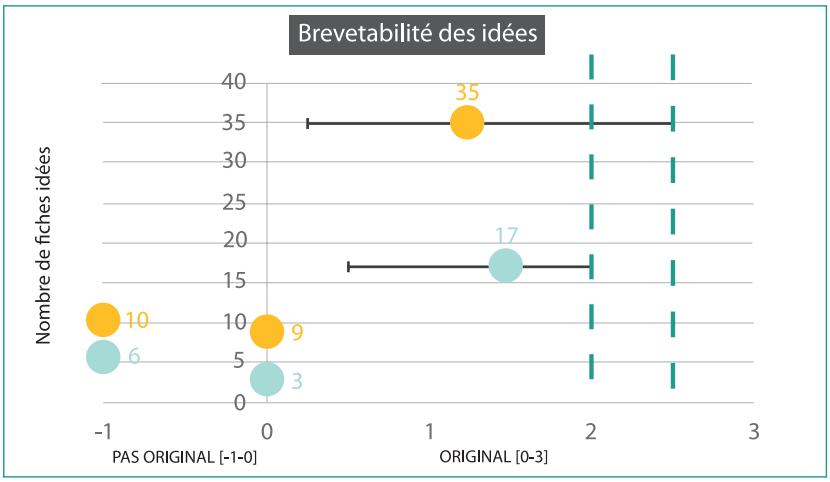


Fig.100 - Evaluation de la brevetabilité des fiches

Nous observons d'abord que, effectivement, la majorité des fiches idées ont été évaluées comme susceptibles d'être brevetables. Parmi celles-ci, les plus susceptibles d'être brevetables ont été générées par la population test stimulée par le dispositif « Cartes-Objets ». **Donc le dispositif Cartes-Objets augmente le potentiel brevetable des idées.**

Document confidentiel

Toutefois, nous remarquons que 12 fiches idées sont présentes sur l'axe des ordonnées (x=0), ce qui signifie que la moitié des Experts les ont jugées non originales quand l'autre moitié des Experts les jugeaient originales. Nous retenons alors que, lorsqu'elle est conduite très tôt dans le processus, l'évaluation de la brevetabilité des fiches idées requièrent un groupe d'Expert.es plus robuste. Cela pourrait être par exemple atteint en convoquant des expert.es de la propriété intellectuelle lors de l'évaluation, ou plus généralement en augmentant la diversité des profils.

Finalement, la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » favorise effectivement d'une part, la génération d'idées brevetables et, en outre, la génération d'idées plus brevetables qu'un processus créatif stimulé uniquement par 8 objets typiques.

La sous-section suivante propose une synthèse des résultats de l'évaluation conduite sur les six critères présentés.

4.4.7.5 Synthèse des résultats expérimentation #1

L'expérimentation #1 réalisée sous la forme d'une étude comparative conduite en interne, chez Poly-Shape avec 12 participant.es était focalisée sur les phases 2 et 3 du modèle de créativité par et pour la fabrication additive proposé, soit les phases « Génération d'idées et Evaluation ». Au sujet de la conduite de ces phases, nous avions émis l'hypothèse suivante : « la stimulation par la manipulation d'un objet instrument de type « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées créatives ».
Les fiches idées créées dans le cadre de cette étude ont fait l'objet d'une analyse quantitative selon les critères de quantité et d'adéquation au brief et d'une analyse qualitative selon les critères de nouveauté, de faisabilité, de variété et enfin de brevetabilité. Nous retenons alors que le dispositif de stimulation de la capacité créative nommé « Cartes-Objets », permet, dans le contexte de la créativité par et pour la fabrication additive, de :

- Générer une plus grande quantité d'idées, en assurant la fluidité des participant.es
- Générer des idées plus adéquates au brief soumis
- Générer des idées plus nouvelles
- Mieux assurer la faisabilité par les procédés Métal et Polymère des idées, même lorsque celles-ci sont très nouvelles
- Générer des idées brevetables
- Générer plus d'idées brevetables

En ce sens, nous pouvons affirmer que l'hypothèse H1 émise est validée. Cependant, les résultats montrent également que la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » :

- N'a pas d'influence sur la variété des idées générées
- Requiert un nombre impair d'Expert.es ou ayant un niveau de connaissances très élevé (par exemple des ingénieur.es spécialistes de la veille brevet) pour améliorer la fiabilité de l'évaluation de la brevetabilité

L'ensemble de ces résultats sont synthétisés dans la table 14 ci-après.

Table 14 - Synthèse des résultats expérimentation #1

Critères	Validation
Quantité d'idées	
Fluidité des participant.es	
Adéquation au brief	
Nouveauté des idées	
Nouveauté et faisabilité technique des idées	
Brevetabilité des idées	
Variété des idées	

Dans la section suivante, nous rapportons d'autres observations qui n'ont pas fait l'objet d'une analyse par des Expert.es dans le périmètre de cette thèse. Ces feedbacks montrent des perspectives d'approfondissement des recherches liant créativité et fabrication additive.

4.4.7.6 Feedbacks et discussion

Ces feedbacks ont été recueillis d'une part, grâce au questionnaire soumis aux participant.es en fin de séance de créativité et d'autre part grâce à l'analyse des photos, prises de son et vidéos réalisées dans le cadre de cette observation participante. Ils ouvrent sur l'étude du flux créatif des individus, dans le cadre de la créativité par et pour la fabrication additive.

Etat émotionnel et génération d'idées

A l'issue de la séance, il était demandé aux participant.es : « Les émotions que vous avez ressenties pendant le workshop vous ont aidé à générer des idées ». Leur réponse devait être placée sur l'échelle suivante : (1) Pas du tout – (2) Un peu – (3) Moyennement – (4) Beaucoup – (5) Carrément. Les duos de la population test ont en moyenne répondu Un peu à Moyennement (2,8/6). 3 participant.es ont évoqué du stress et une frustration liés au timing imposé (6 min/tour) inhibant leur génération d'idées et empêchant l'approfondissement d'idées techniquement complexes. A l'inverse, les 3 autres ont verbalisé le plaisir lié à « l'esprit de compétition » imposé par l'utilisation du dispositif, poussant à générer « plus d'idées que les autres » et « des idées auxquelles les autres ne vont pas penser ». Les duos représentant la population témoin ont répondu en moyenne Beaucoup à Carrément (4,1/6). I.elles ont unanimement verbalisé le plaisir ressenti au regard de l'aspect facilitateur et guidant apporté par les objets typiques. Il semblerait donc que le dispositif « Cartes-Objets » puisse influencer l'état émotionnel, vers des émotions négatives ou positives. Il pourrait alors être intéressant d'observer l'influence des états émotionnels de concepteur.trices faisant face à un niveau d'informations techniques complexes, sur la qualité des idées générées.

Document confidentiel

Coopération, collaboration et construction des représentations

L'analyse des séquences d'enregistrement vidéo sonore a également permis d'observer les interactions entre les participant.es et leur influence sur la construction des représentations. Nous rapportons cette observation sur la figure 101. Chaque fiche idée numérotée est reliée au membre du duo qui l'a construite par un segment. Lorsque les deux membres du duo ont participé à la construction d'une fiche idée, un segment relie les deux participant.es. Les segments fléchés représentent alors les contributions de chaque membre et si l'initiative de la construction était unilatérale (segment plus long d'un côté) ou bilatérale (segments égaux).

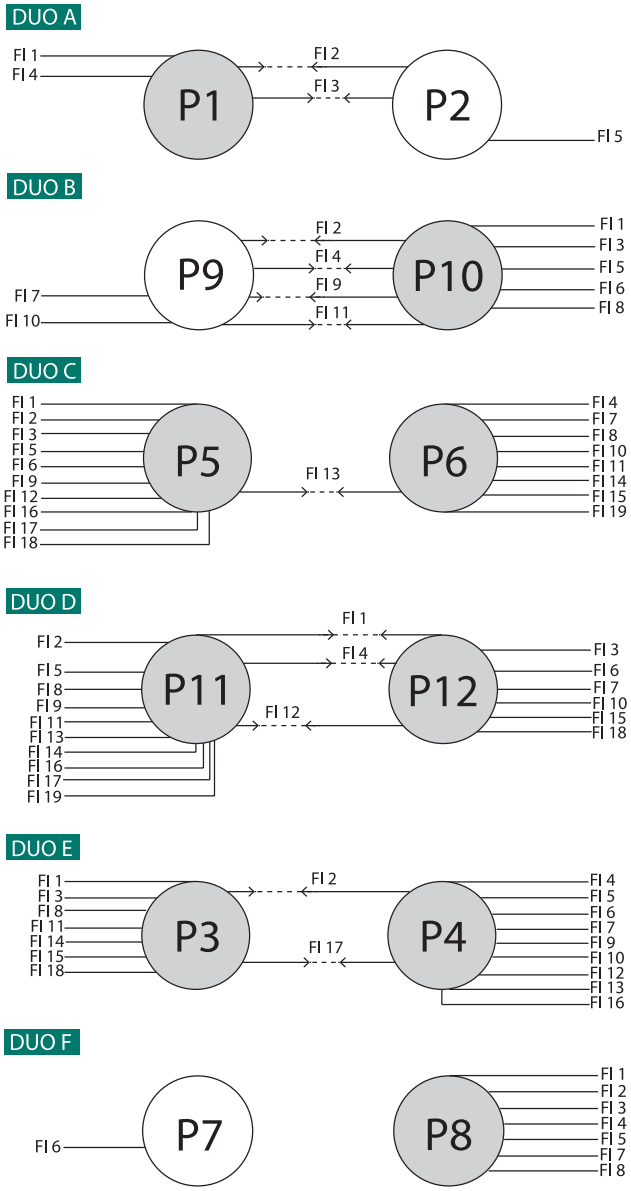


Fig.101 - Interactions entre participant.es et construction des représentations

Nous remarquons d'abord que, dans la population témoin (Duos A, B et F), les fiches idées ont été majoritairement construites par l'un des deux membres du duo. Cette situation est particulièrement observable dans le duo F où P8 a construit l'ensemble des fiches à l'exception d'une seule (FI 6). Toutefois, dans les duos A et B, une part importante des fiches idées a été co-construite par les deux membres de chaque duo. A l'inverse, dans les duos représentant la population test (C, D et E), les fiches idées ont été rarement co-construites. Dans ces duos, chaque membre a construit un nombre de fiches idées similaires. En ce sens, il semble que les membres de la population témoin aient eu une attitude collaborative pour la construction des représentations alors que les membres de la population test étaient plus dans la coopération, selon les définitions présentées par Laverne **[34]** (pp 47-49). Une fois que l'idée était proposée oralement et discutée, chacun des membres se chargeait de construire une ou plusieurs fiches correspondantes à cette idée et ses déclinaisons. Dans ces duos, les deux membres se sont donc réparti la tâche de construction. Au regard de la quantité de fiches construites par ces duos test, il apparaît que cette attitude coopérative augmente la productivité mais pas la collaboration.

Finalement, le dispositif « Cartes-Objets » serait-il défavorable pour la collaboration et favorable pour la coopération ? Il serait intéressant d'observer les schémas de coordination, coopération ou collaboration en jeu face à l'utilisation de différents dispositifs de stimulation de la créativité par et pour la fabrication additive, et d'observer leur influence sur la qualité des idées générées. En perspective, cela permettrait alors d'optimiser les dispositifs dans le sens de la collaboration.

4.4.8 Conclusion de l'expérimentation #1

Cette expérimentation #1 visait à observer l'influence de la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets ». Nous supposions que cette stimulation favorise la génération d'idées créatives, dans le contexte de la créativité par et pour la fabrication additive. Pour in/valider cette hypothèse, nous avons conçu le dispositif « Cartes-Objets » puis conduit une étude comparative en séance de créativité avec des collaborateur.trices de Poly-Shape.

Ainsi, les résultats de l'expérimentation #1 ont montré que le dispositif « Cartes-Objets » influence positivement la génération d'une plus grande quantité d'idées, plus adéquates au brief, plus nouvelles, faisables en fabrication additive et susceptibles de faire l'objet de dépôt de demandes de brevets. Il est par contre apparu que le dispositif ne semble pas avoir d'influence sur la variété des idées. Ces résultats permettent d'affirmer que l'hypothèse n°1 est validée, sous réserve que l'évaluation pour la brevetabilité soit conduite par des Experts en groupe impair et ayant des niveaux de connaissances très diversifiés sur la fabrication additive, de manière à pondérer et à rendre leur jugement plus robuste. Les résultats positifs apparaissent donc en vert sur la figure 102 ci-dessous et les réserves, liées à la variété et à la brevetabilité, en rouge.

Document confidentiel

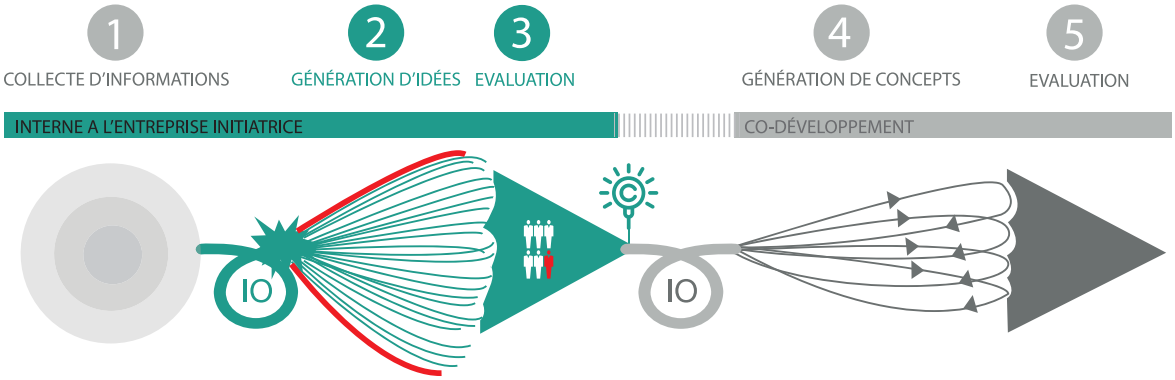


Fig.102 - Validation des phases 2 et 3, avec réserves (en rouge)

En phase de génération d'idées, il est surprenant de constater une amélioration de la quantité, la nouveauté, l'adéquation, la faisabilité et de la brevetabilité des idées mais une moins bonne variété. Dans cette phase divergente la variété des idées est une qualité attendue car elle indique l'étendue de l'exploration dans un espace de conception. Une faible variété indique une faible expansion dans cet espace et donc une plus faible probabilité de trouver les meilleures idées dans cet espace. Cette faiblesse pourrait alors suggérer que, finalement, le dispositif Cartes-Objets serait approprié en phase avale, lorsque les activités tendent à converger vers la génération de concepts, vers un stade de définition plus élevé où la variété est peu requise.

Nous identifions un biais et trois limites quant à cette étude. D'une part, notre participation à la séance de créativité (rôle d'animatrice) a potentiellement influencé les participant.es et/ou les résultats. Ce biais est connu et inhérent à la recherche-action (§1.2.2). Une première limite correspond à la population réduite à 12 participant.es. Conduire d'autres séances de créativité sur le même thème permettrait d'obtenir des résultats plus robustes. La seconde limite est relative au nombre d'Experts conviés pour l'évaluation. La dernière limite renvoie au fait que le dispositif « Cartes-Objets » a été mis en jeu sur la seule thématique de l'intégration de fonction en fabrication additive. Appliquer ce dispositif à d'autres thématiques permettrait d'observer plus finement l'importance de stimuler les acteur.trices de la créativité par et pour la fabrication additive.
Nous avons également identifié des perspectives possibles. En effet, l'usage de cartes et d'une logique de jeu comme stimulant de la capacité créative est connu en sciences de la conception, notamment dans le champ des *learning games* **[251]**. La recherche sur la créativité, active depuis plusieurs dizaines d'années, propose également des pistes de recherches qui dépassent le stade de l'outil de stimulation pour s'intéresser, par exemple, aux états émotionnels, aux interactions sociales et au pouvoir de transformation des individus avec le *corporate hacking* **[252]**. Dans notre contexte techno-centré, placer notre étude au niveau des outils et de l'évaluation de la qualité des idées générées est un moyen efficace pour faire la preuve de l'intérêt d'intégrer la créativité. Ce positionnement est donc cohérent avec l'état de l'entreprise actuel et à moyen terme constaté chez Poly-Shape (§1.1).
Cependant, ce positionnement dépasse la dimension « recette systématique à appliquer » parfois reprochée aux études centrées sur les outils (§2.11.1). En effet, la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » ne vise pas une application ponctuelle mais s'inscrit dans une

démarche de plus long terme, qui nécessitera notamment d'être articulé avec la phase de co-développement, sujet de l'expérimentation suivante. En outre, cette étude s'attache à questionner les outils à la lumière de la fabrication additive et à les développer pour la situation singulière de l'exploration d'une thématique de R&D. En ce sens, la section suivante présentera la conception du dispositif « AMIO », mis en jeu dans l'expérimentation #2.

4.5 [PROJET B]

Conception et fabrication du dispositif « AMIO »

Dans le projet A, la conception du dispositif « Cartes-Objets » visait à transférer un outil et une logique de rencontres aléatoires forcées connus dans le champ de la créativité, au champ de la fabrication additive. A l'inverse, ce projet B vise alors à transférer des spécificités de la fabrication additive à un outil de créativité : les objets déclencheurs d'expériences, au sens de Cruz **[174]** et de Moussette **[185]**. Nous présentons donc ici la conception et la fabrication d'objets déclencheurs d'expériences spécifiques à la fabrication additive.

4.5.1 Fondement et objectifs du projet B

La conception de ce dispositif a pour objectif d'incarner des constats issus de l'état de l'art, des projets R&D 1 et 2 et de l'expérimentation #1 :

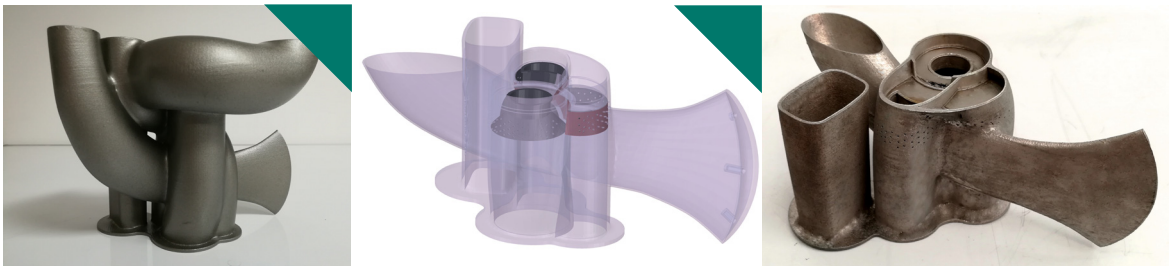
- Les objets instruments, un type singulier d'objets intermédiaires mobilisé pendant le processus créatif, présentent un caractère exploratoire, interactif, original et ludique **[178]**
- En favorisant les manipulations sensori-motrices, les objets déclencheurs d'expériences, un type singulier d'objets intermédiaires mobilisé pendant le processus créatif, suscitent la curiosité, des questionnements et favorisent le mécanisme d'analogie **[174], [185]**
- Les objets intermédiaires sont des marqueurs spatiaux, qui permettent d'orienter le regard et les interactions entre les participant.es d'une séance de créativité de groupe **[160]**
- Des corps étrangers solides, liquides, pulvérulents et fibreux peuvent être inclus dans des objets typiques de la fabrication additive

Le dispositif « AMIO » (pour Additive Manufacturing of Intermediate Objects) est destiné à des acteur.trices ayant un niveau de connaissances débutant ou intermédiaire en fabrication additive, dans le cadre de séances de créativité de groupe, conduites dans un contexte de co-développement et en présence d'un.e animateur.trice. Il peut être utilisé indifféremment par des acteur.trices ayant développé leur capacité créative ou non.

4.5.2 Conception et fabrication des AMIO

La conception de ce dispositif s'est déroulée en trois étapes : la conception numérique des modèles, leur fabrication avec interruption de production pour inclure des corps étrangers selon la méthode mise au point au cours du projet R&D2 et la définition de scénarii de manipulation des objets produits. Ces étapes sont présentées dans les sous-sections suivantes.
Ces modèles sont dérivés des objets typiques issus de la pré-expérimentation et utilisés dans l'expérimentation #1. Ils présentent donc également des caractéristiques formelles et fonctionnelles typiques de la fabrication additive, augmentées d'autres fonctions apportées par l'inclusion de corps étrangers. Les corps étrangers inclus dans ces modèles avaient été identifiés précédemment et techniquement validés au cours du projet R&D2 (§3.2.2). Les six modèles sont décrits ci-après.

Le modèle 1 (fig.103) est dérivé de l'objet typique B. En CAO, des cavités ont été aménagées à l'intérieur de trois des tubes, de manière à contenir du sulfate de cuivre anhydre en poudre. Ces cavités sont refermées par des plafonds, selon la technique d'interruption de production mise au point dans le projet R&D2. Le corps étranger inclus n'est donc pas visible en apparence mais des indices observables déclenchent des questionnements. La présence de plafonds et des perçages visibles en surface indiquent la présence d'une caractéristique singulière. Ainsi, la conception de cet objet permet de commencer à éveiller la curiosité des participant.es par l'observation, avant d'accéder à la découverte des informations par la manipulation, dont le scénario est décrit dans la section suivante.



Objet typique B *Modèle 1* *AMIO 1*

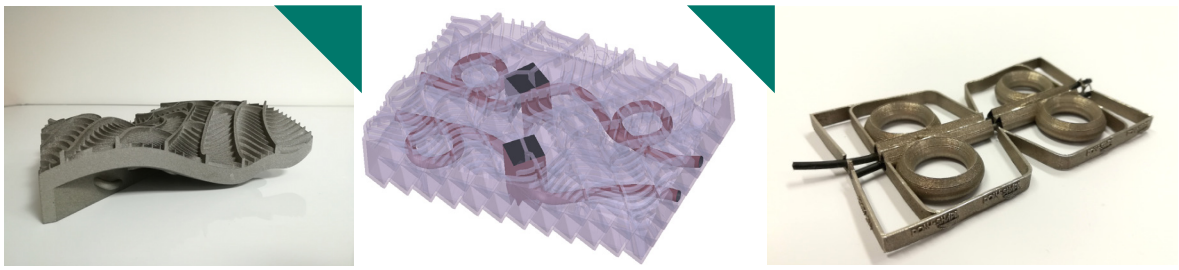
Fig.103 - De l'objet typique B à l'AMIO n°1

Le modèle 2 (fig.104) est dérivé de l'objet typique G. Deux structures en treillis ont été conçues à l'intérieur du tube le plus long, de manière à maintenir en place une pastille effervescente. Ce corps étranger n'est pas visible mais la structure treillis peut être aperçue par la section ouverte du tube. Il s'agit également ici de donner un indice, par la seule observation, sur la présence d'une caractéristique singulière afin d'éveiller la curiosité et des questionnements avant la manipulation.

Objet typique G *Modèle 2* *AMIO 2*

Fig.104 - De l'objet typique G à l'AMIO n°2

Le modèle 3 (fig.105) est dérivé de l'objet typique C. Deux canaux formant des boucles ont été aménagés pour contenir deux fibres optiques. Deux évidements ont été aménagés comportant chacun un « couperet » disposés au -dessus de chaque fibre optique. Les fibres optiques débouchent de chaque côté du modèle. Ainsi, la présence des fibres peut être aperçue, de manière à éveiller la curiosité sur la singularité de cet objet. Dans ce cas, un échec de fabrication a contraint à substituer au modèle 3 conçu, l'objet produit au cours du projet R&D2.



Objet typique C *Modèle 3* *AMIO 3*

Fig.105 - De l'objet typique C à l'AMIO n°3

Le modèle 4 (fig.106) est dérivé de l'objet typique H. Deux des aubes ont été extraites de l'objet typique. Les dimensions de ces aubes ont été augmentées de manière à aménager deux cavités à l'intérieur de chacune. La première cavité (la plus grande) est destinée à contenir une huile colorée et la seconde une bille métallique. Ces deux cavités communiquent pour mettre en contact l'huile et la bille. Une fois l'objet fabriqué, seule la cavité débouchante contenant la bille est visible en surface. Il s'agit donc encore d'éveiller la curiosité par la simple observation, et de donner des premiers indices sur un scénario de manipulation qui permettra de découvrir la singularité de l'objet.

Objet typique H *Modèle 4* *AMIO 4*

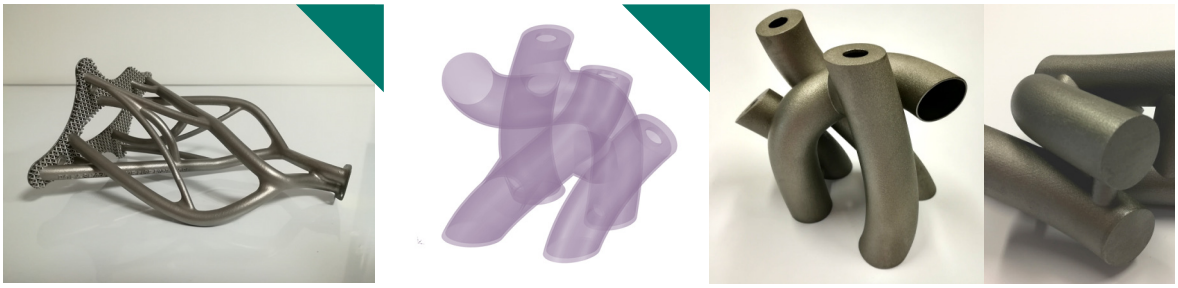
Fig.106 - De l'objet typique H à l'AMIO n°4

Le modèle 5 (fig.107) est dérivé de l'objet typique E. Dans ce cas, l'objet typique n'a, à première vue, pas été modifié. En fait, des parcours de circulations de liquides colorés ont été créés en bouchant une partie des canaux existants. En apparence, ces parcours ne sont pas visibles, ce qui déclenche des questionnements quant au rôle de ce modèle. Dans ce cas, les liquides colorés n'ont pas été inclus pendant la fabrication, ils le seront lors de la phase de manipulation.

Objet typique E *Modèle 5* *AMIO 5*

Fig.107- De l'objet typique E à l'AMIO n°5

Enfin, le modèle 6 (fig.108) est dérivé de l'objet typique A. Une partie des « branches » de l'objet typique a été extraite. Le diamètre de ces branches a été augmenté de manière à pouvoir aménager des canaux creux à l'intérieur de celles-ci, permettant la circulation d'une bille d'acier. Un seul de ces tubes est ouvert et permettra à la bille de s'échapper. Le fait que les autres tubes soient bouchés donne un premier indice sur un scénario de manipulation qui permettra de découvrir la singularité de cet objet.



Objet typique A *Modèle 6* *AMIO 6*

Fig.108 - De l'objet typique A à l'AMIO n°6

Finalement, l'ensemble de ces modèles apportent des informations sur les caractéristiques formelles et fonctionnelles typiques de la fabrication additive et, dans le même temps, des indices liés à l'inclusion de corps étrangers en fabrication additive, c'est-à-dire un niveau d'information supplémentaire. Dans ce contexte, ces modèles ne doivent pas être compris comme étant des composants, leur fonction est de déclencher des expériences à vivre via la manipulation. La conception et la fabrication de ces modèles correspondent donc aux constats de Cruz **[174],** Moussette **[185]** et de Dunne **[186]** identifiés dans l'état de l'art. En ce sens, nous les nommons « AMIO » pour Additive Manufacturing of Intermediate Objects. Ce sont des objets intermédiaires spécifiques à la fabrication additive et mobilisés pour le processus créatif. Pour accéder aux informations contenues dans ces AMIO, il sera alors nécessaire de « faire l'expérience de la fabrication additive », au sens de Bolzan **[222]**. Dans le cadre d'une séance de créativité de groupe, les participant.es découvriront ces informations en manipulant (au sens sensori-moteur) ces AMIO.

Les scénarii de manipulations conçus pour chaque AMIO sont présentés dans la section suivante.

4.5.3 Scénarii de manipulations

Ces scénarii visent à mettre en situation d'expérience les AMIO fabriqués et détaillés dans la section précédente. Ces situations doivent être affordantes, c'est-à-dire qu'elles doivent suggérer aux participant.es au moins une façon de manipuler chaque AMIO, sans qu'un mode d'emploi soit nécessaire. Il est attendu que ces manipulations sensori-motrices déclenchent de l'étonnement et des questionnements. En ce sens, les scénarii doivent intégrer du suspens et un temps de découverte.

Ces scénarii sont décrits dans les figures 108 à 113 ci-dessous. Toutes les situations sont présentées sur un support noir identique, de manière à définir le cadre de chaque expérience.

La première mise en scène (fig.109) présentera l'AMIO n°1 disposé à côté d'un contenant transparent rempli d'eau. Cette disposition suggère que l'AMIO devra être plongé dans l'eau. Pendant 15 secondes, aucune réaction ne sera visible. Ensuite, l'eau bleuira progressivement. En effet, le sulfate de cuivre anhydre emprisonné entrera en contact avec H2O et réagira.

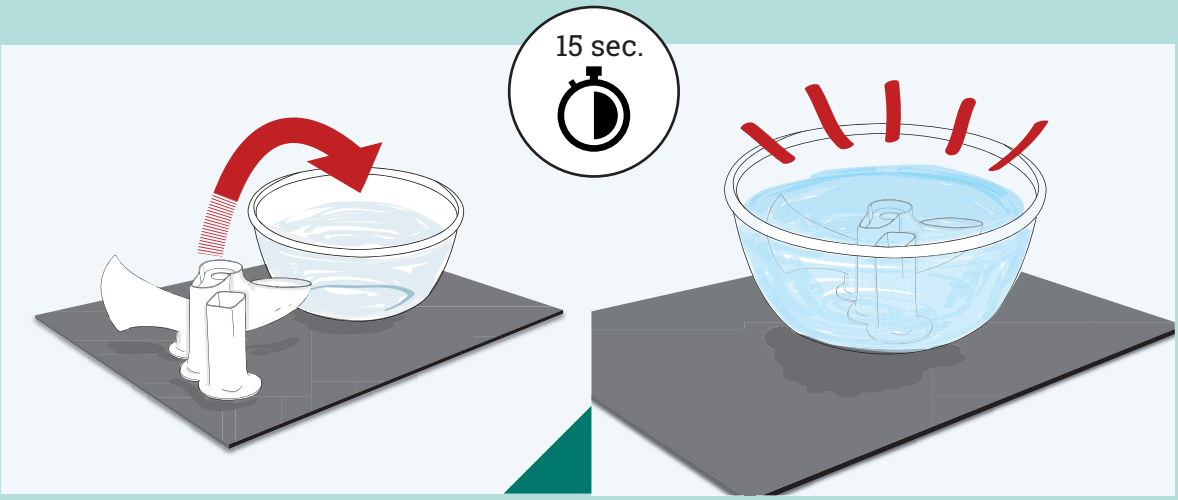


Fig.109 - Scénario de manipulation #1

La seconde mise en scène (fig.110) présentera l'AMIO n°2 disposé à côté d'un contenant vertical transparent rempli d'eau. Cette disposition suggère que l'AMIO est destiné à être plongé dans l'eau à la verticale. Aucune indication ne sera donnée sur l'orientation de l'AMIO à choisir pour le plonger. Pendant 5 secondes aucune réaction ne sera visible. Des bulles fines s'échapperont ensuite de l'objet. En effet, la pastille effervescente incluse réagira au contact de l'eau. Cette réaction ne sera pas visible de loin, cela devrait inciter les acteur.trices à s'approcher pour observer la situation et découvrir les informations.

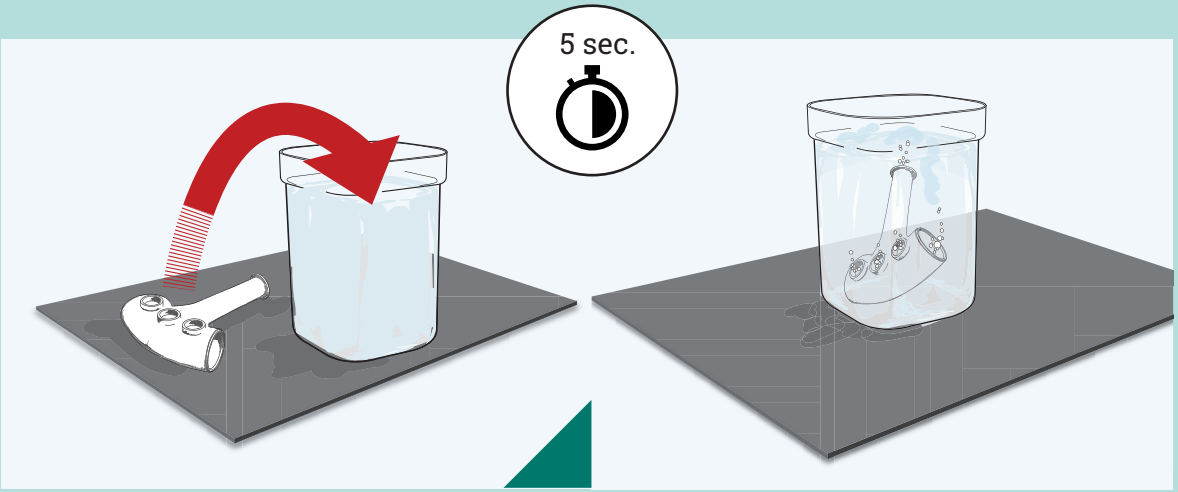


Fig.110 - Scénario de manipulation #2

La troisième mise en scène (fig.111) présentera une paire de gants de protection disposés à côté de l'AMIO n°3. Ces gants suggèrent que la manipulation pourrait être salissante. L'une de ces « aubes » (ou les deux en même temps) devrait être retournée puis déplacée sur le support. Ainsi, l'huile colorée devrait entrer en contact avec la bille métallique et laisser une trace colorée visible sur le support, à la manière d'une cartouche d'encre. L'huile devrait permettre le roulement de la bille métallique.

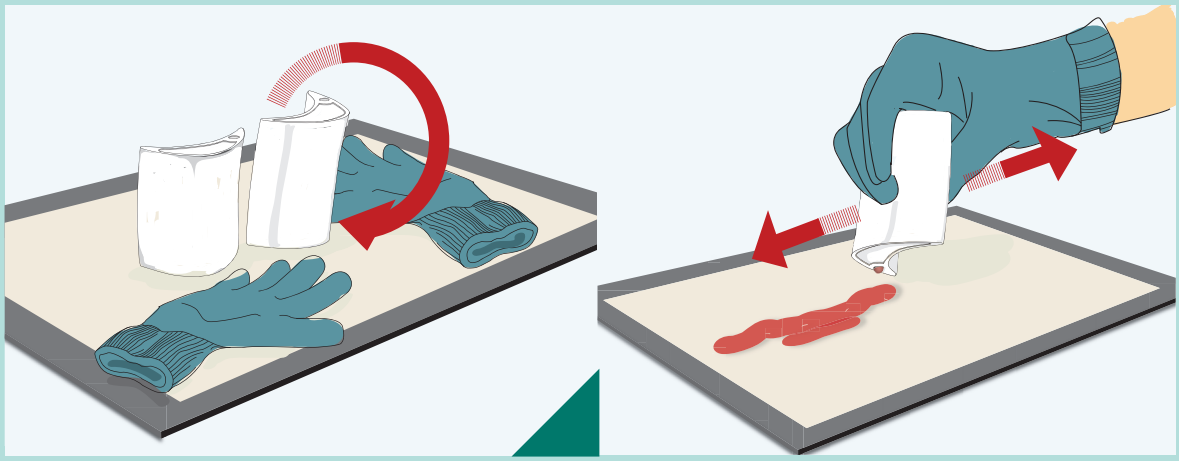


Fig.111 - Scénario de manipulation #3

La quatrième mise en scène (fig.112) présentera l'AMIO n°4 disposé à côté d'un gant, d'un marteau et d'une LED bleue allumée. Pour cette manipulation, la salle sera plongée dans le noir. Le gant suggère de se protéger vis-à-vis du marteau. Cette disposition suggère alors que, avec un coup de marteau, il sera possible de sectionner l'une des deux fibres optiques, puis constater que le flux lumineux est interrompu en bout de la fibre sectionnée mais toujours visible sur la seconde fibre restée intacte.

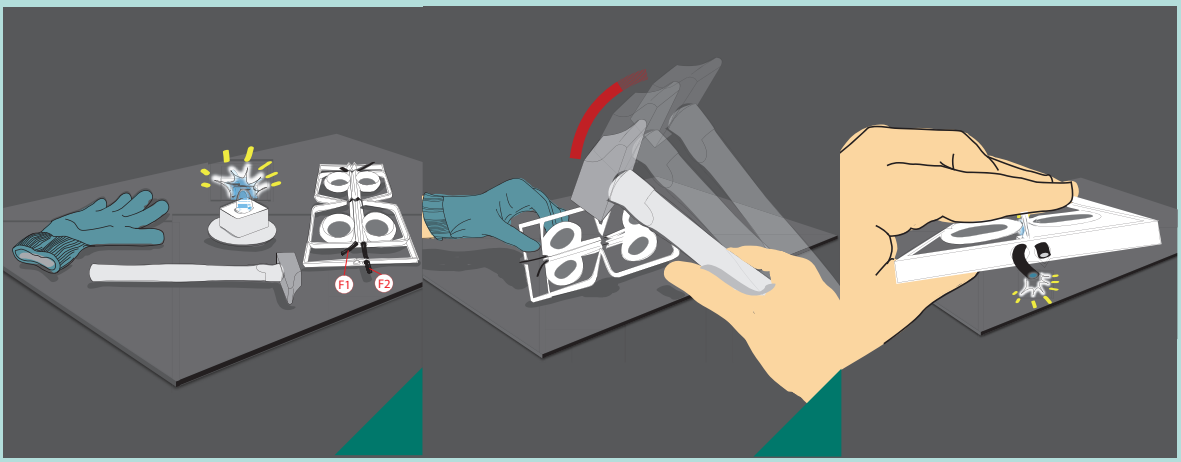


Fig.112 - Scénario de manipulation #4

La cinquième mise en scène (fig.113) présentera l'AMIO n°5, trois pipettes contenant trois colorants liquides (bleu, rouge et jaune) et quatre contenants transparents vides. Cette disposition suggère que les colorants devront être inclus dans les canaux à l'aide des pipettes. Le nombre de contenants transparents correspond au nombre de tubes visibles : 3 d'un côté de l'AMIO et un seul de l'autre côté. Ainsi, la disposition suggère que, si les liquides colorés sont inclus lorsque les trois tubes sont orientés vers le haut, les couleurs ressortiront mélangées (image A). A l'inverse, si les colorants sont inclus lorsque le tube unique est orienté vers le haut, chaque colorant débouchera sans avoir été mélangé avec les autres (image B).

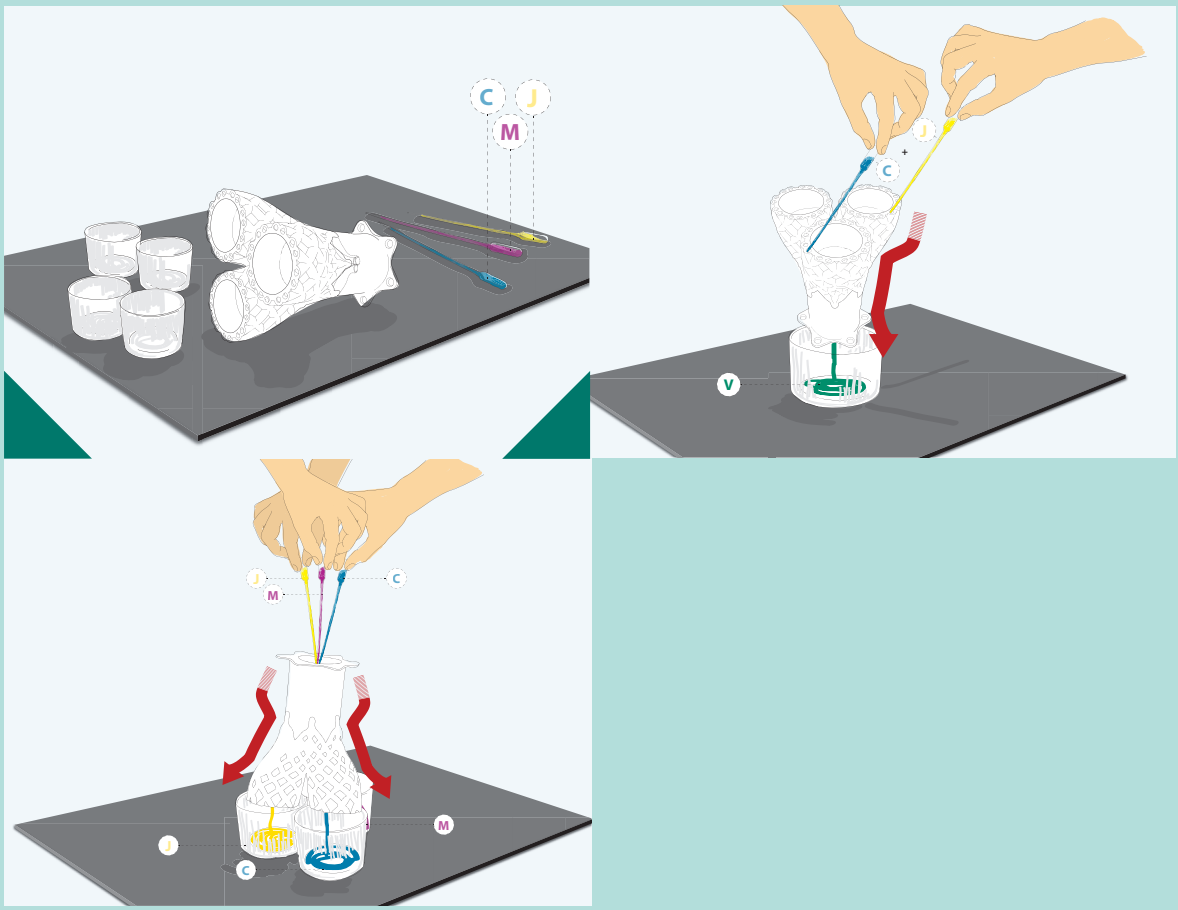


Fig.113 - Scénario de manipulation #5

La sixième mise en scène (fig.114) présentera un aimant disposé à côté de l'AMIO n°6. Dans un premier temps, cet aimant est peu visible car petit. Cette disposition suggère que l'AMIO devrait d'abord être manipulé seul. Cette manipulation révèlera, par le son, la présence de la bille métallique emprisonnée à l'intérieur. La ou les personnes qui manipulent devraient alors chercher le lien entre l'aimant disponible et la bille emprisonnée. Ce lien devrait conduire à utiliser l'aimant pour guider la bille métallique dans les tubes, à la manière d'un labyrinthe, jusqu'à pouvoir la libérer.

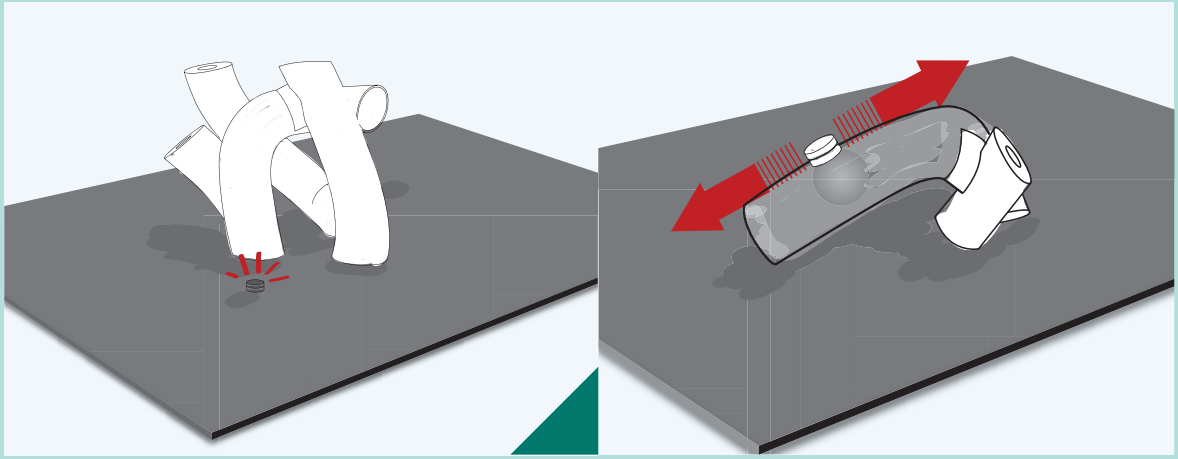


Fig.114 - Scénario de manipulation #6

Les scénarii décrits étaient destinés à concevoir la manipulation des AMIO, ils ne seront pas donnés aux personnes qui en feront l'expérience, c'est-à-dire, dans cette thèse, aux participant.es à l'expérimentation #2. Nous venons de décrire individuellement chaque expérience. La section suivante décrit alors la conception de l'organisation spatiale qui permettra de mettre en scène l'ensemble de ces expériences vis-à-vis de participant.es.

4.5.4 Définition du cadrage spatial

L'état de l'art, a rapporté les constats de Vinck **[160]** affirmant que les objets intermédiaires jouent un rôle de marqueurs spatiaux dans le cadre d'activités de groupe (§2.9.4). Ils permettent de définir un espace collectif (et donc, en dehors de celui-ci, un espace individuel), d'orienter les regards vers un centre d'action et de favoriser la coopération entre les personnes. Ils sont alors connus comme favorisant l'alternance activités individuelles / collectives nécessaires à la conduite du processus créatif.
Ainsi, la disposition des expériences prévues, vis-à-vis des participant.es est montrée dans la figure 115. Cette disposition suggère que chaque personne assise en face d'une expérience sera naturellement désignée comme étant animatrice de la manipulation.

En face, l'individu devrait être le ou la répondant.e. Les participant.es voisin.es de l'animateur.trice pourront également participer à l'expérience, par de la verbalisation et/ou directement en manipulant avec l'animateur.trice. Cette coopération est par exemple prévue dans le scénario #5 décrit dans la section précédente. Cette manipulation impliquera en effet, au moins deux personnes pour tenir l'objet et inclure les liquides colorés. Une telle disposition devrait inviter l'ensemble des participant.es à se rapprocher du centre de l'action et à interagir.

Ces expériences seront réalisées successivement, dans l'ordre des scénarii décrits ci-dessus, soit 1 à 6. De cette manière, l'ensemble des participant.es aura accès aux informations découvertes par les manipulations.

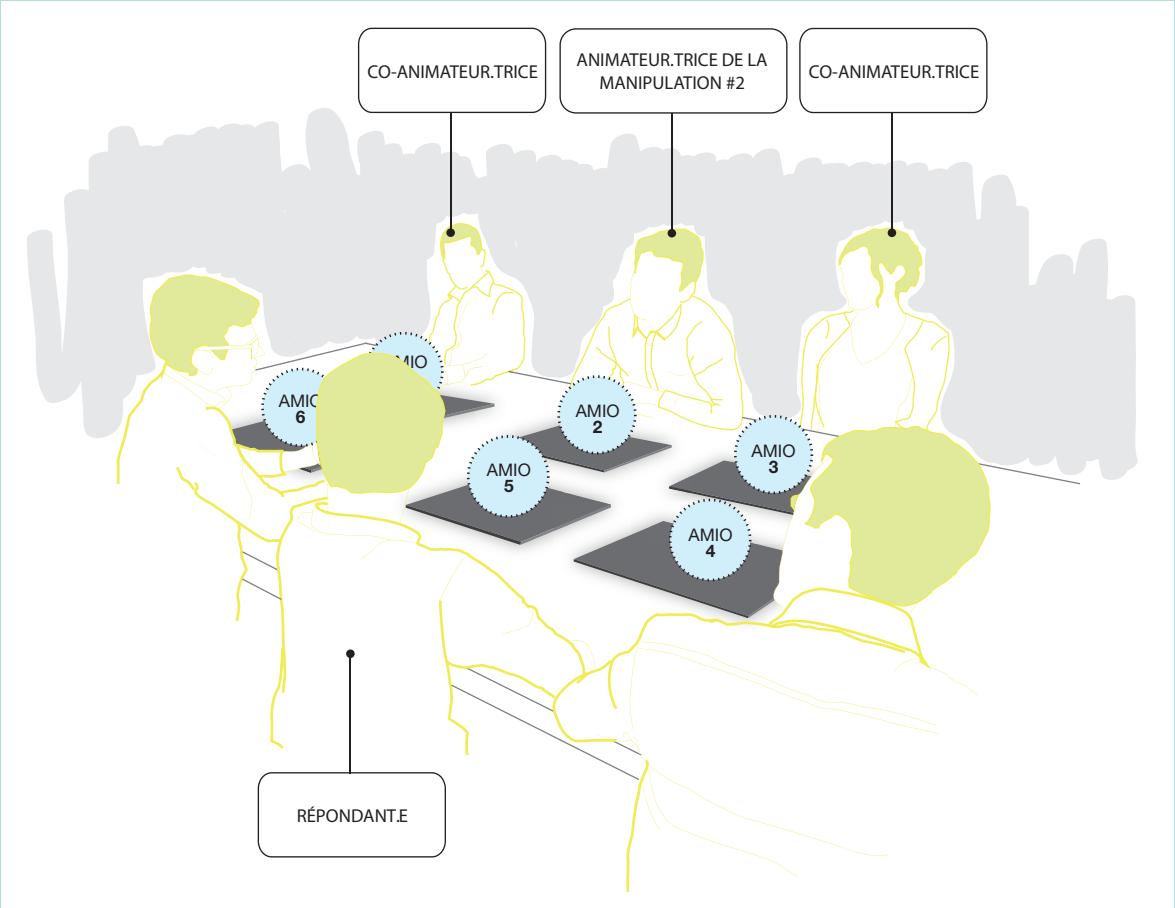


Fig.115 - Disposition spatiale des expériences vis-à-vis des participant.es

L'ensemble des éléments décrits (les AMIO modélisés puis fabriqués, les scénarii de manipulation et le cadrage spatial) constitue « le dispositif AMIO ». L'expérimentation #2, décrite dans la section suivante, visera alors à observer l'influence de la stimulation par la manipulation de ce dispositif, sur la génération d'idées puis de concepts.

4.6 Expérimentation #2 : stimulation par le dispositif « AMIO »

4.6.1 Objectif

Cette expérimentation #2 vise à observer l'influence de la stimulation par la manipulation d'objets déclencheurs d'expériences spécifiques à la fabrication additive, permise par le dispositif « AMIO ». L'influence sera observée sur la capacité créative de partenaires de co-développement, dans le cadre de séance de créativité de groupe centrée sur l'intégration de fonctions en fabrication additive. En d'autres termes, nous cherchons à in/valider l'hypothèse n°2 : « la stimulation par la manipulation d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise la génération d'idées et de concepts créatifs ».

4.6.2 Population et lieu

L'expérimentation #2 a requis une population de 12 participant.es professionnel.les du groupe Air Liquide, pendant une séance de créativité de groupe d'une journée réalisée dans le tiers-lieux **ilab**. Les profils des participant.es sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

4.6.2.1 Les partenaires de co-développement

Comme décrit en amont, cette thèse s'inscrit dans un contexte où le département de l'innovation articule la recherche et le développement et correspond donc à une situation de co-développement entre une entreprise initiatrice et une entreprises partenaire (§1.1.2). En ce sens, les participant.es à cette expérimentation #2 sont appelé.es « Partenaires de co-Développement » (PcoD). Il s'agit ainsi de passer de l'exploration des possibilités techniques offertes par la fabrication additive à l'exploration d'applications possibles pour un secteur industriel, en l'occurrence le secteur Energie. En ce sens, les PcoD représentent différentes entités du groupe Air Liquide qui développent des produits variés, tels que, par exemple, des réservoirs cryogéniques, des échangeurs thermiques, des bouteilles de gaz, des catalyseurs pour la production de gaz ou encore du petit matériel médical. Un questionnaire soumis en amont de la séance de créativité a déterminé les profils des PcoD. Ces profils sont synthétisés dans la table 15 ci-dessous.

Document confidentiel

Table 15 - Partenaires de co-développement et niveaux d'expérience

PcoD	F/H	Années XP	Types de postes
PcoD 1	H	+ 5 ans	« coordination des projets »
PcoD 2	H	+ 5 ans	« senior expert »
PcoD 3	F	+ 5 ans	« responsable équipe innovation »
PcoD 4	H	+ 5 ans	-
PcoD 5	H	+ 5 ans	« directeur de projets »
PcoD 6	H	+ 5 ans	« expert échangeurs et responsable d'une équipe de recherche »,
PcoD 7	H	+ 5 ans	« vice-président ventes globales »
PcoD 8	H	+ 5 ans	« chef de projets »
PcoD 9	H	1 à 5 ans	-
PcoD 10	F	1 à 5 ans	-
PcoD 11	H	1 à 5 ans	« responsable exploitation »
PcoD 12	H	- de 1 an	« responsable bureau d'études »

La majorité des PcoD (8/12) a donc plus de 5 ans d'ancienneté et utilise des termes renvoyant à un haut niveau de responsabilités pour décrire leur poste et leurs activités chez Air Liquide. Nous retenons que le groupe est assez expérimenté pour avoir une vision globale des différents produits développés par Air Liquide et donc une vision de contextes d'applications possibles de la fabrication additive dans le secteur Energie.

4.6.2.2 Une population novice en fabrication additive

En vue de conduire une étude comparative entre un groupe test comptant 6 PcoD (coloré sur la table 16 ci-dessous) et un groupe témoin, les PcoD ont été questionné sur leur niveau de connaissances en fabrication additive (échelle : Débutant (1) – Intermédiaire (2) - Expert (3)) et sur l'orientation de ces connaissances (parmi Matériaux, Procédés, Produits ou l'ensemble). Leurs réponses sont synthétisées dans la table 16 ci-après.

Table16 - Partenaires de co-développement et connaissances en fabrication additive

PcoD	Niv. Connaissances FA	Orientation FA
PcoD 1	Intermédiaire	Ensemble
PcoD 2	Débutant	Procédés
PcoD 3	Débutant	Matériaux
PcoD 9	Intermédiaire	Matériaux-Procédés
PcoD 11	Intermédiaire	Matériaux-Procédés
PcoD 12	Débutant	Matériaux
PcoD 4	Intermédiaire	Matériaux-Procédés
PcoD 5	Débutant	Procédés
PcoD 6	Intermédiaire	Procédés-Produits
PcoD 7	Débutant	Procédés
PcoD 8	Intermédiaire	Matériaux-Procédés
PcoD 10	Débutant	Procédés

La moitié des PcoD déclare avoir un niveau de connaissances débutant en fabrication additive, tandis que l'autre moitié déclare un niveau intermédiaire. Comme dans l'expérimentation #1, ce niveau est déterminé uniquement de manière déclarative et non évaluée. Nous retenons alors que les PcoD ont en moyenne un niveau de connaissances débutant à intermédiaire en fabrication additive. I.elles déclarent également que leurs connaissances sont majoritairement relatives aux procédés de fabrication additive mais très peu aux produits. Ces niveaux et orientations des connaissances sont donc cohérents avec l'objectif de cette expérimentation #2.

4.6.2.3 Lieu d'expérimentation

L'état de l'art a rapporté les observations de Parmentier **[92]** qui témoignent de l'émergence de tiers-lieux, situés hors des frontières habituelles de l'entreprise, favorisant l'émergence de la capacité créative des individus (§2.11.3). En ce sens, nous organisons cette expérimentation au sein de l'ilab. Ce tiers-lieu est identifié au sein du groupe Air Liquide comme un espace dédié à l'innovation où les attitudes, les interactions, les activités et le rythme de travail sont différents des lieux et des pratiques quotidiennes des individus. Ce contexte permet de faire passer au second plan les relations hiérarchiques et comportements inhérents et permet de mettre les individus dans une posture active d'interactions sociales, de proposition d'idées et de concepts.

4.6.3 Dispositif

Cette expérimentation #2 s'appuie sur le déploiement du dispositif « AMIO » décrit précédemment dans le projet B (§4.5).

4.6.3.1 Organisation

La répartition des deux groupes, témoin et test, est illustrée figure 116. Elle montre qu'i.elles occupaient deux salles séparées. En cohérence avec la recherche-action, cette expérimentation #2 a été conduite avec une méthode d'observation participante en assurant l'animation de cette séance. Un appareil photo/vidéo/son a permis de recueillir les comportements des participant.es et leur verbalisation pendant la séance.
Les PcoD n'avaient pas accès à une source extérieure d'information. L'étude était ainsi circonscrite à leurs connaissances et à celles qu'i.elles pouvaient construire à partir des informations découvertes lors de la séance.

Document confidentiel

Fig.116 - Etude comparative en séance de créativité de groupe

4.6.3.2 Variable observée : stimulation par le dispositif AMIO

Nous présumons que la manipulation d'objets déclencheurs d'expériences spécifiques à la fabrication additive favorise la génération d'idées créatives puis de concepts créatifs. En ce sens, la stimulation du processus créatif était assurée, pour la population test, par le dispositif AMIO. Le groupe témoin représentait une population neutre, aucune stimulation ne leur était

apportée. Les mises en scène des AMIO ont été soumises au groupe test sans donner d'indications sur les manipulations, sur l'articulation possible entre manipulation et construction des représentations ou sur les interactions sociales attendues. Les PcoD étaient donc libres sur la manière de manipuler les AMIO pour découvrir les informations et libres pour construire les représentations immédiatement après manipulation d'un AMIO ou après manipulations de plusieurs AMIO.

4.6.3.3 Des supports pour l'ensemble des PcoD

Comme pour l'expérimentation #1, l'état de l'art préconise de faciliter la construction de représentations externes, par exemple, grâce à l'utilisation de gabarits. En ce sens, les gabarits présentés dans la figure 117 ci-dessous sont mis à disposition des deux groupes. Durant la phase de génération d'idées, seul le gabarit [Fiche Idée], de format A5 et similaire au gabarit utilisé dans l'expérimentation #1, était mis à disposition, en quantité illimitée. Celui-ci est destiné à des représentations de type mixte (graphique et textuelle) créées rapidement. Sur ce gabarit, des conseils précisent le type d'information attendu dans ces représentations.

Le gabarit [Fiche Concept], de format A4 orientation paysage, a été ensuite introduit pour la phase de génération de concepts. Ces fiches étaient disponibles en quantité illimitée. Ce gabarit visait à faciliter la construction de représentations plus détaillées que les fiches idées.

Fig.117 - Gabarits « Fiche Idée » et « Fiche Concept » fournis aux PcoD

Enfin, dans la phase finale de sélection d'un seul concept par groupe, un gabarit nommé [Pitch Tail] était fourni (fig.118). Composé de 5 volets, il visait à guider les PcoD pour préciser le problème auquel le concept proposé répondait, une description du concept et de son fonctionnement, puis les bénéfices, risques et verrous majeurs liés au concept retenu. Le dernier volet présentait 4 critères permettant aux PcoD de conduire une auto-évaluation que nous détaillerons.

Document confidentiel

Fig.118 - Gabarit « Pitch Tail » fourni à chaque groupe

L'ensemble de ces gabarits, Fiches Idées, Fiches Concepts et Pitch Tail permettent de recueillir et d'archiver les productions générées et de diffuser, en en faisant copie, ces informations aux deux entreprises partenaires que sont, dans ce cas d'application, Poly-Shape et Air Liquide.
Le déroulement de l'expérimentation #2 est présenté dans la sous-section suivante, en intégrant l'utilisation des gabarits décrits.

4.6.4 Tâches, durées et données attendues

La séance de créativité s'est déroulée sur une **journée de 7 heures** découpée selon les phases décrites sur la figure 119 ci-dessous. Les étapes de battement telles que l'accueil et le déjeuner ne sont pas mentionnées.

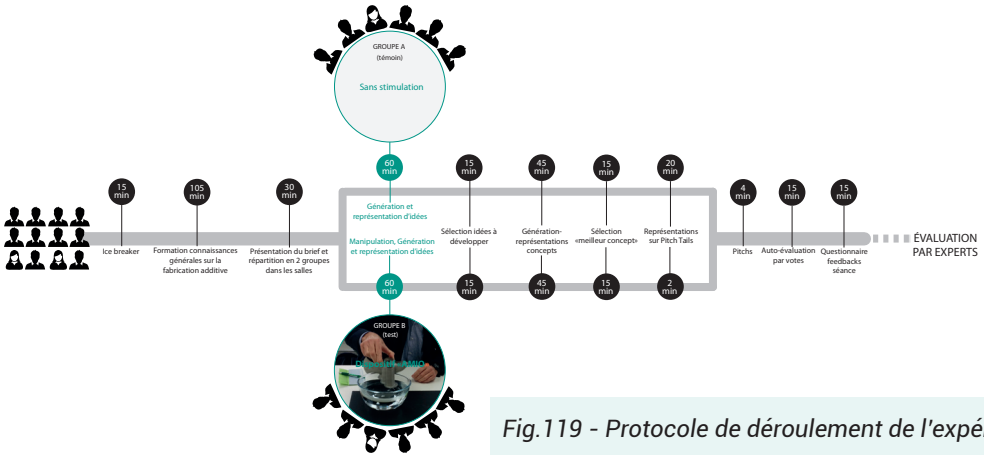


Fig.119 - Protocole de déroulement de l'expérimentation #2

Les 12 PcoD étaient réuni.es durant les trois premières phases afin de faire connaissance via une technique ice breaker (15 min), d'assurer une base de connaissances communes à l'ensemble du groupe, quel que soit les niveaux de connaissances déclarés, via une formation sur les généralités de la fabrication additive et sur le principe de l'inclusion de corps étrangers (105 min) et enfin une présentation du brief (fig.120), puis la répartition en deux groupes et leur installation dans deux salles séparées (30 min). La suite du déroulement, conduit par comparaison entre un groupe test et un groupe témoin fait donc plus particulièrement l'objet de cette étude.

Fig.120 - Le brief soumis aux PcoD de l'expérimentation #2

La variable d'étude était ensuite introduite au groupe test. 60 minutes étaient alors consacrées à la génération-représentations d'idées, stimulée par les manipulations des AMIO mis en scène. Les PcoD étaient invités à proposer une ou plusieurs idées, discuter celles-ci et construire les représentations sur les fiches idées. Cette même phase de 60 min a été conduite en parallèle avec le groupe témoin, mais sans stimulation. Nous retrouvons ainsi les cycles classiques du processus créatif Génération-Evaluation-Représentation présentés dans l'état de l'art (§2.9).

Il était ensuite demandé aux deux groupes de sélectionner les idées à développer dans la suite de la séance, parmi leurs fiches idées construites (15 minutes). Ni la méthode ni les critères de sélection n'étaient imposés. 45 minutes étaient alors données à chaque groupe pour détailler les idées sélectionnées et représenter ces concepts plus précis sur les gabarits fiches concepts mis à disposition. Au moins 1 fiche concept était attendue par groupe.
Chaque groupe pouvait ensuite sélectionner celui qui, à leur sens, était leur « meilleur concept », en vue de le présenter à l'autre groupe (15 min). Les critères de sélection n'étaient pas imposés. Une fois leur « meilleur concept » sélectionné, chaque groupe disposait de 20 min pour le présenter de manière détaillée sur la gabarit Pitch Tail fourni. Lorsque les gabarits ont été complétés, les deux groupes ont été rassemblés, de manière à mettre en commun les productions réalisées. Chaque groupe devait alors « pitcher » son concept pour convaincre l'autre groupe de la force de leur concept (2 min/groupe).
A l'issue des pitchs, les 12 PcoD étaient invités à voter pour pointer le point fort de chacun des concepts (15 min). Cette auto-évaluation est visible sur la figure 121 ci-dessous. 4 critères d'auto-évaluation étaient proposés : Intérêts pour les entités d'Air Liquide (rose), Faisabilité technique (vert), Valeur de co-développement (jaune) et enfin Quick win ! (orange), selon les définitions rapportées dans l'état de l'art (§2.10.2). Chaque PcoD pouvait alors choisir une seule couleur par concept parmi les quatre proposées pour souligner la force majeure du concept, selon leur point de vue.

Document confidentiel

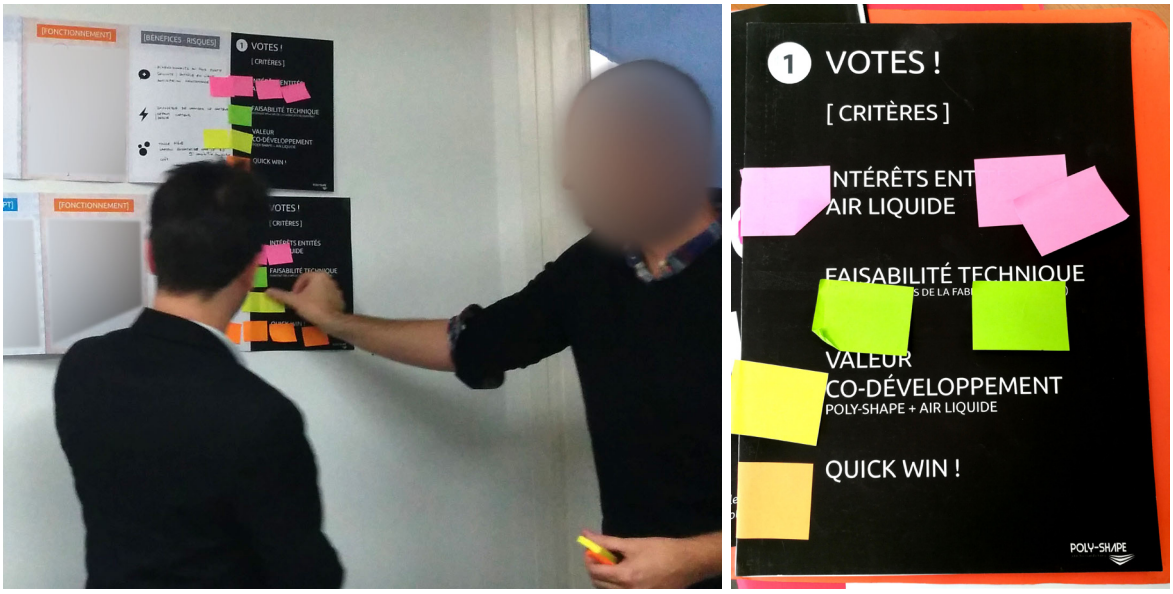


Fig.121 - Auto-évaluation par votes

A l'issue de cette auto-évaluation et avant la clôture de la séance, un questionnaire d'évaluation globale de la séance, de leurs perceptions et ressentis a été soumis aux PcoD pour recueillir leurs feedbacks. Il leur était demandé de le compléter de manière individuelle (15 minutes).
Le temps d'évaluation par les Experts n'est pas comptabilisé dans ce protocole, celle-ci est présentée dans la section suivante.

4.6.5 Evaluation : population, dispositif et critères

Nous menons en priorité une analyse quantitative puis qualitative des fiches idées, des fiches concepts et des pitchs tails générés. Nous nous intéresserons de manière secondaires aux ressentis et qualités perçues et, en perspective, aux effets du dispositif sur les interactions sociales.
En ce sens, **6 Experts** ont évalué la qualité des données de sortie recueillies. Ces Experts présentent deux niveaux de connaissances sur la fabrication additive, en cohérence avec leurs fonctions et/ou à leurs années d'expérience chez Poly-Shape. La table 17 ci-dessous synthétise leurs profils. Ces évaluateurs ne sont pas experts du processus créatif. Leur expérience et/ou leur fonction leur permet d'avoir une bonne connaissance de l'ensemble des procédés et de leurs limites, et des existants en fabrication additive. Ces Experts sont identiques à ceux engagés pour l'évaluation de l'expérimentation #1, à l'exception de l'Expert 3. En effet, celui-ci est spécialiste du secteur Energie et a donc une bonne connaissance de contextes d'applications de la fabrication additive dans ce secteur, correspondant à Air Liquide. Aucun de ces Experts n'avait participé à l'expérimentation #2.

Table 17 - Population d'Experts évaluateurs

Niveau d'expertise	Experts	F/H	Années XP	Fonctions	Expertise créativité
Niveau 1	Expert 1	H	10 ans	Dirigeant	Non
	Expert 2	H	3 ans	Responsable R&D	Non
	Expert 3	H	3,5 ans	Chargé d'affaires Energie	Non
Niveau 2	Expert 4	H	2,5 ans	Ingénieur production	Non
	Expert 5	H	1 an	Ingénieur dév. procédé	Non
	Expert 6	H	1 an	Doctorant R&D	Non

L'évaluation s'est déroulée en une séance d'**1 heure**. En amont de la séance, les fiches idées et fiches concepts ont été anonymisées et numérotées de manière aléatoire. Les fiches crées par la population test ne pouvaient donc pas être distinguées de celles créées par la population témoin. Cette évaluation a été conduite selon le dispositif montré ci-dessous (fig.122).

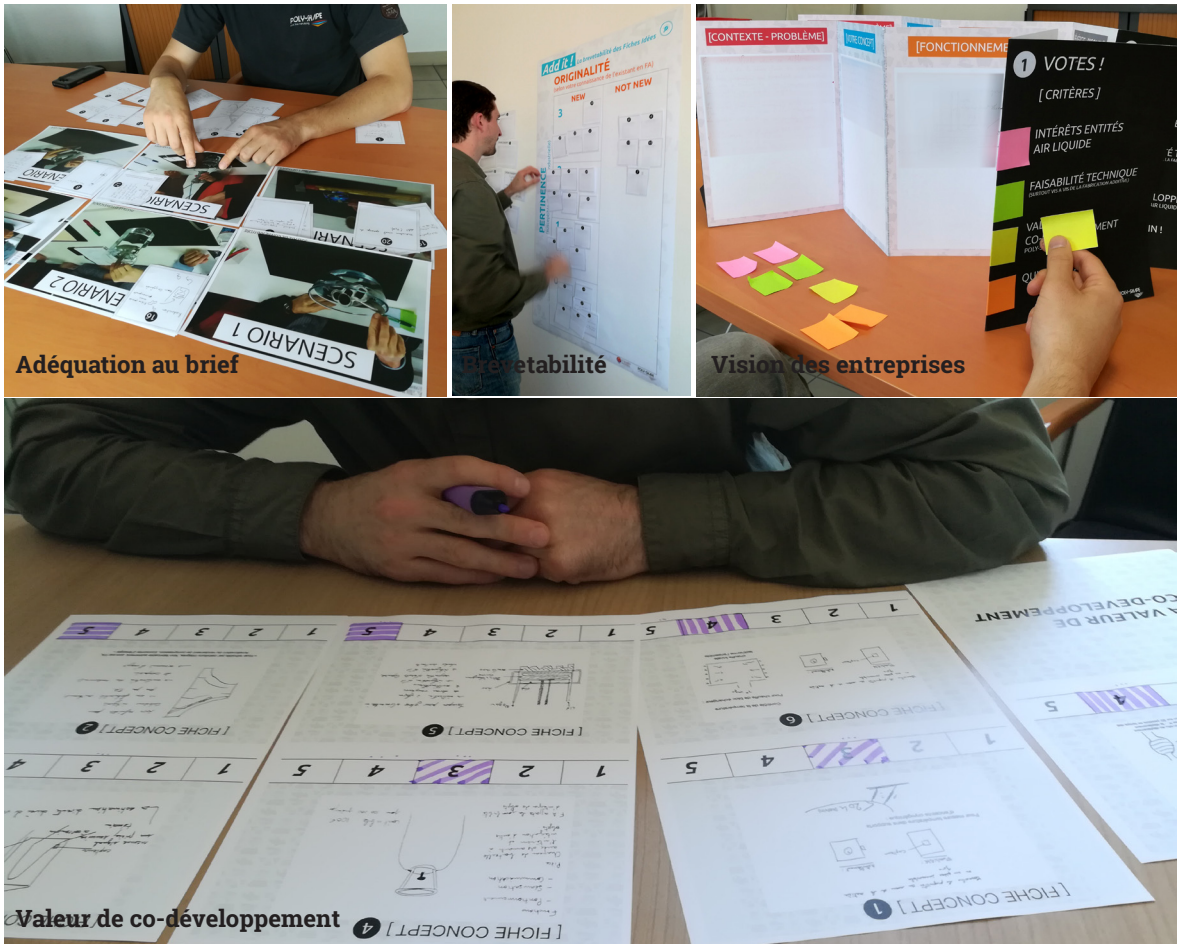


Fig.122 - Dispositif d'évaluation de l'expérimentation #2

Document confidentiel

Les Experts ont évalué les fiches idées puis les fiches concepts et enfin les pitch tails selon les critères d'analyses des productions rapportés dans l'état de l'art (§2.10.2). Ces critères permettent d'évaluer l'impact du processus créatif conduit.

Evaluation des Fiches Idées :

- **L'adéquation au brief**, c'est-à-dire la prise en compte des informations découvertes grâce à la manipulation des AMIO. En ce sens, nous demandons aux Experts s'ils peuvent, ou non, relier les fiches idées aux 6 scénarii de manipulation. Ils pouvaient ainsi placer chaque fiche sur le scénario l'ayant inspirée ou, au contraire, sur aucun des scénarii présentés.
- **La brevetabilité,** critère identique à l'expérimentation #1 : **l'originalité** couplée au critère de **pertinence**. Les Experts devaient positionner les fiches dans les 2 colonnes correspondant à l'originalité ou absence d'originalité. Les fiches idées jugées originales devaient également être réparties **sur une échelle de pertinence allant de 0 à 3**, où 0=très faible pertinence et 3=très forte pertinence.
-

Evaluation des Fiches Concepts :

- La **valeur de co-développement**. Il s'agit d'identifier les concepts susceptibles d'initier un partenariat entre les deux entreprises engagées dans le processus. Pour s'engager dans un co-développement, les entreprises doivent pouvoir identifier un potentiel économique et/ou technique, une perspective de développement d'un marché, ou encore un enjeu pour l'acquisition, le transfert ou la capitalisation de connaissances. En ce sens, les Experts devaient attribuer, pour chaque fiche concept, une valeur **sur une échelle de Likert de 1 à 5 degrés** (où 1 = min. et 5 = max.)
- La brevetabilité : le critère appliqué précédemment est également appliqué aux fiches concepts, dans le but d'identifier un moment d'évaluation de la brevetabilité pertinent dans cette situation de co-développement. Il s'agira également d'observer la corrélation ou l'absence de corrélation entre la brevetabilité des fiches concepts et leur valeur de co-développement.

Evaluation des Pitch Tails :

Il s'agira de comparer les résultats de l'auto-évaluation par votes effectuée par les PcoD, aux votes réalisés par les 6 Experts, dans les mêmes conditions et selon les 4 mêmes critères soit :

- Intérêts pour Air Liquide,
- Faisabilité technique
- Valeur de co-développement
- Quick win !

Ainsi, les visions des deux entreprises engagées dans le processus créatif pourront être comparées.

4.6.6 Résultats quantitatifs et analyses

Il s'agit d'abord de vérifier que la manipulation du dispositif « AMIO » ne diminue pas la productivité des PcoD. En effet, le temps de manipulation et de compréhension des informations pourraient impacter la génération-représentation d'idées. Les fiches concepts, elles, ont été construites plus tard dans le processus, donc plus longtemps après l'étape de manipulation, soit plus d'une heure. Nous considérons donc que le temps de manipulation n'impacte pas la quantité de fiches concepts construites. En ce sens, les nombres de fiches idées construites par les populations test et témoin sont comparés. Ces résultats quantitatifs sont visibles dans le diagramme ci-dessous (fig.123).

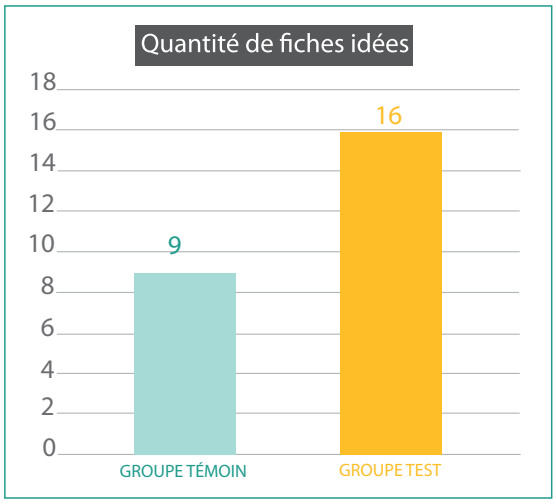


Fig.123 - Comparaison des quantités de fiches idées construites dans l'expérimentation #2

Nous constatons que le temps de manipulation du dispositif « AMIO » n'a pas impacté négativement la productivité des PcoD. Au contraire, les PcoD stimulés par la manipulation du dispositif ont construit **2x plus de fiches idées**. Nous pouvons alors affirmer que la stimulation par la manipulation du dispositif « AMIO » favorise la génération d'une plus grande quantité d'idées.
Au-delà de l'aspect quantitatif, cette expérimentation #2 visait à observer l'influence de la stimulation par le dispositif « AMIO » sur la génération d'idées puis de concepts créatifs. En ce sens, les sections suivantes détaillent les résultats qualitatifs.

4.6.7 Résultats qualitatifs et analyses

4.6.7.1 Adéquation au brief

Document confidentiel

Dans l'expérimentation #1, l'adéquation au brief était évaluée d'un point de vue quantitatif. Dans cette expérimentation #2, le critère d'adéquation au brief dépasse ce seul aspect quantité. Il s'agit en effet d'évaluer la compréhension des informations découvertes par la manipulation des AMIO, l'intégration dans les connaissances et le transfert au secteur industriel visé, tâches synthétisées sous l'expression « exploration des connaissances » en phase de génération d'idées et « exploitation des connaissances » en phase de génération de concepts.

Les résultats de l'évaluation de l'adéquation au brief sont visibles sur deux diagrammes (figs. 124 et 125). Il était demandé aux Experts de relier les fiches idées construites aux scénarii de manipulation, ou de ne pas les relier. La table 18 ci-après rapporte les fiches idées non reliées aux scénarii. En vert, les fiches construites par la population témoin.

Table 18 – Fiches idées non reliées aux scénarii de manipulation

NUMÉROS FICHES IDÉES	EXPERT 1	EXPERT 2	EXPERT 3	EXPERT 4	EXPERT 5	EXPERT 6
	15		25	7	15	21
	5		7	15	7	7
	7		15	20	5	19
	9				9	11
	24	-			25	10
	23				23	15
	11					5
						24
						23

Nous observons que 12 fiches idées différentes n'ont pas été reliées. Parmi celles-ci, 4 fiches ont été construites par la population témoin (n°15, 7, 25 et 21) et 8 fiches par la population test. Etant donné que la population test a construit 2x plus de fiches idées que la population témoin. Les deux populations ont donc construit la même proportion de fiches idées non reliées. Nous remarquons également que la majorité des Experts (5/6) s'accordent sur le fait que deux des fiches construites par la population témoin ne peuvent être reliées (fig. 124) à aucun scénario car elles présentaient des idées explorant des principes basiques de la fabrication additive : la possibilité de modéliser et fabriquer des formes libres pour la fiche n°7 et la possibilité de fabriquer par plusieurs procédés pour la fiche n°15, hors contrainte de soudabilité. Elles ne sont pas relatives à l'intégration de fonctions par inclusion de corps étrangers, autrement dit, elles sont inadéquates au brief soumis.

Fig.124 - Fiches Idées n°7 et 15 construites par la population témoin

Nous nous intéressons particulièrement aux fiches idées que les Experts ont relié aux scénarii, c'est-à-dire qui témoignent de l'exploration des connaissances en phase de génération d'idées. Le diagramme ci-dessous (fig.125) montre la répartition des fiches construites par la population dont la capacité créative n'a pas été stimulée.

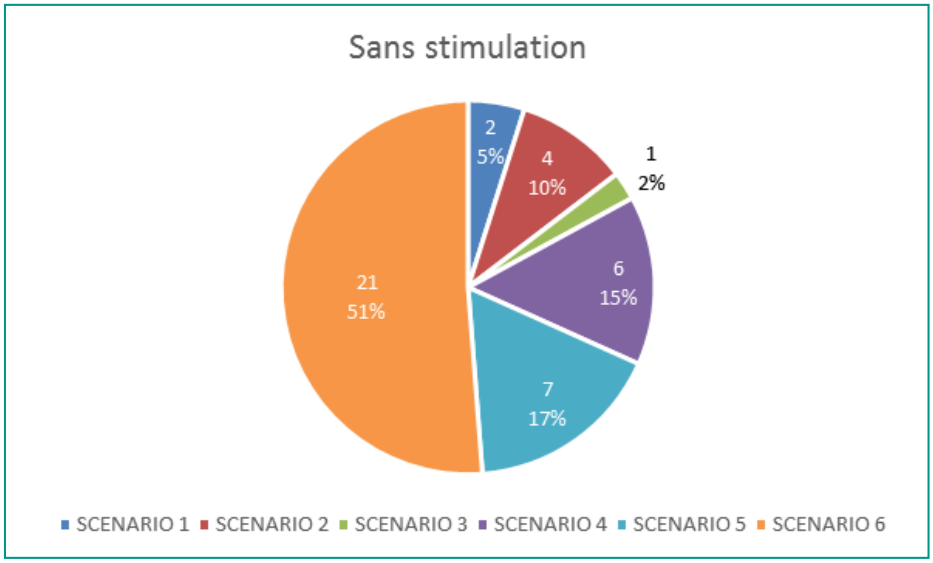


Fig.125 - Une exploration inégale des connaissances

Selon les Experts, les fiches idées construites par la population témoin montrent que l'exploration des connaissances est majoritairement (51%) relative à une même information : la possibilité de guider, depuis la surface, un élément interne à travers des canaux, incarnée dans le scénario #6 par une bille métallique guidée par un aimant (§4.5.3). Ce diagramme montre également que ces fiches mentionnent des informations proches des scénarii #4 et #5, c'est-à-dire relatives à la possibilité de conserver ou interrompre un flux lumineux via l'inclusion de fibres optiques et à la possibilité de séparer / mélanger des flux selon l'orientation d'un composant, incarnée dans le scénario #5 par des parcours de liquides colorés (§4.5.3). Parmi les autres fiches idées construites, les Experts ont relevé peu de proximité avec les informations incarnées dans les AMIO. Elles ne représentent alors que 5% (scénario #1) et 2% (scénario #3) des fiches reliées. Sans stimulation, l'exploration des connaissances en phase de génération d'idées est finalement particulièrement déséquilibrée.

Le diagramme ci-dessous (fig.126) montre la répartition des fiches construites par la population test stimulée par le dispositif « AMIO ». De manière générale, nous observons une répartition plus équilibrée des liens entre fiches idées et informations incarnées dans les AMIO. Nous comprenons alors que les PcoD ont mieux compris, intégrer et transférer les informations découvertes par les manipulations.

Selon les Experts, la majorité des fiches idées (36%) sont relatives au scénario 4 (possibilité de conserver ou interrompre un flux lumineux via l'inclusion de fibres optiques, voir §4.5.3). Par comparaison avec le diagramme précédent, nous observons que le dispositif de stimulation a permis aux PcoD de générer une proportion plus importante (9%) d'idées relatives au scénario #1, c'est-à-dire à la possibilité de signaler une mise en contact avec H^2O grâce à l'inclusion de

Document confidentiel

sulfate de cuivre anhydre qui bleuit, ainsi qu'une proportion plus importante (13%) de fiches idées liées aux informations apportées par le scénario #3, montrant la possibilité de diffuser progressivement un liquide et de laisser une trace, via l'inclusion d'une huile colorée communiquant avec une bille métallique (§4.5.3).

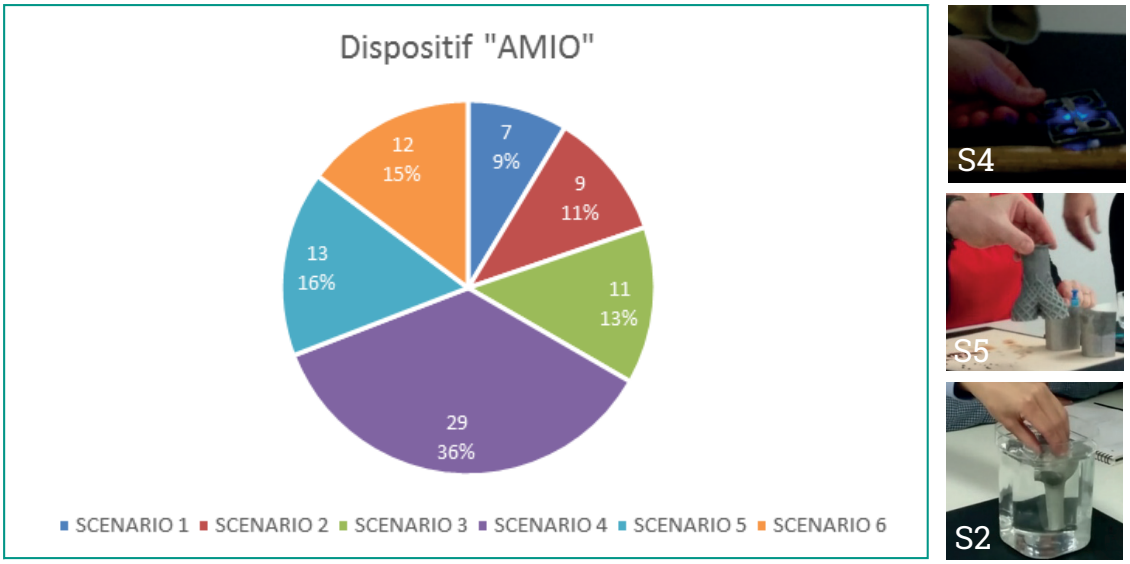


Fig.126 - Vers une exploration plus étendue des connaissances

Finalement, nous retenons que la stimulation par le dispositif AMIO favorise une exploration plus vaste et plus équilibrée des connaissances en phase de génération d'idées. En conséquence, cette stimulation favorise la génération d'idées plus adéquates au brief donné, par rapport à un processus créatif non stimulé. Ce résultat est cohérent avec le constat rapporté dans l'état de l'art sur la créativité (§2.9.2), la diversification des sources d'information favorise l'inspiration par le mécanisme d'analogie, les individus sont alors plus susceptibles de générer des idées créatives.

4.6.7.2 Manipulation des AMIO et exploration des connaissances : une influence positive

Dans le but d'affiner la compréhension des caractéristiques liées à la manipulation des AMIO qui peuvent influer sur la génération d'idées et de concepts créatifs, nous analysons également les réponses recueillies par le questionnaire soumis aux PcoD (annexe 4) à la fin de la séance de créativité. Il leur était demandé d'évaluer leur expérience selon 6 critères :

1. **Evaluation de la manipulation des AMIO** : il s'agissait d'attribuer une note sur une échelle de Likert (1 à 5) pour qualifier chaque scénario de manipulation selon les critères Rebutant (1) / Attirant (5), puis Fastidieux (1) / Efficace (5) et Incompréhensible (1) / Evident (5)

2. Evaluation de l'influence des AMIO : il s'agissait d'attribuer une note sur une échelle de Likert (1 à 5) pour qualifier l'influence de chaque manipulation selon les critères Evocatrice (de 1 à 5), Inspirante (de 1 à 5) et Transférable (de 1 à 5).

Les résultats issus des 6 répondant.es sont présentés dans la matrice de graphes page suivante (fig.127). Ces graphes permettent de comparer le ressenti du groupe test et l'évaluation des Experts. Il apparaît que l'ensemble des facteurs évaluées impactent positivement l'exploration.

En effet, le 1er graphe («Attirant») montre que dans la majorité des cas (42, soit 51,8%), les fiches idées ont été reliées à des scénarii jugées très attirants par les participants. Cet impact positif se vérifie avec les autres facteurs. Il apparaît également que le facteur «Transférable» a un impact négatif. En effet, on remarque sur le graphe 4 que, à de nombreuses reprises (30, c'est-à-dire dans + de 38% des cas) les fiches idées ont été reliées à scénarii jugés très peu transférables (ayant une moyenne de 2-3), voire reliées (9 fois) à des scénarii jugés pas du tout transférables.

A la suite de cette figure, nous analysons ces résultats en les mettant en regard des situations captées par photos et vidéo pendant la séance de créativité de groupe.

Document confidentiel

Fig.127 - Facteurs influençant l'exploration des connaissances

Analyse des graphes 1, 2 , 3, 5 et 6 : des facteurs qui impactent positivement l'exploration

Ces graphes montrent que les aspects Attirant, Efficace, Evident, Evocatrice et Inspirante perçus par les répondants suite à la manipulation impactent de manière positive l'exploration des informations découvertes.
Ces résultats sont cohérents avec ce que nous observons sur les photos et vidéos, présentées ci-après (figs.128 à 131).

La mise en situation correspondante au scénario #4 (fig.128), a été jugée Evidente (3,5/5), Efficace (3,5/5), Attirante (4/5) et Transférable (3,5/5). Selon les Experts, la majorité (29 fiches, fig.126) des fiches idées montrent une exploration réalisée à partir des informations découvertes par la manipulation de ce scénario #4.
L'analyse des fiches idées montre alors que les qualités perçues par les PcoD lors de cette mise en situation ont effectivement favorisé l'exploration des connaissances.

Fig.128 - Manipulation selon scénario #4

L'analyse des photos et vidéos des scénarii suivants confirme la capacité d'influence des facteurs mesurés. Une évaluation complémentaire à cette étude permettrait de mesurer si cette capacité d'influence est égale pour tous ces facteurs ou s'il y a des dominants. Cela permettrait de hiérarchiser les informations à inclure lors de la conception des AMIO.

Document confidentiel

La mise en situation correspondante au scénario #5 (fig.129), a été jugée Efficace (3,8/5) et Attirante (4,1/5) mais moyennement évidente (2,6/5). A l'observation du déroulement, cette mise en situation a effectivement déclenché un temps de manipulation 2x plus long que les autres, plus de questionnements ainsi que l'engagement de plusieurs PcoD au cours de la manipulation. PcoD 1 manipulant seule au départ, a été rejointe par PcoD 3 puis par PcoD 11. Pour autant, le temps et l'engagement nécessaires à la découverte des informations ne semblent pas avoir défavorisé la génération d'idées puisque, selon les Experts, 16% des Fiches Idées (soit 13 fiches, fig.126) montrent une exploration à partir des informations découvertes dans ce scénario.

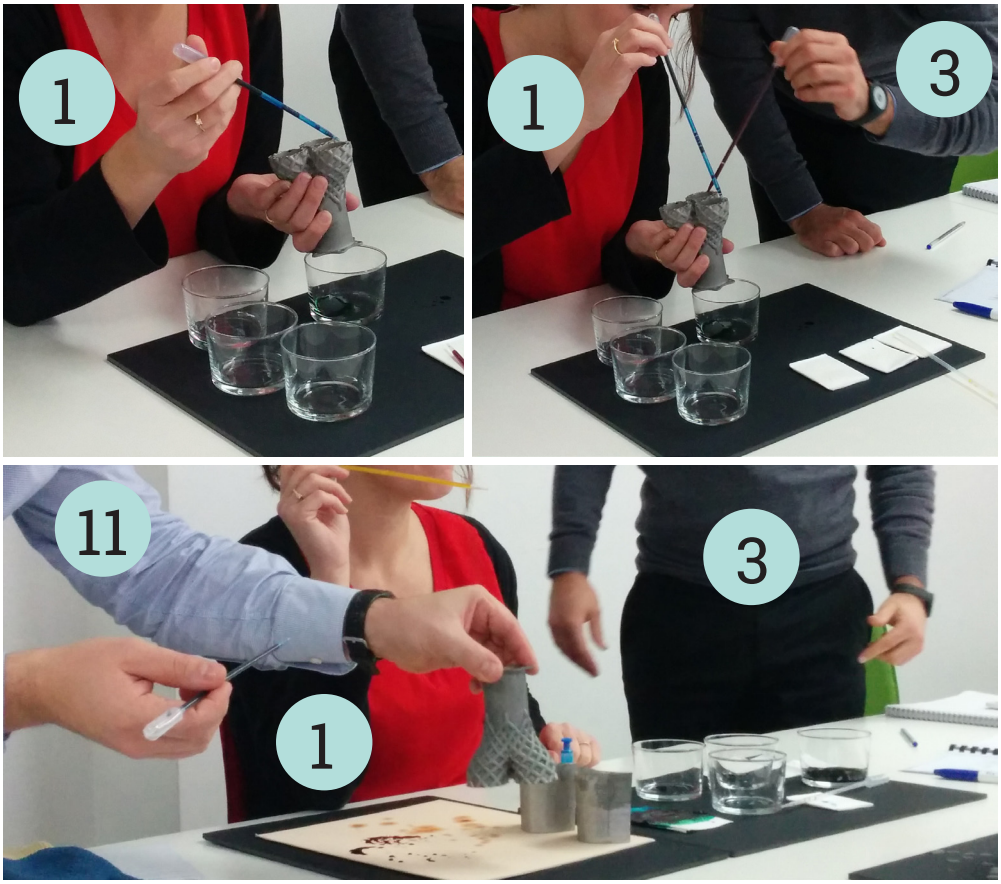


Fig.129 - Manipulation selon scénario #5

La mise en situation correspondante au scénario #6 (fig.130), a été jugée à la fois Evidente (3,6/5), Efficace (3,3/5) et Attirante (3,3/5). Selon les Experts, 15% (soit 12 fiches, fig.126) montrent une exploration conduite à partir des informations découvertes dans ce scénario. Ainsi, nous observons que, même si l'expérience de manipulation liée au scénario #5 a été perçue comme moins évidente que celle du scénario #6, les deux cas ont favorisé l'exploration des connaissances.

Fig.130 - Manipulation selon scénario #6

Ces résultats semblent indiquer que les paramètres sont interdépendants : un manque d'évidence peut être compensé par le caractère attirant. L'évaluation de chaque critère indépendamment des autres critères associés dans cette recherche permettrait de caractériser la valeur de chaque paramètre et la force de leurs dépendances.

Graphe 4 : le facteur Transférable impacte négativement l'exploration

Plus les informations sont perçues comme difficilement transférables dans le secteur de l'Energie, moins les PcoD les ont explorées pendant la phase de génération d'idées. Pour exemple, la mise en situation correspondante au scénario #1 (fig.131), a été jugée Evidente (4/5), Efficace (3,8/5) et Attirante (3,8/5) par les PcoD. La vidéo montre qu'elle a déclenché la construction de plusieurs représentations immédiatement à la suite de la manipulation, par le même PcoD ayant manipulé. Nous pourrions alors en déduire que les informations découvertes ont favorisé la génération d'idées. Mais ces informations ont été jugées peu transférables (2,3/5). Il apparaît alors que, selon les Experts, elles ont permis de générer seulement 9% des fiches idées. L'analyse des fiches montre qu'une faiblesse dans le caractère transférable impacte l'exploration de manière négative : elle la défavorise.

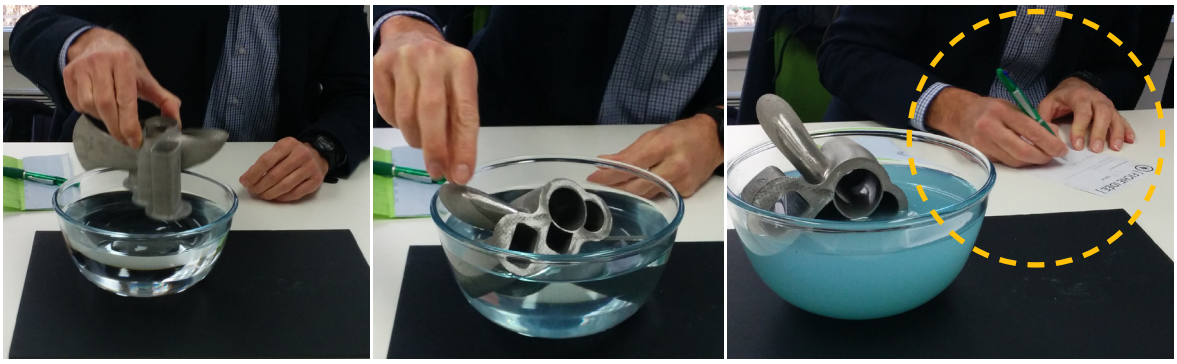


Fig.131 - Manipulation selon scénario #1 et construction de représentations

Document confidentiel

Cela révèle le type de navigation conduite par les PcoD entre Imaginaire et Réalité. En effet, à partir du modèle de navigation proposé par Aznar **[198]** décrit dans l'état de l'art (§2.11.1), nous observons son application dans ce cas d'étude (fig.132).

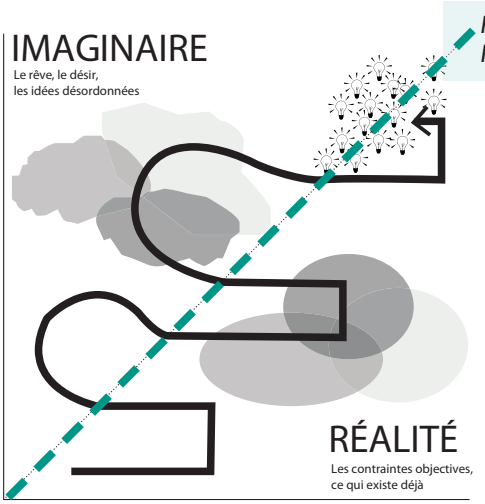


Fig.132 - Navigation entre Imaginaire et Réalité pour la génération d'idées

En phase de génération d'idées, les PcoD ont aisément navigué entre le domaine Réalité, du techniquement sensé et celui de l'Imaginaire, c'est-à-dire des idées folles, loufoques ou éloignées du contexte. Ce cheminement confirme que la stimulation par le dispositif AMIO favorise la génération d'idées créatives.

Ce résultat est intéressant parce que le facteur «Transférable» est nécessaire pour que les individus projettent des applications dans leur secteur industriel. C'est la transférabilité qui permet de passer d'une exploration large des connaissances à l'exploitation pour un secteur déterminé. On retient donc que, comme montré précédemment, le dispositif « AMIO » favorise la variété des idées, c'est-à-dire le cheminement dans l'imaginaire. Mais il semble ne pas être adapté pour passer dans le domaine Réalité, c'est-à-dire aux applications concrètes.

Nous avions, dans l'expérimentation #1, constaté l'effet inverse : le dispositif Cartes-Objets semble limiter la variété des idées. Les résultats obtenus n'ayant en effet pas montrés d'influence positive. Ces résultats semblent alors indiquer qu'il serait préférable d'inverser les deux dispositifs (Cartes-Objets et AMIO) dans la chronologie du processus créatif. En effet, le dispositif AMIO favorisant la variété serait préférable en phase divergente, puis le dispositif Cartes-Objets favorisant le transfert vers l'applicatif serait préférable en phase convergente.

4.6.7.3 Brevetabilité des idées et des concepts

Comme dans l'expérimentation #1, nous avons vu, d'une part, que la capitalisation par brevet est un des résultats attendus des séances de créativité de groupe et que, d'autre part, il est crucial pour une entreprise de pouvoir identifier, au plus tôt, les idées susceptibles d'être brevetées. Selon Howard **[122]**, en conception créative, la brevetabilité correspond à la mesure de l'originalité associée à la mesure de la pertinence. Dans cette expérimentation #2, le secteur industriel concerné est celui de l'Energie, nous attribuons donc un coefficient de pondération (2) à l'Expert 3 spécialiste de ce secteur.

Il s'agissait d'abord d'in/valider le fait que la stimulation par le dispositif AMIO favorise la génération d'idées brevetables puis de concepts brevetables. Dans un second temps, nous souhaitions in/valider le fait que, en situation de co-développement, il est possible d'évaluer la brevetabilité très tôt, à partir d'un niveau de détail peu élevé, c'est-à-dire au stade fiches idées. Les résultats sont synthétisés dans le diagramme ci-dessous (fig.133).

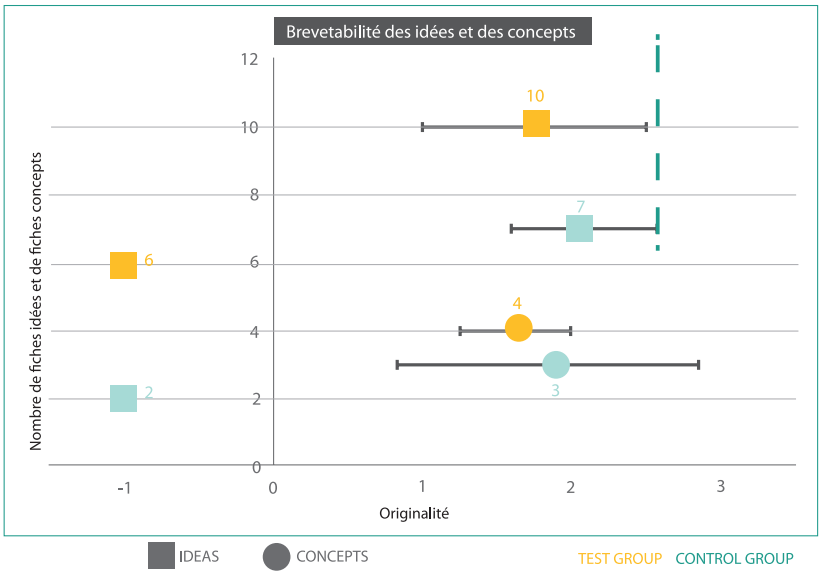


Fig.133 - Comparaison de la brevetabilité au stade « idées » et au stade « concepts »

Nous constatons que, au stade fiches idées comme au stade fiches concepts, les productions de la population témoin, non stimulée, ont été jugées plus brevetables que celles de la population test. Nous comprenons alors que notre hypothèse est infirmée sur le critère brevetabilité. La stimulation par notre dispositif ne favorise pas la génération d'idées puis de concepts plus brevetables qu'un processus créatif non stimulé.
Concernant l'évaluation de la brevetabilité au stade des fiches idées, il apparaît que, conformément aux attentes, on observe un meilleur consensus entre les Experts lorsque le niveau de détail des fiches est plus élevé, c'est-à-dire au stade fiches concepts. Sur le diagramme, nous observons que l'extremum se réduit entre les fiches idées et les fiches concepts de la

Document confidentiel

population test. Mais à l'inverse, le consensus diminue concernant les fiches idées et fiches concepts générées par la population témoin. Sur le diagramme, l'extremum augmente. Nous retenons alors que conduire l'évaluation de la brevetabilité au stade des idées procure des résultats moins fiables que lorsque cette évaluation est conduite à l'issue de la phase de génération de concepts. Ce résultat infirme l'hypothèse émise qui supposait que la brevetabilité peut être évaluée, en situation de co-développement, dès l'issue de la phase de génération d'idées. Du point de vue d'une entreprise susceptible d'engager des frais liés à la protection intellectuelle, l'évaluation de la brevetabilité devrait donc plutôt être conduite à l'issue de la phase de génération de concepts.

Enfin nous remarquons que, au stade fiches idées, l'écart est faible entre l'idée la plus brevetable de la population test (note max) et l'idée la plus brevetable de la population témoin. Cet écart augmente fortement au stade fiches concepts. Pourtant, nous avons effectivement constaté dans les résultats précédents (§4.6.7.2) que la manipulation des AMIO a favorisé la génération d'idées créatives. Les PcoD test ont effectivement conduit une exploration plus large des connaissances et ont jugé les informations transférables, évocatrices et inspirantes. Il semble alors que, lors du passage au stade des fiches concepts, les PcoD se sont concentré. es sur leurs connaissances antérieures plutôt que sur les informations découvertes lors des manipulations. Ce raisonnement créatif est illustré dans la figure 134 ci-dessous, que nous comparons au raisonnement conduit en phase de génération d'idées (fig.134).

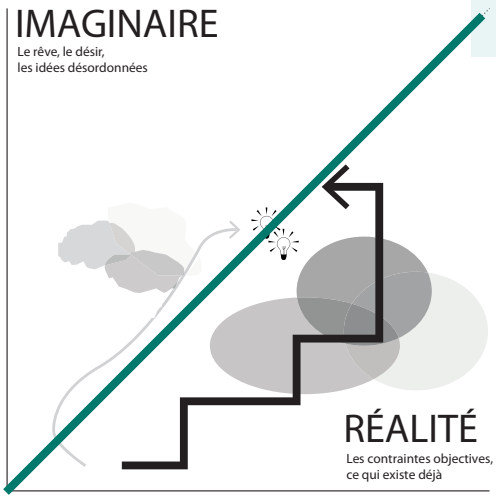


Fig.134 - Navigation essentiellement dans le domaine Réalité pour la génération de concepts

Les informations découvertes par les manipulations des AMIO avaient permis la navigation dans le domaine Imaginaire durant la phase de génération d'idées (fig.132). Mais, dès qu'il s'est agi de générer des solutions concrètes ouvrant à des preuves de valeur pour Air Liquide, c'est-à-dire de passer à la phase de génération de concepts, les PcoD ont restreint leur raisonnement au domaine Réalité, à ce qu'i.elles savaient déjà de la fabrication additive et du secteur de l'Energie, en prenant moins en compte les informations découvertes par les manipulations. Nous comprenons alors que la seconde partie de notre hypothèse est infirmée. La stimulation par le dispositif AMIO a bien favorisé la génération d'idées créatives mais n'a pas favorisé la génération de concepts créatifs car les individus ont peu exploité les connaissances découvertes en amont.

Nous interprétons ce résultat de deux manières :

- Un manque de cohérence entre le niveau d'informations incarné dans les AMIO et le niveau de connaissances des participant.es à la séance. Cet écart a pu rendre le processus d'inspiration difficile, notamment pour faire des analogies avec le secteur de l'Energie. Il serait alors important d'évaluer plus finement (au-delà du déclaratif) les connaissances des participant.es et d'adapter le niveau d'informations apportées.
- Un temps de manipulation trop court. Utiliser le dispositif de stimulation uniquement au début de la phase de génération d'idées semble insuffisant, celle-ci pourrait être renouvelée en phase de génération de concepts. Il serait alors important de concevoir des AMIO destinés à être manipulés plusieurs fois. Les participant.es pourraient même les modifier, les combiner ou encore les augmenter.

Ces résultats conduiront à enrichir notre modèle initial de Créativité par et pour la fabrication additive (§4.7).

4.6.7.4 Brevetabilité et valeur de co-développement

Nous avons vu que la capitalisation par dépôt de brevet est un des résultats attendus des séances de créativité de groupe et que l'évaluation de la brevetabilité est plus fiable lorsqu'elle est conduite à propos des concepts. Nous avons également vu que les séances de créativité se déroulent dans le cadre d'une organisation en co-développement entre une entreprise initiatrice (ici Poly-Shape) et une entreprise participante (ici Air Liquide). Les concepts générés pendant ces séances exploitent donc à la fois des connaissances propres à l'entreprise initiatrice et des connaissances propres à l'entreprise participante. Cette situation soulève alors la question du partage de la propriété intellectuelle. En ce sens, il est important de pouvoir identifier les concepts susceptibles d'être à la fois brevetables et porteurs de potentiel de développement pour les deux entreprises engagées. En ce sens, l'évaluation de la brevetabilité des fiches concepts est croisée avec l'évaluation de leur valeur de co-développement. La même pondération de coefficient 2, relative à la présence de l'Expert 3 spécialiste du secteur Energie est appliquée. Les résultats de cette analyse sont visibles dans le diagramme ci-dessous (fig.135).

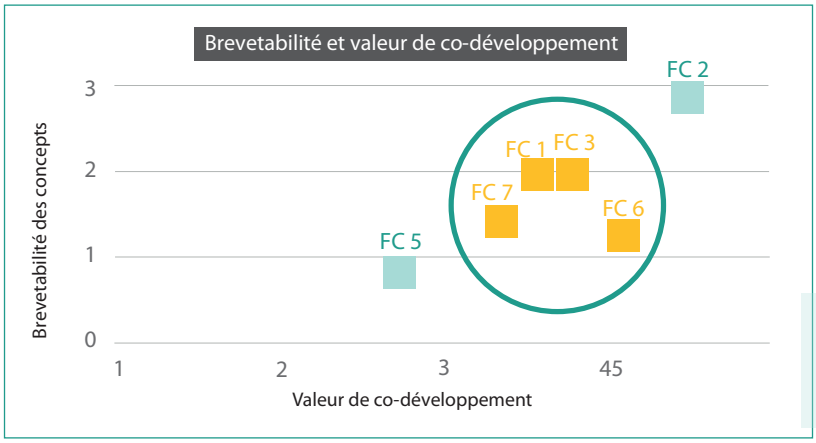


Fig.135 - Analyse croisée de la valeur de co-développement et de la brevetabilité des fiches concepts

Document confidentiel

Nous observons d'abord la corrélation positive : plus la valeur de co-développement d'un concept est élevée, plus sa brevetabilité est probable. C'est donc bien dans les concepts à haute valeur de co-développement que se trouvent les concepts les plus susceptibles d'être brevetés. En d'autres termes, sans collaboration dans le cadre d'un processus créatif, ces entreprises n'auraient pas généré des concepts aussi brevetables. Ce résultat confirme l'intérêt de faire collaborer deux entreprises différentes en phase de génération de concepts, ce qui valide l'organisation en co-développement prévue dans les phases 4 et 5 de notre modèle de créativité **par et pour** la fabrication additive (§3.4).

D'autre part nous observons que la fiche concept (FC 2) évaluée comme ayant la plus grande valeur de co-développement et de brevetabilité a été générée par le groupe témoin et, dans le même temps, la fiche la moins brevetable (FC 5) a aussi été créée par cette même population témoin. Nous retenons alors que, sans stimulation, il est possible de générer une «pépite» parmi d'autres conceptsayant peu de valeur. A l'inverse, la stimulation par le dispositif AMIO a visiblement tendance à assurer une qualité plus homogène des concepts (FC 1, 3 6 et 7 sur fig. 135). Ce résultat soulève la question de la stratégie souhaitée par l'entreprise : souhaite-t-elle multiplier le nombre de séances et de participant.es jusqu'à trouver LE concept génial ? ou souhaite-t-elle s'assurer que plusieurs concepts valables seront générés par un nombre limité de séances et de participant.es, même si cela ne permet pas de faire émerger une pépite ?
A la fin de la séance de créativité, une auto-évaluation des concepts finalement retenus avait été demandée aux PcoD. Dans le but de comparer la vision de l'entreprise initiatrice (ici Poly-Shape) et la vision de l'entreprise participante (ici Air Liquide), les Experts ont également conduit l'évaluation de ces concepts, selon les mêmes règles. Les résultats de la comparaison des deux visions sont présentés dans la section suivante.

4.6.7.5 Comparaison des visions des entreprises

Comme décrit précédemment (§4.6.4), les PcoD ont procédé à une auto-évaluation des pitch tails à la fin du processus créatif pour déterminer, selon elles et eux, le point fort de chaque concept présenté. Nous souhaitions alors comparer cette vision avec celle des Experts de Poly-Shape. Les résultats sont visibles sur les deux graphes (figs.136 et 137). La même pondération de coefficient 2 relative à l'Expert 3 a été appliquée.
Le graphe ci-dessous (fig.136) montre les résultats des votes concernant le concept présenté sur le pitch tail du groupe témoin.

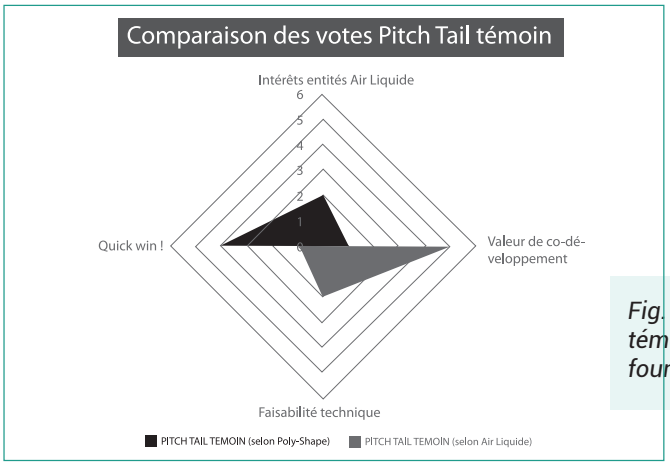


Fig.136 - Concept Pitch Tail témoin : une vision orientée client-fournisseur

Il apparaît que, selon les votes de Air Liquide, le point fort du concept présenté est sa dimension Quick win ! et, de manière secondaire, son intérêt pour les marchés d'Air Liquide. Selon Poly-Shape, la force de ce concept réside plutôt dans sa valeur de co-développement et également dans l'enjeu pour la faisabilité technique. Bien que le nombre de votants soit réduit, nous comprenons que ces visions restent orientées sur une relation client-fournisseur traditionnelle. En effet, Air Liquide valorisant la maturité d'un concept que l'on pourrait mettre en œuvre dans un délai court, nous comprenons que cette entreprise reste dans sa position de client : elle souhaite obtenir le composant rapidement. Alors que, de son côté, Poly-Shape est intéressé pour s'ouvrir à un marché, mettre en œuvre ses connaissances et chercher à en acquérir d'autres. Poly-Shape est donc dans son rôle de fournisseur. Ces deux rôles complémentaires sont classiques.

Le graphe suivant (fig.137) montre les résultats des votes concernant le concept représenté sur le pitch tail du groupe test.

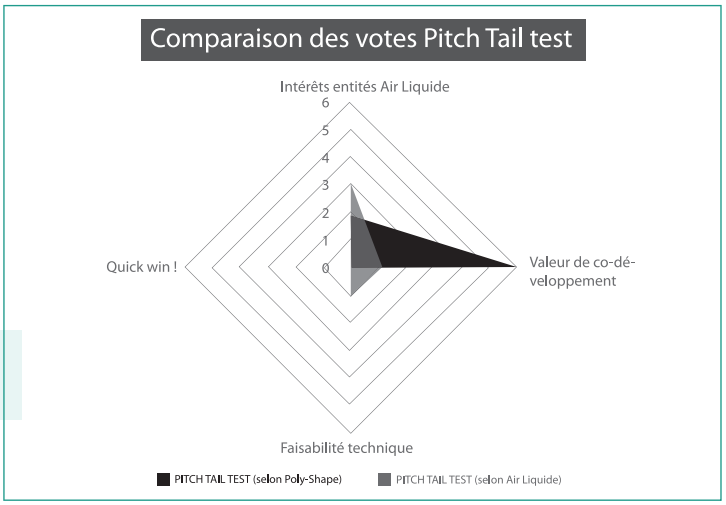


Fig.137 - Concept Pitch Tail test : vers un partenariat ?

Il apparaît que, selon les votes de Air Liquide, le point fort du concept présenté sur le pitch tail test réside dans son intérêt pour les entités d'Air Liquide. Dans une moindre mesure, sa valeur de co-développement est également remarquée, ainsi que son enjeu pour la faisabilité technique. Ces deux critères valorisent l'intérêt de collaborer avec Poly-Shape. Ce résultat semble alors dessiner une tendance à un rapprochement d'Air Liquide vers Poly-Shape. Selon les votes des Experts (en rouge), la force de ce concept réside dans sa valeur de co-développement. Poly-Shape émet donc le même avis que le concept précédent sur cette dimension, mais les votants soulignent également l'intérêt du concept pour les entités d'Air Liquide. Poly-Shape reconnaît donc l'intérêt du concept pour un marché de l'entreprise partenaire. Poly-Shape semble donc également se diriger vers un rapprochement avec Air Liquide. Les deux entreprises ont donc tendance à se rejoindre dans une vision commune (zone de recouvrement sur le graphe).

Finalement, l'échantillon de votants est insuffisant pour considérer ces résultats comme étant représentatifs des deux entreprises dans leur ensemble. Toutefois, il apparaît que la population stimulée par la manipulation du dispositif « AMIO » a généré un concept final qui, d'après l'ensemble des votes, est plus susceptible de conduire à un développement en partenariat, c'est-à-dire à une situation de co-développement durable, au-delà de la séance de créativité.

Document confidentiel

Ce résultat fait émerger le fait que notre modèle de créativité par et pour la fabrication additive ne prévoit pas la phase consécutive à l'évaluation des concepts finaux (phase 5). Comment alors conduire le co-développement d'un concept créatif ?

4.6.7.5 Synthèse des résultats expérimentation #2

L'expérimentation #2 réalisée sous la forme d'une étude comparative avec 12 participant.es du groupe Air Liquide était focalisée sur les phases 4 et 5 de notre modèle de créativité par et pour la fabrication additive, soit les phases « Génération de concepts et Evaluation ». Nous avions émis l'hypothèse suivante : « la stimulation par la manipulation d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise la génération d'idées et de concepts créatifs ».

Les fiches idées créées dans le cadre de cette étude ont fait l'objet d'une analyse quantitative et qualitative selon les critères d'adéquation au brief et de brevetabilité. Les fiches concepts ont fait l'objet d'une analyse qualitative selon les critères de brevetabilité et de valeur de co-développement. Enfin les concepts finaux, présentés sur les pitch tails ont fait l'objet d'une analyse comparée qualitative concernant les visions des deux entreprises engagées dans la démarche de co-développement. Nous retenons alors que la stimulation de la capacité créative par le dispositif « AMIO », permet de :

- Générer une plus grande quantité d'idées
- Générer des idées plus adéquates au brief soumis
- Explorer plus largement les connaissances en phase de génération d'idées
- Générer des concepts ayant un plus haute valeur de co-développement
- Favoriser l'organisation en co-développement

En ce sens, nous pouvons affirmer que l'hypothèse émise au chapitre 3 est en partie validée : la stimulation par le dispositif « AMIO » favorise la génération d'idées créatives. Cependant, les résultats montrent également que la stimulation ne favorise pas l'exploitation des connaissances en phase de génération de concepts et n'a pas d'influence sur la brevetabilité des idées et des concepts générés. En ce sens, la seconde partie de notre hypothèse, qui concerne la génération de concepts créatifs, n'est pas validée. Ces résultats sont synthétisés par la table 19 ci-après.

Table 19 - Synthèse des résultats expérimentation #2

Critères	Validation
Exploration des connaissances en phase de génération d'idées	
Exploitation des connaissances en phase de génération de concepts	
Adéquation au brief	
Brevetabilité des idées	
Brevetabilité des concepts	
Organisation en co-développement	
Génération de concepts à haute valeur de co-développement	

Dans la section suivante, nous rapportons d'autres observations qui n'ont pas fait l'objet d'une analyse détaillée dans le périmètre de ces travaux. Cependant, ces feedbacks font émerger des perspectives d'approfondissement des recherches liant créativité et fabrication additive.

4.6.7.6 Feedbacks et discussion

Ces feedbacks ont été recueillis d'une part, grâce au questionnaire soumis aux PcoD à la fin de la séance et d'autre part grâce à l'analyse des photos, prises de son et vidéos réalisées pendant l'observation participante.

Niveau d'informations incarné dans les AMIO et processus créatif

A la question « Aviez-vous de connaissances suffisantes (grâce à votre background + la formation en début de séance) sur la fabrication additive pour répondre au brief donné ? » les PcoD ont répondu que leur niveau de connaissances était moyennement suffisant (3,3/6). PcoD 1 a mentionné un manque d'informations généralistes sur la fabrication additive et PcoD 11 a précisé que des vidéos des procédés auraient été bénéfiques. Ces avis sont cohérents avec les résultats observés concernant la difficulté à exploiter les connaissances en phase de génération de concepts et, en conséquence, avec le fait que les concepts générés par la population test ne sont pas plus brevetables que ceux de la population témoin (§4.6.7.3). Il semble alors que l'équilibre ou, au contraire le déséquilibre entre le niveau d'informations apportées et le niveau de connaissances initial des participant.es influe sur le raisonnement créatif. Il pourrait alors être intéressant d'évaluer précisément en amont le niveau de connaissances des participant.es pour concevoir en conséquence des scénarii de manipulation des AMIO favorisant le déclenchement d'analogies de plus ou moins haut niveau.

Interactions sociales et découverte des informations

L'analyse des séquences de vidéos sonores a également permis d'observer des interactions sociales entre les PcoD. Par exemple, lors de la manipulation selon le scénario #2, PcoD 12 a été influencé par PcoD 9. Cette situation est montrée sur la figure 137 ci-dessous. Au début de la manipulation, PcoD 12 a choisi de plonger l'AMIO orienté « tête vers le bas » (image 1). PcoD 9 a alors interrompu son geste en disant « je l'aurai plongé dans l'autre sens ». PcoD 12 a alors retourné l'AMIO (image 2) et l'a finalement plongé « tête vers le haut » (image 3). Cet AMIO contenait une pastille effervescente. Les bulles étaient plus difficilement visibles s'il était plongé « tête vers le haut ». La découverte des informations a donc nécessité que les PcoD s'approchent très près de la situation, émettent différentes hypothèses sur les informations à en retirer et sur leur interprétation.

Document confidentiel

Fig.138 - Influence des interactions sociales sur la manipulation du scénario #2

Avec la mise en scène #3 (fig.139), nous avons au contraire observé l'absence d'interactions sociales pendant la manipulation. PcoD 9 hésitant sur la manière de manipuler cet AMIO, n'a pas été conseillé verbalement par les autres PcoD, nous n'avons pas observé de regroupement autour de la situation non plus. Nous avons alors remarqué que la manipulation effectivement réalisée (image de droite) ne correspond pas au scénario envisagé lors de la conception du dispositif (à gauche).

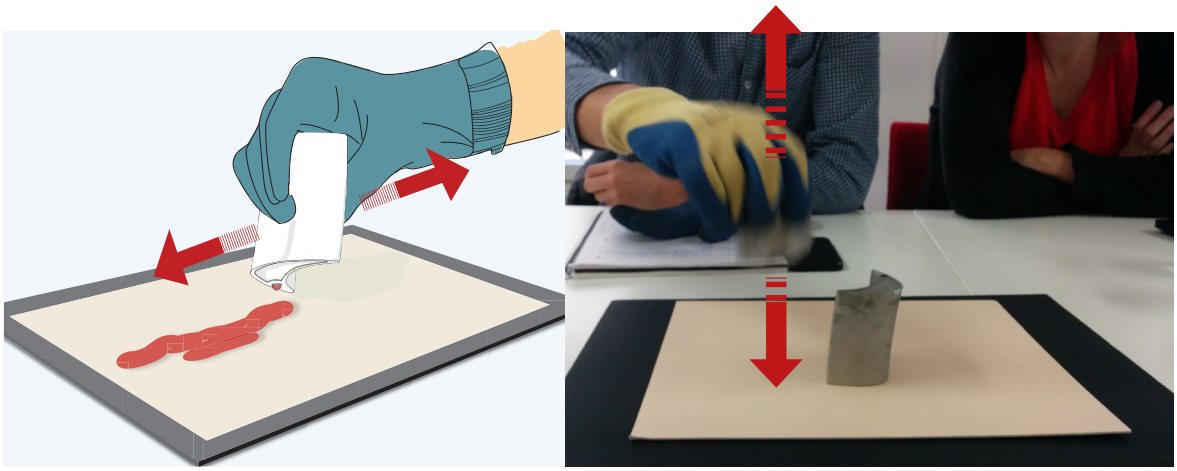


Fig.139 - Scénario prévu versus manipulation inattendue

La découverte des informations a donc été différente de ce que nous avions envisagé. Nous comprenons alors que les interactions sociales entre participant.es peuvent influer sur les manipulations et donc sur la découverte des informations, avant même que les premières idées explorant ces informations soient émises. Or, le processus de créativité par et pour la fabrication additive proposé est basé sur l'exploration puis l'exploitation des informations. Il pourrait alors être intéressant de comparer le processus créatif d'un individu non influencé par des interactions sociales pendant la découverte à celui d'un individu influencé. L'exploration des connaissances seraient-elles similaires ?

4.6.8 Conclusion de l'expérimentation #2

Cette expérimentation #2 visait à observer l'influence de la stimulation par le dispositif « AMIO ». Nous supposions que ce dispositif favorisait la génération d'idées créatives puis de concepts créatifs, dans une situation de co-développement. Pour in/valider cette hypothèse, nous avions conçu le dispositif AMIO puis conduit une étude comparative dans le cadre d'une séance de créativité en contexte réel avec des participant.es du groupe Air Liquide. Cette étude a été conduite en observation participante, au sein de l'ilab.

Ainsi, les résultats expérimentaux ont montré que le dispositif « AMIO » influence positivement la génération d'une plus grande quantité d'idées, plus adéquates au brief et explorant mieux les informations liées à la fabrication additive. Ils ont également montré que cette stimulation favorise la génération de concepts à haute valeur ajoutée. Enfin, ils ont montré que la mise en situation en co-développement est favorable à la génération d'idées créatives et de concepts créatifs. Ces résultats ont permis d'affirmer que l'hypothèse n°2 est partiellement validée. En effet, les résultats ont également montré que la stimulation par le dispositif AMIO n'a pas d'influence positive sur la brevetabilité des idées et des concepts. Ce résultat s'explique par le manque de fiabilité dans l'évaluation de la brevetabilité dès le stade fiches idées en co-développement et, d'autre part, car le stimulus ne favorise pas l'exploitation des connaissances en phase de génération de concepts. Ce résultat a été interprété de deux manières : par un manque de cohérence entre le niveau de connaissances déclaré par les PcoD et le niveau incarné dans les AMIO et par un moment d'utilisation inadapté car permis uniquement au début de la phase de génération d'idées et non au début voire au long de la phase de génération de concepts. Ces résultats positifs et négatifs de l'expérimentation #2 sont synthétisés dans la figure 140 ci-dessous.

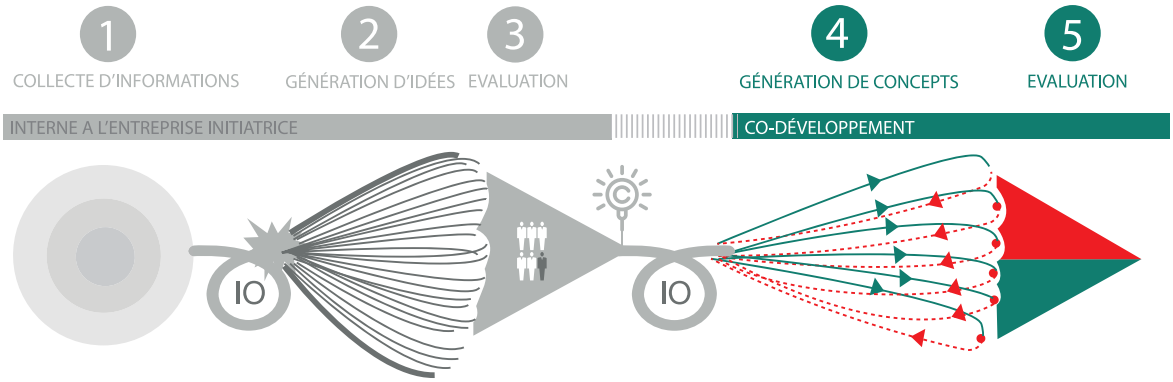


Fig.140 – Résultats de l'expérimentation #2 au regard du modèle proposé

En phase de génération de concepts, il est étonnant de constater une amélioration dans l'étape préalable de génération d'idées créatives puis une faiblesse lors de la phase consécutive d'exploitation des connaissances.

Document confidentiel

Cette faiblesse est apparue lorsqu'il s'agissait de converger vers des concepts, donc un stade de définition plus précis que les idées. Mais, dans le même temps, cette expérimentation a confirmé que le dispositif AMIO apporte un regain d'exploration, notamment à travers le caractère ludique des manipulations qui permettent la découverte des informations.

En conclusion de l'expérimentation #1, nous avions remarqué que le dispositif Cartes-Objets avait finalement tendance à réduire la variété des idées, c'est-à-dire à tendre vers une phase convergente. Et nous constatons ici que le dispositif AMIO stimule favorablement la divergence (i.e l'exploration) mais n'a pas d'influence sur la convergence (i.e l'exploitation). En ce sens, il semblerait alors pertinent d'introduire le dispositif AMIO en phase 2 du modèle de créativité par et pour la fabrication additive, lorsqu'une forte divergence est attendue, puis introduire le dispositif Cartes-Objets plus tard, en phase 4 pour stimuler la génération de concepts. Finalement, la logique de rencontres forcées aléatoires et le type d'informations incarnées dans le dispositif Cartes-Objets seraient appropriées dans les situations moins exploratoires, lorsque le problème à traiter et les objectifs sont moins flous. A l'inverse, la découverte d'informations par les manipulations sensori-motrices serait appropriée en situation très exploratoire, lorsque la finalité du processus est floue. Cette inversion dans le moment d'application des deux dispositifs sera explicitée lors de la définition d'un modèle enrichi (§4.7.2).

Nous identifions le même biais que dans l'expérimentation #1 et deux limites quant à cette expérimentation #2. D'une part, notre participation à la séance de créativité (rôle d'animatrice) a potentiellement influencé les participant.es et/ou les résultats. Ce biais est connu et reste inhérent à la recherche-action (§1.2.2). Une première limite correspond à la population de 12 participant.es. La quantité de données récoltées sur chaque critère est donc réduite. Conduire d'autres séances de créativité sur le même thème permettrait d'obtenir des résultats plus robustes. La seconde limite est relative au fait que notre étude a été réalisée seulement avec des participant.es du secteur de l'Energie. Appliquer cette étude avec des participant.es d'autres secteurs et/ou de secteurs mélangés permettrait de récolter des résultats plus réalistes au regard du contexte industriel de la fabrication additive qui concerne un panel très large d'industries et donc d'individus ayant des connaissances et des profils différents.

Des perspectives possibles ont été identifiées pour cette étude, notamment relatives à l'influence du niveau d'informations apporté et aux interactions sociales sur l'exploration et l'exploitation des informations incarnées dans les AMIO.

La section suivante présente le modèle de créativité par et pour la fabrication additive enrichi par les résultats des expérimentations #1 et #2. En ce sens, cette section débutera par une synthèse des résultats de ces deux expérimentations.

4.7 Une modélisation enrichie

Les résultats expérimentaux permettent donc d'enrichir le modèle de créativité par et pour la fabrication additive formulé, à priori, dans le chapitre précédent. Ainsi, cette section synthétise les résultats des expérimentations #1 et #2 et présente une modélisation actualisée. La figure 141 ci-dessous rappelle le modèle préliminaire.

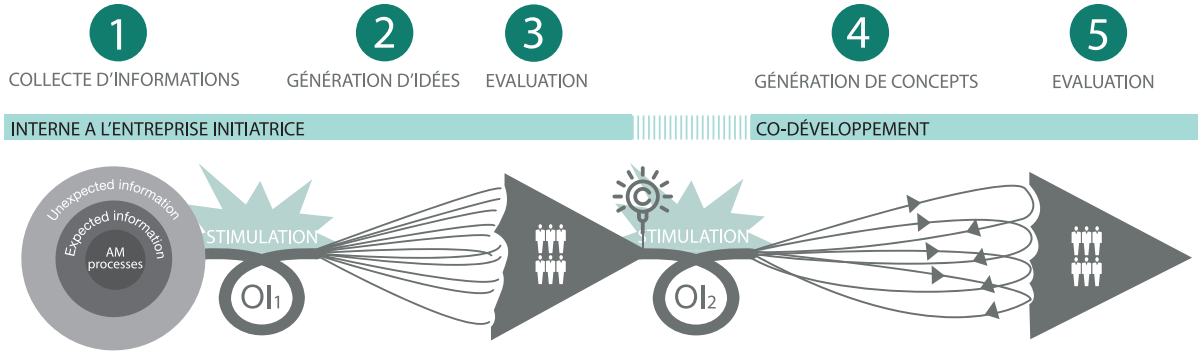


Fig.141 - Modélisation préliminaire

La section suivante montre, sur ce modèle préliminaire, les phases pour lesquelles les expérimentations #1 et #2 ont produit des résultats positifs et des résultats négatifs (en rouge).

4.7.1 Synthèse globale des résultats expérimentaux

Comme présenté dans le plan expérimental (§4.1), nous avons confronté le modèle au terrain via une pré-expérimentation (phase 1 du modèle), la conception et fabrication d'un premier dispositif nommé « Cartes-Objets », puis une expérimentation #1 (phases 2 et 3), la conception et fabrication d'un second dispositif nommé « AMIO » et enfin avec l'expérimentation #2 (phases 4 et 5). Les résultats expérimentaux sont montrés par couleurs sur les figures 142 à 144 ci-dessous.

La pré-expérimentation a permis de collecter des informations attendues (Expected) et des informations inattendues (Unexpected) au regard de la thématique d'exploration traitée : l'intégration de fonctions en fabrication additive par l'inclusion de corps étrangers. Ces données ont permis de concevoir et fabriquer le premier dispositif de stimulation de la capacité créative, nommé « Cartes-Objets ».

A la suite, nous supposions que la stimulation par la manipulation d'un objet instrument de type « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées créatives. L'expérimentation #1 visait à tester cette hypothèse. Les résultats ont montré que la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » favorise :

Document confidentiel

- La génération d'une plus grande quantité d'idées, en assurant la fluidité des participant.es
- La génération d'idées plus adéquates au brief soumis
- La génération d'idées plus nouvelles
- La génération d'idées faisables par les procédés Métal et Polymère, même lorsque celles-ci sont très nouvelles
- La génération d'idées brevetables, sous réserve que le nombre et le profil des juges soient appropriés
- La génération d'un plus grand nombre d'idées brevetables

En ce sens, les phases 1, 2 et 3 apparaissent en vert sur la figure 142 ci-dessous. La réserve liée au nombre et aux profils des juges évaluateur.trices apparaît en rouge. La faiblesse liée au fait que le stimulus ne favorise pas la variété des idées apparaît également en rouge en phase 2. On voit également que la divergence en phase 2 a été élargie, correspondant au résultat positif sur l'aspect quantitatif. Le dépôt de la demande de brevet n° 1661092 décrit dans le projet R&D2 est lié à l'exploration de ces connaissances. Nous avons proposé d'expliquer la faiblesse concernant la variété des idées en suggérant que, finalement, le dispositif Cartes-Objets pourrait être plus approprié pour les situations moins exploratoires, c'est-à-dire plutôt en phase 4.

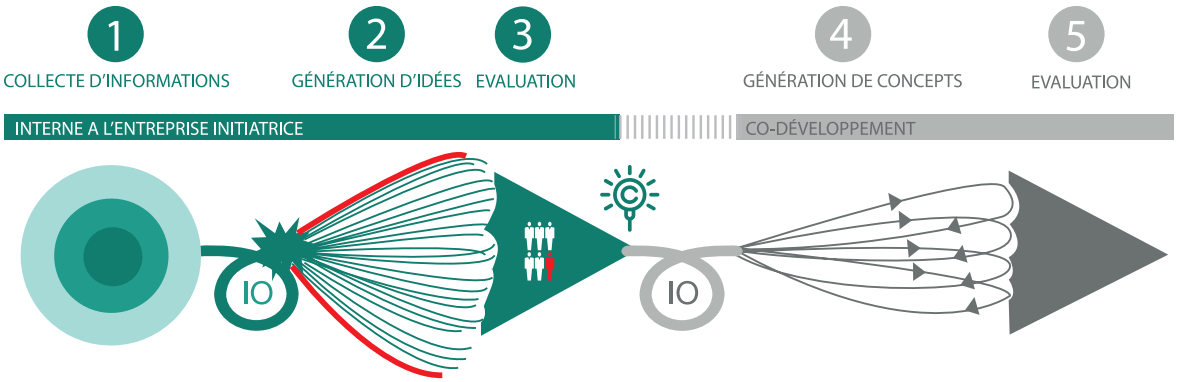


Fig.142 - Visualisation des résultats de la pré-expérimentation et expérimentation #1

Une fois la demande de brevet déposée, nous avons conçu et fabriqué le second dispositif de stimulation de la capacité créative, nommé « AMIO ». Nous supposions alors que la stimulation par la manipulation d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise la génération d'idées et de concepts créatifs. L'expérimentation #2 visait à tester cette hypothèse. Les résultats ont montré que la stimulation par le dispositif « AMIO » favorise :

- La génération d'une plus grande quantité d'idées
- La génération d'idées plus adéquates au brief soumis
- L'exploration plus large et équilibrée des connaissances en phase de génération d'idées
- La génération de concepts ayant un plus haute valeur de co-développement
- La collaboration en situation de co-développement

Ces résultats positifs sont visibles en vert dans les phases 4 et 5 (fig.143). On voit également que la divergence en phase 4 a été élargie, correspondant au résultat positif sur l'aspect quantitatif. Toutefois, les résultats ont également montré l'absence d'influence sur l'exploitation des connaissances en phase de génération de concepts (segments retours des boucles en rouge sur fig.143), ainsi que sur la brevetabilité des idées et des concepts. Ces résultats apparaissent donc en rouge sur ce modèle.

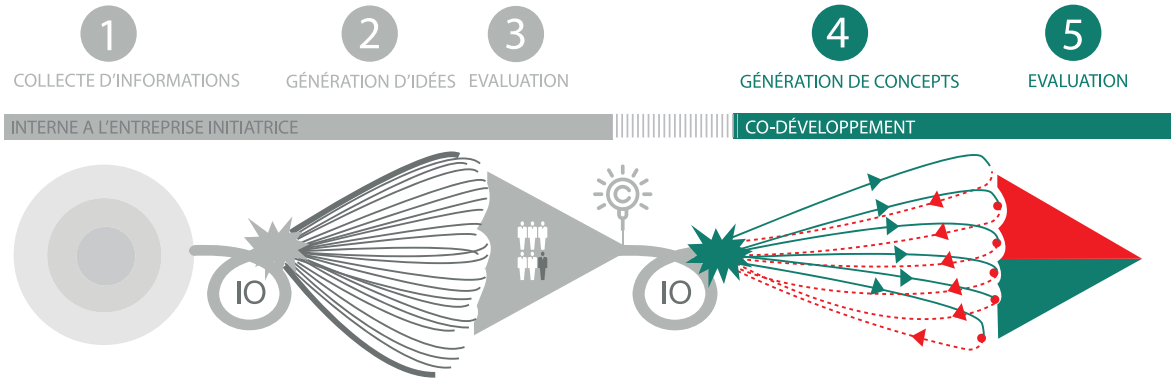


Fig.143 - Visualisation des résultats de l'expérimentation #2

Nous avons proposé d'expliquer cette faiblesse concernant l'exploitation des connaissances en phase de génération de concepts en suggérant que, finalement, le dispositif AMIO serait plus performant pour l'exploration que pour l'exploitation. Il pourrait donc être plus approprié en phase 2.
En synthèse, la figure 144 ci-dessous présente sur le modèle l'ensemble des résultats expérimentaux, positifs et négatifs. Elle rappelle la faiblesse liée au manque de variété des idées en phase 2, la réserve liée au nombre et aux profils des Experts qui évaluent en phase 3 ; puis les faiblesses liées à l'exploitation des connaissances et à la brevetabilité des idées en phase 4, et enfin le manque d'influence sur la brevetabilité des concepts en phase 5.

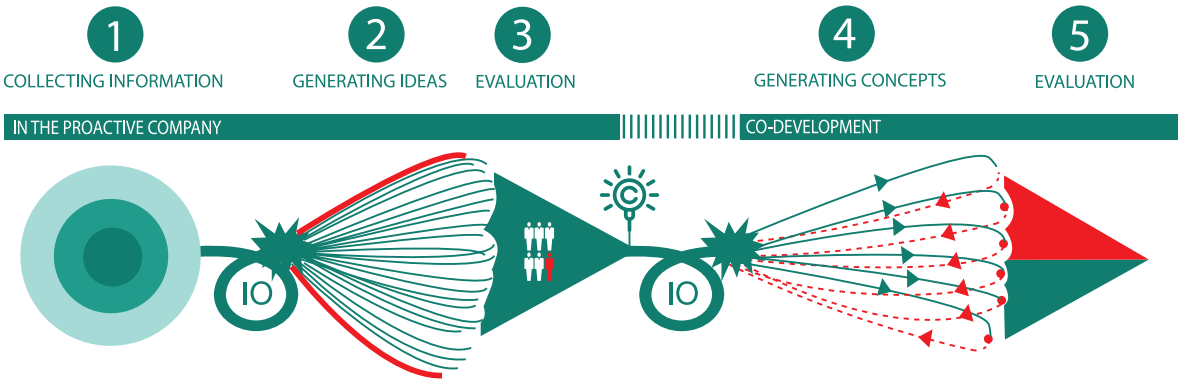


Fig.144 - Visualisation des résultats expérimentaux

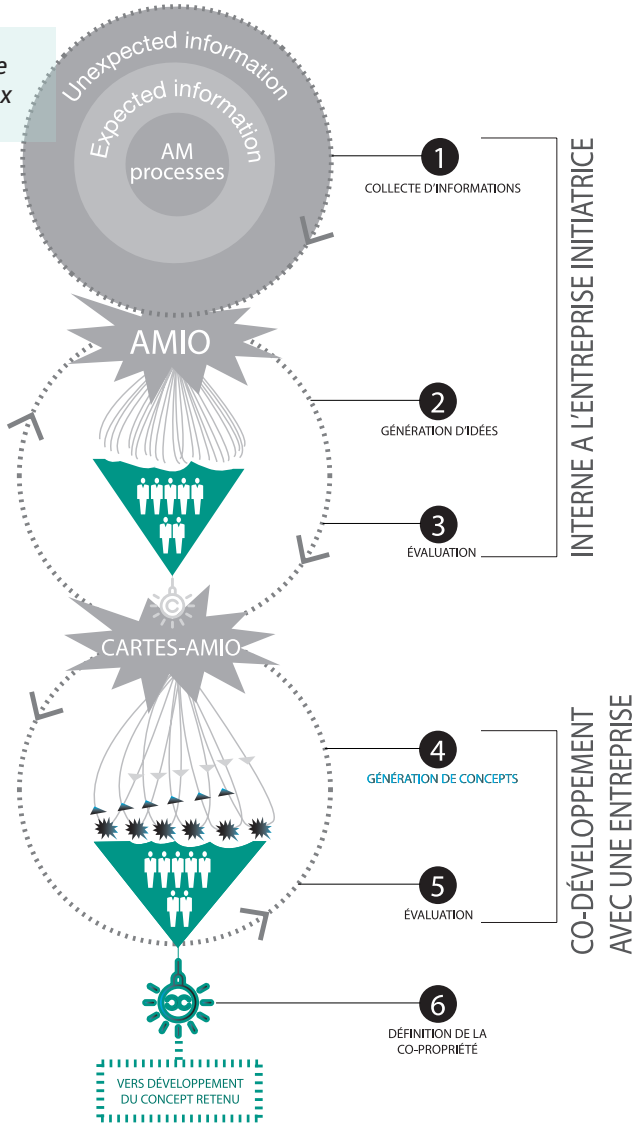
Document confidentiel

L'ensemble de ces résultats et les éléments de discussion permettent alors d'enrichir la modélisation de la méthode de créativité par et pour la fabrication additive. Cette actualisation est présentée dans la section suivante.

4.7.2 Proposition d'un modèle enrichi

Au regard des résultats expérimentaux obtenus par les expérimentations #1 et #2 synthétisés dans la section précédente, le modèle de créativité par et pour la fabrication additive est enrichi et montré dans la figure 145 ci-dessous. Cette modélisation représente un apport majeur de cette thèse, elle incarne la mise en relation de la créativité et de la fabrication additive.

Fig.145 - Modélisation enrichie par les résultats expérimentaux



La modification majeure apportée au modèle est l'inversion du moment d'introduction des deux dispositifs. Cette évolution est issue des résultats expérimentaux. Il s'avère que le dispositif AMIO favorise l'exploration mais n'a pas d'influence sur l'exploitation et, à l'inverse, le dispositif Cartes-Objets ne favorise pas la variété mais favorise la convergence dans les situations moins exploratoires. Ainsi, le dispositif AMIO devrait être introduit comme stimulation de la phase 2, puis le dispositif Cartes-objets comme stimulation de la phase 4. A ce propos, nous préconisons alors d'utiliser les objets tangibles AMIO à la place des objets typiques, qui deviennent obsolètes dans cette chronologie. En ce sens, le dispositif auparavant nommé Cartes-Objets est désormais nommé « Cartes-AMIO ». Les AMIO pourraient alors être manipulés tout au long de la phase de génération de concepts et non seulement au début. Faire l'expérience de la fabrication additive « en continu » permettrait alors de mieux accompagner l'exploitation des connaissances. L'introduction du dispositif Cartes-AMIO dans une situation de co-développement permettrait alors d'orienter la génération de concepts vers le secteur industriel de l'entreprise partenaire.

L'inversion des dispositifs questionne alors les démonstrations de Pei **[171]**. Dans les constats rapportés par l'état de l'art (§2.9.4), E. Pei montre par une typologie de représentations intermédiaires que, au fil du processus créatif, celles-ci progressent depuis des formes non tangibles (croquis, mots-clés…) jusqu'à des formes tangibles (maquette, experimental prototype…). Or le dispositif AMIO est composé d'objets tangibles à manipuler. Introduit comme stimulation d'une phase de génération d'idées, ce dispositif tangible accompagne alors les concepteur.trices vers l'abstraction, c'est-à-dire dans l'action d'extraire des informations depuis les objets tangibles pour formuler mentalement des idées et des concepts. Ainsi, en créativité par et pour la fabrication additive, il ne s'agit pas de progresser de l'intangible jusqu'au produit tangible mais, de naviguer en permanence entre tangible (les AMIO) et intangible (l'idéation et la conceptualisation).

Pour assurer l'évaluation de la brevetabilité des idées (phase 3), nous avons vu qu'un groupe pair d'expert.es était insuffisant. En ce sens, nous préconisons un groupe en nombre impair, de préférence ayant un profil de type « ingénieur.e brevet » ou ayant des niveaux de connaissances hétérogènes que l'on pourrait pondérer. Les résultats expérimentaux ont montré que, dans une situation de co-développement, l'évaluation de la brevetabilité au stade des idées est moins fiable qu'au stade des concepts. En ce sens, nous préconisons de conduire cette évaluation à l'issue de la phase 4 et non pas au cours de celle-ci. Nous préconisons d'appliquer la même règle du groupe d'expert.es en nombre impair ou profils hétérogènes pondérés pour évaluer la brevetabilité des concepts générés. Enfin, les résultats expérimentaux ayant montré une corrélation positive entre la valeur de co-développement des concepts et leur brevetabilité, nous préconisons d'intégrer, en phase finale du modèle, les tâches relatives au partage de la propriété intellectuelle et au co-dépôt de brevets entre entreprises partenaires qui peuvent faire l'objet de discussions cruciales pour les entreprises. L'évaluation de la brevetabilité en amont, à l'issue de la phase 3, puis en situation de co-développement à l'issue de la phase 5 permet alors de distinguer brevet d'exploration et brevet d'exploitation. Cette distinction est cohérente avec les constats rapportés dans l'état de l'art (§2.7.2). Lorsque l'innovation articule la recherche et le développement, elle est basée sur le couple exploration-exploitation. Dans ce cadre, le brevet d'exploitation est centré sur des applications possibles pour le secteur industriel correspondant à l'entreprise participante. A l'inverse, le brevet d'exploration reflète effectivement les avancées dans une situation exploratoire, sans que des applications aient été projetées. De manière générale, ce modèle prend une forme plus cyclique pour, conformément aux principes rapportés dans l'état de l'art (§2.8.1), permettre de reboucler en cas d'échec d'une phase ou pour mettre l'accent sur l'une des phases. Ainsi, à l'issue de la phase 3, il est

Document confidentiel

possible de poursuivre par l'exploitation (phase 4) ou, pour mettre l'emphase sur l'exploration, de recommencer cette phase. De la même manière, si un échec est constaté à l'issue de la phase 5, il est possible de reboucler sur cette phase, voire de reprendre à la phase 2. Deux progressions différentes pourraient même être envisagées. Dans une situation très exploratoire, où la thématique et les objectifs que l'entreprise partenaire souhaite atteindre sont peu définis, le processus peut effectivement progresser comme décrit sur ce modèle. Mais dans une situation moins exploratoire, où thématique et objectifs sont mieux définis, le processus pourrait réduire le temps consacré aux phases 2 et 3 pour mettre l'emphase sur les phases 4 et 5.

Synthèse du chapitre 4

Ce chapitre 4 a décrit les phases expérimentales de cette thèse, réalisées à partir de la méthode de créativité par et pour la fabrication additive modélisée dans le chapitre précédent. Ainsi, nous avons expérimenté, en contextes réels, les deux hypothèses formulées :

- H1 : la stimulation par la manipulation d'un objet instrument de type « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées créatives
- H2 : la stimulation par la manipulation d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise la génération d'idées et de concepts créatifs

Cette étude a d'abord nécessité la conduite d'une pré-expérimentation visant à collecter des informations relatives à une problématique de R&D réelle : l'exploration de l'intégration de fonctions par l'inclusion de corps étrangers. A la suite, le projet A visait à concevoir un dispositif incarnant ces informations et destiné à les faire découvrir en séance de créativité. Ce dispositif opérationnel « Cartes-Objets » a été appliqué comme stimulus de la capacité créative, lors de l'expérimentation #1, justement pour évaluer l'influence de celui-ci. A partir d'idées recueillies, nous avons conçu un second dispositif, nommé « AMIO » -pour Additive Manufacturing of Intermediate Objects- incarnant ces informations dans des objets tangibles à manipuler. Ce dispositif, également opérationnel, a été appliqué comme stimulus de la capacité créative lors de l'expérimentation #2. Celle-ci visait justement à observer l'influence de la stimulation par la manipulation d'objets réalisés en fabrication additive sur la qualité des idées générées puis des concepts générés. Cette expérimentation a été conduite dans une situation de co-développement, c'est-à-dire une mise en relation, lors des phases de génération de concepts et d'évaluation, de deux entreprises ayant des connaissances différentes. Dans cette thèse, il s'est agi de la société Poly-Shape et d'entités du groupe Air Liquide qui ont donc participé à la séance de créativité de groupe organisée au sein de l'ilab.
Les résultats de ces phases expérimentales montrent que l'hypothèse H1 est validée et que l'hypothèse H2 n'est que partiellement validée. La stimulation via le dispositif « Cartes-Objets » favorise effectivement la génération d'idées créatives, même si elle n'a pas d'influence sur la variété des idées. La stimulation via la manipulation du dispositif « AMIO » favorise effectivement la génération d'idées créatives dans une situation de co-développement mais pas la génération de concepts créatifs. Notre démarche d'observation participante a également permis de recueillir des feedbacks. A partir de l'ensemble de ces résultats, nous avons ainsi proposé une modélisation enrichie de la méthode de créativité par et pour la fabrication additive proposée.
Le chapitre suivant synthétisera l'ensemble des travaux réalisés, pour en souligner les apports et les perspectives restantes à explorer et faire état des publications, conférences, brevets et articles de vulgarisation réalisés au cours de cette thèse.

CHAPITRE 5

APPORTS, ORIGINALITÉ ET PERSPECTIVES

CHAPITRE 5 : APPORTS, ORIGINALITÉ ET PERSPECTIVES

Introduction du chapitre 5

Ce chapitre final vise à synthétiser l'ensemble des travaux menés dans le cadre de cette thèse de doctorat. En ce sens, les apports et l'originalité de ces travaux sont d'abord présentés (§5.1), ainsi que les perspectives qu'ils ouvrent (§5.2), avant de conclure le document et de faire une liste des publications, conférences, brevets et articles de vulgarisation réalisés.

5.1 Les apports et l'originalité de cette thèse

La synthèse de ces travaux montre finalement que ses apports se situent à plusieurs niveaux d'importance scientifique :

- Un positionnement original liant créativité et fabrication additive
- Proposition d'un modèle préliminaire de créativité par et pour la fabrication additive, en anglais creativity through additive manufacturing puis d'un modèle enrichi
- Une nouvelle définition du statut des objets intermédiaires vue sous le prisme de la fabrication additive puis de la créativité par et pour la fabrication additive
- Une mise en œuvre effective de ces définitions théoriques par la conception et la fabrication de deux dispositifs opérationnels :

1. Dispositif « Cartes-Objets » : stimulus pour la phase de génération d'idées
2. Dispositif « AMIO » : stimulus pour la phase de génération de concepts

- Une contribution formelle dans la conception de gabarits pour guider la construction de représentations en séance de créativité de groupe
- Une contribution à la formalisation des connaissances sur les procédés de fabrication additive par une infographie

Ces différents apports sont détaillés ci-après.

Un positionnement original – La littérature montre des études liées à la fabrication additive uniquement techno-centrées. Or, l'analyse du contexte industriel a montré la nécessité de dépasser cette vision pour accompagner les entreprises dans l'exploration des connaissances et la projection des futures applications industrielles de la fabrication additive. Au regard de ce manque, nous avions alors fait l'hypothèse générale que s'intéresser à la créativité, dans ce contexte techno-centré, permettrait d'adresser ces enjeux. Le positionnement original de

cette thèse réside donc dans le fait qu'elle cherche à mettre en relation fabrication additive et créativité. Il s'agit d'apporter une brique de liaison entre ces deux champs rarement associés. Cette association a pour objectif global de faciliter l'innovation en fabrication additive, plus précisément la génération d'idées et de concepts créatifs ouvrant à de futures applications de la fabrication additive. En ce sens, nous proposons ainsi d'initier un nouveau champ de recherche, que nous proposons de nommer « créativité en fabrication additive ».

Un modèle pour les phases initiales – Cette mise en relation de la fabrication additive et de la créativité s'est concrétisée par la proposition d'un modèle préliminaire de creativity through additive manufacturing traduit sous l'intitulé créativité par et pour la fabrication additive. Ce modèle préliminaire est composé de 5 phases montrées ci-après (fig.146 ci-dessous).

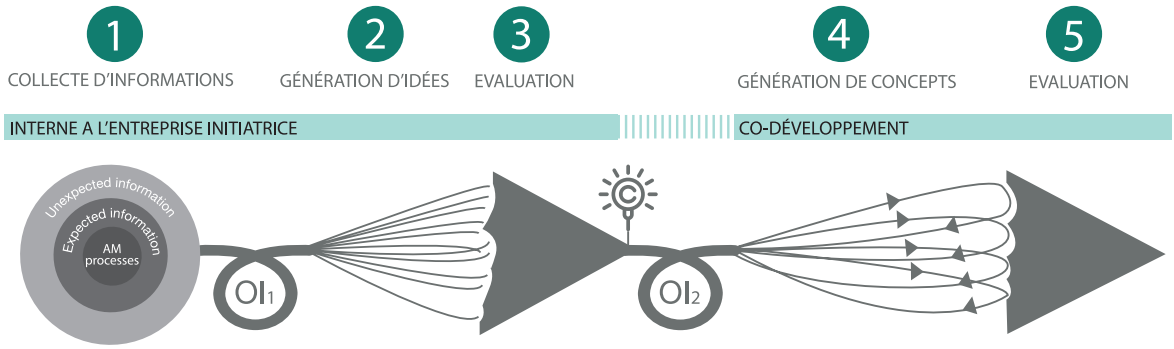


Fig.146 - Modèle préliminaire de créativité par et pour la fabrication additive

Ce modèle préliminaire a été confronté au terrain au cours des phases expérimentales, notamment par les expérimentations #1 et #2, qui ont mis en œuvre les deux dispositifs de stimulation conçus. Les résultats expérimentaux ont alors permis d'actualiser la représentation, de manière à proposer un modèle enrichi de créativité par et pour la fabrication additive (fig.147). Les phases et activités liées à ce modèle sont décrites ci-après.

Document confidentiel

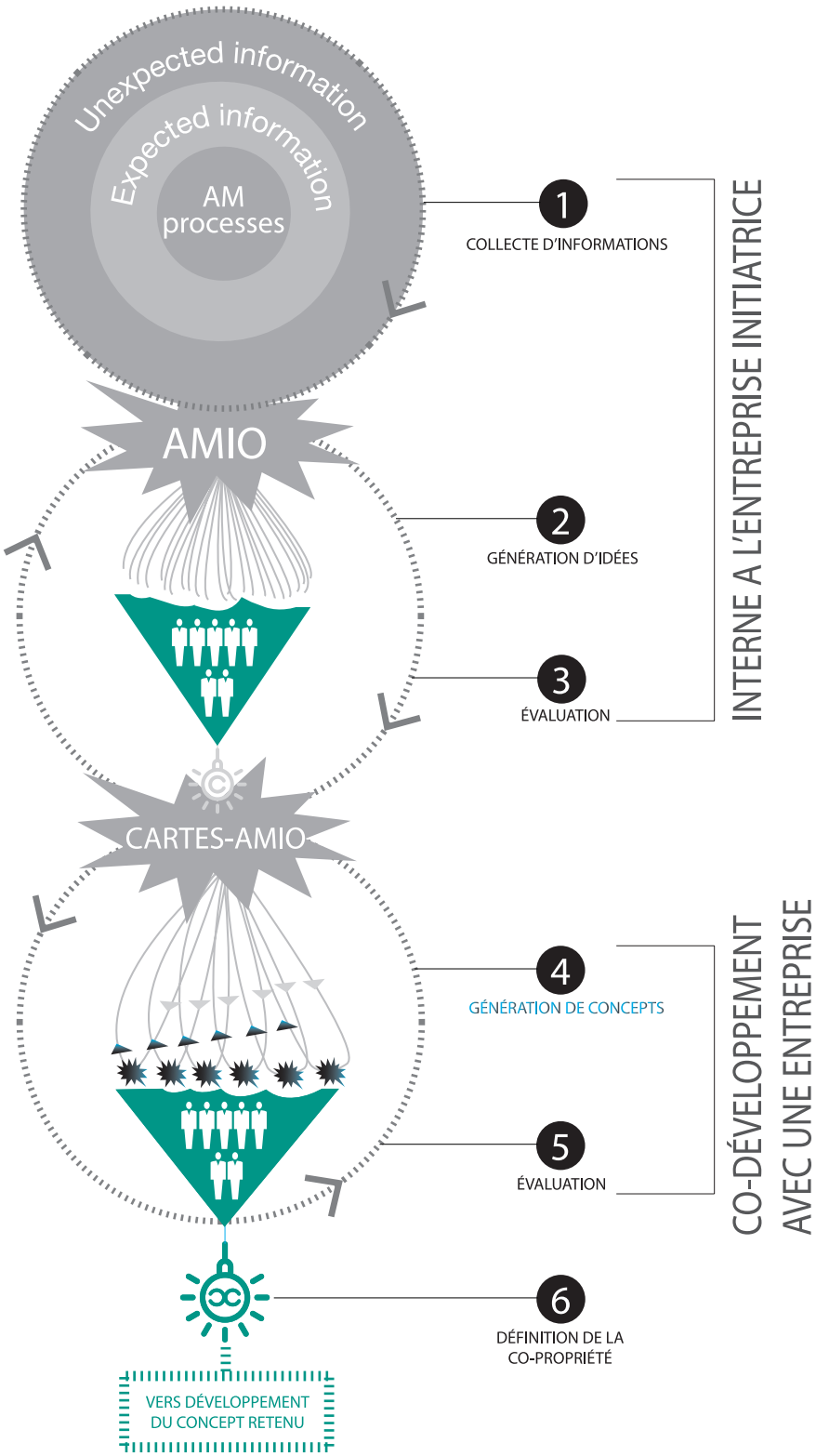


Fig.147 – Proposition d'un modèle enrichi de créativité par et pour la fabrication additive

Dans sa globalité, ce modèle est cyclique. Il permet donc de reboucler pendant les phases de génération d'idées et de génération de concepts, en cohérence avec le processus créatif traditionnel (i.e hors fabrication additive). Les trois premières phases sont conduites au sein de l'entreprise initiatrice (représentée, dans cette thèse, par Poly-Shape) afin de maîtriser la diffusion des connaissances émergentes. Les phases 4,5 et 6 sont ensuite conduites en co-développement avec au moins un grand groupe industriel.

Phase 1 : collecte d'informations

La première tâche consiste à s'assurer que les concepteur.trices disposent des connaissances de bases de la fabrication additive : le principe de la fabrication par couches et les différents procédés. Les concepteur.trices sont ensuite invité.es à collecter des informations attendues au regard de la fabrication additive (i.e Expected) et des informations issues d'autres domaines, à priori éloignés de la fabrication additive (i.e Unexpected).

OI1 : conception et fabrication d'un dispositif de type « AMIO »

Ce projet consiste à concevoir une traduction tangible des informations recueillies dans la phase 1. Cette traduction tangible vise à mettre les informations Expected et Unexpected à disposition des concepteur.trices de l'entreprise initiatrice du projet pour favoriser leur exploration. Selon les résultats expérimentaux, ce dispositif devrait prendre la forme d'une série d'objets tangibles réalisés en fabrication additive et pouvant être manipulés de manière à déclencher des états d'étonnements et de surprise.

Phase 2 : génération d'idées

Les concepteur.trices sont invité.es à générer des idées répondant au brief de R&D soumis. Il est alors nécessaire de stimuler dans cette tâche les concepteur.trices ayant peu l'habitude d'utiliser leur capacité créative. En ce sens, nous proposons d'utiliser le dispositif tangible conçu précédemment comme outil de stimulation. Selon les principes soulignés dans l'état de l'art, la représentation des idées devrait être guidée par l'utilisation de gabarits. En ce sens, plusieurs fiches idées sont attendues comme données de sortie de cette phase. La phase suivante visera alors à évaluer ces fiches idées.

Phase 3 : évaluation

L'évaluation est conduite par un nombre impair d'expert.es aux niveaux de connaissances hétérogènes qui peuvent être pondérés, issu.es en priorité de l'entreprise initiatrice et éventuellement d'expert.es extérieur.es, sous couvert d'accord de confidentialité. L'évaluation vise à identifier les idées qui peuvent être brevetées, ainsi que celles qui devraient être précisées et projetées dans un ou plusieurs secteurs industriels d'applications.

OI2 : conception et fabrication d'un dispositif de types « Cartes-AMIO »

Ce projet consiste à concevoir une traduction tangible des informations et idées générées et sélectionnées dans les phases 2 et 3. Cette traduction tangible visera à mettre le contenu à disposition des partenaires de co-développement pour favoriser leur exploration et leur exploitation pour au moins un secteur industriel. Selon les résultats expérimentaux, ce dispositif devrait comporter en priorité des cartes augmentées des AMIO précédemment utilisés. Il est donc à noter que dans cette chronologie, les objets typiques proposés dans le modèle préliminaire deviennent obsolètes.

Phase 4 : génération de concepts

Cette phase marque la transition entre un processus mené en interne et les phases de co-

Document confidentiel

développement. Les partenaires de co-développement sont invité.es a générer des concepts créatifs projetant de futures applications destinées au secteur industriel impliqué. Comme vu dans l'état de l'art, le concept est un niveau de définition plus avancé que l'idée. Cette phase commence donc par la génération d'idées qui conduiront à la génération de concepts, tâche qui nous intéresse. Il est nécessaire de guider les acteur.trices dans cette phase car i.elles sont novices en conception, en fabrication additive et utilisent peu leur capacité créative dans le cadre de leurs activités habituelles. En ce sens, nous proposons d'utiliser le dispositif Cartes-AMIO comme outil de stimulation. Selon les constats réunis par l'état de l'art, la représentation des concepts devrait être guidée par l'utilisation de gabarits. Cette phase devrait donc aboutir à un portfolio de fiches concepts dont la valeur pour ces deux entreprises sera évaluée dans la phase suivante et un concept final représenté sur le Pitch tail, qui pourra être communiqué au-delà du groupe participant.

Phase 5 : évaluation

L'objectif de cette phase est d'identifier au moins un concept créatif pour le secteur industriel concerné, ainsi que d'évaluer la valeur des concepts « suspendus », c'est-à-dire ne répondant pas au brief soumis mais valables pour d'autres briefs. L'évaluation est réalisée par un nombre impair d'expert.es ayant des connaissances diversifiées et des niveaux de connaissances hétérogènes qui pourront être pondérés. La brevetabilité est évaluée au stade des fiches concepts, ainsi que leur valeur de co-développement. Les deux valeurs peuvent être croisées pour assurer la cohérence des décisions à prendre concernant le concept à développer.

Phase 6 : définition de la copropriété intellectuelle

Un comité de pilotage réunissant des membres de l'entreprise initiatrice et des membres de l'entreprise partenaire devrait se réunir pour évaluer et répartir la propriété intellectuelle au regard de l'ensemble des contenus produits au fil du processus. Ainsi, cette phase devrait se dérouler immédiatement à la suite des phases précédentes. Elle a pour objectif de définir les frontières liées aux possibles dépôts de demandes de brevets.

Phases suivantes : développement du concept retenu

Lorsque au moins un concept pertinent à développer a été identifié, le processus peut être poursuivi. Ce modèle de créativité par et pour la fabrication additive ne traite pas ces phases avales du processus de développement d'un concept en situation de co-développement.

Nouvelles définitions des statuts des objets intermédiaires – La définition d'un modèle de créativité par et pour la fabrication additive engendre une nouvelle définition de différents statuts que peuvent prendre les objets intermédiaires. Cette évolution des définitions est synthétisée dans la figure 148 ci-dessous.

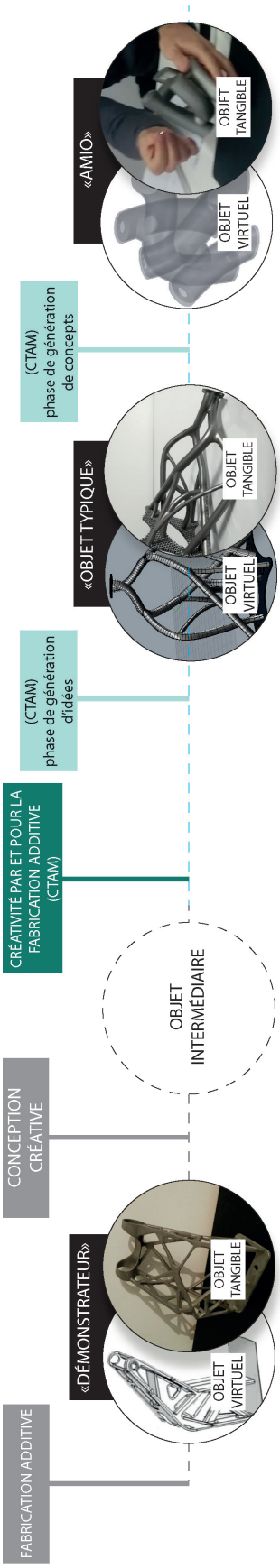


Fig. 148 - Synthèse des statuts pris par l'objet intermédiaire

Document confidentiel

Nous avions identifié, par l'observation de pratiques de terrain, que certains composants réalisés en fabrication additive ont le statut de « démonstrateurs ». Ceux-ci ne sont pas destinés à être véritablement intégrés à des produits mais ils montrent les capacités offertes par la fabrication additive et, lorsqu'ils sont manipulés, soulèvent des questionnements. Leur fonction est donc d'informer. Hors fabrication additive, la littérature sur la conception, et particulièrement sur la conception créative est riche à propos des « objets intermédiaires ». Ce statut englobe l'ensemble des objets, tangibles ou non, mobilisés ou créés au cours d'un processus créatif. Parmi ces statuts, nous avions remarqué, dans l'état de l'art, les objets instruments et les objets déclencheurs d'expériences. En outre, l'état de l'art a rapporté que, au fil du processus créatif traditionnel, les objets intermédiaires sont d'abord de nature non tangible (croquis, mots-clés…) puis progressivement tangible (maquette, prototype…).

En accord avec le modèle proposé, nous avons alors défini des statuts que peuvent prendre les objets intermédiaires dans le cadre d'une démarche de créativité par et pour la fabrication additive. En phase de génération d'idées, des « objets typiques » c'est-à-dire montrant les caractéristiques formelles et fonctionnelles typiques de la fabrication additive, sont mobilisés comme outil de stimulation du processus créatif. Ils sont destinés à être le réceptacle des projections mentales des concepteur.trices. Ensuite, en phase de génération de concepts, les objets intermédiaires prennent le statut d'AMIO pour Additive Manufacturing of Intermediate Objects. Ils incarnent à la fois les caractéristiques typiques de la fabrication additive et un niveau d'informations supplémentaire sur la fabrication additive (en l'occurrence sur l'inclusion de corps étrangers). Ils sont alors destinés à être manipulés pour que les informations qu'ils incarnent soient découvertes. Ces manipulations sensori-motrices sont destinées à stimuler la capacité créative des individus, notamment par l'augmentation des motivations intrinsèques. Au regard des résultats expérimentaux, cette définition des statuts des objets intermédiaires en créativité par et pour la fabrication additive pourrait même être réduite aux seuls AMIO. En effet, si, comme proposé précédemment, le dispositif AMIO est utilisé plus en amont dans le processus et le dispositif Cartes-Objets plus en aval, les objets typiques deviennent obsolètes. Ils sont remplacés par les AMIO qui peuvent alors être manipulés tout au long du processus créatif, seuls dans les phases d'exploration et accompagnés de cartes dans les phases d'exploitation.

Conséquemment à cette définition, l'évolution traditionnelle des objets intermédiaires au cours du processus créatif, de l'intangible au tangible, est questionné. Dans le paradigme de la créativité par et pour la fabrication additive, il s'agit plutôt de naviguer en permanence entre objets tangibles et conceptualisation, voire entre objets tangibles – objets virtuels – conceptualisation.

Parce que cette évolution des statuts est due à la fabrication additive, nous faisons également apparaître le double numérique de chaque objet tangible (fig.138). En effet, comme présenté dans l'état de l'art (§2.1.1), un composant tangible en fabrication additive ne peut exister que parce qu'un modèle numérique a été préalablement conçu. L'objet tangible a donc toujours un double virtuel. Ces doubles virtuels n'ont toutefois pas fait l'objet d'étude dans cette thèse. Cet aspect marque une perspective importante de cette thèse, développée dans la section suivante.

Des dispositifs opérationnels – Nous avons effectivement mis en œuvre les définitions des statuts d'objets intermédiaires proposées. Ainsi, nous avons conçu des objets typiques de la fabrication additive (§4.2.2), avant de les intégrer dans le dispositif « Cartes-Objets » dont le contenu est visible en annexe 2. Nous avons également conçu et fabriqué les AMIO (§4.5.2). Cette démarche à nécessité de mettre au point le principe d'interruption du procédé de Fusion

de poudre métallique par laser pour l'inclusions de corps étrangers, qui a fait l'objet du dépôt d'une demande de brevet. Ces AMIO ont ensuite été intégrés dans le dispositif de stimulation pour la génération de concepts que nous avons conçus. Ces deux dispositifs ont donc été testés en contextes réels.

Des outils d'application - Nous avons également conçu des gabarits destinés à guider la construction des représentations et les avons appliqués en séances de créativité de groupe. C'est notamment le cas du gabarit nommé Pitch Tail (fig.149) destiné à guider la représentation du concept finalement retenu et à le communiquer à d'autres acteur.trices d'entreprises, par exemple des décisionnaires liés à l'innovation. Cette conception s'est basée sur des constats et des existants relevés lors de l'étude bibliographique. Ces gabarits sont également actionnables sur d'autres thématiques que celle de l'intégration de fonctions en fabrication additive. En ce sens, ces outils représentent également un des apports, bien que secondaire, de cette thèse.

Fig.149 – Gabarit de représentation et de communication d'un concept final

Une infographie des procédés – Cet apport est secondaire au regard de cette thèse. Au cours de l'étude bibliographique sur la fabrication additive, il est apparu qu'aucune visualisation ne permettait de présenter l'ensemble des procédés de fabrication additive de manière synthétique et actualisée. En ce sens, nous avons construit une infographie (fig.150) de l'ensemble des procédés de fabrication additive recensés par une étude des brevets, de la littérature et de la normalisation. Celle-ci est destinée à être partagée et mise à jour (§2.3.1).

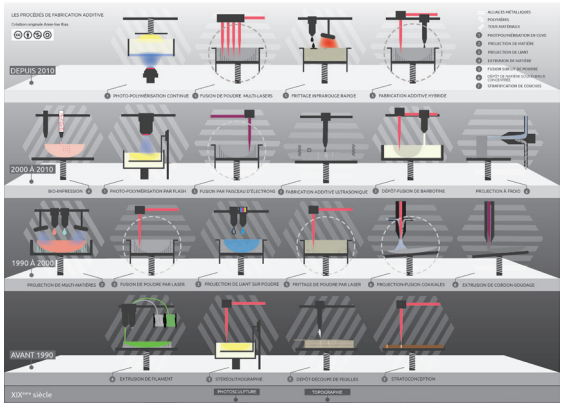


Fig.150 – Infographie des procédés de fabrication additive

Document confidentiel

5.2 Perspectives de développement et de recherche

5.2.1 Perspectives de développement

Les types d'informations à apporter et leur proportion

A court terme, nous pensons qu'il sera nécessaire d'élargir le panel d'étude, à la fois en termes de nombre de séances de créativité de groupe, de diversité d'entreprises participantes et de thématiques d'exploration. Un tel élargissement permettrait d'éliminer les hypothèses liées à l'influence potentielle de ces paramètres. Il semble notamment nécessaire de répéter l'expérimentation #2 avec des entreprises représentantes d'autres secteurs industriels que l'Energie. En effet, dans le cadre de ces travaux, nous n'avons pas évalué l'influence du type d'informations découvertes par la manipulation des AMIO au regard du secteur industriel d'application visé. Nous n'avons donc pas observé finement l'intégration des informations apportées dans les connaissances déjà possédées par les participant.es, autrement dit la création des matrices de connaissances et leur malléabilité. Par exemple, est-ce que des informations relatives aux matériaux sont plus inspirantes pour le secteur Aéronautique que pour le secteur Energie ? Si de telles tendances peuvent être déterminées, il deviendrait alors possible de proportionner la quantité des différents types d'informations à incarner dans les AMIO en fonction de l'entreprise partenaire engagée dans la séance de créativité de groupe.

De la même manière, il sera nécessaire de multiplier les types de thématiques d'exploration traités. Nous avons concentré cette étude à l'inclusion de corps étrangers en Fusion de poudre métallique par laser et conçu les dispositifs de stimulation correspondants. Quels impacts aurait alors une autre thématique, par exemple liée à la combinaison de plusieurs procédés ? La nature des connaissances à découvrir aura-t-elle un impact sur la capacité créative des individus ?

L'évaluation initiale des connaissances fabrication additive

Il semble également nécessaire d'approfondir la méthode d'évaluation du niveau de connaissance sur la fabrication additive que les participant.es ont, préalablement à la séance de créativité de groupe. En effet, dans ces travaux, l'évaluation du niveau était basée sur une méthode déclarative par questionnaire. Nous avons constaté que les déclarant.es sous-évaluent ou, au contraire, surévaluent leur niveau de connaissances. Cette incertitude limite la possibilité d'apporter le niveau d'information pertinent et voulu à découvrir selon le profil des participant.es aux séances. Nous envisageons donc le développement d'un outil d'évaluation des connaissances plus objectif non seulement déclaratif.

5.2.2 Perspectives de recherche

Objet tangible/objet virtuel et capacité créative

Une première perspective de recherche concerne une spécificité apportée par la fabrication additive. Nous avons vu qu'elle permet d'obtenir un objet tangible uniquement à partir d'un objet numérique. Autrement dit, chaque objet tangible est toujours accompagné de son double virtuel. Dans le cadre de cette thèse, nous avons exploré l'influence de la manipulation d'objets tangibles sur la capacité créative de concepteur.trices. Nous n'avons pas questionné l'influence de leurs doubles virtuels et surtout l'influence du fait que les deux types d'objets, tangible et virtuel, fonctionnent toujours de pair. Ainsi, est-ce qu'une manipulation effectuée dans le monde virtuel et/ou dans le monde tangible favoriserait la génération d'idées et de concepts créatifs ? Nous voyons également en ce sens des liens avec les travaux sur la créativité en environnement virtuel, thématique couramment en discussion dans le champ de la recherche en créativité, et des travaux développés au LCPI.

Processus créatif et chaîne numérique

Porter l'intérêt sur les rôles des objets virtuels permettrait également d'étudier la transition des phases initiales prises en charge par le modèle de créativité par et pour la fabrication additive vers les phases avales à conduire une fois qu'un concept créatif a été sélectionné pour être développé. En effet, nous avons vu que ces phases avales sont principalement basées sur l'utilisation de logiciels de modélisation numérique, selon des démarches de conception basées sur l'optimisation (topologique, géométrique, paramétrique…). Nous pouvons alors faire l'hypothèse que la prise en compte de la chaîne numérique, au plus tôt, dès les phases initiales, permettrait de faciliter la transition vers ces phases de développement et de limiter la perte de données. Il restera alors à étudier l'impact, sur la capacité créative des individus, de cette prise en compte de la chaîne numérique.

Développement de la capacité créative des concepteur.trices

Une seconde perspective de recherche concerne la capacité créative des concepteur.trices. En effet, les principes de base de la créativité indiquent que tous les individus ont cette capacité naturellement mais qu'ils la développent plus ou moins, notamment en fonction de leur formation et de leurs activités (§2.6.1). Par exemple, les designers apprennent, pendant leurs cursus d'études, à développer celle-ci, notamment à travers l'apprentissage du dessin et de différents modes de représentation comme moteur de la conversation réflexive. Ces profils apprennent à « réfléchir par le dessin ». Tous les individus peuvent donc faire progresser leur capacité créative. En conséquence, il semble pertinent d'envisager une étude pour observer les interactions entre informations découvertes par la manipulation de dispositifs et développement de la capacité créative. Par exemple, il s'agirait d'observer le niveau des analogies réalisées à partir d'un même dispositif soumis à des participant.es issu.es de divers métiers : design, ingénierie, marketing, etc…Il deviendrait ainsi possible de concevoir des dispositifs facilitant les analogies bas niveau pour les participant.es ayant peu développé leur capacité créative, des dispositifs favorisant les analogies de haut niveau pour des individus habitués à utiliser leur capacité créative et des dispositifs intermédiaires. Dans le cadre de séances de créativité de groupe conduites périodiquement avec un même groupe de participant.es, il pourrait alors être intéressant d'observer l'évolution de la capacité créative. Au-delà de résultats pour la recherche, cette démarche progressive pourrait également s'appliquer en entreprise. En effet, un accompagnement sur le long terme permettrait de dépasser l'injonction à avoir de bonnes idées sur un temps de séance de créativité définie et favoriserait l'intégration d'une culture créative plus profondément dans les entreprises.

Document confidentiel

5.2.3 Perspectives à plus long terme

Les perspectives de plus long terme sont liées à l'intégration du modèle de créativité par et pour la fabrication additive en entreprise, plus précisément dans une unité de Recherche-Innovation-Développement (RID). Cette intégration soulèvera des questionnements liés au modèle économique d'une telle organisation et liés au management de l'innovation par Exploration. Ces questionnements initiés dans les travaux fondateurs sur la RID datant de 2006 **[121]** restent d'actualité. Dans le contexte de l'Exploration, les projets d'innovation sont, par définition, transversaux à l'expertise technique sur la fabrication additive et à l'expertise sur la créativité. Quels sont alors les critères d'organisation des projets ? Par expertise technique ? Par secteur industriel ? Peut-on définir un profil de chef.fe de projets d'Exploration ? Etonnamment, le profil designer n'est pas mentionné dans ces travaux initiateurs de la RID alors que l'enseignement du design industriel permet, depuis plus de 20 ans, l'acquisition de compétences transversales à l'industrie et à la créativité. Les profils impliqués dans les projets d'Exploration de la fabrication additive et l'organisation en entreprise resteront donc à définir. Il s'agira alors d'intégrer, dans la culture d'entreprises techno-centrées, le recours à des approches par la créativité pour faire face aux enjeux de transformation actuels pour l'innovation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

De nombreuses études sur la fabrication additive adoptent un point de vue uniquement techno-centré, lié à la compréhension des procédés, à la définition de règles de conception et à leur enseignement. Au regard de la résistance au changement visible dans les industries susceptibles d'appliquer la fabrication additive et de la difficulté de faire évoluer les façons de penser de l'industrie conventionnelle vers l'additif, il est apparu nécessaire d'accompagner les entreprises par d'autres approches. C'est l'essence de cette thèse, réalisée à la suite d'un cursus en design industriel, qui cherche à apporter le point de vue de la créativité sur ce terrain technologique.

Ce document a présenté notre travail de thèse en 4 chapitres, organisés pour rendre compte de notre démarche de recherche-action, basée sur la réalisation de projets dans un contexte industriel, la PME Poly-Shape. Il s'agissait donc de mettre en relation deux champs de recherche habituellement distincts : la fabrication additive et la créativité, afin de mettre en évidence des moyens de stimuler la capacité créative des individus, dans le contexte spécifique de la fabrication additive. Cette mise en relation a pour but d'accompagner l'intégration de la fabrication additive dans différents secteurs industriels, en co-développement avec les grands groupes industriels, pour en imaginer les futures applications. Cette thèse visait alors à répondre à la problématique suivante : **comment faire l'expérience de la fabrication additive afin de favoriser la génération d'idées et de concepts créatifs ?**
Dans ce but, nous avons d'abord analysé la littérature et observé des pratiques en terrain industriel. En parallèle, nous avons conduit deux projets de R&D pour compléter la définition de « faire l'expérience de la fabrication additive ». Les constats relevés ont permis de comprendre

les mécanismes du processus créatif, dans l'objectif d'en appliquer les bases au domaine de l'innovation en fabrication additive et pour en redéfinir certains contours à l'aune de la fabrication additive. Ainsi, nous avons souligné des éléments prépondérants tels que l'importance de collecter des informations dans différents domaines plus ou moins éloignés de la fabrication additive pour nourrir l'inspiration, ou le rôle des objets intermédiaires en tant qu'articulation des dimensions de la capacité créative.

Nous avons alors modélisé une méthode de créativité par et pour la fabrication additive. Celle-ci vise à guider, en faisant l'expérience de la fabrication additive (« par »), les individus peu habitué.es à utiliser leur capacité créative, dans la génération d'idées et de concepts créatifs destinés à la fabrication additive (« pour »). Dans le but de confronter ce modèle au terrain industriel, nous avions émis deux hypothèses :

- La stimulation par la manipulation d'un objet instrument de type « Cartes-Objets » favorise la génération d'idées créatives
- La stimulation par la manipulation d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise la génération d'idées et de concepts créatifs

Nous avons alors conçu et fabriqué deux dispositifs opérationnels destinés à faire faire l'expérience de la fabrication additive à des participant.es en séance de créativité de groupe. Le modèle de créativité par et pour la fabrication additive a donc été testé par une pré-expérimentation puis deux expérimentations basées sur la mise en œuvre des deux dispositifs. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que la stimulation par le dispositif « Cartes-Objets » favorise effectivement la génération d'idées créatives. Ils ont également montré que la stimulation, via des manipulations sensori-motrices, d'objets d'expériences réalisés en fabrication additive favorise également la génération d'idées créatives dans un contexte de co-développement, mais sans parvenir a prouvé l'influence de ces manipulations d'objets sur la génération de concepts créatifs. Nous avons alors compris que, au regard du niveau des connaissances techniques en jeu, l'expérience de la fabrication additive devrait pouvoir être réalisée tout au long de la phase de génération de concepts et non pas seulement comme stimulation en début du processus.

En définitive, cette thèse a montré, d'un point de vue global, une approche originale en cherchant à mettre en relation fabrication additive et créativité. Nous avons contribué à enrichir les sciences de la conception en proposant un modèle de créativité par et pour la fabrication additive. Nous avons également apporté une nouvelle définition des caractéristiques et des statuts que peuvent prendre les objets intermédiaires dans ce contexte. Nous avons par ailleurs contribué à enrichir les pratiques industrielles en aboutissant, par une démarche de recherche-action, au dépôt de deux brevets d'une part et, d'autre part, en concevant des dispositifs opérationnels qui ont été actionnés dans des contextes réels.

Enfin, vu la profondeur des recherches actuelles sur la créativité et au regard de l'évolution des connaissances sur la fabrication additive, de nombreuses études liant ces deux champs restent à faire. Elles pourront s'intéresser, entre autres pistes, à croiser états émotionnels, découverte de connaissances techniques et génération de concepts créatifs pour la fabrication additive ou encore objets virtuels-objets tangibles et génération de concepts créatifs pour la fabrication additive.

Document confidentiel

CONTRIBUTIONS

I. Revues scientifiques et ouvrages

- Rias AL., Segonds F., Bouchard C., Abed S., TOWARDS ADDITIVE MANUFACTURING OF INTERMEDIATE OBJECTS (AMIO) FOR CONCEPTS GENERATION, in International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 11(2), 2017, pp 301-315

Abstract – According to an analysis of existing Design For Additive Manufacturing (DFAM) methods, we first highlight that they present limits regarding product innovation. This paper then presents a creative approach to be integrated in the early stages of DFAM methods. Two case studies, A and B, are presented as the experimental application of the first stage of our creative approach. The results of these case studies highlight that designers need a new kind of Intermediate Representation (IR), especially to represent dynamic features. To address this need, we introduce the concept of AMIO – Additive Manufacturing of Intermediate Objects. This new kind of IR is an expected output of the ideas generation stage. These intermediate objects are meant to be manipulated by all the design stakeholders, as an input for the concept generation stage, to enhance the generation of creative concepts for additive manufacturing.

- Rias AL., Bouchard C., Segonds F., Vayre B., Abed S., DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING: SUPPORTING INTRINSIC-MOTIVATED CREATIVITY, chapter 8 in Emotional Engineering vol.5, 2017, pp 99-116, Springer international publishing

Abstract – Emotional aspects and designers' motivations in Design For Additive Manufacturing are rarely studied. Still, as they can influence creative behaviors, it is worth of interest to draw some bases for a relation between designers' motivations and the field of Additive Manufacturing. This paper aims at identifying the motivations that push designers to deal with AM in their practice. We have highlighted that they experience some extrinsic motivations: technical improvements, economics and social environments pressures. We also notice that creative designers, apart from AM, usually experience some intrinsic motivations and, moreover, that it exists an ideal state to generate creative concepts: the Flow. To support creative designers in DFAM in reaching the Flow, we then identified 4 key levers through the potential of AM: the newness of AM processes, the necessary skill of 3D modelling, the investigation of new shape grammars and finally the opportunity of embodying concepts into physical objects. To benefit from this potential, we assume that designers' intrinsic motivations should be supported. For that purpose we identified 3 required conditions. The first one is the use of a proper vocabulary i.e the expression Additive Manufacturing instead of 3D Printing. The second one is the development of a design process which integrates a creative approach. The third condition is the use of AM objects as experience triggers during creative sessions to arise positive emotions.

II. Conférences internationale et nationales

- **Internationale** : Rias AL., Segonds F., Bouchard C., Abed S., DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING: A CREATIVE APPROACH, presented at DESIGN 2016 conference, May 16-19th 2016, Dubrovnik, Croatia and published in the proceedings pp 411-420.

Introduction – Our research object is focused on Design For Additive Manufacturing (DFAM) methods, from a creative design point of view. It appears that some existing methods already integrate some creative approaches but they guide to generate only partially creative concepts, while AM is recognized to have a great potential in new designs. We thus propose a framework of a creative DFAM method in this paper. AM allows to introduce complexity in products at four levels: in their shape, material distribution, structure hierarchy and functionality [Rosen, 2007], [Gibson et al. 2010]. To exploit this potential, several DFAM methods have been developed, with various design purposes. This paper aims first at presenting an overview of current DFAM methods, focusing on the input data and the initial Intermediate Representation (IR) they allow to define [Bouchard et al. 2005]. We identified that these methods impact differently the product definition and we propose to categorize them in 3 levels of changes, formal newness, functional reconfiguration and AM form & function implementation. However, among these methods, a very few are oriented to the generation of creative concepts i.e AM concepts whose features are new, realistic and useful [Bonnardel, 2000]. In order to support the generation of creative concepts in AM, this paper aims at proposing a 5 stages creative approach to be integrated in early stages of DFAM methods. This approach intends to foster designers to explore new design features, by taking into account both intra-domain and far-domain sources of inspiration as input data.

- **Nationale** : Rias AL., Segonds F., Bouchard C., Abed S., CONCEPTION POUR LA FABRICATION ADDITIVE : UNE APPROCHE PAR LA CRÉATIVITÉ. Présentation aux 22ème Assises Européennes de la Fabrication Additive, 21 Juin 2016 à Paris, France

- **Nationale** : Rias AL., Segonds F., Bouchard C., Abed S., FABRICATION ADDITIVE ET CRÉATIVITÉ : UNE DÉMARCHE POUR LA CONCEPTION AMONT. Article présenté lors de la conférence CONFERE 2014, 3-4 juillet à Sibenik, Croatie.

Résumé – Ayant dépassé le prototypage, la fabrication additive et spécifiquement la fabrication rapide (i.e fabrication de pièces fonctionnelles et finies), est devenue un véritable procédé industriel remettant en question les connaissances, habitudes, méthodes et outils des concepteurs. Le processus de conception de produits doit alors être redéfini pour que le concepteur intègre dès les phases amont les spécificités du principe additif. C'est l'objectif des méthodologies de Design For Additive Manufacturing. Cet article propose un état de l'art montrant l'impact de la fabrication rapide sur la conception ainsi que le rôle du design industriel et en particulier de la créativité dans cette conception pour la fabrication rapide.

III. Enveloppes Soleau et brevets

Les projets R&D1 et R&D2 présentés dans ce document (§3.2) ont donné lieu aux dépôts de 9 enveloppes Soleau différentes auprès de l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI) et de deux demandes de dépôt de brevets :

- Demande de brevet n°1661707, Rias AL., Segonds F., Bouchard C., Vayre B., Abed S., Procédé d'authentification d'un composant original réalisé au moins en partie par fabrication additive à base de poudre métallique et procédé d'authentification d'un composant, 2016
- Demande de brevet n°1661092, Rias AL., Vaissier B., Segonds F., Bouchard C., Vayre B., Abed S., Procédé d'intégration d'un corps étranger au sein d'une pièce obtenue par fabrication additive par fusion sélective par laser, 2016

IV. Articles de vulgarisation

Au-delà des contributions scientifiques, la conduite de ces travaux a également permis d'aller à la rencontre des acteurs de l'écosystème industriel de la fabrication additive. Nous avons ainsi partagé ces rencontres et connaissances industrielles avec la communauté du design (traditionnellement liée au champ de la créativité) et plus largement au grand public.

Article de revue spécialisée

- Rias AL, Segonds F., Bouchard C., Abed S., Focus sur la fusion de poudre métallique par laser et ses applications, dans Traitements & Matériaux n°431 décembre 2014, pp 29-34

Articles de blog spécialisé

- Rias AL, Impression 3D ou Fabrication Additive – de quoi parle-t-on ? Une infographie de l'ensemble des procédés, 20 octobre 2016 http://strabic.fr/Impression-3d-ou-Fabrication-additive
- Rias AL, La bibliothèque de référence sur l'impression 3D, 18 Mai 2015, un article en ligne sur 3D Natives http://www.3dnatives.com/bibliotheque-impression-3d/
- Rias AL., Les Fablab d'entreprises : un appel aux makers et aux créatifs, 23 Mars 2015, un article en ligne sur 3D Natives http://www.3dnatives.com/les-fablab-dentreprises-un-appel-aux-makers-et-aux-creatifs/
- Rias AL., Le CHU de Nantes s'intéresse de près à l'impression 3D, 3 février 2015, un article en ligne sur 3D Natives http://www.3dnatives.com/chu-nantes-impression-3d-chirurgie/
- Rias AL., 3D&P, un nouvel acteur français dans l'impression 3D métal, 27 novembre 2014, un article en ligne sur 3D Natives http://www.3dnatives.com/3dp-francais-impression-3d-metal/

- Rias AL, Des volumes d'impression 3D toujours plus grands ! (compte-rendu d'une visite du salon 3D Print show Paris), 11 novembre 2014, un article en ligne sur 3D Natives http://www.3dnatives.com/volumes-impression-3d-grands/
- Rias AL., Monsieur Faltazi : la volonté de réunir impression 3D et éco-design, 18 juillet 2014, un article en ligne sur 3D Natives http://www.3dnatives.com/faltazi-impression-3d-eco-design/
- Rias AL., Poly-Shape : la petite entreprise qui parle aux grands, 21 Mai 2014, une interview en ligne sur 3D Natives http://www.3dnatives.com/poly-shape-petite-parle-grands/

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Mc Taggart R., Kemmis S. (Eds), The action research planner. 1988: Deakin university

[2] Henderson R., Clark M, Kim B., Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms. Administrative science quarterly, 1990. (35): p. 9-30

[3] O'Connor CG., Market learning and radical innovation : a cross case comparison of eight radical innovation projects. Journal of Product Innovation Management, 1998. 15(2): p. 151-166

[4] Garcia R., Calantone R., A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology : a literature review. Journal of Product Innovation Management, 2002. 19: p. 110-132

[5] Laverne F., Segonds F., D'Antonio Gianluca, Le Coq M., Enriching design with X through tailored additive manufacturing knowledge: a methodological proposal. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2016. p. 1-10

[6] Boujut JF., Conception de nouveaux produits mécaniques, in Pour une science de la conception, UTBM, Editor. 2005. p. 41-54

[7] Seepersad C., Design rules for selective laser sintering, H. Technologies, Editor 2012, The university of Texas, Austin

[8] Thomas D., The development of Design rules for selective laser melting, in Computer aided product design2009, University of Wales, Cardiff. p. 318

[9] Barbe AS., Giraud G., L'impression 3D en France et dans le monde : applications, enjeux et perspectives à l'horizon 2020. Paysage concurrentiel et stratégies des acteurs, ed. G. Xerfi. 2014

[10] Associates W., Wohlers report 2016. 3D Printing and additive manufacturing state of the industry, W. Associates Editor 2016

[11] Mahmoud-Jouini S.B., Comment passer d'une démarche réactive à une démarche proactive fondée sur des stratégies d'offres innovantes ? Le cas des grandes entreprises générales de Bâtiment françaises, in De l'idée au marché. 2000, Vuibert

[12] Mahmoud-Jouini S. B , Midler C., Compétition par l'innovation et dynamique des systèmes de conception dans les entreprises Françaises. Réflexions à partir de la confrontation de trois secteurs, Université Paris XI, Centre de Recherche en Gestion de l'Ecole polytechnique

[13] Coriat B., Weinstein O., Les nouvelles théories de l'entreprise 1995: Le Livre de Poche

[14] Deschamps JP., L'innovation et le leadership. The international handbook on innovation, 2003. (1): p. 815-831

[15] Lenfle S., Midler C., Stratégie d'innovation et organisation de la conception dans les entreprises amont. Revue Française de Gestion, 2008. 28(140): p. 89-105

[16] Lenfle S., Midler C., Gestion de projet et innovation. L'Encyclopédie de l'innovation, Economica, 2003. p. 49-69
[17] AERES Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement, Rapport d'Evaluation de l'Unité de Recherche : Laboratoire de Conception de Produits et Innovation, 2013, Arts et Métiers ParisTech
[18] Lahonde N., Optimisation du processus de conception : proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision, 2010, Arts et Métiers ParisTech. p. 217
[19] Bouchard C., Modélisation du processus de design automobile. Méthode de veille stylistique au design du composant d'aspect, 1997, Arts et Métiers
[20] Vial S., Court traité du design, 2014, PUF Editor
[21] Le Boeuf J., Histoires du design : questionnement critique, in Sciences du Design, PUF Editor. 2015. p. 76-85
[22] Dokshin L., Modélisation du processus de conception centrée utilisateur, basée sur l'intégration des méthodes et outils de l'ergonomie cognitive : application à la conception d'IHM pour la télévision interactive, 2003, Arts et Métiers
[23] Nelson J., Contribution à l'analyse prospective des usages dans les projets d'innovation, 2011, Arts et Métiers ParisTech
[24] Cardoso Goncalves P., The integration of users into the innovation process for the design of new luxury products, 2016, Arts et Métiers
[25] Dumenil-Lefebvre A., Intégration des aspects sensoriels dans la conception des emballages en verre : mise au point d'un instrument méthodologique à partir des techniques d'évaluation sensorielle, 2006, Arts et Métiers
[26] Gentner A., Définition et représentation d'intentions liées à l'expérience d'utilisation en phase amont du processus de conception de produit, 2014, Arts et Métiers
[27] Bongard-Blanchy K., Bringing the user experience to early product conception: from idea generation to idea evaluation, 2013, Arts et Métiers
[28] Groff A., Optimisation de l'innovation par l'élaboration d'un processus de créativité industrielle : cas de l'industrie automobile, 2004, Arts et Métiers
[29] Mougenot C., Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée, 2008, Arts et Métiers ParisTech
[30] Bila-Deroussy P., Approche systémique de la créativité : outils et méthodes pour aborder la complexité en conception amont, 2015, Arts et Métiers
[31] Rieuf V., Impact of the immersive experience on Kansei during early design, 2013, PhD thesis at Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
[32] Omhover JF., Bouchard C., Mining KEER - What can an algorithm extract from the production of our community ?, in KEER 2016, University of Leeds
[33] Dubois P., Duchamp R., Aoussat A., Formalisation d'une démarche pourla conception d'un processus de prototypage rapide, 1999
[34] Laverne F., Concevoir avec la Fabrication Additive : une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique, 2016, Arts et Métiers
[35] Checkland P., Holwell S., Action Research: its nature and validity. Systemic Practice and Action Research, 1998. 11(1): p. 9-21
[36] Simon HA., The sciences of the artificial. 1969, Cambridge MA
[37] Le Moigne J.L., La modélisation des systèmes complexes Collection Sciences Humaines, 1990, Dunod
[38] Reason P., Bradbury H. (Eds), Handbook of action research: participative inquiry and practice. 2001, Sage.
[39] Lenfle S., Projets et conception innovante, in Sciences de Gestion 2008, Université Paris Dauphine. p. 172
[40] Findeli A., La recherche-projet : une méthode pour la recherche en design, in Symposium sur le design 2005, Bâle, Suisse. p. 40-51

[41] Lemarchand C., Vous avez dit «recherche en design» ?, 2010, ENSCI- Les Ateliers
[42] Baskerville R.L., Distinguishing action research from participative case studies. Journal of Systems and Information Technology, 1997. 1(1): p. 24-43
[43] Schön DA., The reflective practitioner : how professionals think in action. Vol. 5126. 1983: Basic Books
[44] Catroux M., Introduction à la recherche-action : modalités d'une démarche théorique centrée sur la pratique. Recherche et pratiques pédagogiques en langues de spécialité, 2002. 21(3): p. 8-20
[45] Susman G.I., Action Research : A Sociotechnical Systems Perspective, ed. G.M, 1983, London : Sage Publications
[46] Geel C., Le designer à l'aune de la créativité. Mode de recherche, 2010(14)
[47] Fischer X., Coutellier D., Research in interactive design, 2007, vol.2, Springer Science & Business Media
[48] Bourell D., Beaman J., Leu M., Rosen D. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead, in RapidTech 2009
[49] AFNOR, NF E 67-001, 2011, Union de Normalisation de la Mécanique
[50] ASTM, F2792-12a : Standard terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2012, West Conshohocken (ed)
[51] Barlier C., Bernard A., Fabrication Additive - Du prototypage rapide à l'impression 3D, ed. Dunod, 2015
[52] Gibson I., Rosen D.W, Stucker B., Additive Manufacturing Technologies. Rapid prototyping to Direct Digital Manufacturing. 2010, Springer, p.1-472
[53] Chua CK., Teh SH., Gay RKL., Rapid prototyping versus virtual prototyping in product design. International Journal of Advanced manufacturing technology, 1999, 15: p. 597-603
[54] Hopkinson N., Hague R.J.M, Dickens P.M., Rapid manufacturing : an industrial revolution for the digital age. 2006, Wiley
[55] Vayre B., Vignat F., Villeneuve F., Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. Mechanics & Industry, 2012, 13: p. 89-96
[56] Wohlers Associates. (eds), Additive manufacturing and 3D printing state of the industry. Annual worldwide progress report. 2013
[57] Adnene S., Fabrication additive de pièces à base d'alliages métalliques complexes, in Génie des Procédés et des Produits 2013, Université de Lorraine
[58] Hull CW., Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, 1984
[59] André JC., Mehaute A., De Witte O., Device for producing a model of an industrial part, 1986, France
[60] André JC., Cabrera M., Karrer P., Process and device for the manufacture of a solid three-dimensional part by the phototransformation of an organic liquide, 1988
[61] André JC., Cabrera M., Jezequel Y., Karrer P., Process and device for producing models of industrial parts by the action of light, 1988
[62] Kruth JP., Leu MC., Nakagawa T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, 1998
[63] Pham DT., Gault RS., A comparison of rapid prototyping technologies. International Journal of machine tools and manufacture, 1998, 38: p. 1257-1287
[64] Chua CK., Chou SM., Wong TS., A Study of the State-of-the-Art Rapid Prototyping Technologies. International Journal of Advanced manufacturing technology, 1998, 14: p. 146-152
[65] Karunakaran KP., Bernard A., Suryakumar S., Dembinski L., Taillandier G., Rapid manufacturing of metallic objects. Rapid prototyping Journal, 2012, 18: p. 264-280
[66] Obaton A-F., Bernard A., Taillandier G., Moschetta J-M., Fabrication additive : état de l'art et besoins métrologiques engendrés. Revue française de métrologie, 2015-1(37)

Document confidentiel

[67] Ruan J., Sparks TE., Fan Z., Stroble JK., Panackal A., and Liou F., A review of Layer based manufacturing processes for metal, in Solid freeform fabrication symposium 2006, University of Texas Press, p. 233-245
[68] Vayre B., Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM, 2014, Université de Grenoble
[69] Kranz J., Herzog D., Emmelmann C., Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. Journal of Laser Applications, 2015 vol.27
[70] Rias AL., Focus sur la fusion de poudre métallique par laser et ses applications, in Traitements & Matériaux 2014, p. 29-34
[71] Hague R.J.M, Reeves P.E, Rapid prototyping, tooling and manufacturing. Vol. 117. 2000, iSpithers Rapra Publishing
[72] Sass L. , Oxman R., Materializing design : the implications of rapid prototyping in digital design. Design Studies, 2006. 27: p. 325-355
[73] Yan Y., Li S., Zhang R., Lin F., Wu R., Lu Q., Xiong Z., Wang X., Rapid prototyping and manufacturing technology : principle, representative technics, applications and development trends. Tsinghua Science and Technology, 2009, 14: p. 1-12
[74] De Martinoa T., B. Falcidienob, S. Haßingerb, Design and engineering process integration through a multiple view intermediate modeller in a distributed object-oriented system environment. Computer-Aided Design, 1998, 30(6): p. 437-452
[75] Wong K.V., Hernandez A., A review of Additive Manufacturing, ISRN Mechanical Engineering, 2012
[76] Patil L., Dutta D., Bhatt A.D., Jurrens K., Lyons K., Pratt M.J., Sriram R.D., Representation of heterogeneous objects in ISO 10303 (STEP), in ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2000: Orlando, Florida
[77] Bonnard R., Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive, in Génie mécanique2010, IRCCyN Ecole Centrale Nantes. p. 213
[78] Laverne F., Segonds F., Dubois P., Fabrication additive - Principes généraux. Techniques de l'ingénieur, 2016
[79] Krish S., A practical generative design method. Computer-aided Design, 2011, 43: p. 88-100
[80] Doutre PT., Thanh Hoang Vo, Marin P., Pourroy F., Prudhomme G., Optimisation topologique : outil clé pour la conception des pièces produites par fabrication additive ?, in 14ème colloque AIP PRIMECA 2015: La Plagne, France
[81] Teece D.J., Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy Research Policy, 1986. 15(6): p. 285-305
[82] Hague R., Campbell I., Dickens P., Implications on design of rapid manufacturing. Journal of Mechanical Engineering Science, 2003. 217: p. 25-30
[83] Rosen D.W, Design for additive manufacturing : a method to explore unexplored regions of the design space., in 18th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium 2007, p. 402-415
[84] Rosen D.W, Research supporting principles for design for additive manufacturing. Virtual and Physical Prototyping, 2014. 9(4): p. 225-232
[85] Gibson I., Rosen D.W, Stucker B., Design For Additive Manufacturing. Additive Manufacturing Technologies, 2010: p. 283-316
[86] Wallas G., The art of thought. 1926, London: Jonathan Cape
[87] Guilford J.P., The nature of human intelligence. 1967, New York: McGraw Hill
[88] De Brabandère L., Pensée magique, pensée logique : petite philosophie de la créativité. 2012, Paris: Le Pommier (Eds)
[89] Chakrabarti A., Design Creativity Research, in Product Research. 2009, Springer Science Business Media. p. 17–39
[90] Ryan R., Deci E., Intrinsic and Extrinsic motivations: classic definitions and new directions. Contemporary Educational Psychology, 2000. 25(1): p. 54-67

[91] Lubart T., Mouchiroud C., Tordjman S. , Zenasni F., Psychologie de la créativité. 2003, Paris
[92] Parmentier G., Szostak B., Dechamp G., Cohendet P. Créativité et organisation : quels enjeux en management stratégique ? in 25ème conférence internationale de management stratégique, 2015, Paris
[93] Amabile TM., Creativity in context. 1996, Boulder USA: Westview Press
[94] Bonnardel N., Créativité, in Dictionnaire des Sciences cognitives, 2002, Arman Colin: Paris. p. 95-97
[95] Boden MA., The creative mind: myths and mechanisms. 1990, London: Weidenfeld and Nicolson
[96] Shah JJ., Smith SM., Vargas-Hernandez N., Metrics for measuring ideation effectiveness. Design Studies, 2003. 24: p. 111-134
[97] Yannou B., Jankovic M., Leroy Y., Okudan Kremer G., Observations from radical innovation projects considering the company context, Journal of Mechanical Design, 2013, 135(2)
[98] Csikszentmihalyi M. and Robinson R. E, The art of seeing: an interpretation of the aesthetic encounter. J. Paul Getty Museum, 1991
[99] Gero JS., Conceptual design as a sequences of situated acts, in Artificial intelligence in structural engineering, I. Smith, 1998, Springer: Berlin p. 165-177
[100] Hatchuel A., Le Masson P., Weil B., De la R&D à la RID : de nouveaux principes de management du processus d'innovation, in Congrès francophone du management de projet 2001: Paris, France
[101] Schumpeter, JA., The theory of Economic Development. An inquiry into profits, capital, credit, interest and the business cycle. Vol. 55. 1934: Transaction publisher
[102] Kelly P., Kranzberg M. , Technological innovation: A critical review of current knowledge. 1978, San Francisco: San Francisco Press
[103] Abernathy W., Utterback J., Patterns of Industrial Innovation. Technology Review, 1978. 80(7): p. 40-47
[104] Garel G., Rosier R., Régimes d'innovation et exploration. Revue Française de Gestion, 2008(187): p. 127-144
[105] Christensen C., The Innovator's dilemma. 1997: Harvard Business School Press
[106] Hatchuel A., Towards Design Theory and expandable rationality: the unfinished program of Herbert Simon. Journal of Management and Governance, 2002. 5(3-4)
[107] Garel G., Rosier R. Gérer l'exploration : le cas des technologies à haut potentiel. in Congrès annuel de l'Association des sciences administratives du Canada, 2007, Ottawa, Ontario
[108] Weil B., Conception collective, coordination et savoirs. Les rationalisations de la conception automobile, 1999, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
[109] March JG., Exploration and Exploitation in organizational learning. Organization Science, 1991. 2(1): p. 71-87
[110] He ZL., Wong PK., Exploration vs Exploitation: an empirical test of the ambidextry hypothesis. Organization Science, 2004. 15(4): p. 481-494
[111] Chanal V., Mothe C., Comment concilier innovation d'exploitation et innovation d'exploration : une étude de cas dans le secteur automobile. Revue Française de Gestion, 2005. 154(35): p. 173-191
[112] Duncan RB., The ambidextrous organization: designing dual structures for innovation, in The management of organizations, Kilmann Editor. 1976: New-York. p. 167-188
[113] Tushman M.L., O'Reilly C.A., Ambidextrous organizations: Managing evolutionary and revolutionary change. California Management Review, 1996. 38: p. 8-30
[114] Brion S., Mothe C., Sabatier M., L'impact-clé des modes de management pour l'innovation. Revue Française de Gestion, 2008. 187: p. 178-194

Document confidentiel

[115] Gibson C.B., Birkinshaw J., The Antecedents, Consequences and Mediating Role of Organizational Ambidexterity. Academy of Management Journal, 2004. 47(2): p. 209-226
[116] Amabile TM., Conti R., Coon H., Lazenby J., Herron M., Assessing the work environment for creativity. Academy of Management Journal, 1996. 39(5): p. 1154-1184
[117] Ford C., A theory of individual creative action in multiple social domains. Academy of Management Review, 1996. 21(4): p. 112-1142
[118] Brion S., Caroline M., Organizational context and innovation ambidexterity: is creativity the missing link ?, in 25ème conférence internationale de management stratégique 2015: Paris
[119] Cohendet P., Simon L., Playing across the playground: paradoxes of knowledge creation in the videogame firm. Journal of Organizational Behavior, 2007. 28: p. 587-605
[120] Audia P., Goncalo J., Past Success and Creativity over Time: A Study of Inventors in the Hard Disk Drive Industry. Management Science, 2007. 53(1): p. 1-15
[121] Le Masson P., Weil B., Hatchuel A., Les processus d'innovation, conception innovante et croissance des entreprises. 2006, Paris: Hermès Lavoisier
[122] Howard TJ., Culley SJ, Dekoninck E., , Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. Design Studies, 2008. 29: p. 160-180
[123] Bonnardel N., Créativité et conception. Approches cognitives et ergonomiques. 2006, France : Solal Editions
[124] Wynn D., Clarkson J., Models of designing, in Design process improvement. 2005, Springer: London. p. 34-59
[125] Cross N., Engineering Design Methods (réédition), 2008: John Wiley & Sons
[126] Ullman D.G., The mechanical design process - 4th edition. 2010: Mc Graw Hill
[127] Pahl & Beitz, Engineering design. A systematic approach, ed. K. Wallace. 2007: Springer-Verlag
[128] Quarante D., Eléments de design industriel. 1994, Paris: Polytechnica
[129] Fisher X., Nadeau JP., Integrated design and manufacturing in mechanical engineering., in Research in interactive design. 2011, Springer: Paris. p. 7-43
[130] Visser W., La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations. Le travail humain, 2009. 72(1): p. 61-78
[131] Design Council, Design for innovation, S.f. Growth, Editor 2011
[132] Hatchuel A., Weil B. C-K theory : notions and applications of a unified design theory. in Herbert Simon International Conference on Design Sciences. 2002. Lyon, France
[133] Dorst K., Cross N., Creativity in the design process : co-evolution of problem-solution. Design Studies, 2001. 22(5): p. 425-437
[134] Gero J.S, Maher M.L, Modeling creativity and knowledge-based creative design. Psychology Press
[135] Simon HA., The structure of ill structured problems. Artificial intelligence, 1973. 4(3-4): p. 181-201
[136] Segonds F., Cohen G., Véron P., Peyceré J., PLM and early stages collaboration in interactive design, a case study in the glass industry. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2016. 10(2): p. 95-104
[137] Pugh S., Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineers. 1990, N-Y: Addison Wesley
[138] Bonnardel N., Activités de conception et créativité : de l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives. Le travail humain, 2009. 72: p. 5-22
[139] Jones JC., Design methods: seeds of human futures. 1970, New York: Wiley-Interscience
[140] Basadur M., Pringle, P., Speranzini G., Bacot M., Collaborative problem solving through creativity in problem definition: expanding the pie, Creativity and Innovation Mangement, 2000. 9(1): p. 54-76

[141] Alberti P., La créativité en conception industrielle. Notions et méthodes. 2009: Techniques de l'Ingénieur
[142] Ottosson S., Dynamic concept development, a key for future profitable innovations and new product variants. 2001, Glasgow: International Conference on Engineering Design
[143] Tomiyama T., Gu P., Jin Y. Kind Ch., Kimura F., Design methodologies : industrial and educational applications. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009. 58: p. 543-565
[144] Newell A., Simon H., Human problem solving. 1972: Prentice Hall
[145] Casakin H., Kreitler S., The cognitive profile of creativity in design. Thinking skills and creativity, 2011. 6: p. 159-168
[146] Anolli L., Antonietti A., Crisafulli L., Cantoia M., Accessing source information in analogical problem solving. The Quaterly Journal of Experimental Psychology, 2001(1): p. 237-261
[147] Iyer N., Kalyanaraman Y., Lou K., Janyanti S., Ramani K. , A reconfigurable 3D engineering shape search system part I: Shape representation, in ASME design engineering technical conferences on computers and information in engineering 2003: DETC'03 Chicago
[148] Hicks B.J., Culley S.J., Allen R.D., Mullineux G., A framework for the requirements of capturing, storing and reusing information and knowledge in engineering design. International Journal of Information Management, 2002(22): p. 263-280
[149] Bouchard C., Modélisation et computation des processus cognitifs et informationnels en conception amont. Une investigation chez les designers et les concepteurs, 2010, INP Grenoble
[150] Levy P., Interdisciplinary Design for the Cyberspace by an approach in Kansei Information—Methodology and Workgroup Communication Tool Design Approach in Kansei, 2005, University of Tsukuba: Japan
[151] Pasman G., Designing with precedents. 2003: Delft University of Technology
[152] Koëstler A., The act of creation. 1964, New York: Macmillan
[153] Bonnardel N. Marmeche E., Towards Supporting Evocation Processes in Creative Design: A Cognitive Approach. International Journal Human-Computer Studies, 2005. 63: p. 422-435
[154] Goldschmidt G., Smolkov M., Variances in the impact of visual stimuli on design problem solving performance. Design Studies, 2006. 27: p. 549-569
[155] Agogué M., Kazakçi A., Weil B., Cassotti M., The impacts of examples on creative design : explaining fixation and stimulation effects, in ICED 11th International Conference on Engineering Design 2011: Denmark
[156] Gero J.S, Creativity, ermergence and evolution in design. Knowledge-Based Systems, 1996. 9: p. 435-448
[157] Finke R.A, Imagery, Creativity and emergent structure. Consciousness and cognition, 1996. 5: p. 381-393
d'équipement. Revue d'anthropologie des connaissances, 2009. 3(1): p. 51-72
[158] Aznar G., Ely S., La posture sensible dans le processus de création des idées 2010: Editions Créa Université
[159] Rosenman MA., Gero JS., Creativity in Design using a design prototype approach, in Modeling creativity and knowledge-based creative design. 1992, John S. Gero et Mary Lou Maher (Eds): New Jersey. p. 111-138
[160] Vinck D., De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. Vers la prise en compte du travail
161] Bernèche R., Plante P., L'Art-thérapie : un espace favorable à la résurgence du potentiel créateur. Revue québécoise de psychologie, 2009. 30(3): p. 11-28
[162] Wenger W., Communities of practice: learning, meaning and identity. 1998, Cambridge: University Press
[163] Oxman R., Design by re-representation: a model of visual reasoning in design. Design studies, 1997. 18: p.329-347

Document confidentiel

[164] Goel V., Sketches of thought. 1995, Cambridge: The MIT Press
[165] Hyysalo S., Representations of use and practice-bound imaginaries in automating the safety of the elderly. Social studies of Science, 2006. 36(4): p. 599-626
[166] Le Gall A., Pratiques de représentations visuelles des cocnepts en équipe d'exploration : rôles et caractéristiques des objets intermédiaires en fonction de leurs contextes d'usage. Innovatio, la revue pluridisciplinaire en innovation, 2015
[167] Edwards B., Vision, dessin, créativité. 1997, Sprimont, Belgique: Mardaga (Eds)
[168] Ndiaye Y., Herold JF., Laisney P., L'imprimante 3D, outil d'aide à l'apprentissage des élèves dans l'activité de conception créative au lycée technologique, in Colloque Eduquer et former au monde de demain 2016: Clermont-Ferrand, France
[169] Mer S., Jeantet, A., & Tichkiewitch, S., Les objets intermédiaires de la conception : modélisation et communication. Le communicationnel pour concevoir, 1995: p. 21-41
[170] Bouchard C., Camous R., Aoussat A., Nature and role of intermediate representations (IR) in the design process : case studies in car design. Internation Journal of Vehicle Design, 2005. 38(1): p. 1-25
[171] Pei E., Campbell I., Evans M.A., A taxonomic classification of visual design representations used by industrial designers and engineering designers. The Design Journal, 2011. 14(1): p. 64-91
[172] Blanco E., Les brouillons. Révélateurs et médiateurs de la conception, in Ingénieurs au quotidien. Ethnographie de l'activité de conception et d'innovation. 1999, Presses Universitaires de Grenoble p. 181-201
[173] Blanco E., Garro O., Brissaud D., Jeantet A., Intermediary objects in the context of distributed design, in CESA'96 IMACS Multiconference: computational engineering in systems applications 1996. p. 579-584
[174] Cruz V., Gaudron N. Open-ended objects : a tool for brainstorming. 2010. Designing Interactive Systems conference Aarhus, Denmark, August 16-20th
[175] Boujut JF., Blanco E., Intermediary Objects as a Means to Foster Co-operation in Engineering Design. Computer Supported Cooperative Work, 2003. 12: p. 205-219
[176] Bassereau JF., Pello RC., Faucheu J., Delafosse D., Les objets intermédiaires de conception/design, instruments d'une recherche par le design, in Sciences du design. 2015, Presses Universitaires de France. p. 48-63
[177] Rabardel P., Les hommes et les technologies. Approche cognitive des instuments contemporains. 1995, Paris: Armand Colin
[178] Mattelmäki T., Design Probes. 2006: University of Art and Design Helsinki
[179] Hutchinson H., Mackay W., Westerlund B., Bederson B., Druin A., Plaisant C., Beaudoin-Lafon M., Conversy S., Evans H., Hansen H., Roussel N., Eiderbäck Björn, Technology probes: inspiring design for and with families, in CHI'03 conference on human factors in computing systems2003: Florida, USA - April 05-10. p. 17-24
[180] Buchenau M., Fulton Suri J. Experience prototyping. in Conference on designing interactive systems: processes, practices, methods, and techniques. 2000. New York, USA
[181] Christofol H., Robert T., Richir S., Bineau S., Les «produits concept», objets fédérateurs pour la mise en place d'une organisation de Recherche Innovation et Développement, in 10ème séminaire CONFERE 3-4 juillet 2003: Belfort, france. p. 43-50
[182] Borja de Mozota B., Design management. 2002: Editions d'Organisation, Paris
[183] Ries E., The lean startup: how today's entrepreneurs use continuuous innovation to create radically successful businesses. 2011: Crown Publishing group
[184] Silberzahn P., Lean startup : le compagnon idéal de l'effectuation ?, in Lean startup, Design thinking et nouvelles approches pour l'entrepreneuriat innovant, D.B. Supérieur Editor, 2013. p. 29-35
[185] Moussette C., Banks R. Designing through making: exploring the simple haptic design space in 5th international conference on tangible, embedded and embodied interaction, 2011

[186] Dunne A. , Hertzian Tales, Electronic Products, Aesthetic Experience and Critical Design. 2005 revised edition (original 1999): The MIT Press
[187] Amabile T., The social psychology of creativity. 1983, New York: Springer-Verlag
[188] Shalley CE., Gilson I., What leaders need to know: a review of social and contextual factors that can foster or hinder creativity. Leadership Quarterly, 2004. 15(1): p. 33-53
[189] Shah JJ., Kulkarni SV., Vargas-Hernandez N., Evaluation of idea generation methods for conceptual design: effectiveness metrics and design of experiments. Journal of Mechanical Design, 2000. 122: p. 377-384
[190] Yannou B., Jankovic M., Leroy Y., Empirical verifications of some radical innovation design principles onto the quality of innovative designs, in International conference on engineering design ICED112011: Technical University of Denmark
[191] Rowe PG., Design Thinking. 1991: MIT Press
[192] Beudon N., Barbier E., Blanpain C., Chartier P., Painvin E., Le Design Thinking en bibliothèque. Un kit pratique pour la conception de projets centrés sur les usagers. 1ère édition française. Vol. 1. 2016: IDEO
[193] Johansson-Sköldberg U., Woodilla J., Cetinkaya M., Design thinking: Past, Present and Possible futures. Creativity and Innovation Management, 2013. 22(2): p. 121-146
[194] Osborn AF., Applied imagination. 1957, New York: Scribner
[195] De Bono E., The use of lateral thinking. 1967, London: Cape
[196] De Bono E., Les six chapeaux de la réflexion. 2005, Paris: Eyrolles
[197] Vidal R., Mulet E., Gomez-Senent E., Effectiveness of the means of expression in creative problem-solving in design groups. Journal of Engineering Design, 2004. 15(3): p. 285-298
[198] Aznar G., Idées : 100 techniques de créativité pour les produire et les gérer. 2005, Paris: Eyrolles
[199] Debois F., Groff A., Chenevier E., La boîte à outils de la créativité. 2ème édition. 2015, Paris: Dunod
[200] Martin B., Hanington B., 100 méthodes de design. 2013: Eyrolles
[201] Van Gundy AB., 101 Activities for Teaching Creativity and Problem Solving. 2005, San Francisco: John Wiley & Sons
[202] Bouchard C., Camous R., Aoussat A. , Nature and role of intermediate representations (IR) in the design proess. International journal of vehicle design Studies, 2005. 38(1): p. 1–25
[203] Moggridge B., Atkinson B., Designing interactions. Vol. 17. 2007, Cambridge: MIT Press
[204] Ocnarescu I., Aesthetic experience & innovation culture : the aesthetic experience in an R&D department through design and for innovation culture, 2013, PhD thesis at Arts et Métiers Paristech
[205] Chang CM., New organizational designs for promoting creativity: a case study of virtual teams with anonymity and structured interactions. Journal of Engineering and Technology Management, 2011. 28(4): p. 268-282
[206] Maisonnier A., Comment améliorer la créativité des emplyés des startups et PME ?, 2009, EM Lyon Business school
[207] Burton M.J. , Design for rapid manufacture : developping an appropriate knowledge transfer tool for industrial designers, 2005, Faculty of Social Sciences & Humanities department of Design & Technology, Loughborough
[208] Maheshwaraa U., Seepersad C., Bourell D. L., Design and Freeform Fabrication of Deployable Structures With Lattice Skins Rapid prototyping Journal, 2007. 13(4): p. 213-225
[209] Munguia J., Riba C., Lloveras J., In the search of design for rapid manufacturing strategies to solve functional and geometrical issues for small series production, in International Conference on Engineering Design ICED2007: Paris, France
[210] Chu C. Graf G. and Rosen D., Design for Additive Manufacturing of cellular structures. Computer-aided design and applications, 2008. 5: p. 686-696

Document confidentiel

[211] Doubrovski Z. , Verlinden J. , Geraedts J. Optimal design for additive manufacturing : opportunities and challenges in ASME 2011 International Design Engineering Technical Conference & Computer and Information in Engineering Conference. 2011. Washington DC, USA
[212] Alpay E., Implications of additive manufacturing applications for industrial design profession from the perspective of designers, in Natural and applied sciences 2012
[213] Maidin B.S, Campbell I., Pei E., Development of a design feature database to support design for additive manufacturing. Assembly Automation, 2011. 32(3): p. 235-244
[214] Rodrigue H., Rivette M., Calatoru V., Richir S., Une méthodologie de conception pour la fabrication additive, in 9ème Congrès International de Génie Industriel 2011: Canada
[215] Boyard N., Rivette M., Christmann O., Richir S. A design methodology for parts using additive manufacturing. in 6th International Conference on Advanced research in Virtual and rapid prototyping. 2013. Leira, Portugal
[216] Vayre B., Vignat F., Villeneuve F. Designing for Additive Manufacturing. in 45th CIRP Conference on Manufacturing systems 2012
[217] Ponche R., Méthodologie de conception pour la Fabrication Additive, application à la projection de poudre, 2013, IRCCyN, Ecole Centrale Nantes. p. 152
[218] Yang S., Zhao T.F., Additive manufacturing-enabled design theory and methodology : a critical review. International Journal of Advanced manufacturing technology, 2015
[219] Gatenby D., Foo G., Design for X (DFX) : key to competitive, profitable products. AT&T Technical Journal, 1990. 69(3): p. 2-13
[220] Mognol P., Lepicart D., Perry N. Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight, 2006. 12(1): p.26-34
[221] Langeveld LH., Design with X is new in product design education, in International design conference DESIGN 2006: Dubrovnik, Croatie
[222] Bolzan P., Mortati M. Designing Through additive manufacturing: present and future discussion. in CUMULUS conference. 2015. Politecnico di Milano, Italie
[223] Sheil R., Design Through Making. Vol. 74. 2005: Wiley
[224] Moussette C., Dore F. Sketching in Hardware and Building Interaction Design: Tools, Toolkits and an Attitude for Interaction Designers. in Design Research Society 2010, Montreal, Canada
[225] Laverne F., Segonds F., Anwer N., Le Coq M., Assembly based methods to support product innovation in Design for Additive Manufacturing: an exploratory case study. Journal of Mechanical Design, 2015. 137(12): p. 1-8
[226] Fey NP., South BJ., Seepersad CC., Neptune RR. Topology Optimization and Freeform Fabrication Framework for Developing Prosthetic Feet in Solid Freeform Fabrication Symposium, 2009
[227] Williams C., Mistree F., Rosen D., Towards the design of a layer-based additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructure, in ASME International Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference2005: California. p. 353-364
[228] Rodrigue H. Rivette M. An Assembly-Level Design for Additive Manufacturing Methodology. in IDMME-Virtual Concept. 2010. Bordeaux, France: Research in Interactive Design
[229] Tang Y., Hascoet JV., Zhao YF., , Integration of topological and functional optimization in Design For Additive Manufacturing, in ASME 2014 12th biennal conference on Engineering systems2014: Copenhagen, Denmark
[230] Rias AL., Segonds F., Bouchard C., Abed S. Design For Additive Manufacturing : a creative approach. in DESIGN 2016 conference, May 16-19th. 2016. Dubrovnik, Croatia
[231] Burton M., Design for rapid manufacturing (DFRM) questionnaire. 2006: SME Editor Loughborough University
[232] Rosen D., Design for additive manufacturing : past, present, and future directions, 2014: Journal of Mechanical design

[233] Gausemeier J., Thinking ahead the future of additive manufacturing. Future applications, 2012, Direct Manufacturing Research Center
[234] Gausemeier J., Echterhoff N., Wall M. Thinking ahead the future of additive manufacturing. Scenario-based matching of technology push and market pull in Forum für Rapid Technologie, 2012
[235] Li X., F. Prinz. Embedding of fiber optic sensors in layered manufacturing. in 11th solid freeform fabrication symposium, 2001, Texas
[236] Geving B., and Ebert-Uphoff, I., . Enhancement of Stereo-Lithography Technology to Support Building Around Inserts. in Proceedings of the 2000 ASME Mechanisms and Robotics Conference. 2000. September 10-13, Baltimore
[237] Kataria A., Rosen DW. Building around inserts : methods for fabricating complex devices in stereolithography in ASME Design Engineering Technical Conferences, 2000
[238] De Laurentis K., Mavroidis C., Kong F.F., Rapid Fabrication of non-assembly robotic systems with embedded components, 2001: p. 1-30
[239] Chen Y., Zhou C., Lao J., A layerless additive manufacturing process based on CNC accumulation. Rapid prototyping Journal, 2011. 17(3): p. 218-227
[240] Cham J.G., Pruitt B.L., Cutkosky M.R., Binnard M., Weiss L.E., Neplotnik G. Layered manufacturing with embedded components : process planning considerations in ASME Design Engineering Technocal Conference, 1999, Las Vegas
[241] Li H., Embedded sensors in layered manufacturing, 2001, Phd thesis
[242] Maier RRJ., MacPherson WN., Barton JS., CAr,e M., Swan M., Sharma N., Futter SK., Knox DA., Jones BJS., McCulloch S., . Fiber optic strain and configuration sensing in engineering components produced by additive layer rapid manufacturing in IEEE sensors. 2011, Limerick, UK
[243] Lopes A., Navarrete M., Medina F., Palmer J., MacDonald E., Wicker R., Expanding rapid prototyping for electronic systems integration of arbitrary form, in Solid Freeform symposium 2006: Texas
[244] Isanaka S.P., Liou F. The applications of additive manufacturing technologies in cyber-enabled manufacturing systems in Solid Freeform Fabrication Symposium, 2012
[245] Stiltner LJ., Elliott AM., Williams CB., , A method of creating actuated joints via fiber
[246] Panesar A., Brackett D., Ashcroft I., Wildman R., Hague R. Design optimization strategy for multifunctional 3d printing in Solid Freeforrm Fabrication Symposium, 2014
[247] Nardi AT., Mantese JV., Klecka MA., Viens DV., Component with internal sensor and method of additive manufacture, patent WO 2015112858 A1, 2014
[248] Wicker RB., Medina F., MacDonald E., Muse DW., Espalin D., Methods and Systems For Embedding Filaments in 3D Structures, Structural Components, and Structural Electronic, Electromagnetic and Electromechanical Components/Devices, patent US 20140268604 A1, 2013
[249] Wu SY., Yang C., Hsu W., Lin L., 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors. Microsystems & nanoengineering, 2015
[250] Cruz V., Gaudron N., Open-ended objects : un outil pour la créativité
[251] Serna A., Tabard A., Emin-Martinez V. Jen.cards : un outil pour faciliter la conception collaborative de learning games in EIAH conference. 2015. Agadir, Maroc
[252] Viguié MN., Bacquère S., Makestorming, le guide du corporate hacking, ed. Diateino. 2016, Paris

Document confidentiel

INDEX DES FIGURES

Couverture : Photo prise pendant un workshop, «regarder différamment et plus loin»
Figure 1 : Démarche de recherche-action conduite pour cette thèse
Figure 2 : Positionnement de cette thèse au regard des contextes industriel et académique
Figure 3 : De gauche à droite, réalisations pour les secteurs Aéronautique (Airbus Helicopter), Spatial (Thales Alenia Space), Médical (OBL Paris), Sport automobile, Aéronautique (Price Induction) et Véhicules terrestres (Goodfab)
Figure 4 : Concept Laser Xline 1000R, Arcam Q20, SLM Solutions 500 avec 4 lasers et machine hybride Lasertec 65
Figure 5 : Chiffres clés et étapes significatives de croissance de Poly-Shape
Figure 6 : Chaîne de valeurs de la fabrication additive chez Poly-Shape
Figure 7 : Sources d'informations chez Poly-Shape
Figure 8 : Cartographie d'entreprises concurrentes, ouverte à actualisation suivant le lien : https://umap.openstreetmap.fr/fr/map/additive-manufacturing-companies_117882#4/41.18/-389.27
Figure 9 : Processus d'une unité R&D proactive chez Poly-Shape
Figure 10 : Synthèse des 3 champs abordés dans notre état de l'art et de notre cheminement
Figure 11 : La fabrication additive, point d'entrée de notre état de l'art
Figure 12 : Principe de la fabrication additive : l'empilement de strates de matière
Figure 13 : Composant fabriqué par Poly-Shape en cours d'intégration dans un satellite de Thales Alenia Space
Figure 14 : Les deux usages principaux de la fabrication additive et le 3ème usage observé dans la pratique
Figure 15 : Proposition de classification de l'ensemble des procédés de fabrication additive
Figure 16 : Procédé de Fusion de poudre métallique par laser
Figure 17 : Textures de surfaces de composants fabriqués en Inconel par Fusion de poudre métallique par laser
Figure 18 : Chaîne de connaissances de la fabrication additive et outils de mise en œuvre
Figure 19 : Chaîne numérique supportant la fabrication additive, illustration : pipe d'admission, Dassault Aviation
Figure 20 : Composants orientés, positionnés et supportés dans la chambre de fabrication virtuelle
Figure 21 : L'optimisation topologique génère des géométries inhabituelles pour les concepteur. trices, d'après Doutre
Figure 22 : Typologie de composants existants catégorisés en fonction des 4 types de complexité
Figure 23 : La créativité, second point d'entrée de notre état de l'art
Figure 24 : Représentation systémique de la créativité : des interactions entre plusieurs dimensions
Figure 25 : Typologie des régimes d'innovation
Figure 26 : Modèle « macro » du processus de conception proposé par Cross
Figure 27 : Modèle co-évolutif du processus de conception, d'après Dorst
Figure 28 : Modèle du processus de conception proposé par Yannou
Figure 29 : La dynamique co-évolutive est culminante dans les toutes premières phases, selon Cross
Figure 30 : Modèle de Creative Problem Solving, représentation vulgarisée par Basadur
Figure 31 : Représentation simplifiée de la co-évolution proposée par Bouchard
Figure 32 : Modèle en « trèfle fractal » du processus créatif co-évolutif proposé par Alberti
Figure 33 : Raisonnement co-évolutif et manifestation de la créativité

Figure 34 : Distances des sources d'information vis-à-vis d'une cible de conception
Figure 35 : Deux mécanismes d'analogie dans le raisonnement créatif
Figure 36 : L'émergence de nouvelles formes ou nouvelles fonctions à partir de caractéristiques données, d'après Gero et Finke
Figure 37 : Les 4 types de raisonnements qui sous-tendent l'émergence, extrait de Rosenman et Gero p.127
Figure 38 : Cycle d'externalisation des représentations, d'après Oxman
Figure 39 : Gabarits guidant la représentation dans le contexte de l'innovation pour l'automobile, extraits de Bila-Deroussy, A : gabarit vierge, B : complété par un.e concepteur.trice
Figure 40 : Stormboard, outil d'aide à la représentation visuelle de concept, extrait de Makestorming.com
Figure 41 : Extraits de la typologie de représentations intermédiaires proposée par Pei
Figure 42 : Objets déclencheurs d'expériences, extraits de Cruz (image A) et Moussette (image B)
Figure 43 : Les objets d'expériences au cœur de la vision systémique de la créativité
Figure 44 : Ideo cards et Techcards, outils composés de cartes d'informations techniques
Figure 45 : Navigation entre Imaginaire et Réalité, d'après Aznar
Figure 46 : Convergence entre créativité et fabrication additive, puis positionnement de nos travaux
Figure 47 : Liens entre conception et fabrication additive et leurs effets d'expansion
Figure 48 : Design For Manufacture and Assembly, aux origines de la conception pour la fabrication additive, extrait de Boothroyd
Figure 49 : Composant reconçu suivant une méthodologie DFAM, extraits de Vayre
Figure 50 : Approches DFX et DWX vis-à-vis de la conception, extrait de Laverne
Figure 51 : Moments et formes d'apports des informations fabrication additive aux concepteur.trices
Figure 52 : Apport de connaissances FA dans les phases initiales, extrait de Laverne
Figure 53 : Méthodologies et objets intermédiaires créés dans les phases initiales des DFAM Globales
Figure 54 : Méthodologie proposée par Vayre et objets intermédiaires créés
Figure 55 : Extrait de la base de cas spécifiques à la fabrication additive, Maidin
Figure 56 : Fiche d'informations sur la fabrication additive, extrait de Laverne
Figure 57 : Expansion plus ou moins large dans le domaine de conception de la fabrication additive
Figure 58 : Positionnement de cette thèse dans le cadre théorique du DTAM
Figure 59 : Positionnement des projets R&D dans notre démarche de recherche-action
Figure 60 : Les types d'intégration de fonctions en fabrication additive, sources Poly-Shape & Dassault Aviation (A), Poly-Shape (B) et Li (C)
Figure 61 : Inclusions de corps étrangers dans des composants polymère
Figure 62 : Objets tangibles incarnant les informations.
De haut en bas, frise processus, démonstrateurs, poster et fiches d'informations
Figure 63 : Temps et modalités de diffusion des informations
Figure 64 : Les fiches « Contrôles » recto (à gauche) et verso (à droite)
Figure 65 : Exploration des connaissances en Phase 1 du projet R&D1
Figure 66 : Argumentation, Inspiration et associations entre démonstrateurs & fiches d'informations
Figure 67 : Expansion des domaines connaissances et concepts dans le projet R&D1
Figure 68 : Conception de modèles CAO pour l'inclusion de corps étrangers
Figure 69 : Etapes principales du principe d'inclusion de corps étrangers en fusion de poudre métallique par laser

Document confidentiel

Figure 70 : Expansion par l'expérience de la fabrication
Figure 71 : Expériences de manipulation des objets comportant des corps étrangers
Figure 72 : Expansion dans les espaces connaissances et concepts pour le projet R&D2
Figure 73 : Modèle préliminaire de la créativité par et pour la fabrication additive
Figure 74 : Articulation des projets et expérimentations
Figure 75 : Plan expérimental
Figure 76 : Dispositif utilisé pour la pré-expérimentation (Phase 1)
Figure 77 : 8 couples formes/fonctions typiques de la fabrication additive
Figure 78 : Démarche de conception des objets typiques
Figure 79 : Version tangible des 8 objets typiques de la fabrication additive (page suivante)
Figure 80 : Dispositif utilisé pour la Phase 2 de la pré-expérimentation
Figure 81 : Scénarii construits en Phase 2
Figure 82 : Types de corps étrangers et nombre de fonctions possibles
Figure 83 : Validation de la première phase du modèle proposé
Figure 84 : Le dispositif « Cartes-Objets »
Figure 85 : Exemple de carte « Expected » (à gauche) et lien avec l'objet typique correspondant
Figure 86 : Exemple de carte « Unexpected » (recto)
Figure 87 : Plateau de jeu favorisant les rencontres forcées aléatoires
Figure 88 : Etude comparative en séance de créativité de groupe
Figure 89 : Logique de manipulation pour les rencontres forcées aléatoires
Figure 90 : Gabarits guidant la construction de représentations pour les idées (A) puis les concepts (B)
Figure 91 : Protocole de l'expérimentation #1
Figure 92 : Le brief soumis aux participant.es de l'expérimentation #1
Figure 93 : Dispositif d'évaluation des Fiches Idées de l'expérimentation #1
Figure 94 : Comparaison de la quantité de fiches idées générées sans notre dispositif (à gauche) et avec (à droite)
Figure 95 : Nombre de fiches idées générées au fil de la séance
Figure 96 : L'une des fiches idées générées
Figure 97 : Degré de nouveauté des Fiches Idées
Figure 98 : La nouveauté au regard de la faisabilité
Figure 99 : Variété des fiches idées créées
Figure 100 : Evaluation de la brevetabilité des fiches
Figure 101 : Interactions entre participant.es et construction des représentations
Figure 102 : Validation des phases 2 et 3, avec réserves (en rouge)
Figure 103 : De l'objet typique B à l'AMIO n°1
Figure 104 : De l'objet typique G à l'AMIO n°2
Figure 105 : De l'objet typique C à l'AMIO n°3
Figure 106 : De l'objet typique H à l'AMIO n°4
Figure 107 : De l'objet typique E à l'AMIO n°5
Figure 108 : De l'objet typique A à l'AMIO n°6
Figure 109 : Scénario de manipulation #1
Figure 110 : Scénario de manipulation #2
Figure 111 : Scénario de manipulation #3
Figure 112 : Scénario de manipulation #4
Figure 113 : Scénario de manipulation #5
Figure 114 : Scénario de manipulation #6
Figure 115 : Disposition spatiale des expériences vis-à-vis des participant.es
Figure 116 : Etude comparative en séance de créativité de groupe
Figure 117 : Gabarits «Fiche Idée» et «Fiche concept» fournis aux PcoD
Figure 118 : Gabarit «Pitch Tail» fourni à chaque groupe

Figure 119 : Protocole de déroulement de l'expérimentation #2
Figure 120 : Le brief soumis aux PcoD de l'expérimentation #2
Figure 121 : Auto-évaluation par votes
Figure 122 : Dispositif d'évaluation de l'expérimentation #2
Figure 123 : Comparaison des quantités de fiches idées construites dans l'expérimentation #2
Figure 124 : Fiches Idées n°7 et 15 construites par la population témoin
Figure 125 : Une exploration inégale des connaissances
Figure 126 : Vers une exploration plus étendue des connaissances
Figure 127 : Facteurs influençant l'exploration des connaissances
Figure 128 : Manipulation selon scénario #4
Figure 129 : Manipulation selon scénario #5
Figure 130 : Manipulation selon scénario #6
Figure 131 : Manipulation selon scénario #1 et construction de représentations
Figure 132 : Navigation entre Imaginaire et Réalité pour la génération d'idées
Figure 133 : Comparaison de la brevetabilité au stade «idées» et au stade «concepts»
Figure 134 : Navigation essentiellement dans le domaine Réalité pour la génération de concepts
Figure 135 : Analyse croisée de la valeur de co-développement et de la brevetabilité des fiches concepts
Figure 136 : Concept Pitch Tail témoin : une vision orientée client-fournisseur
Figure 137 : Concept Pitch Tail test : vers un partenariat ?
Figure 138 : Influence des interactions sociales sur la manipulation du scénario #2
Figure 139 : Scénario prévu versus manipulation inattendue
Figure 140 : Résultats de l'expérimentation #2 au regard du modèle proposé
Figure 141 : Modélisation préliminaire
Figure 142 : Visualisation des résultats de la pré-expérimentation et expérimentation #1
Figure 143 : Visualisation des résultats de l'expérimentation #2
Figure 144 : Visualisation des résultats expérimentaux
Figure 145 : Modélisation enrichie par les résultats expérimentaux
Figure 146 : Modèle préliminaire de créativité par et pour la fabrication additive
Figure 147 : Proposition d'un modèle enrichi de créativité par et pour la fabrication additive
Figure 148 : Synthèse des statuts pris par l'objet intermédiaire
Figure 149 : Gabarit de représentation et de communication d'un concept final
Figure 150 : Infographie des procédés de fabrication additive

INDEX DES TABLES

Table 1 : Classification de modèles du processus de conception et de modèles du processus de créativité, extraits de Howard et al
Table 2 : Appellations des objets intermédiaires « finaux »
Table 3 : Critères d'évaluation retenus pour cette étude
Table 4 : Méthodes intuitives, méthodes systématiques et techniques & outils associés, d'après Aznar, Debois et al. et Bila-Deroussy p.89
Table 5 : Synthèse comparant l'originalité des OI générés par les DFAM classées aux niveaux 1, 2 et 3 (X = Non original, O = Original)
Table 6 : Population participante au projet R&D1
Table 7 : Population participante au projet R&D1

Table 8 : Corps étrangers à inclure en Fusion de poudre métallique par laser
Table 9 : Les 8 couples formes/fonctions typiques de la fabrication additive
Table 10 : Profils des participant.es à l'expérimentation #1
Table 11 : Profils des Experts pour l'évaluation
Table 12 : Nombre de fiches idées générées par duo au fil de la séance
Table 13 : Evaluation de l'adéquation au brief
Table 14 : Synthèse des résultats expérimentation #1
Table 15 : Partenaires de co-développement et niveaux d'expérience
Table 16 : Partenaires de co-développement et connaissances en fabrication additive
Table 17 : Population d'Experts évaluateurs
Table 18 : Fiches idées non reliées aux scénarii de manipulation
Table 19 : Synthèse des résultats expérimentation #2

ANNEXES

Annexe 1 : Fiches d'informations utilisées dans le projet R&D1
Annexe 2 : Cartes Unexpected et Expected utilisées dans l'expérimentation #1
Annexe 3 : Questionnaire de perception de la créativité
Annexe 4 : Questionnaire d'évaluation de l'expérimentation #2

ANNEXE 1 (pages suivantes) - Fiches d'informations utilisées dans le projet R&D1

POST-TRAITEMENTS

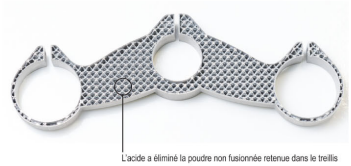
L'usinage chimique

POST-TRAITEMENTS

Définition

Méthode appliquée après fabrication. Elle est destinée à éliminer une quantité de matière prédéfinie sur des pièces métalliques de géométries complexes. Ceci afin de nettoyer les résidus de fabrication ou d'en polir la surface. Un agent chimique attaque la matière, sur une épaisseur déterminée par la durée du trempage en bain acide, la pièce est ensuite nettoyée à l'eau pour stopper la réaction.

Principe technique



L'acide a éliminé la poudre non fusionnée retenue dans le treillis

À retenir

-L'usinage chimique est particulièrement adapté pour les pièces complexes comportant des treillis ou maillages fin

POST-TRAITEMENTS

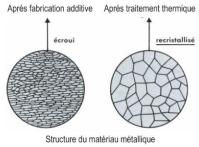
Les traitements thermiques

POST-TRAITEMENTS

Définition

On applique des cycles thermiques aux pièces métalliques fabriquées par fusion de poudre laser. Ces cycles visent à éliminer les contraintes et tensions accumulées dans la pièce pendant la fabrication en modifiant la structure du matériau. Des techniques issues de la métallurgie peuvent être appliquées telles que : le recuit ou la compression isostatique à chaud

Principe technique



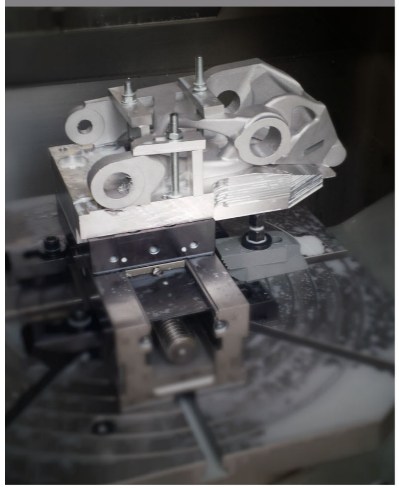
Structure du matériau métallique

À retenir

-Les traitements thermiques peuvent changer la composition de la matière et modifier la géométrie du produit (retrait, relaxation) après fabrication additive

POST-TRAITEMENTS

L'usinage numérique

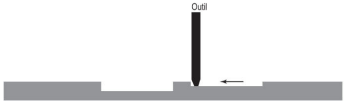


POST-TRAITEMENTS

Définition

Opération consistant à retirer de la matière d'un volume initial. Ici, le volume initial est la pièce fabriquée par procédé additif. L'usinage est réalisé sélectivement sur des surfaces correspondantes à des zones fonctionnelles ou d'assemblage. Cette méthode est complémentaire de la fabrication additive, elle pallie au manque de précision de la fabrication additive qui produit des pièces d'aspect granuleux.

Principe technique



Enlèvement de matière localisé, sur une épaisseur limitée (moins de 10mm)

À retenir

-Métaux et polymères peuvent être usinés
-L'usinage 5 axes est adapté aux géométries complexes

POST-TRAITEMENTS

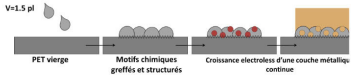
La métallisation

POST-TRAITEMENTS

Définition

Opération consistant à appliquer une couche fine de métal sur une pièce en polymère. Cuivre, or, aluminium ou inox peuvent être appliqués.
Un champ électrique conduit les particules fines de métal vers le polymère pour les agglomérer. La métallisation peut être localisée ou sur la totalité de la pièce

Principe technique



À retenir

-La métallisation peut donner à une pièce polymère une propriété de conduction électrique

Document confidentiel

CONTRÔLES

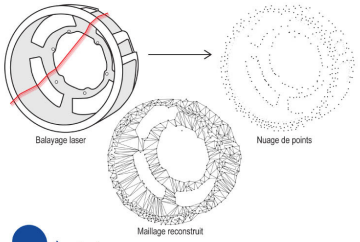
Le scanner tridimensionnel

CONTRÔLES

Définition

Une plage laser balaye la pièce pour recueillir des informations sur ses aspects extérieurs : forme, dimensions et éventuellement couleurs et textures. L'opération est réalisée après fabrication, sans détruire la pièce.

Principe technique

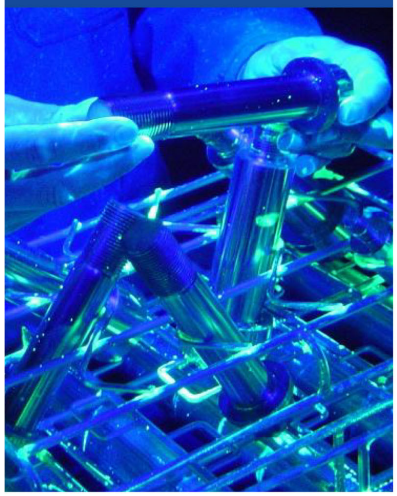


À retenir

-Le rayon laser ne traverse pas la matière
-Le scanner 3D permet d'obtenir un fichier numérique exploitable pour la fabrication additive

CONTRÔLES

Le ressuage

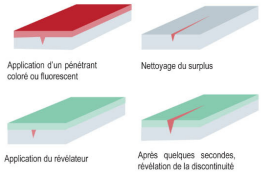


CONTRÔLES

Définition

Méthode permettant de faire apparaitre des discontinuités débouchantes sur la surface d'une pièce comme des criques, des fissures, des perçages ou des porosités. Adapté aux surfaces planes, courbes ou complexes en métal ou polymère.

Principe technique



À retenir

-Les discontinuités non débouchantes n'apparaissent pas au ressuage

CONTRÔLES

L'éprouvette suiveuse

CONTRÔLES

Définition

Méthode consistant à fabriquer des éprouvettes en même temps que la pièce réelle, sur le même plateau, dans le même matériau et avec la même paramétrie machine. Les éprouvettes sont destinées aux essais de traction, compression et fatigue. Elles sont testées après fabrication puis archivées par le client comme témoins d'une production.

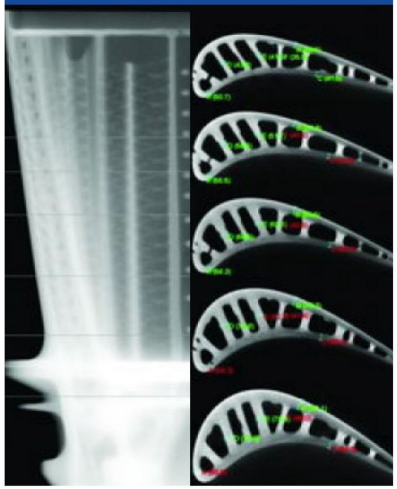
Principe technique

À retenir

-Les éprouvettes et leurs courbes d'analyses sont conservées pendant plusieurs années

CONTRÔLES

La tomographie à rayons X

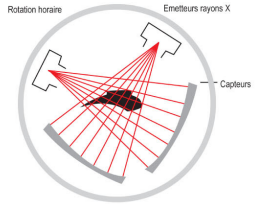


CONTRÔLES

Définition

Technique d'imagerie similaire à la radiographie médicale. Les rayons X traversent la matière, permettant d'en observer la composition, les variations d'épaisseur ou de densité, les vides, inclusions et éventuels défauts. Le volume de la pièce est reconstruit par accumulation des différents plans de coupes. Cette technique peut être appliquée aux métaux, céramiques et polymères.

Principe technique



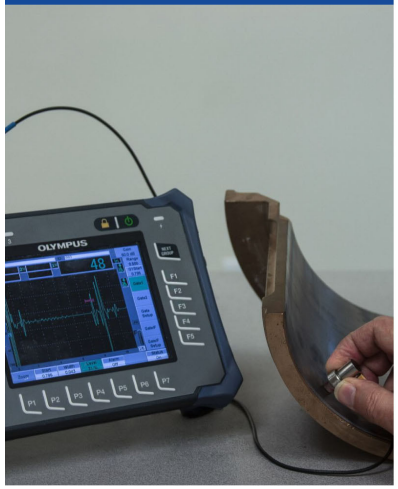
À retenir

-Ce contrôle peut détecter des particularités très fines, de moins d'1mm

Document confidentiel

CONTRÔLES

Le contrôle par ultrasons

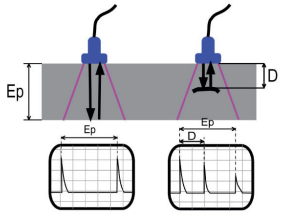


CONTRÔLES

Définition

Méthode permettant la détection de discontinuités à l'intérieur de la matière, dans son épaisseur. Un palpeur émetteur / récepteur est promené sur la surface de la pièce. On utilise un écran d'oscilloscope pour visualiser les variations des ondes émises et reçues. Méthode appliquée aux matériaux métalliques

Principe technique



À retenir

-La détection fonctionne sur des parois fines et jusqu'à 3cm d'épaisseur
-Ce contrôle est plus efficace sur surfaces planes ou peu complexes
-Le contrôle peut être réalisé localement sur une surface de 2cm2

CONTRÔLES

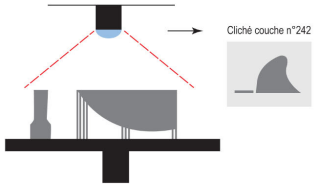
Le contrôle vidéo continu

CONTRÔLES

Définition

Méthode de contrôle en temps réel. Une caméra interne à la chambre filme le déroulement de la fabrication et prend un cliché après chaque couche fusionnée. Les images sont retransmises sur l'écran extérieur. Elles sont également enregistrées et conservées. Cette méthode permet d'observer le comportement de la machine en temps réel et donc d'interrompre la fabrication si besoin.

Principe technique

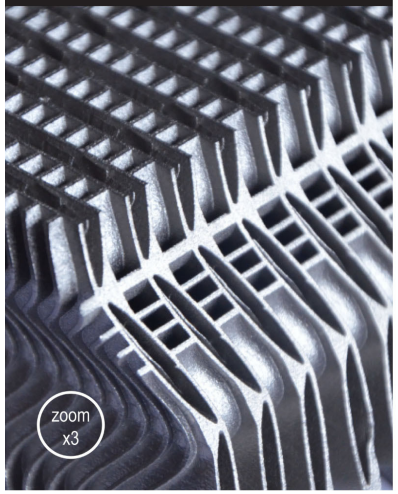


À retenir

-L'opérateur humain peut suivre la fabrication en temps réel
-Ce contrôle donne la possibilité d'arrêter la fabrication à un ou des moments choisis

MATÉRIAUX

Les alvéoles



MATÉRIAUX

Principe

Volume comprenant des alvéoles isolées ou continues. Les alvéoles continues forment des canaux internes. Permet la circulation de flux (air ou liquides). Les alvéoles peuvent être débouchantes sur la surface ou non. Leur échelle peut varier au sein d'une même pièce

Procédés de fabrication

Les alvéoles peuvent être fabriquées par les procédés de fusion de poudre, par frittage de poudre par laser, par dépôt de fil ou par polymérisation par flash UV

Matériaux

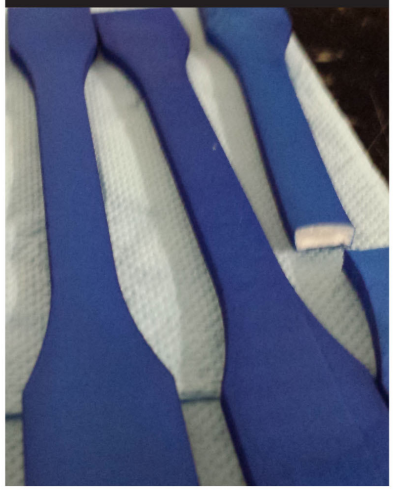
Métaux, polyamides ou résines polymères visqueuses

À retenir

-Le nombre, la géométrie, la taille et la disposition des alvéoles doivent être définis lors de la phase de conception CAO

MATÉRIAUX

La porosité



MATÉRIAUX

Principe

Propriété d'un matériau permettant l'absorption de liquide et sa diffusion par capillarité, depuis la surface en direction du coeur de la matière, sur une épaisseur déterminée par le temps d'absorption et le type de liquide. Le liquide absorbé comble les porosités de la pièce.

Procédés de fabrication

Un seul procédé de fabrication additive permet d'obtenir cette propriété, le frittage de poudre par laser

Matériaux

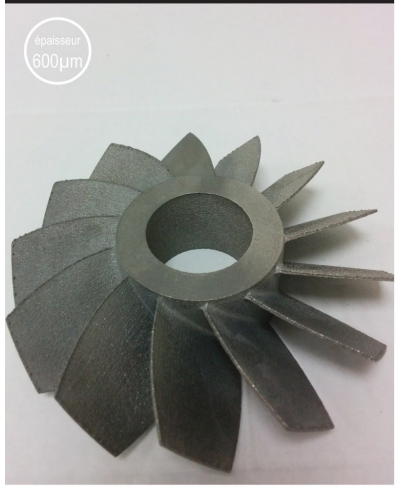
Le caractère poreux est également dû au matériau, le polyamide

À retenir

-Les liquides absorbés peuvent avoir différentes propriétés (colorés ou non, rigidifiant ...)
-L'absorption peut être réalisée sur l'ensemble de la pièce ou localement

Document confidentiel

MATÉRIAUX
Les parois fines



MATÉRIAUX

Principe

La fabrication additive permet de réaliser des parois fines (minimum 400µm) de formes complexes. La juste quantité de matière nécessaire est déterminée lors de la conception CAO. Une ossature de renfort fine et maillée peut être ajouté aux parois très minces.

Procédés de fabrication

Les parois fines sont obtenues par fusion de poudre métallique ou frittage de poudre polymère

Matériaux

Métaux et polyamides

À retenir

-Il est possible de **varier les épaisseurs** de matière au sein d'une même pièce
-Les métaux utilisés en fabrication additive sont **amagnétiques**. Les parois n'attirent pas les aimants

MATÉRIAUX
Les treillis internes

MATÉRIAUX

Principe

Maillage 3D **remplissant en totalité ou localement** un volume auparavant vide ou plein. Les structures sont organisées pour conserver des propriétés de résistance mécanique tout en allégant le solide. L'échelle des treillis peut varier d'une pièce à l'autre et également au sein d'une même pièce.

Procédé de fabrication

Les maillages 3D peuvent être obtenus par les procédés de fusion de poudre, par frittage de poudre ou par polymérisation par flash LED. Les plus fins sont obtenus par fusion de poudre laser

Matériaux

Métaux, polyamides résines polymères visqueuses

À retenir

-Le motif 3D du treillis interne doit être défini lors de la conception CAO
-La variété de ces motifs est infine

MATÉRIAUX
Les inclusions

MATÉRIAUX

Principe

Introduction d'un corps étranger dans un volume **en cours de fabrication**. Le corps étranger peut être visible ou non une fois l'opération finie. Ce corps étranger peut être de nature variée (solide, liquide, poudre ...)

Procédés de fabrication

L'interruption / reprise de fabrication est possible avec les procédés de fusion de poudre, frittage de poudre, dépôt de fil et polymérisation par flash UV

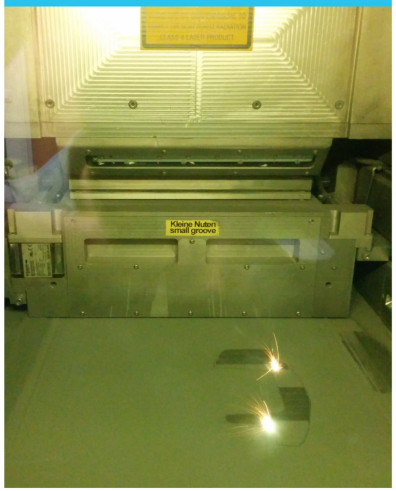
Matériaux

Tous les métaux et polymères utilisés dans les procédés pré-cités sont susceptibles d'accueillir une inclusion. Toutefois des incompatibilités peuvent exister selon les compositions. Des réactions dûes à la mise en oeuvre du procédé peuvent également apparaitre.

À retenir

-Les inclusions peuvent être faites **pendant la fabrication** par la machine elle-même ou par un opérateur humain en interrompant la fabrication

PROCÉDÉS
La fusion de poudre par laser

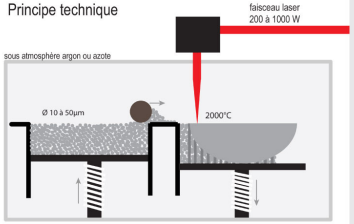


PROCÉDÉS

Définition

Fabrication par dépôt de couches successives de poudre métallique. Sur chaque couche, les grains sont fusionnés (+2000°C) par le passage d'un laser dont le parcours est déterminé par le fichier numérique 3D. Mise en oeuvre dans une enceinte protégée pour éviter l'oxydation des poudres. Épaisseur moyenne des couches : 100 µm .

Principe technique



À retenir

-Matériaux : alliages titane, aluminium, alliages base nickel, acier inox, alliages cobalt-chrome
-Fabrication à haute température
-Les machines peuvent comporter 1, 2 ou 4 lasers

Document confidentiel

PROCÉDÉS

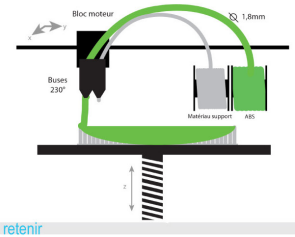
Le dépôt de fil fondu

PROCÉDÉS

Définition

Un filament de polymère est extrudé par une buse chauffante. Le polymère fondu solidifie instantanément une fois la couche déposée. Des supports sont nécessaires au maintien de la pièce pendant la fabrication. La température de l'enceinte de fabrication est peu élevée (moins de 50°) , parfois température ambiante dans le cas d'une enceinte ouverte.

Principe technique

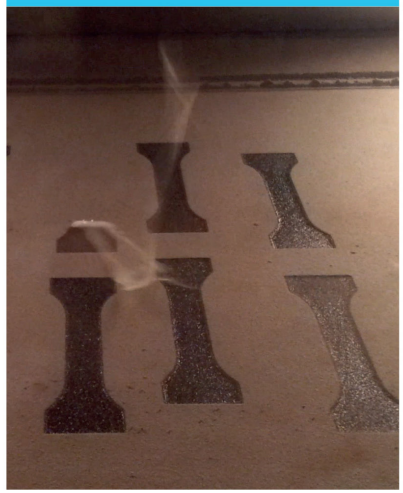


À retenir

-Procédé de fabrication techniquement le plus simple
-Matériaux : filaments de polymères thermoplastique, filaments métalliques
-Pas de protections de la part des constructeurs, ces machines peuvent être modifiées, détournées, adaptées

PROCÉDÉS

Le frittage de poudre par laser

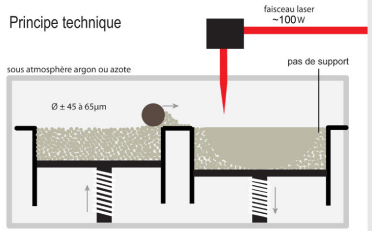


PROCÉDÉS

Définition

Fabrication par dépôt de couches successives de poudre polymère. Sur chaque couche, les grains sont fusionnés (450°C) par le passage d'un laser dont le parcours est déterminé par le fichier numérique 3D. Mise en oeuvre dans une enceinte protégée pour éviter l'oxydation des poudres.

Principe technique

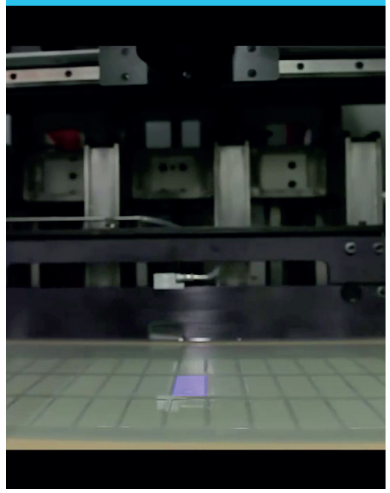


À retenir

-Matériaux : polyamides avec charges (billes de verre, particules céramiques...)
-Procédé très similaire à la fusion de poudre mais température de fabrication 2 à 3 fois moins élevée

PROCÉDÉS

La polymérisation par flash LED

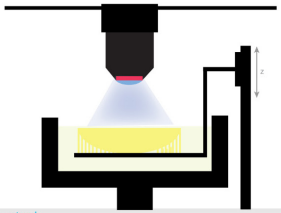


PROCÉDÉS

Définition

Une résine polymère visqueuse est sélectivement «flashée» par un rayonnement UV. La zone à durcir est déterminée par un masque projeté par la source UV sur la surface. Les masques sont définis lors du tranchage du fichier CAO. Epaisseur de couche 25 à 150 µm.

Principe technique

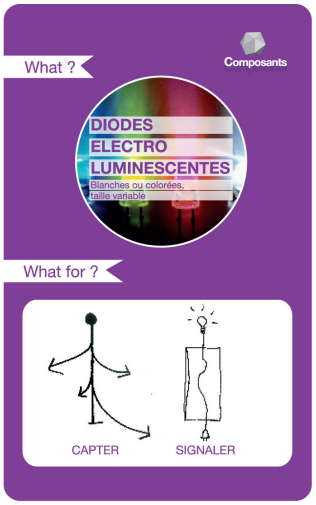


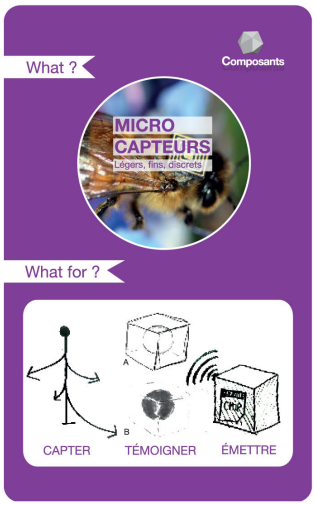
À retenir

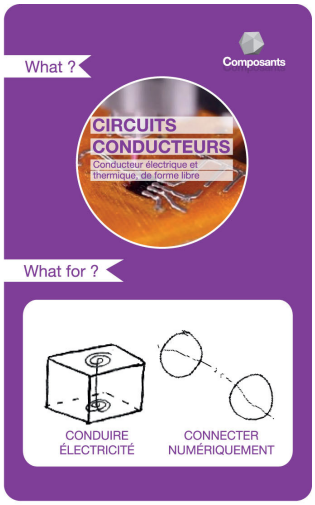
-Les résines peuvent être colorées, translucides ou opaques
-Ce procédé ne génère pas de chaleur

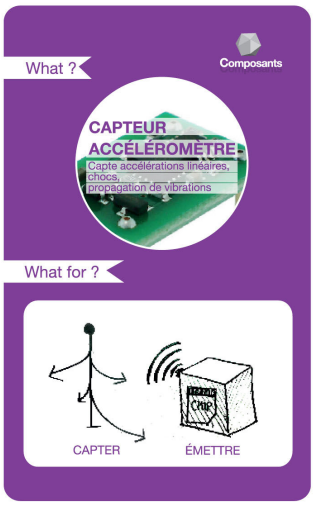
Document confidentiel

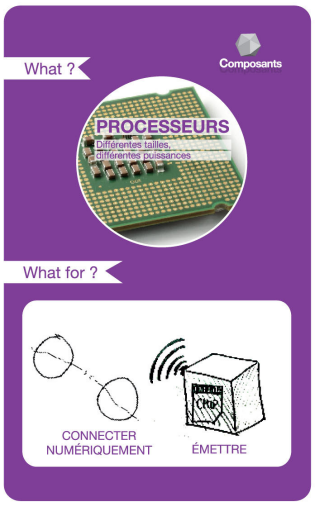
ANNEXE 2 (pages suivantes) - Cartes Unexpected et Expected composantes du dispositif Cartes-Objets utilisé notamment dans l'expérimentation #1

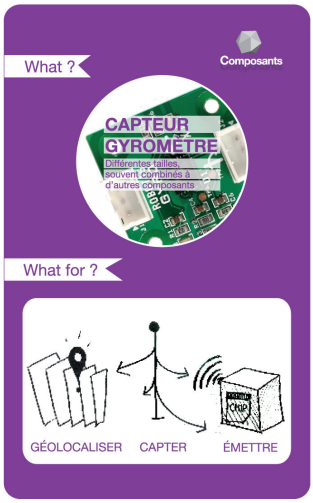


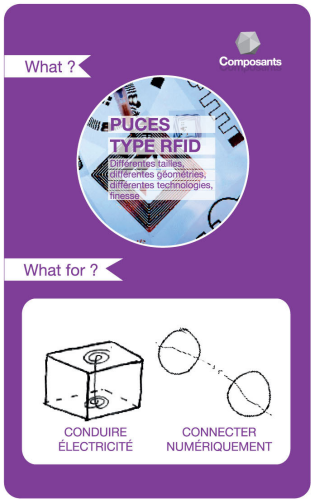


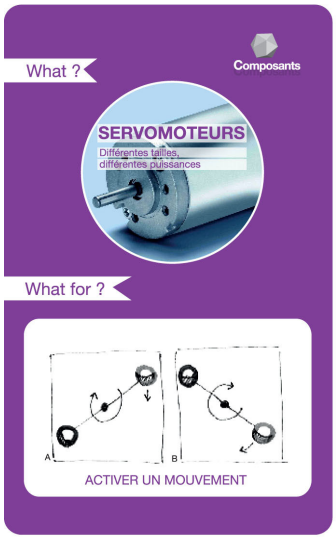


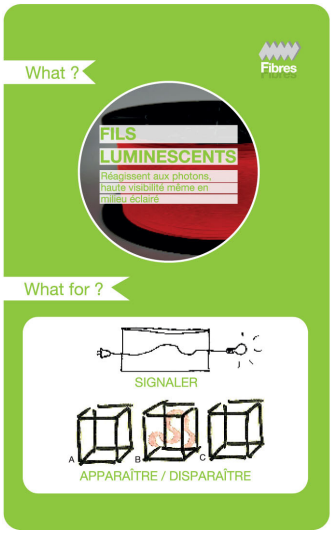


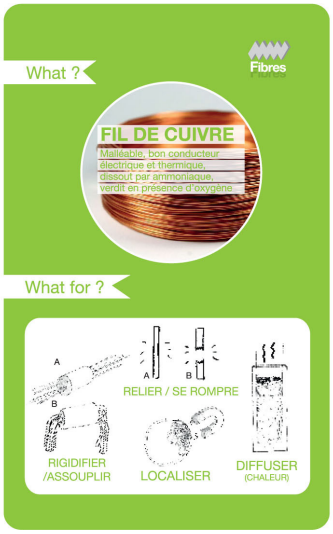










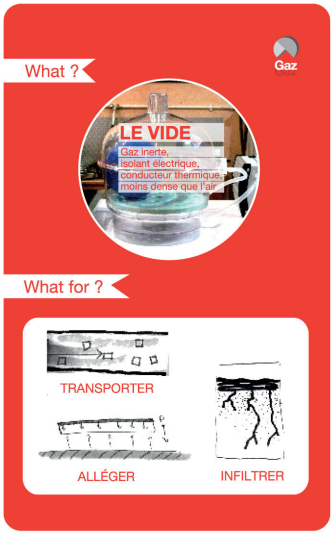


Document confidentiel

What ?
Fibres
CÂBLES ÉLECTRIQUES
Conducteur électrique, différents diamètres, malléables
What for ?
CONDUIRE ÉLECTRICITÉ
DIFFÉRENCIER

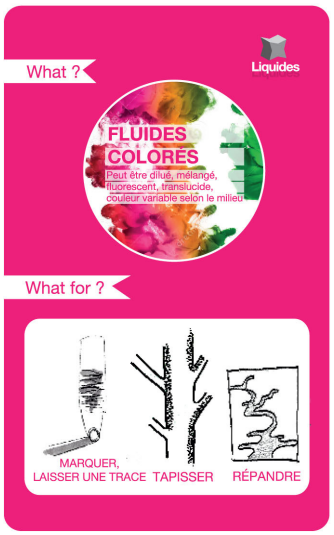
What ?
Gaz
AIR COMPRIMÉ
Pressions et volumes variables
What for ?
A
B
EXPANSER
EXERCER UNE PRESSION
RENFORCER

What ?
Gaz
HÉLIUM
Gaz inerte, isolant électrique, conducteur thermique, moins dense que l'air
What for ?
TRANSPORTER
ALLÉGER
INFILTRER


What ?
Gaz
LE VIDE
Gaz inerte, isolant électrique, conducteur thermique, moins dense que l'air
What for ?
TRANSPORTER
ALLÉGER
INFILTRER

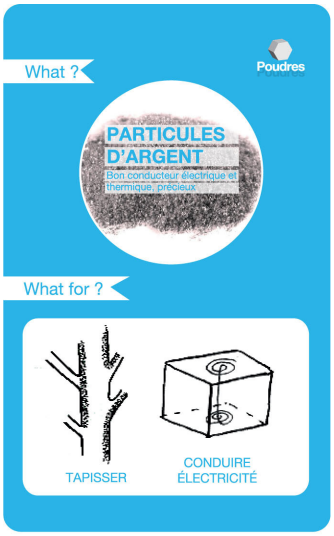
What ?
Gaz
ARGON
Gaz inerte, plus léger que l'air, isolant thermique
What for ?
TRANSPORTER
EXERCER UNE PRESSION
ALOURDIR
COMBLER /EVIDER
ISOLER (THERMIQUE)

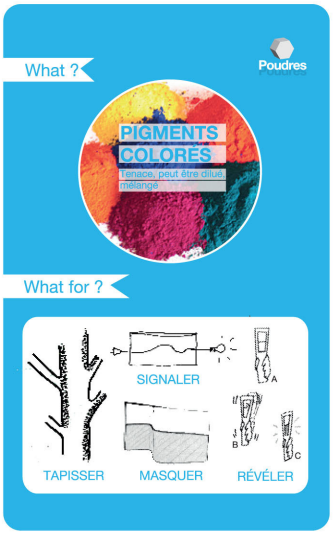
What ?
Liquides
LIQUIDES VISQUEUX
Viscosités variables en fonction de la pression ou du milieu
What for ?
TRANSPORTER
CHRONOMÉTRER
GRADUER

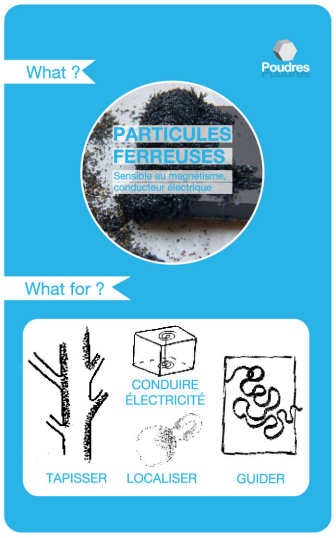

What ?
Liquides
FLUIDES COLORÉS
Peut être dilué, mélangé, fluorescent, translucide, couleur variable selon le milieu
What for ?
MARQUER, LAISSER UNE TRACE
TAPISSER
RÉPANDRE

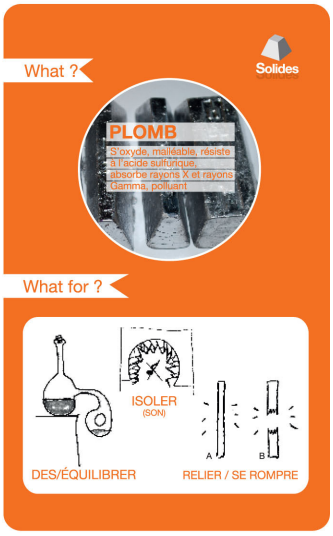
What ?
Liquides
ACIDES
Attaque les surfaces métalliques, forme liquide ou gazeuse
What for ?
A
B
C
D
DÉSAGREGER, DISSOUDRE
INFILTRER

What ?
Liquides
EAUX
Etats variables selon les températures (liquide, solide, gazeux), transitions progressives
What for ?
A
B
FIGER
CONDUIRE ÉLECTRICITÉ
INFILTRER



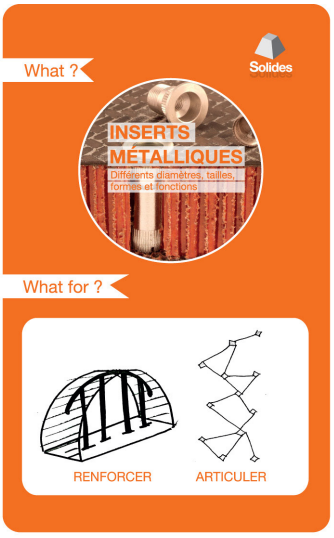




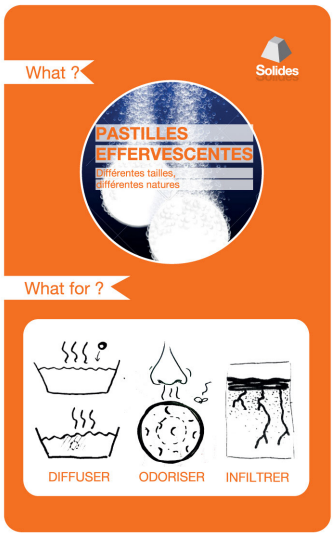


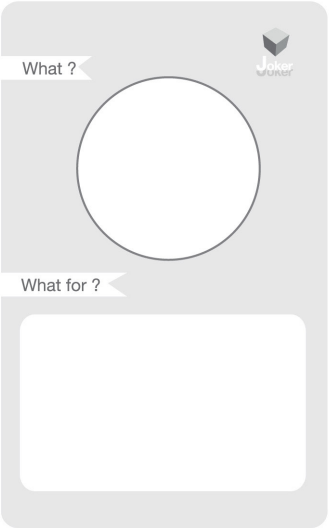
Document confidentiel

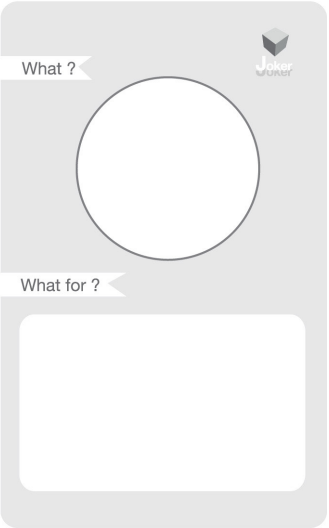
What ?
Solides
AIMANTS
Différentes formes, différentes dimensions, différentes puissances
What for ?
REPOUSSER/ ATTIRER
ARTICULER
GUIDER

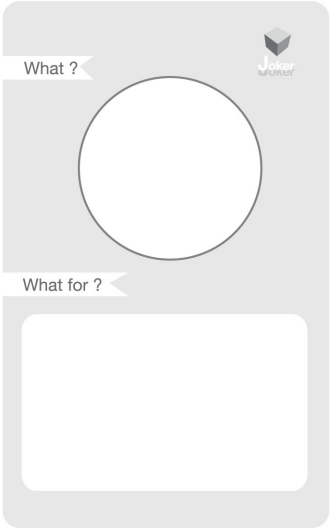

What ?
Solides
INSERTS MÉTALLIQUES
Différents diamètres, tailles, formes et fonctions
What for ?
RENFORCER
ARTICULER

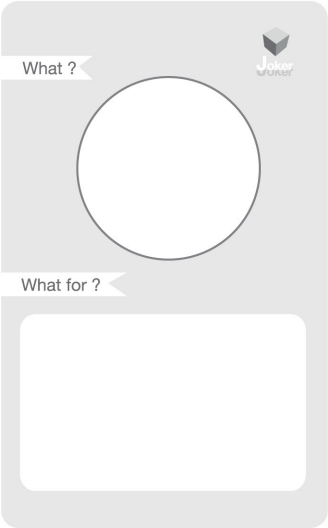
What ?
Solides
BILLES
Différents diamètres, différentes matières
What for ?
OBSTRUER
DES/ÉQUILIBRER
CHOQUER
SONORISER


What ?
Solides
PASTILLES EFFERVESCENTES
Différentes tailles, différentes natures
What for ?
DIFFUSER
ODORISER
INFILTRER

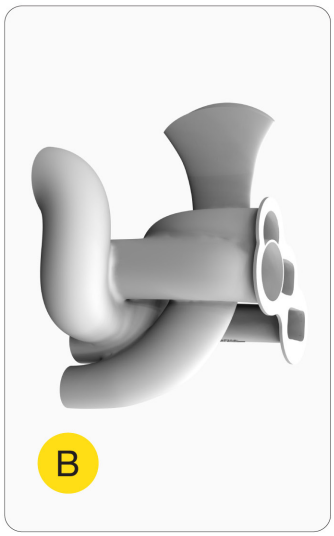

What ?
Joker
What for ?

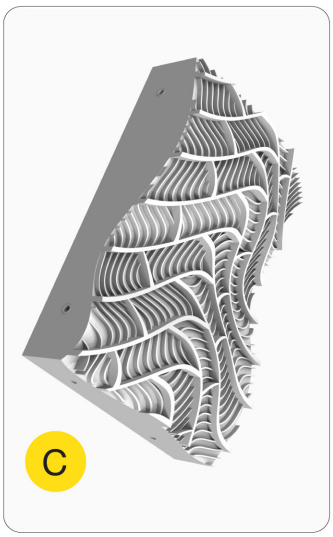

What ?
Joker
What for ?


What ?
Joker
What for ?


What ?
Joker
What for ?

A

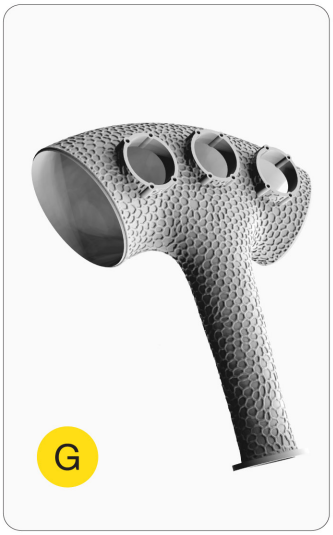

B

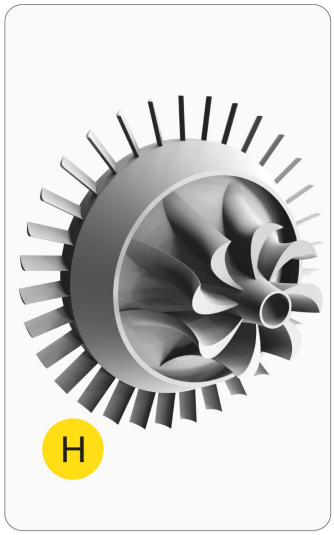

C

D

E

F


G


H

ANNEXE 3 - Questionnaire en ligne visant à recueillir la perception de la créativité des 12 individus participant à l'expérimentation #1, accessible en suivant le lien https://rias1.typeform.com/to/WoZS6L.

Your typeform **La créativité et vous** has a new response:

- **Votre prénom :**
  [illegible]
- **Selon vous, sommes-nous tous des individus créatifs ?**
  No
- **Si oui, expliquez pourquoi nous sommes tous créatifs**
  [Not answered]
- **Si non, expliquez pourquoi nous ne sommes pas tous créatifs**
  L'imagination est une faculté mentale qui se travaille, s'exploite et se développe. La créativité dépend du sens critique et de la capacité de chacun à faire un assemblage d'idées

Selon vous, êtes-vous une personne créative ?

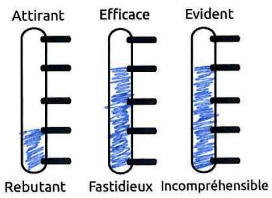
- **Si oui, expliquez pourquoi vous êtes une personne créative.**
  [Not answered]
- **Si non, expliquez pourquoi vous n'êtes pas une personne créative**
  je suis pragmatique, je préfère accomplir et avancer que chercher et imaginer, trop inhibée par le jugement pour oser proposer, je manque d'entrainement
- **Quelle est *votre* définition de la créativité ?**
  capacité à imaginer des solutions alternatives et innovantes en relation avec l'art
- **Selon vous, la créativité est-elle nécessaire dans vos activités professionnelles ? Précisez dans quelles activités et pourquoi la créativité est nécessaire.**
  oui mais à moindre mesure, chef de projet junior, le but étant de trouver des solutions pragmatiques pour faire avancer le projet, être créatif pour obtenir des réponses et mettre en place des solutions
- **Aviez-vous déjà participé à au moins 1 workshop créatif ? (hors thèse Anne-lise Rias)**
  No
- **Avez-vous participé à plusieurs workshops créatifs ? Précisez combien.**
  0
- **Si vous aviez déjà participé à plusieurs workshops créatifs, décrivez les contextes, les thématiques, le nombre de participant-es, les durées...**
  non

ANNEXE 4 - Questionnaire (extrait) proposé à l'issue de l'expérimentation #2

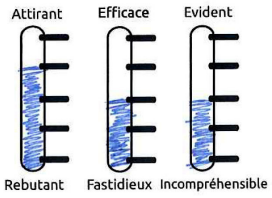
[ÉVALUATION 2/3]

La manipulation des AMIO

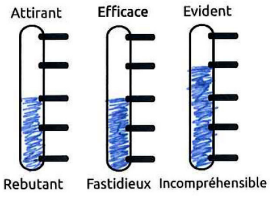
SCÉNARIO 1 : le sulfate



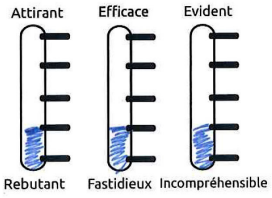
SCÉNARIO 2 : la pastille



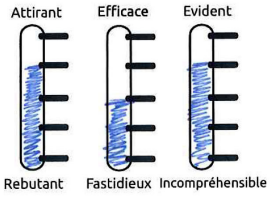
SCÉNARIO 3 : colorant + bille



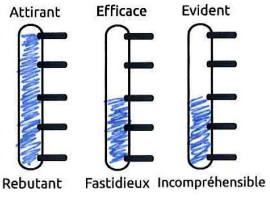
SCÉNARIO 4 : les fibres optiques



SCÉNARIO 5 : les colorants



SCÉNARIO 6 : bille + aimant



L'influence des AMIO

Chaque manipulation des 6 scénarios AMIO a été pour vous : Evocatrice de fonctions faisables, Inspirante pour la génération de vos concepts, Transférable à vos secteurs d'acitivtés

De gauche à droite : Pas du tout, Pas vraiment, Plutôt oui, Oui, Tout à fait

SCÉNARIO 1 : le sulfate

Evocatrice ☆ ☆ ★ ☆ ☆
Inspirante ★ ☆ ☆ ☆ ☆
Transférable ☆ ★ ☆ ☆ ☆

SCÉNARIO 2 : la pastille

Evocatrice ☆ ☆ ☆ ★ ☆
Inspirante ☆ ☆ ☆ ★ ☆
Transférable ☆ ☆ ☆ ★ ☆

SCÉNARIO 3 : colorant + bille

Evocatrice ☆ ☆ ★ ☆ ☆
Inspirante ☆ ★ ☆ ☆ ☆
Transférable ☆ ☆ ★ ☆ ☆

SCÉNARIO 4 : les fibres optiques

Evocatrice ★ ☆ ☆ ☆ ☆
Inspirante ★ ☆ ☆ ☆ ☆
Transférable ★ ☆ ☆ ☆ ☆

SCÉNARIO 5 : les colorants

Evocatrice ☆ ☆ ★ ☆ ☆
Inspirante ☆ ☆ ★ ☆ ☆
Transférable ☆ ★ ☆ ☆ ☆

SCÉNARIO 6 : bille + aimant

Evocatrice ☆ ☆ ☆ ★ ☆
Inspirante ☆ ☆ ☆ ★ ☆
Transférable ☆ ☆ ☆ ★ ☆

Conception Produits Innovation — POLY-SHAPE

Document confidentiel

Créativité *par* et *pour* la fabrication additive : Proposition d'une méthodologie outillée

RESUME : Accompagner l'intégration de la fabrication additive dans les grands groupes donneurs d'ordres devient crucial pour les sous-traitants. L'enseignement actuel des procédés et des règles de conception, limité à une vision techno-centrée, ne suffit pas pour projeter ses futures applications dans diverses industries telles que l'aéronautique, l'énergie, le médical, etc… D'un côté, les travaux sur la fabrication additive et les observations de terrain indiquent que les connaissances sur ses procédés, les matériaux et leur mise en œuvre sont régulièrement enrichies. D'un autre côté, les travaux de recherche en créativité montrent qu'il est possible de stimuler la capacité créative des individus pour les guider dans la génération d'idées et de concepts créatifs. Cette thèse explore alors un rapprochement possible entre créativité et fabrication additive, dans la perspective de proposer une méthode de créativité et des outils d'applications spécifiques au paradigme additif. Cette liaison vise à mettre en évidence des moyens de stimuler la créativité pour adresser les enjeux et opportunités soulevés par la fabrication additive. Cette approche a permis de faire émerger le rôle prépondérant des objets intermédiaires qui articulent les interactions entre plusieurs dimensions de la capacité créative : les motivations, les émotions, l'exploration des connaissances, l'alternance individu/collectif et l'organisation spatiale. Elle a aussi fait émerger le besoin de redéfinir les rôles de ces objets intermédiaires au regard de la fabrication additive. En ce sens, deux dispositifs opérationnels de stimulation, basés sur la manipulation d'objets tangibles, ont été conçus puis testés dans des contextes industriels. Les résultats expérimentaux montrent que l'exploration des connaissances matérialisées par ces dispositifs favorise la génération d'idées créatives qui peuvent ouvrir à de futures applications de la fabrication additive. Finalement, une méthode de Créativité par et pour la fabrication additive est proposée. Elle permet d'enrichir à la fois les pratiques méthodologiques des sciences de la conception et les pratiques opérationnelles sur deux terrains : celui de l'industrie de la fabrication additive et celui de l'innovation.

Mots clés : *Fabrication additive, Créativité, Objets intermédiaires, AMIO, Exploration des connaissances, Stimulation de la créativité, Conception créative, DFAM*

Creativity *through* additive manufacturing: a methodology and its tools for application

ABSTRACT: Emphasizing the integration of Additive Manufacturing (AM) into big industrial companies becomes crucial for subcontractors. Teaching additive processes and design rules is a techno-centric vision. It is not sufficient to project future applications of additive manufacturing in various industries such as aeronautics, energy, medical, etc. On one hand, the state of the art and field observations show that AM knowledge is steadily increasing. On the other hand, the state of the art about creativity shows that individuals' creative capacity can be stimulated to guide to the generation of creative ideas and concepts. This thesis then explores a possible linking between AM and creativity in order to propose a methodology and its application tools to stimulate creativity, in the specific context of additive manufacturing. This approach allowed us to bring out the major role of intermediate objects which articulate the interactions between several dimensions of the creative capacity: motivations, emotions, knowledge exploration, individual/collective work phases and spatial organization. It also highlighted the need for a new definition of intermediate objects' roles regarding AM. In this sense, we designed two operational devices, based on sensori-manipulations of tangible objects, and tested them in real industrial contexts. Our experimental results show that the exploration of the knowledge embodied in these devices emphasizes the generation of creative ideas. Finally, a model of Creativity Through Additive Manufacturing (CTAM) has been proposed. It enables us to contribute both to the methodological practices of design science and operational practices in two fields: the additive manufacturing industry and the field of innovation.

Keywords : *Additive manufacturing, Creativity, Intermediate objects, AMIO, Knowledge exploration, Creativity stimulation, Creative design*

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY