



HAL
open science

Méthodologie d'intégration de la fabrication additive comme source de créativité pour l'industrie manufacturière

Armand Lang

► **To cite this version:**

Armand Lang. Méthodologie d'intégration de la fabrication additive comme source de créativité pour l'industrie manufacturière. Génie des procédés. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE073 . tel-03675216

HAL Id: tel-03675216

<https://pastel.hal.science/tel-03675216>

Submitted on 23 May 2022

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.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation – Campus de Paris]

THÈSE

présentée par : **Armand LANG**

soutenue le : **14 décembre 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Science de la Conception**

Méthodologie d'intégration de la Fabrication Additive comme source de créativité pour l'industrie manufacturière

THÈSE dirigée par :
M. Frédéric SEGONDS

et co-encadrée par :
M. Camille JEAN & M. Fabrice MANTELET

Jury

M. Pascal MOGNOL, Professeur des Universités, GeM, ENS Rennes

M. Frédéric DEMOLY, Professeur des Universités, ICB-COMM, UTBM

M. Bertrand ROSE, Professeur des Universités, ICube, Université de Strasbourg

Mme Souad LATORRE, Chercheuse associée, LVMT, UMR Ecole des Ponts – Université Gustave Eiffel

M. Patrice PEYRE, Directeur de Recherche CNRS, PIMM, Arts et Métiers

M. Frédéric SEGONDS, Maître de Conférences HDR, LCPI, Arts et Métiers

M. Camille JEAN, Maître de Conférences, LCPI, Arts et Métiers

M. Fabrice MANTELET, Maître de Conférences, LCPI, Arts et Métiers

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

T
H
È
S
E

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord aux membres de mon jury de thèse de doctorat. Merci à Messieurs Frédéric DEMOLY et Bertrand ROSE d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ces travaux. Merci à Monsieur Pascal MOGNOL de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Je remercie Madame Souad LATORRE et Monsieur Patrice PEYRE d'avoir accepté d'être examinateurs de cette thèse.

Je tiens également à remercier mon équipe encadrante. Je remercie, mon directeur de thèse, Frédéric SEGONDS, et mes co-encadrants Messieurs Camille JEAN et Fabrice MANTELET. Merci à vous pour les discussions constructives et ces trois années de thèse.

Je voudrais également remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à l'avancée de mes travaux de thèse. Merci, aux membres de l'ANR CREAM pour vos discussions durant ces trois années. Merci aux partenaires industriels qui m'ont permis de faire des expérimentations dans d'excellentes conditions. Merci à l'ensemble des personnes en entreprise qui ont accepté d'échanger avec moi sur les sujets en lien avec mes travaux. Merci aux étudiants qui ont réalisé leurs projets de recherche sur des sujets issus de mes travaux.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des membres du LCPI, le corps professoral, les ingénieurs de recherche, le secrétariat, et bien sûr mes chers camarades doctorants et tout particulièrement mon cher homonyme Armand H.

Pour terminer, je souhaite remercier ma famille, mes parents, ma sœur et tout particulièrement Daria pour m'avoir soutenu durant ces trois années.

Sommaire

Remerciements	3
Introduction	9
Objectif des travaux	9
ANR CREAM : Creativity in Additive Manufacturing	10
Originalité de la thèse	11
Structure du document	12
1. Contexte et positionnement	15
1.1 Contexte général	15
1.1.1 La fabrication additive : une technologie en pleine croissance	15
1.1.2 La fabrication additive : un potentiel d'innovation en conception de produits.....	18
1.2 Question scientifique	22
1.3 Positionnement de la recherche	22
1.3.1 Communauté internationale et française	23
1.3.2 Le Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation (LCPI)	25
2. Etat de l'art	27
2.1 Créativité en conception	29
2.1.1 Processus de conception	29
2.1.2 Créativité en conception amont.....	38
2.1.3 Méthodes et outils de stimulation de la créativité	42
2.1.4 Synthèse de l'état de l'art sur la créativité en conception	48
2.2 Approches de conception dédiées fabrication additive	49
2.2.1 Design For Additive Manufacturing (DFAM)	49
2.2.2 Design With Additive Manufacturing (DWAM)	55
2.2.3 Creativity Through Additive Manufacturing (CTAM).....	56
2.2.4 Méthodologies de conception en FA basées sur des représentations tangibles	60
2.2.5 Synthèse des approches de conception dédiées fabrication additive	61
2.3 Intégration de la fabrication additive en entreprise	64
2.3.1 Introduction sur les processus d'intégration d'une nouvelle technologie	64
2.3.2 Facteurs de réussite d'une intégration technologique	66

2.3.3	Processus d'intégration de la fabrication additive	68
2.3.4	Synthèse sur l'intégration de la fabrication additive en entreprise	73
2.4	Etat de l'art industriel.....	75
2.4.1	Elaboration d'entretiens avec des industriels	75
2.4.2	Analyse des entretiens	80
2.4.3	Synthèse sur l'état de l'art industriel	87
2.5	Synthèse de l'état de l'art.....	89
3	Problématique et hypothèse.....	93
3.1	Problématique	93
3.2	Proposition méthodologique et hypothèse	94
3.2.1	Définition des termes	94
3.2.2	Méthode ADAM ² : Augmented Design with AM Methodology.....	95
3.2.3	Hypothèse.....	97
4	Expérimentations	99
4.1	Outil d'adoption du potentiel de la Fabrication Additive.....	100
4.1.1	Opportunités de la Fabrication Additive	100
4.1.2	Structuration des opportunités avec TRIZ.....	102
4.1.3	Objets opportunités	106
4.1.4	Evaluation et validation du design des objets.....	112
4.1.5	Synthèse de l'outil d'adoption du potentiel de la FA	116
4.2	Adoption de la Fabrication Additive en séance de créativité	119
4.2.1	Pré-expérimentation A.....	119
4.2.2	Pré-expérimentation B : Truck de skateboard	126
4.2.3	Expérimentation 1 : Luxe & FA.....	134
4.2.4	Synthèse adoption de la Fabrication Additive en séance de créativité.....	144
4.3	Planification de l'intégration de la Fabrication Additive.....	146
4.3.1	Pré-expérimentation C : Caisse en blanc de voiture	146
4.3.2	Expérimentation 2 : Segmenter pour mieux intégrer la FA.....	154
4.3.3	Synthèse de la planification de l'intégration de la Fabrication Additive	169
5	Apports	173
5.1	Méthode ADAM² : Augmented Design with Additive Manufacturing Methodology	173
6.	Conclusion et perspectives.....	179

6.1	Conclusion	179
6.2	Perspectives.....	180
	<i>Production scientifique</i>	<i>185</i>
	Revue scientifique internationale	185
	Conférence internationale	185
	Conférence nationale	185
	Autres.....	185
	<i>Bibliographie</i>	<i>187</i>
	<i>Tables des figures</i>	<i>203</i>
	<i>Table des tableaux.....</i>	<i>207</i>
	<i>Annexes.....</i>	<i>209</i>
	Annexe 1 : Questions d'entame et objectifs des phases des entretiens	209
	Annexe 2 : Résultats des entretiens	211
	Annexe 3 : Opportunités de la Fabrication Additive	218

Introduction

Ce travail constitue la synthèse des travaux de thèse réalisées à l'Ecole des Arts et Métiers Sciences et Technologies, au sein du Laboratoire de Conception Produits et Innovation (LCPI) sous la direction de Frédéric Segonds et co-encadrée par Camille Jean et Fabrice Mantelet dans le cadre du projet ANR CREAM (CREativity in Additive Manufacturing).

Objectif des travaux

Ce travail a pour objectif de développer une méthodologie d'aide à l'intégration de la technologie de Fabrication Additive (FA) pour les équipes de conception en entreprise. La fabrication additive est une technologie qui, aujourd'hui, est mature pour la fabrication directe de certaines pièces fonctionnelles. De plus, avec l'industrie 4.0, la FA est devenue la technologie de fabrication associée aux nouvelles technologies. Ces éléments entraînent un intérêt fort des entreprises pour la FA. Mais les connaissances associées à cette technologie diffèrent de celles de procédés de fabrications traditionnelles, ce qui oblige les concepteurs à prendre des orientations de conception différentes. Un certain nombre de difficultés font que ces décisions ne sont pas encore prises par les concepteurs, ce qui freine l'intégration de la FA.

Ainsi, l'objectif de nos travaux de thèse est d'aider les entreprises à dépasser et atténuer ces difficultés lors de l'intégration de la FA dans les processus de conception de produits.

Cet objectif nécessite une approche méthodologique afin d'assurer la bonne intégration de la technologie au regard du contexte industriel. En effet, l'intégration de la FA impose de transmettre aux concepteurs le potentiel de la FA, de stimuler la créativité des concepteurs afin de dépasser les biais cognitifs imposés par la fabrication traditionnelle et d'avoir une vision globale du contexte de l'entreprise qui explique la nécessité d'intégrer cette technologie au processus de conception.

Cette thèse a donc pour finalité de répondre à la problématique suivante : dans une entreprise de l'industrie manufacturière, comment intégrer la fabrication additive en phase amont de conception comme source de créativité dans une stratégie d'innovation ?

Les apports de ce travail de thèse sont la formalisation, sous forme de méthodologie, de l'intégration de la FA en 3 phases : une phase d'adoption de la FA, une phase de planification

de la FA et une phase de créativité et d'innovation avec la FA. Cette méthodologie est structurée autour d'un processus d'intégration de la FA et d'un processus de conception associé. Les apports sont démontrés à travers un ensemble d'expérimentations, majoritairement industrielles.

L'ensemble de ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ANR CREativity in Additive Manufacturing (CREAM).

ANR CREAM : Creativity in Additive Manufacturing

Dans ce contexte d'émergence de la technologie de Fabrication Additive dans l'industrie, et de son fort potentiel d'innovation en conception de produit, l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) a financé un projet nommé Créativité en Fabrication additive (CREAM – Creativity in Additive Manufacturing). Notre thèse de doctorat s'inscrit dans ce projet. Plus d'information sur : <https://anr.fr/Projet-ANR-18-CE10-0010>.

Ce projet a pour objectif de proposer un ensemble d'outils et de méthodes de créativité en fabrication additive fondée sur des objets intermédiaires dans le but de favoriser la sensibilisation, la créativité et l'intégration organisationnelle de cette technologie au sein des équipes de conception. Les outils seront donc basés sur l'expérience utilisateur et la manipulation d'objets complexes et exclusifs à la FA. Ce projet s'articule autour de deux verrous. Un verrou scientifique qui réside dans la conception de méthodes paramétrables et efficaces à destination des industriels. Un verrou technologique qui vise à outiller ces méthodes par l'intermédiaire de dispositifs adaptés et utilisables.

Ce projet s'appuie sur trois partenaires académiques que sont le laboratoire CPI des Arts et Métiers, le LINEACT de l'école du CESI et le LATI de l'Université Paris Descartes. Le laboratoire LINEACT et LATI possèdent une expertise forte sur les approches cognitives et l'intégration organisationnelle, qui sera un plus aux expertises de créativité et de conception en FA du laboratoire CPI. Ainsi, le projet s'inscrit dans plusieurs champs disciplinaires : les sciences de l'ingénieur, les sciences cognitives et les sciences sociales.

Par ailleurs, les avancées et les étapes de ce projet sont présentées et diffusées auprès d'un réseau d'industriels. Ce réseau présente des industries de domaines très différents (oil and gas, aérospatiale, médical, luxe, sidérurgie, industrie du verre et fabricants de machines FA).

Ce projet ANR, avec les expertises des différents laboratoires et avec les présentations et diffusions des avancées du projet à des industriels, nous a permis de développer des recherches nouvelles sur le sujet en apportant des originalités par rapport à l'existant.

Originalité de la thèse

Ces travaux de thèse proposent une méthodologie d'intégration de la fabrication additive en conception de produit. Cette méthodologie comprend 3 éléments majeurs :

- Un ensemble de 14 objets tangibles, les objets opportunités : c'est objets opportunités ont été conçus afin de favoriser l'exploitation du potentiel de la FA et de stimuler la créativité des concepteurs en conception de produits.
- Un processus d'intégration : ce processus se décompose en 3 phases, une phase d'adoption de la FA, une phase de planification de l'intégration de la FA et une phase de créativité et d'innovation avec la FA. Ce processus permet d'orienter la stratégie d'intégration de la FA en conception de produits selon le potentiel technique de la technologie et selon le contexte de l'entreprise.
- Un processus de conception : ce processus permet de guider les concepteurs durant les phases amont de conception avec la FA, en s'appuyant sur les objets opportunités et sur l'orientation stratégique de l'intégration.

Ces éléments de la méthodologie permettent de lier une approche pédagogique et une approche créative de conception dédiées FA ; ainsi que de lier une approche de conception axée sur le processus de conception de produits avec une approche d'intégration de la FA axé sur le contexte de l'entreprise.

Ce double lien est l'originalité de la thèse car aujourd'hui la littérature ne propose pas de méthodologie assurant ces liens. La littérature propose 1- des processus de conception FA axés sur la pédagogie (intégrer les caractéristiques de la technologie) qui vont contraindre les concepteurs vers des capacités de la FA ; 2- des processus de conception FA axés sur la créativité qui n'ont pas pour objectif de transmettre le potentiel de la FA aux concepteurs ; 3- des processus d'intégration de la FA qui vont orienter la stratégie d'intégration de l'entreprise mais sans s'intéresser au processus de conception.

Ainsi, la littérature propose aujourd'hui 3 démarches distinctes : une démarche pédagogique de conception, une démarche créative de conception et une démarche d'orientation de la stratégie d'intégration de l'entreprise.

L'originalité de notre méthodologie consiste à regrouper l'ensemble des 3 démarches de la littérature en une unique démarche de recherche.

Structure du document

Ce manuscrit de thèse s'articule autour de 6 chapitres s'ajoutant à la présente introduction. La figure 1 présente la structure du document.

Chapitre 1 : Contexte et positionnement

Dans ce chapitre nous présentons le contexte qui explique pourquoi l'intégration de la fabrication additive est un enjeu majeur pour les entreprises. Ce contexte nous permet d'énoncer la question scientifique qui nous a permis d'initier notre étude de la littérature. Nous nous positionnons aussi dans cette partie de nos travaux au regard des acteurs du monde de la recherche travaillant sur des thématiques similaires, et au sein du laboratoire LCPI.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Pour le chapitre sur l'état de l'art, en nous référant à la question scientifique, nous présentons les travaux actuels sur la créativité en conception, sur les approches de conception basées FA et sur les processus d'intégration de la FA en entreprise. Dans cette partie, nous présentons également un état de l'art industriel afin d'avoir une vision des réalités industrielles.

Chapitre 3 : Problématique et hypothèses

Dans ce chapitre, nous introduisons notre problématique issu des constats et des manques de l'état de l'art. Nous définissons aussi une proposition méthodologique qui nous permet de proposer une hypothèse.

Chapitre 4 : Expérimentation

Ce chapitre expose les différentes expérimentations que nous avons réalisées durant ces travaux de thèse afin de valider l'hypothèse et de répondre à la problématique. Cette partie s'articule en 3 sous-parties, une sur un outil d'adoption du potentiel de la FA, une sur l'adoption de la FA en séance de créativité et une sur la planification de l'intégration de la FA.

Chapitre 5 : Apports

Dans ce cinquième chapitre nous présentons les apports de la thèse que sont notre méthodologie comprenant un processus d'intégration de la FA et un processus de conception associé.

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives

Ce dernier chapitre proposera une conclusion sur nos travaux ainsi que des perspectives à court, moyen et long termes.

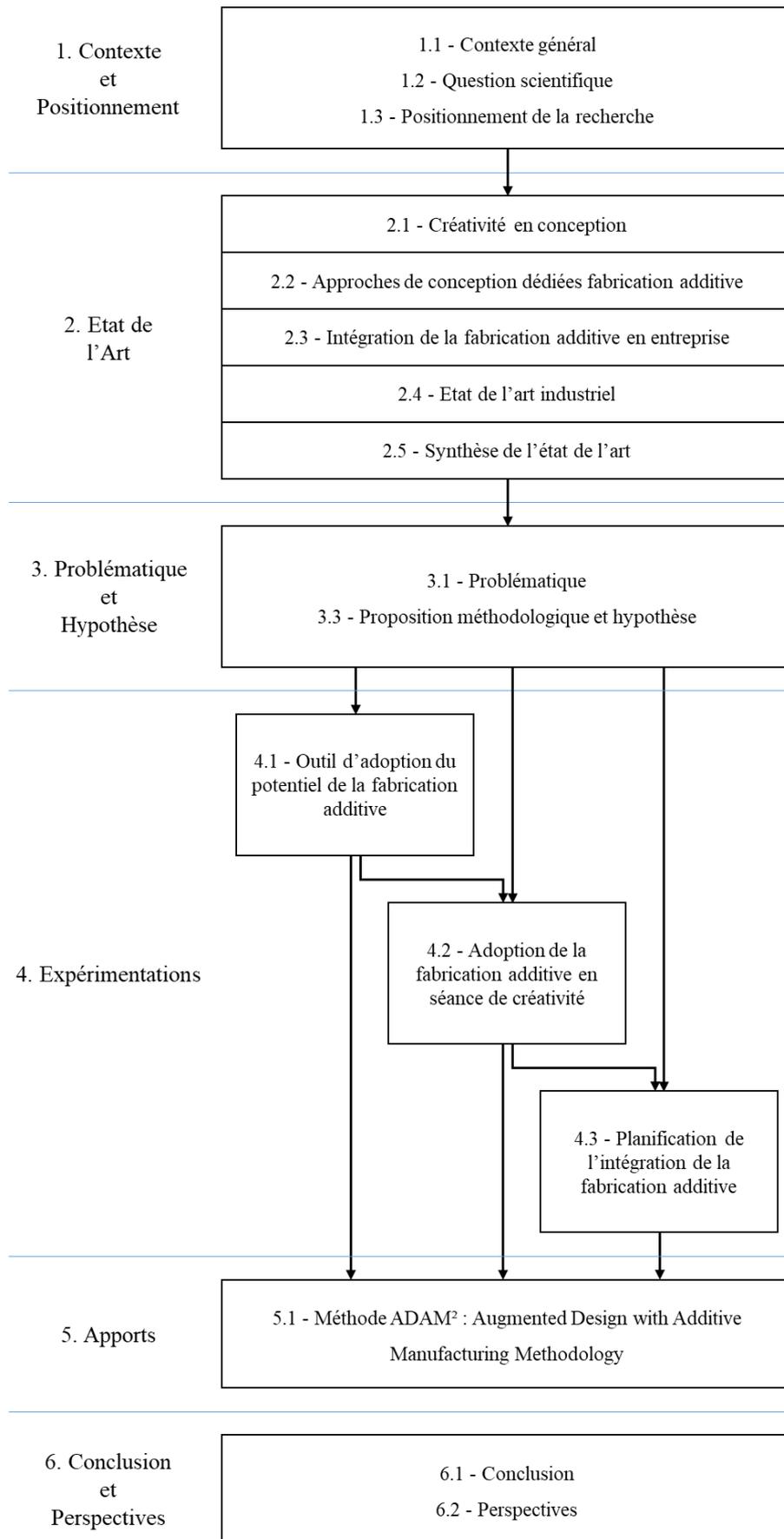


Figure 1 Structure du document

1. Contexte et positionnement

Ce chapitre énonce le contexte général qui explique l'intérêt de la fabrication additive en conception de produits. Cet intérêt est lié à la forte croissance de la FA, et au potentiel d'innovation important qu'offre cette technologie pour la conception de produits. Ce contexte va introduire une question scientifique, qui aidera à orienter l'étude de la littérature. Ce chapitre présentera aussi le positionnement de la recherche, en présentant les acteurs travaillant sur les thématiques en lien avec la question scientifique, et en particulier le laboratoire où ces travaux de thèse sont réalisés (LCPI). La figure 2 présente le plan de cette partie.

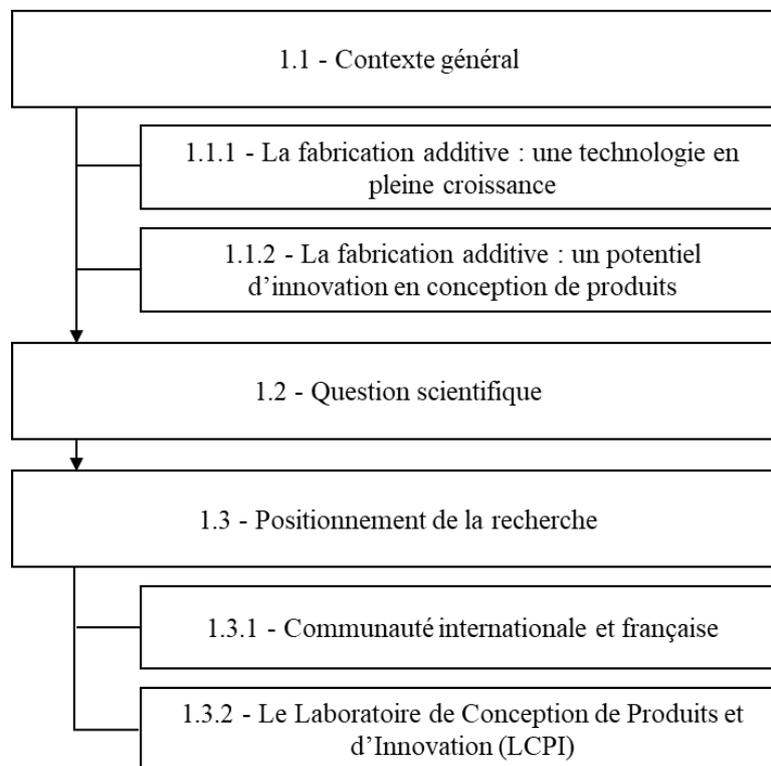


Figure 2 Plan chapitre contexte et positionnement

1.1 Contexte général

1.1.1 La fabrication additive : une technologie en pleine croissance

La technologie de fabrication additive connaît une forte croissance ces dernières années. Entre 2017 et 2019, le nombre d'applications FA par an en entreprise a augmenté de près de 50% pour les activités de production et de 20% pour les activités de prototypage (Wohlens et al.,

2019). La figure 3 montre la croissance exponentielle des ventes de système de FA métallique de 2002 à 2018. Les acteurs industriels évaluent que la croissance des activités de la FA métallique sera d'environ 25% par an sur les 5 prochaines années¹.

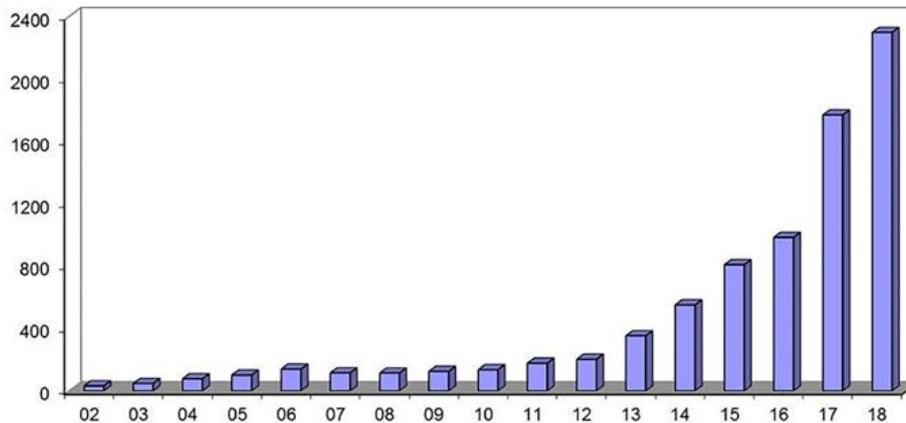


Figure 3 Evolution des ventes de systèmes de FA métallique entre 2002 et 2018 (Wohlers et al., 2019)

Le passage progressif des activités de prototypage vers celles de la fabrication de pièces fonctionnelles révolutionne la conception de produits dans tous les domaines de l'industrie et en particulier au sein des industries automobiles, aéronautiques, aérospatiales et médicales.

La FA comprend l'ensemble des procédés de fabrication passant d'un objet conçu sous format numérique (CAO) à un objet physique ; cette fabrication est faite couche par couche par ajout de matière.

La fabrication additive est un processus de fabrication générative. Cette technologie est souvent nommée avec d'autres termes, considérés réducteurs comme l'impression 3D ou la fabrication par couches.

La FA se différencie totalement des autres procédés de fabrication, dits traditionnels. En effet, aujourd'hui, les équipes de concepteurs s'appuient sur les procédés traditionnels pour idéaliser, concevoir et fabriquer un produit car les connaissances de la FA sont encore faibles au sein des équipes de conception. Ainsi, la fabrication additive bouleverse l'industrie et les techniques de fabrication traditionnelles que sont :

¹ <https://additive-manufacturing-report.com/additive-manufacturing-market/>

- La fabrication formative : la matière est amenée dans un état liquide ou visqueux, puis la mise en forme est effectuée par écoulement de cette matière dans un moule (ex : fonderie, forge).
- La fabrication soustractive : Le produit est réalisé à partir d'une pièce brute sur laquelle la matière va être enlevée dans le but d'obtenir la forme finale souhaitée (ex : usinage).

La figure 4 permet d'observer les différences entre ces 3 types de fabrication.

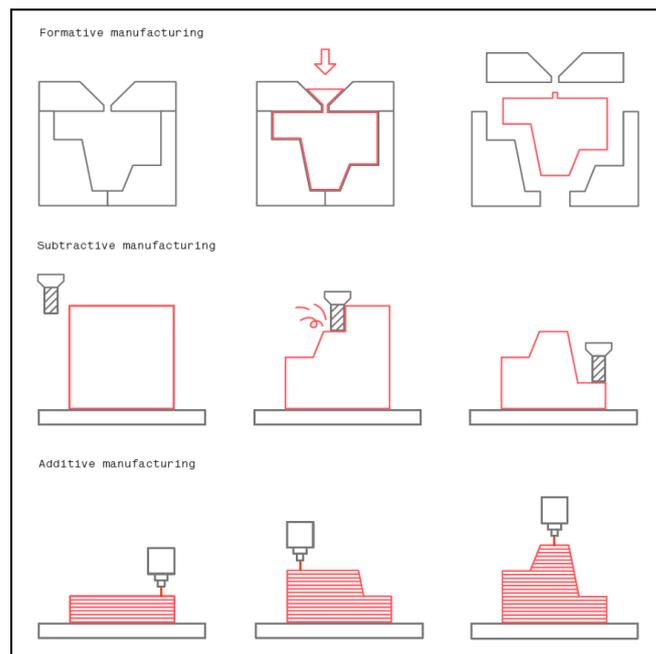


Figure 4 : Les trois types de fabrication (REDWOOD et al., 2017)

La FA n'est pas un unique procédé de fabrication mais comprend 7 types de procédés (fusion sur lit de poudre, extrusion de matière, projection de matière, photopolymérisation en cuve ou stéréolithographie, dépôt de matière sous énergie concentrée, projection de liant, stratification de couches). Ces différents procédés de fabrication additive apportent au monde de la conception de réels potentiels car ils proposent des possibilités de fabrication nouvelles par rapports aux procédés traditionnels. En effet, cette technologie propose de résoudre des complexités de conception existantes avec la fabrication soustractive ou formative, ce qui offre un fort potentiel d'innovation en conception de produits.

1.1.2 La fabrication additive : un potentiel d'innovation en conception de produits

La FA offre un potentiel d'innovation très important car elle offre des capacités de conception totalement nouvelles. En effet, la FA permet de dépasser des complexités présentes avec les procédés de fabrications traditionnelles (Gibson et al., 2015) (Thompson et al., 2016). Ces complexités sont des potentiels de créativité et d'innovation pour les concepteurs intégrant la FA dans leur processus de conception. Ces complexités sont au nombre de 4 :

- *Complexité géométrique :*

Cette complexité définit un enjeu majeur pour les procédés de fabrication traditionnels. En effet, pour l'ensemble des procédés de fabrication, la géométrie est un paramètre contraignant car il n'est pas possible de fabriquer toutes les formes. Par exemple en usinage, la géométrie doit assurer l'accès de l'outil vers la zone à usiner ; en fonderie, des contraintes de formes doivent absolument être respectées pour assurer le bon fonctionnement du procédé. L'atout de la FA est qu'il est possible d'imaginer et de fabriquer quasiment n'importe quelle géométrie. Cet avantage s'explique par le fait qu'en FA une forme 3D est décomposée en un ensemble de forme 2D. Ainsi, il est beaucoup plus simple de résoudre des problèmes géométriques en 2D qu'en 3D. La fabrication d'un produit en FA peut être réalisée en une seule opération ; le produit n'a pas besoin d'être obtenu à la suite d'un assemblage et peut présenter des formes creuses sans avoir besoin d'un système de noyautage. La possibilité de fabriquer des géométries complexes permet de réduire les coûts pour certains produits car il n'y a plus besoin d'opération d'assemblage. La figure 5 présente des exemples de pièces métalliques où la FA a permis de dépasser les limites géométriques de la fabrication traditionnelle.



Figure 5 Pièces en FA métallique présentant des géométries trop complexes pour la fabrication traditionnelle²

- *Complexité hiérarchique :*

La fabrication additive permet de travailler beaucoup plus un produit au niveau de sa structure. En effet, comme les machines de FA dépose la matière sur les zones où il y en a besoin, il devient alors beaucoup plus simple de penser chaque zone du produit et non plus des géométries globales. Il est ainsi possible de réaliser des structures très complexes, jouant sur la quantité de matière au niveau microscopique et ainsi d'obtenir des propriétés mécaniques spécifiques en chaque point de matière. Cette capacité à modifier la structure est aussi faisable en surface avec des textures particulières, ce qui permet d'obtenir des propriétés de contact spécifiques. L'intérêt principale de cette complexité est d'ajuster le produit au besoin, aussi bien au niveau du poids que des propriétés mécaniques. La figure 6 présente une prothèse d'épaule en FA avec une structure infaisable par procédé traditionnelle qui permet la croissance osseuse.

² <https://www.3dnatives.com/technologie-3d-velo3d-26022020/>



Figure 6 Prothèse d'épaule avec une structure infaisable par un procédé traditionnelle³

- *Complexité fonctionnelle :*

La FA permet d'obtenir des fonctionnalités difficilement faisables, voire infaisables, avec les procédés traditionnels. Cette technologie permet de fabriquer des systèmes complets en une unique opération de fabrication sans la moindre opération d'assemblage (soudage, vis...). Par ailleurs, il est possible d'inclure des composants étrangers au produit durant la fabrication, ce qui est impossible avec les autres procédés de fabrication. L'intégration de composants étrangers permet de totalement encapsuler des éléments tel que des composants électroniques ou électrique, des fibres de composites ou d'autres pièces mécaniques. Sur la figure 7, ce composant hydraulique permet de répondre à un besoin fonctionnel difficilement réalisable par un procédé traditionnel.



Figure 7 Composant hydraulique en FA fabriqué un seul bloc⁴

³ <https://3dadept.com/exactech-modifie-le-procede-de-fabrication-additive-dune-prothese-depaule-de-lebm-audmls/>

⁴ <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/etudes-de-cas/un-composant-hydraulique-concu-fabrication-additive-lairbus-a380>

- *Complexité matériaux*

Les procédés de FA offre un choix de matériaux très vaste comme le plastique ou le métal mais aussi de matériaux moins standard comme la cire, le plâtre, le sable, les composites, voire même des cellules vivantes. La FA de moules en sable pour la fonderie offre un potentiel d'innovation très important en conception de produits (figure 8). Par ailleurs, la FA peut fabriquer des pièces multi-matériaux. Il est possible d'obtenir des gradients de matériaux en partant de couches d'un matériau jusqu'à des couches d'un autre matériau en passant par des couches mélangeant les deux. Il est aussi possible d'ajouter des couches de matières de manière discontinue pour obtenir des zones mono-matériau répondant mieux aux contraintes absorbées. Par exemple, il est faisable de fabriquer une pièce mélangeant du polymère, pour les zones où la rigidité est nécessaire, et de l'élastomère, pour les zones où la souplesse est nécessaire. Cette complexité offre un très fort potentiel pour la fabrication additive car il est ainsi possible de réaliser des compositions de matériaux apportant aux produits des propriétés mécaniques, voire thermiques ou chimiques uniques.



Figure 8 Moule de fonderie en sable fabriqué en FA⁵

⁵ <http://www.primante3d.com/voxeljet-vx1000-26092016/>

Le potentiel d'innovation qu'offre la Fabrication Additive a réellement permis à cette technologie de s'affirmer comme une innovation révolutionnaire pour l'industrie et pour la conception de produits, ce qui explique l'intérêt fort pour cette technologie dans le monde industriel et de la recherche.

1.2 Question scientifique

Dans ce contexte de l'émergence de la Fabrication Additive dans l'industrie, cette technologie apporte de nouveaux potentiels de conception et ainsi de nouveaux potentiels d'innovation. Ce potentiel d'innovation entraîne les entreprises à s'intéresser à l'intégration de la FA dans leurs processus de conception et de décision. Cette intégration doit se faire par l'adoption du potentiel de la FA par les concepteurs ; mais, elle implique des décisions importantes au niveau des départements de conception mais aussi au niveau des stratégies de l'entreprise. En effet, la technologie de FA étant récente et n'étant pas toujours adaptée pour toutes les décisions de conception, il devient nécessaire à l'entreprise d'avoir une vision générale sur le processus d'intégration de la FA.

C'est pourquoi, notre étude de la littérature va se baser sur la question scientifique suivante :

Comment et dans quel cas intégrer la fabrication additive dans le processus de conception de produits ?

1.3 Positionnement de la recherche

Au regard de l'intérêt de la fabrication additive pour les activités industrielles et donc de la question scientifique énoncée, de nombreux acteurs de la recherche travaillent sur cette technologie en France et à l'international. Nous présenterons un certain nombre d'acteurs français ainsi que les principaux acteurs internationaux, avant de présenter plus en détail le Laboratoire Conception de Produits et d'Innovation (LCPI).

1.3.1 Communauté internationale et française

La France est un pays majeur dans la recherche sur la FA, de nombreux acteurs universitaires et centres de recherche travaillent sur cette technologie. En 2017, le centre technique des industries mécaniques (CETIM) et le réseau Carnot ont recensé les principaux acteurs de la R&D en FA en France⁶. La figure 9 présente une cartographie de ces acteurs français de la FA.

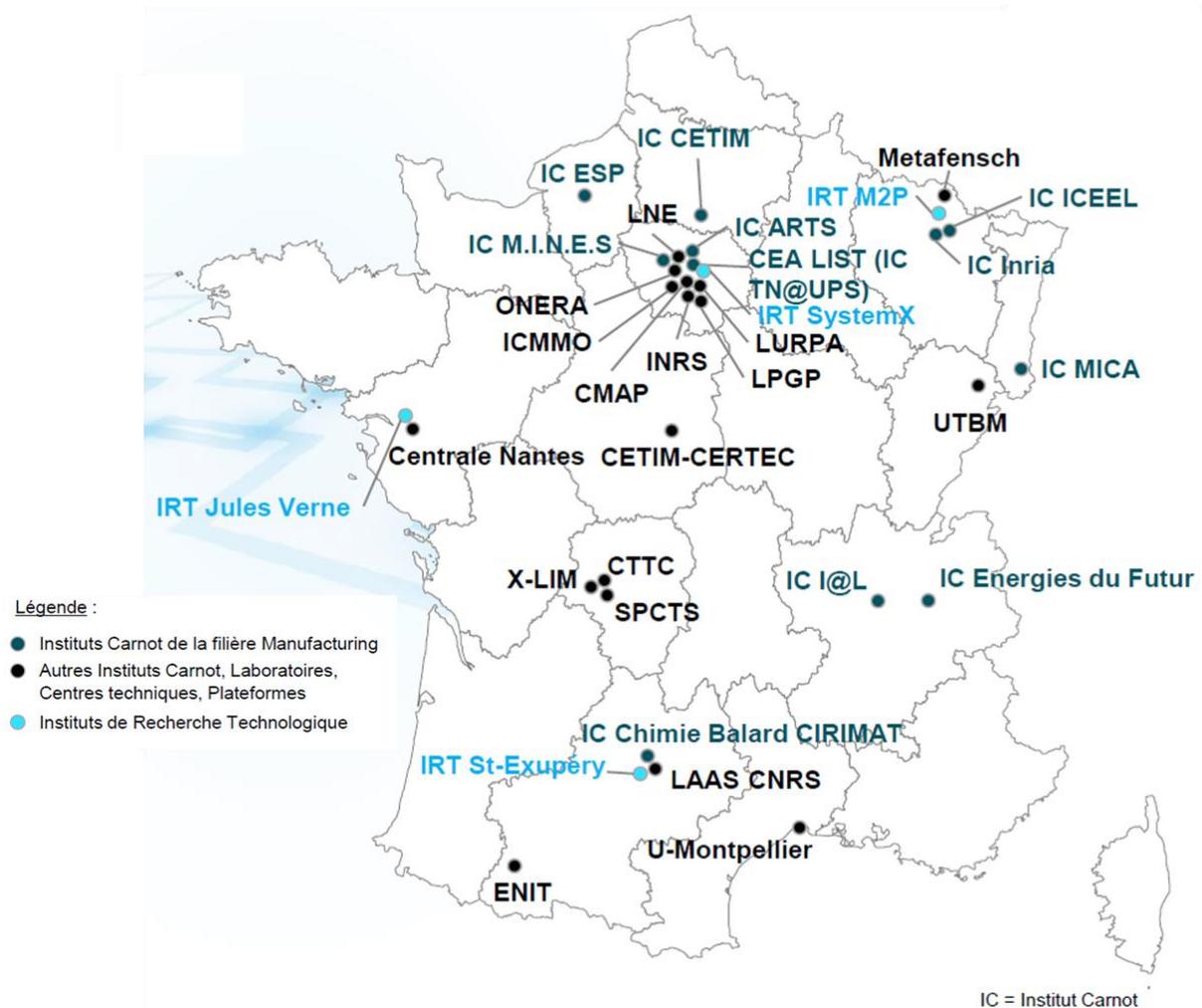


Figure 9 Cartographie des acteurs de la filière FA en France faite par le CETIM/Carnot¹

L'ensemble de ces acteurs permettent d'avoir une expertise dans l'ensemble des compétences associés à cette technologie : la créativité et l'innovation ; le design ; les matériaux ; les

⁶https://www.instituts-carnot.eu/sites/default/files/images/CartoFabAdd_CETIM-filiere-Manufacturing-juil2017.pdf

procédés de FA ; le post-traitement ; les contrôles et caractérisation ; l'hygiène sécurité environnement ; la chaîne numérique ; la normalisation.

Dans le cadre de cette thèse, nous situons nos travaux dans les deux premières compétences.

La France possède donc beaucoup d'acteurs de la filière FA, ce qui prouve l'intérêt de cette technologie pour les sciences de l'ingénierie et de la conception. Cette multitude d'acteurs s'observe aussi dans d'autres pays tels que les Etats-Unis ou l'Allemagne.

Le tableau 1 présente une liste non exhaustif d'acteurs de la recherche travaillant sur les compétences de créativité, d'innovation et de design en France et à l'international.

Pays	Etablissement	Entités de recherche
France	Arts et Métiers	Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI)
	Centrales Nantes	Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM)
	Mines ParisTech	Centre des matériaux (CdM)
	UTBM	Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB)
	Grenoble INP	Laboratoire des Sciences pour la conception, l'Optimisation et la Production (G-SCOP)
Grande-Bretagne	Cambridge and Loughborough University	Design for Additive Manufacturing Laboratory (D4AM)
	The University of Sheffield	Department of Mechanical Engineering
	University of Nottingham	Centre for Additive Manufacturing
Allemagne	Fraunhofer	Institut für fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
Pays-Bas	University of Twente	Twente Centre of Excellence in Additive Manufacturing (TEAM)
Chine	Nanjing University of Science & Technology	Research Center of AM Technology and Equipment for Difficult-to-Form Materials
Etats-Unis	MIT	Center for Additive and Digital Advanced Production Technologies
	PennState	Department of Industrial and Manufacturing Engineering
	Iowa State University	Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering
Nouvelle-Zélande	The University of Auckland	Creative Design and Additive Manufacturing Lab

Tableau 1 Liste d'acteurs de la recherche travaillant sur la créativité /innovation et le design associé à la FA

Parmi les laboratoires, nous avons énoncé le Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation, où sont fait ces travaux de thèse. Ainsi nous allons le présenter plus en détails.

1.3.2 Le Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation (LCPI)

Ce travail de thèse s'inscrit en effet dans les thématiques de recherche du Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation (LCPI) du campus de Paris de l'Ecole des Arts et Métiers. Les thématiques de recherche du LCPI portent sur l'optimisation du processus de conception et d'innovation. Les différents travaux du laboratoire cherchent à proposer et développer des modèles du processus de conception et d'innovation pour l'ensemble des phases du cycle de vie du produit avec un effort particulier sur les phases amont de conception.

Les différentes thématiques de recherche développées dans le laboratoire sont présentées sur la figure 10.

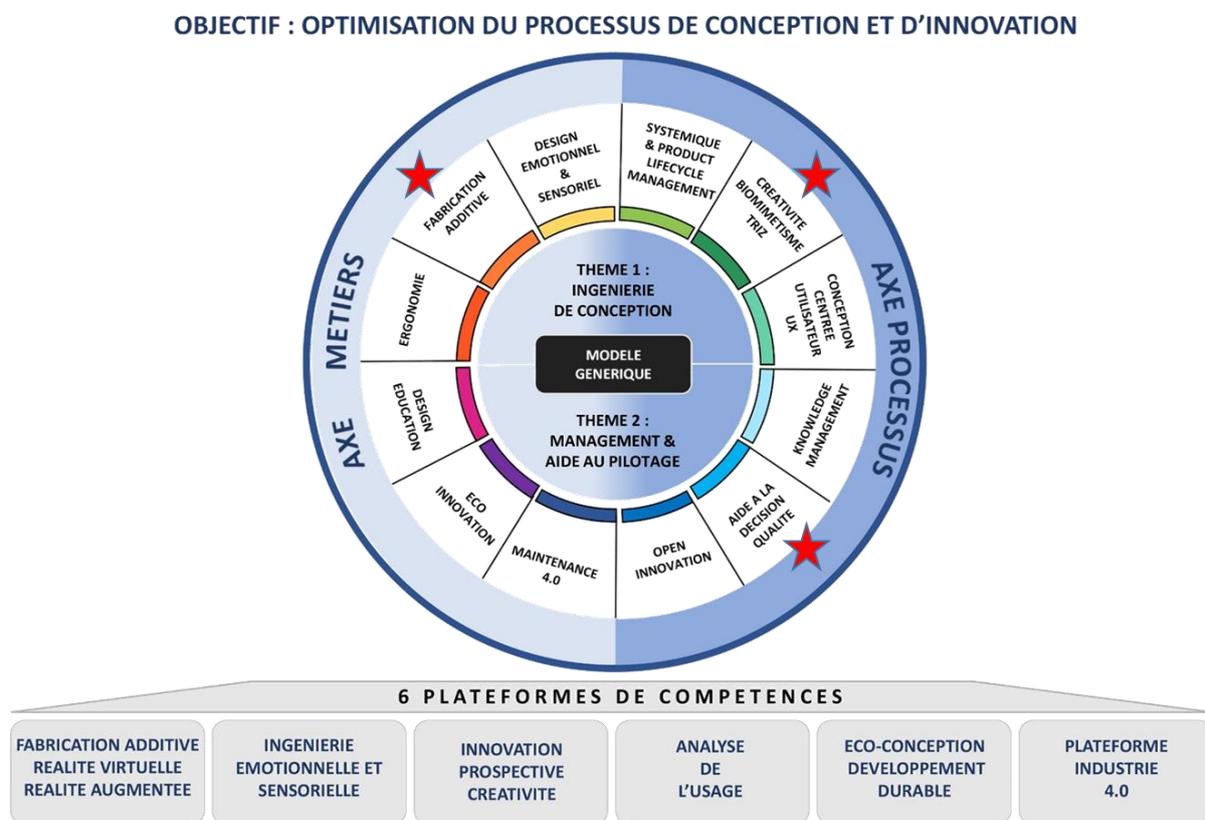


Figure 10 Thématiques de recherche du Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation

Les thématiques de recherche du laboratoire s'articulent autour de deux axes et de deux thèmes complémentaires.

Les axes de recherche sont : l'axe métier, qui vise à enrichir le processus de conception par l'intégration de nouvelles connaissances, règles et outils métiers ; et l'axe processus, qui vise à la formalisation globale du processus de conception pour mieux le comprendre et l'optimiser.

Les thèmes de recherche sont : l'ingénierie de la conception, qui fédère les domaines phares de la conception amont de produits ; et le management/aide au pilotage, qui s'inscrit dans la communauté de recherche du génie industriel.

L'ensemble de la recherche du laboratoire s'appuie sur 6 plateformes de compétences.

Au regard de la question scientifique, nos travaux de thèse s'inscrivent dans 3 thématiques de recherche du laboratoire :

- La Fabrication Additive : Le laboratoire travaille depuis des années sur l'intégration des connaissances de la Fa dans le processus de conception de produits. Plusieurs thèses et projets du laboratoire se sont focalisées sur cette thématique.
- La Créativité : Le laboratoire CPI a monté plusieurs projets dont l'objectif était de stimuler la créativité en processus de conception afin d'améliorer l'innovation de produits. Le laboratoire a en particulier une forte compétence sur la théorie de créativité TRIZ.
- L'aide à la décision : la conception de produits impose aux concepteurs et aux entreprises de prendre des décisions pour aller de l'idéalisation jusqu'à un produit final, en particulier lorsqu'il peut y avoir des réticences à l'innovation comme avec toutes nouvelles technologies. Ainsi, dans le laboratoire CPI, plusieurs sujets de thèses et projets de recherche ont proposé des méthodes d'aide à la décision pour les concepteurs.

Ce chapitre sur le contexte et le positionnement, nous permet d'énoncer que l'intégration de la FA en entreprise est un enjeu majeur de la recherche et de l'industrie car cette technologie est en pleine croissance et offre un potentiel important d'innovation en conception de produits. C'est pourquoi, il va être nécessaire de faire un état de l'art sur les thématiques de recherche associés à la question scientifique.

2. Etat de l'art

Dans ce chapitre, nous allons présenter les travaux de la littérature sur les sujets en lien avec le contexte et donc avec la question scientifique. Notre état de l'art se décompose en 4 parties (figure 11).

La première partie est sur la créativité en conception. Cette partie va expliquer pourquoi la créativité est un élément central dans un processus de conception, en particulier, durant les phases amont ; elle va aussi présenter des méthodes et outils permettant de stimuler la créativité et d'atténuer des facteurs limitant l'innovation.

La deuxième partie va présenter les différentes approches de conception dédiées FA existantes dans la littérature pour intégrer la FA durant la conception de produits. Cette partie va permettre de mettre en avant des manques dans les approches proposées dans la littérature, comme par exemple, la non prise en compte du contexte de l'entreprise.

La troisième partie va exposer les processus d'intégration de la FA en entreprise. Cette partie va aussi permettre de mettre en avant des manques et, en particulier, la vision trop macroscopique de ces processus, ne prenant pas en compte d'éléments propres à la conception de produits.

La quatrième partie est un état de l'art industriel multisectoriel, effectué à partir d'entretiens. Cette partie va permettre d'avoir une vision macroscopique (contexte de l'entreprise) et microscopique (processus de conception) sur l'intégration de la FA afin de dépasser la frontière entre la littérature sur les approches de conception dédiées FA et la littérature sur les processus d'intégration de la FA en entreprise.

2.1 - Créativité en conception	
	2.1.1 - Processus de conception
	2.1.2 - Créativité en conception amont
	2.1.3 - Méthodes et outils de stimulation de la créativité
2.2 - Approches de conception dédiées Fabrication Additive	
	2.2.1- Design For Additive Manufacturing (DFAM)
	2.2.2 - Design With Additive Manufacturing (DWAM)
	2.2.3 Creativity Through Additive Manufacturing (CTAM)
	2.2.4 - Méthodologies de conception en FA basées sur des représentations tangibles
2.3 - Intégration de la Fabrication Additive en entreprise	
	2.3.1 - Introduction sur les processus d'intégration d'une nouvelle technologie
	2.3.2 - Facteurs de réussite d'une intégration technologique
	2.3.3 - Processus d'intégration de la FA
2.4 - Etat de l'Art industriel	
	2.4.1 - Elaboration d'entretiens avec des industriels
	2.4.2 - Analyse des entretiens

Figure 11 Structure du chapitre Etat de l'Art

Nous allons donc dans la suite de cette section, présenter les travaux dans les 4 différentes parties et proposer, à la fin de chacune de ces parties, une synthèse de l'existant, des observations et des manques ainsi que des constats qui nous permettront par la suite d'argumenter notre problématique, notre méthodologie et l'hypothèse de nos travaux de thèse.

2.1 Créativité en conception

Ce chapitre va présenter l'importance de la créativité en conception. Les différentes sections de ce chapitre vont permettre d'affiner l'étude de la littérature en partant des processus de conception vers les méthodes et outils de stimulation de la créativité en passant par l'importance de stimuler la créativité en phases amont de conception (figure 12). Ce chapitre va permettre d'orienter la réflexion sur le contexte, l'enjeu et les outils de la créativité en conception de produits.

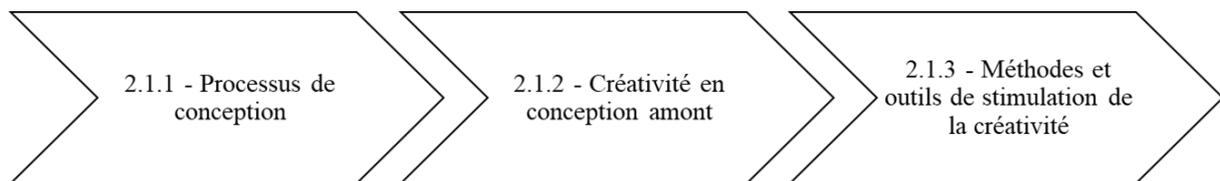


Figure 12 Processus d'analyse de l'état de l'art sur la créativité en conception

2.1.1 Processus de conception

La littérature parle de processus de conception car la conception est définie par un état initial et un état final. Idéalement, l'état final correspond à la concrétisation de l'état initial ; l'état initial étant un état désiré et l'état final, un état réalisé. Il est donc judicieux de parler de « processus de conception » quand il est fait référence à la « conception ». Ce processus de conception, se définit comme une activité articulant : un raisonnement, une organisation et un protocole d'évaluation de la performance (Le Masson et al., 2014).

L'activité de conception consiste en un cheminement de l'inconnu vers le connu à travers un exercice de construction de relations entre des concepts et des connaissances. Ainsi, un projet de conception est un mouvement dialectique entre orientation et contrainte (Garel & Hock, 2012).

De la notion de processus de conception découle celle de modèles. L'existence de formes multiples de conduite de l'activité de conception et les milieux divers d'intérêt ou de pratique de conception amènent à introduire la notion de « modèles » de conception. En effet, la notion de processus de conception n'est pas propre à l'ingénierie car elle découle du cheminement entre un besoin (ou problème) et une solution. Ce cheminement est différent en fonction du secteur (industriel, artistique, ...) et de la complexité du raisonnement à associé à la recherche de solution ; ce qui entraîne des modèles de conception différents.

Les modèles de processus de conception

D'une manière générale et traditionnelle, au niveau industriel, se trouvent distingués les types de modèles suivants :

- *Les modèles en étapes :*

Certains de ces modèles ont acquis une réelle renommée et sont des références tant dans le monde industriel que dans le monde académique.

Pahl et Beitz sont à l'origine de la présentation d'un processus linéaire, décomposable en phases (Pahl et al., 1996) (figure 13) :

- 1- « Design fonctionnel » : à ce stade il importe de préciser les spécifications fonctionnelles du futur produit.
- 2- « Design conceptuel » : dans le cadre de cette phase, sont dégagés les principes techniques et les technologies permettant de réaliser les fonctions identifiées à l'étape précédente.
- 3- « Conception physico-morphologique » ou « Embodiment » : consistant à déterminer l'architecture du produit futur : les composants et leur intégration dans un ensemble cohérent.
- 4- « Conception détaillée » : il importe alors de dimensionner tous les paramètres restés libres à la phase précédente. En particulier à ce stade, les contraintes des procédés de fabrication vont devoir être pris en compte.

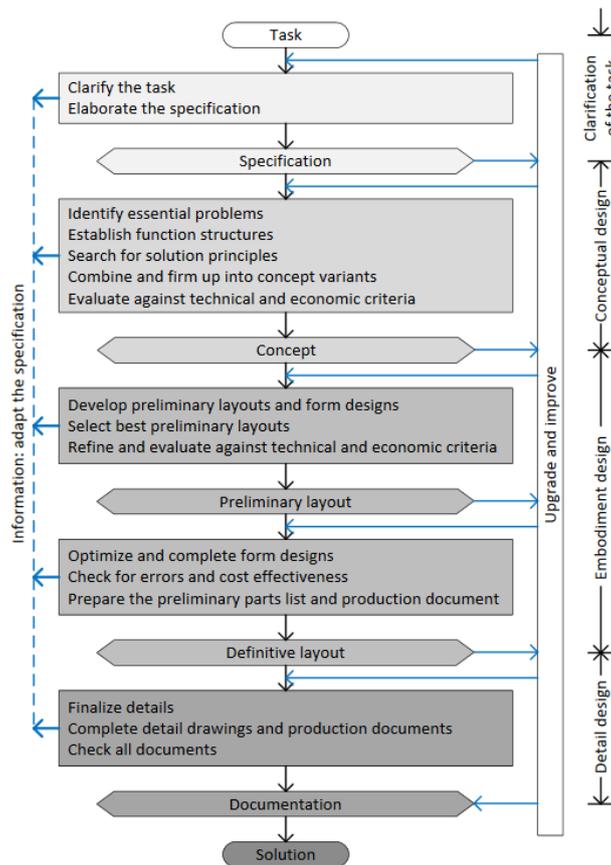


Figure 13 Processus de conception de Pahl and Beitz (Pahl et al., 1996) (représentation détaillée)

Howard et al. énoncent que la représentation linéaire des modèles reste dominante et ils présentent une analyse d'un grand nombre de modèles en étapes. De leur analyse, il en découle que les processus d'ingénierie sont traditionnellement décomposés en 4 à 6 phases, qui sont les suivantes (Howard et al., 2008) :

- 1- « Définition des besoins » : consistant en la compréhension de l'état initial d'insatisfaction qui est à l'origine du processus de conception.
- 2- « Planification des tâches » : il s'agit d'un exercice renvoyant à la mise en place de l'organisation de l'ensemble de l'activité de conception.
- 3- « Conception générale » : il s'agit d'établir des solutions qui pourraient, éventuellement, permettre de résoudre le problème. Lors de la réalisation de cette étape, il importe d'être imaginatif et ouvert pour générer des idées.
- 4- « Conception architecturale » : cela consiste à opérer une sélection parmi les idées générées à l'étape précédente. La notion d'architecture renvoie à la problématique d'agencement des composants.

- 5- « Conception détaillée » : il faut à ce stade définir précisément les caractéristiques du futur produit. Cette étape débouche naturellement sur une description et une définition complète du produit qui va alors être fabriqué dans le cadre de l'industrialisation.
- 6- « Implémentation » : cette ultime étape est tournée vers les questions spécifiques de production industrielle et de commercialisation.

- *Les modèles séquentiels :*

Les modèles séquentiels marquent une évolution par rapport aux modèles en étapes et sont caractérisés par l'influence des travaux des sciences cognitives dans le domaine de l'activité cérébrale de conception. La conception est alors décrite comme un métabolisme qui regroupe un ensemble de transformations accomplies au sein de l'organisme ou de l'organisation réalisant une tâche de conception. Trois types d'activité caractérisent ce métabolisme : la « Génération » ou « Divergence » qui se traduit par la construction de l'espace problème ; la « Transformation » qui génère des solutions en réponse aux problèmes ; l'« Évaluation » ou « Convergence » consistant à évaluer les solutions précédemment établies. Le processus de conception en double diamant correspond à un modèle séquentiel fréquemment utilisé en conception de produit (Banathy, 2013). Il se décompose en 4 phases, comme le présente la figure 14.

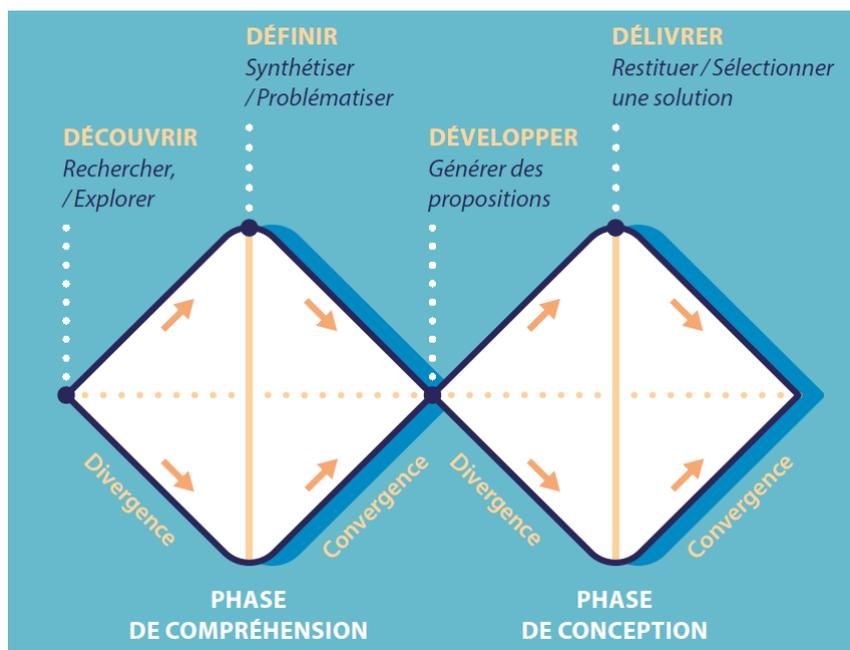


Figure 14 Processus de conception en double diamant (Segonds & Lang, 2019)

Le double diamant est une visualisation du processus de conception avec deux phases de divergence et deux phases de convergence. La première phase permet de découvrir le besoin en explorant et en recherchant des éléments inspirationnels qui sortent des frontières du besoin ; l'idée est de ne pas se limiter au problème mais d'élargir le spectre du besoin et de l'environnement. La seconde phase consiste à définir des possibilités identifiées d'idées qui permettent de répondre à la problématique, tout en synthétisant les informations de la première phase. La troisième phase consiste à développer des solutions à travers la génération de concepts ; l'objectif de cette phase est de proposer plusieurs concepts en s'inspirant des idées de la phase précédente. La dernière phase permet de délivrer la solution à la suite d'une sélection entre les concepts. Cette phase peut-être un produit si le double diamant représente l'ensemble du processus de conception, ou un livrable intermédiaire, comme par exemple un concept final, si le double diamant représente une partie du processus de conception.

- *Les modèles co-évolutifs :*

Ils se résument en la présentation d'une dynamique cyclique qui alterne et combine restructuration du problème et résolution du problème (Yannou et al., 2013) (Dorst & Cross, 2001). Cette dynamique alterne donc des phases de divergence et de convergence. Le processus peut être illustré à travers un éventail qui, au fur et à mesure du temps, se resserre en vue de la solution retenue (figure 15) (Cross, 2008). Cette présentation pose naturellement la question de la fin du processus. Cette dynamique prend fin lorsque la solution est jugée « acceptable et satisfaisante ». Il ne s'agit donc pas de la meilleure solution possible. Cette démarche renvoie au modèle de « rationalité limitée », développée par le prix Nobel d'économie, Herbert SIMON (Simon, 1957).

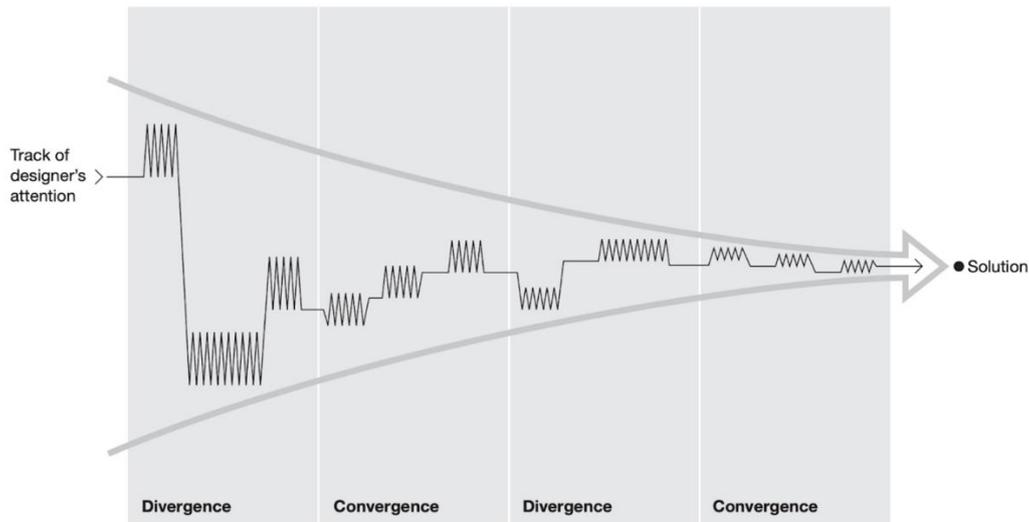


Figure 15 Processus en éventail alternant des phases de divergence et de convergence

Parmi les modèles de conception, le design thinking s'est souvent imposé comme une référence car il permet de mettre l'utilisateur final au centre du processus de conception.

Design Thinking

Le terme de cette méthodologie est apparu en 1987 au MIT. La démarche du Design Thinking est fondée sur le fait de chercher à être en empathie avec le consommateur, grâce à l'observation de pratiques d'usage. L'idée, qui structure la démarche, est caractérisée par la remarque suivante : le client n'achèterait pas un bien ou un service, comme cela est annoncé traditionnellement ; mais plus précisément, il acquerrait une expérience à vivre dont ce bien ou ce service ne serait que le support. Ainsi, la dimension symbolique, la représentation et la part de l'émotion sont mises en avant.

Il s'agit donc d'une démarche de créativité qui se fonde sur les perceptions (le beau, l'image, le symbole, ...) et sur le vécu (l'expérience).

La méthode de Design Thinking est caractérisée par trois étapes de base (figure 16) :

- La première étape, de compréhension, se définit à travers l'observation et l'immersion dans l'expérience client. Il s'agit donc d'observer les pratiques et de comprendre les ressorts des comportements. En utilisant les termes traditionnels de la prospective, nous dirons qu'il s'agit de découvrir les tendances et les signaux faibles qui permettent de

définir les évolutions des pratiques de consommations et les attentes des consommateurs (Cahen, 2010).

- La deuxième étape, d'exploration, consiste à formuler des idées, qui seraient potentiellement des réponses aux éléments identifiés lors de l'étape précédente. La pratique du dessin est privilégiée pour représenter les idées qui émergent lors de cette étape, avant de passer au prototypage.
- La troisième étape, de concrétisation, est la mise en place de la solution qui sera, en final, retenue. Il s'agit d'une phase qui privilégie les tests des prototypes en vue de ressentir physiquement et émotionnellement chacune des solutions. C'est sur cette base qu'est opérée la sélection de la solution finale.

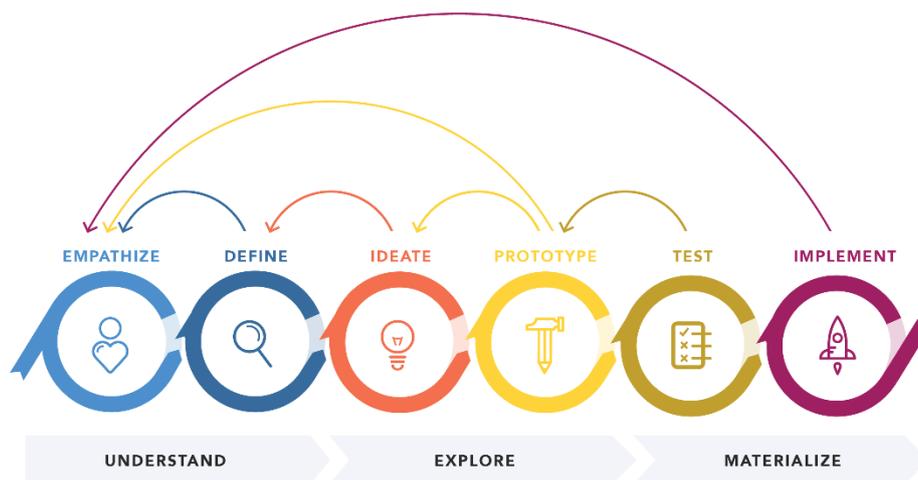


Figure 16 Design thinking⁷

La nature de cette démarche de Design Thinking valorise la pratique des démonstrations, en vue de solliciter les réactions des publics concernés. Aussi, cette démarche élargit, en quelque sorte, le panel des acteurs de la conception au public concerné par le produit à concevoir.

A partir de l'ensemble des modèles de processus de conception présentés dans cette partie, nous allons nous appuyer sur les modèles en étapes et les modèles séquentiels. Les modèles en étapes permettent de mieux segmenter les différentes phases de conception et ainsi de focaliser notre recherche sur les étapes où il est le plus pertinent d'introduire le potentiel de la FA. Les modèles séquentiels vont, quant à eux, permettre d'introduire des notions issues des sciences cognitives

⁷ <https://www.nngroup.com/articles/design-thinking/>

en particulier avec les phases de convergences et de divergences pour ouvrir à des phases de création.

Dans le processus de conception, nous nous positionnons au début du processus de conception, durant la phase de design conceptuel, dénommé phase amont de conception.

Phases amont de conception

Le processus de conception va de la définition des besoins, jusqu'à la solution ; mais les décisions prises au cours de ce processus ne vont pas avoir les mêmes répercussions, en particulier économique. Comme le présente la figure 17, durant les phases amont, les libertés dans le processus de conception sont très importantes car les choix sont encore imprécis et les coûts de conception sont encore assez faibles (Laverne, 2016). Ainsi pour l'intégration d'une nouvelle technologie, il est important de se focaliser sur ces phases amonts.

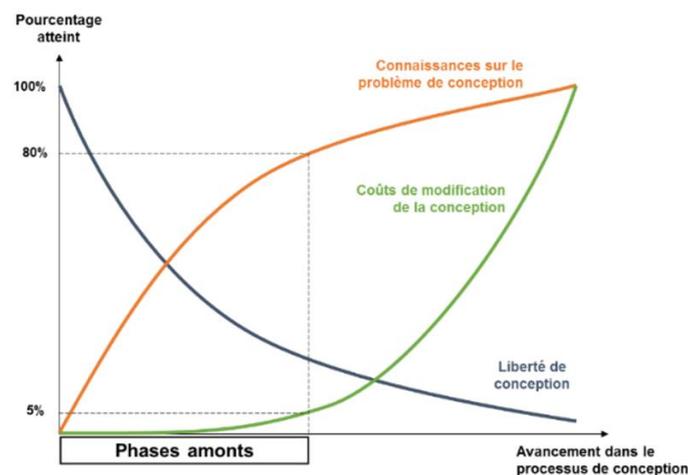


Figure 17 Illustration du paradoxe de conception (Laverne, 2016)

Les limites des phases amont varient selon les définitions. Les définitions de ces phases prennent souvent comme référence le modèle de Pahl et al. présenté dans la partie précédente (Segonds et al., 2016). Eder limite ces phases aux deux premières étapes du modèle, allant jusqu'au concept (Eder, 1998), tandis que Segonds et al. définissent ces phases comme l'ensemble des activités allant du besoin jusqu'à la première série de maquettes (Segonds et al., 2016).

La propriété des phases amont est d'assurer au concepteur la plus grande liberté de création. Phase après phase, cette liberté se réduit, pour atteindre une liberté nulle au moment de

l'achèvement du processus de conception. Ainsi, selon les types de projets, les phases amont ne vont pas avoir la même importance dans le processus de conception, voire même ne pas être présentes pour des projets d'améliorations de produits. La figure 18 présente la localisation des phases amont de conception en fonction des étapes de conception selon le type de projet de conception (Micaëlli & Forest, 2003) (Segonds et al., 2016).

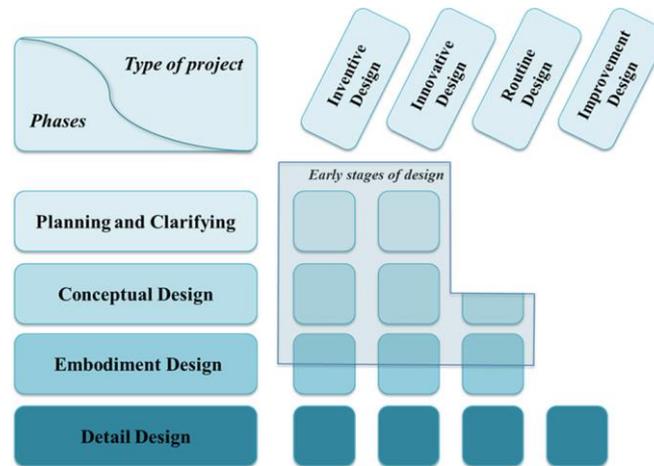


Figure 18 Localisation des phases amont de conception en fonction du type de projet de conception

Les phases amont constituent un moment favorable à l'introduction d'innovations technologiques et en particulier de modes de fabrication inhabituels dans le monde industriel ou dans une entreprise lançant un projet de conception (André et al., 1988) (Kruth et al., 1998). A ce titre, les phases amont peuvent être considérées comme des phases comprenant des processus informels, de négociation, de mobilisation, de mise au point qui peuvent déboucher sur la prise en compte de concepts « originaux » lors de la phase de définition de l'objet et de recherche de concepts (Pol et al., 2005). L'intensité du potentiel de créativité est déterminée par la définition du concept de départ (Garel & Hock, 2012). Cependant, il importe de souligner que le potentiel d'innovation ne dépend pas exclusivement du processus de conception, il est aussi dépendant des intentions stratégiques définies par la direction de l'entreprise concernée et qui fondent la mise en œuvre du processus de conception (Midler et al., 2012) ; ce que nous verrons en particulier dans la partie de l'état de l'art sur les processus d'intégration de la FA.

L'innovation impose de penser globalement : « pour atteindre un bon niveau d'optimisation et de cohérence du produit, il est primordial que tous les métiers du développement interviennent non pas séquentiellement, mais ensemble tout au long du projet. A tout moment, le projet est vu selon tous ses aspects » (Midler, 2012). Dès le départ, multiplier les éléments à prendre en

compte dans toutes les phases de conception et de vie du produit, c'est faire apparaître des propriétés, des idées qui n'apparaîtraient pas dans le cadre d'une pensée linéaire (Lestienne, 2012) (Ricard, 2008).

Ainsi, dans le processus de conception, les phases amonts sont les étapes permettant le plus de liberté à l'innovation. C'est durant ces phases qu'il sera possible d'introduire des connaissances nouvelles qui stimuleront l'innovation. Durant ces phases, la notion d'innovation est donc très importante, mais, elle est souvent liée à une autre notion qui est la créativité. Pour innover en conception de produits, la créativité devra être stimulée en phase amont de conception.

2.1.2 Créativité en conception amont

L'innovation par la créativité

La créativité est le moyen d'atteindre l'innovation ; sans créativité, il ne sera pas possible d'innover (Howard et al., 2008), d'où son importance durant les phases amont.

La définition de la créativité apparaît comme étant de nature conventionnelle. À l'origine, l'accent était mis principalement sur le « talent » et le « génie », d'où sa nature conventionnelle. Mais, dans un contexte industriel, la créativité d'un produit est jugée au regard de certaines de ses caractéristiques : l'utilité, la fonctionnalité, la valorisation (Christiaans, 2002).

Nombreux sont les auteurs qui ont souligné le fait qu'à l'origine se trouve une « idée créative » dans une innovation (Ettlie, 2000). C'est donc la capacité à générer des découvertes, des inventions et donc des innovations ; c'est-à-dire à produire des solutions qui sont évaluées comme étant créatrices parce qu'elles sont jugées : nouvelles (Henderson & Clark, 1990) (Sass & Oxman, 2006) (Yan et al., 2009), originales (Yan et al., 2009) (De Martino et al., 1998), inattendues (Laverne et al., 2017) (De Martino et al., 1998) et non évidentes (Chua et al., 1999). Kudrowitz et Wallace présente dans le tableau 2 plusieurs recherches d'évaluation des solutions selon des critères de créativités (Kudrowitz & Wallace, 2013).

Study	Summary	Products in review	Dimensions of creativity				
Dean <i>et al.</i> (2006)	Review of 90 constructs for idea evaluation	Ideas (e.g. increase tourism in Tucson)	Novelty (originality, paradigm relatedness)	Workability (acceptability, implementability)	Relevance (applicability, effectiveness)	Specificity (implicational explicitness, completeness and clarity)	
Besemer and O'Quin (1986, 1999) ^a	Objective metric for creative product evaluation	Artefacts (chairs)	Novelty (surprising, original)	Resolution (logical, useful, valuable, understandable)	Elaboration and synthesis (organic, well-crafted, elegant)		
Shah and Vargas-Hernandez (2000, 2003)	Evaluation of mechanical engineering designs	Artefacts and ideas (mechanical devices)	Novelty (unusual)	Quality (meets specifications)	Variety (explored solution space)	Quantity	
Horn and Salvendy (2006, 2009) ^a	Consumer-based assessment of product creativity	Artefacts (chairs and lamps)	Novelty (frequency, rarity)	Importance (relevance, significance)	Affect (appeal, desire, attraction, delight, stimulation, etc.)		
Amabile (1982) ^b	Subjective assessment method of creativity	Artefacts (artwork and poetry)	Creativity (as determined by appropriate judges)	Creativity Cluster (novel material use, novel idea, effort, detail, etc.)	Technical cluster (technical goodness, organisation, neatness, etc.)	Aesthetic judgment (liking, aesthetic appeal, would you display it?)	
Christiaans (2002) ^b	Creativity as one metric of design review	Artefacts (cabinets and telephone booths)	Creativity (as determined by appropriate judges)	Technical quality	Attractiveness	Interest	Goodness of example

^aIn these studies, each of the dimensions are made up of many sub-dimensions in the form of bipolar adjective scales.

^bIn these studies, the assessment dimensions in addition to 'creativity' do not determine creativity, but were used to find correlations with creativity.

Tableau 2 : Recherches présentant une évaluation des solutions selon des critères de créativité (Kudrowitz & Wallace, 2013)

La créativité peut être évaluée de manière différente par différents acteurs, en particulier par le concepteur et le consommateur/usager. On parlera d'innovation quand le concepteur et le consommateur jugeront un produit comme créatif.

La créativité est un processus qui pourrait être modélisé à l'instar de la conception. Cependant, si les modèles de conception sont tirés des pratiques de l'ingénierie, les modèles de création sont fortement influencés par les sciences cognitives. Pourtant, on peut noter des similitudes entre les deux catégories de modèles (Howard *et al.*, 2008) ; même si le processus de conception a vocation à déboucher sur un produit complet, alors que le processus de créativité se situe plus au niveau des idées et des concepts. Ainsi nous parlons de créativité et de conception mais chacun se situe à un niveau différent : la créativité se situe au niveau des idées et des concepts donc à niveau encore abstrait, tandis que la conception se situe au niveau du produit donc à niveau concret. Bien que la créativité soit issue des sciences cognitives et la conception des sciences de l'ingénierie, les processus de créativité et de conception sont strictement identiques, ce sont des processus informationnels alternant des phases d'information, de génération et de décision (Bouchard & Aoussat, 2002) (figure 19).

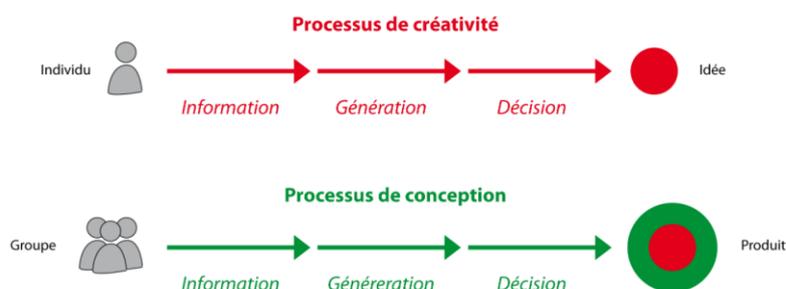


Figure 19 Similitudes entre les processus de créativité et de conception (Bila Deroussy, 2015)

Selon les études, différents facteurs sont identifiés comme pouvant influencer la créativité. Ces divers facteurs peuvent être regroupée en catégories : le contexte extérieur, les moyens et outils mis à disposition et utilisés, la personnalité du créateur, la connaissance et les informations à la portée du créateur. Mais certains facteurs, tels que les inhibiteurs de la créativité, peuvent au contraire limiter le processus de créativité des personnes et, de ce fait, freiner l'innovation (Liedtka, 2015). L'enjeu en phase amont est donc d'identifier et d'atténuer ces inhibiteurs afin d'assurer la créativité et l'innovation.

Inhibiteurs de la créativité

Les études font apparaître trois catégories d'inhibiteurs de la créativité ; ceux relatifs à la psychologie individuelle (biais cognitifs), ceux relatifs à la psychologie de groupe (pensées groupales) et enfin les facteurs de nature institutionnelle et organisationnelle (logiques organisationnelles).

- Les biais cognitifs :

Nombreuses sont les études qui montrent le poids des biais cognitifs dans la psychologie individuelle. Le tableau 3 présente plusieurs biais pouvant bloquer la créativité en conception de produits (Kahneman, 2012).

Biais	Explications
Le biais de confirmation	C'est la tendance à prendre en considération seulement les informations qui confirment ses croyances et ignorer celles qui les contredisent.
Le biais de croyance	C'est quand le jugement sur la logique d'un argument est biaisé par la croyance en la vérité ou en la fausseté de la conclusion, même avec des arguments logiques.
L'excès de confiance	C'est la tendance à surestimer ses capacités et à s'estimer comme ayant une intelligence supérieure à la moyenne.
Le biais de négativité	C'est la tendance à donner plus de poids aux expériences négatives qu'à celles positives et à s'en souvenir davantage.
Le biais de cadrage	C'est la tendance à être influencé par la manière dont un problème est présenté.
Le biais d'ancrage	C'est la tendance à utiliser à tort une information comme référence. Il s'agit souvent de la première information acquise sur le sujet.
Le biais de représentativité	C'est un raccourci mental qui consiste à porter un jugement à partir de quelques éléments qui ne sont pas nécessairement représentatifs.
Le biais de statu quo	C'est la tendance à préférer laisser les choses telles qu'elles sont, un changement apparaissant comme apportant plus de risques et d'inconvénients que d'avantages possibles.
L'illusion de savoir	Cela consiste à se fier à des croyances erronées pour appréhender une réalité et à ne pas chercher à recueillir d'autres informations
Le biais de conformisme	C'est la tendance à penser et à agir comme les autres le font.
L'effet boomerang	C'est le phénomène selon lequel les tentatives de persuasion ont l'effet inverse de celui attendu.

Tableau 3 Liste de biais pouvant limité la créativité en conception de produits (Kahneman, 2012)

Ces biais cognitifs orientent le raisonnement et le jugement, et peuvent se révéler des inhibiteurs puissants à la créativité.

- La pensée groupale :

Le phénomène de la pensée groupale a été conceptualisé par Irving JANIS. La pensée groupale est illustrée par le fait que le groupe cherche prioritairement à préserver sa cohésion, avec pour conséquence directe la tendance à rejeter toute idée originale qui pourrait mettre à mal cette cohésion : « un mode de pensée [...] quand le désir d'unanimité des membres outrepassent leur motivation à concevoir d'autres solutions de façon réaliste » (Janis, 1972). Les effets négatifs de la pensée groupale sur la créativité dans le cadre d'un processus de conception peuvent être

très importants car un processus de conception de produits s'effectue presque toujours en groupe.

- Les logiques organisationnelles :

Au sein d'une entreprise, le potentiel de créativité est déterminé aussi par le contexte environnemental propre à l'organisation et au fonctionnement de l'entreprise. Découlant directement des pratiques propres à une entreprise, il peut se développer des coutumes, des intérêts corporatistes, des habitudes et des routines qui sont un ensemble de frein à la créativité (Besançon & Lubart, 2015). À ce titre, il importe de souligner le poids de l'histoire de l'entreprise, l'influence du passé comme référence ; les singularités d'un cas particulier peuvent se transformer en principes généraux (Midler, 2012). Ainsi, l'inhibition à la créativité au sein d'une entreprise ne peut s'expliquer uniquement par la psychologie des individus, les enjeux de pouvoir, « mais aussi, et peut être surtout, des procédures mises en place, des outils de gestion utilisés [...] Il existe une "technologie invisible" » (Berry, 1983). A noter aussi les contraintes hiérarchiques, où dans un processus de conception, il peut être difficile d'argumenter pour une solution différente de celle proposée par une personne plus haute dans la hiérarchie de l'entreprise.

Pour atténuer ses inhibiteurs de la créativité et ainsi aider les concepteurs à être plus créatifs durant les phases amont de conception, il existe plusieurs méthodes et outils.

2.1.3 Méthodes et outils de stimulation de la créativité

De nombreuses études ont été menées sur la génération d'idées créatives en conception de produits, et certains auteurs ont mis en avant que l'utilisation de stimuli à la créativité permet de plus facilement dépasser les inhibiteurs de la créativité (G. S. Altshuller, 1999) (Howard et al., 2011). Les innovations sont rarement des idées totalement nouvelles, elles sont plutôt conçues à partir de combinaisons d'idées existantes grâce à des processus de créativité comme : la bissonation, consistant à mettre en relation des univers hétérogènes en vue de faire jaillir des idées inattendues ; l'analogie, consistant à penser par comparaison et par métaphore ; l'associations d'idées, à partir d'ensembles hétéroclites d'objets, de mots, d'images ; ou la déconstruction, consistant à décomposer le problème vers des problèmes plus simples (Perez et al., 2019). Ces processus de créativité permettent de forcer l'innovation par l'apport d'une

source externe de créativité, obligeant les concepteurs à se détacher de l'exclusivité de leurs idées et donc des biais cognitifs associés (Howard et al., 2010).

Parmi les méthodes et outils stimulant la créativité par l'apport d'une source externe, on peut citer certains outils de créativité comme la matrice de découverte, la théorie TRIZ ou bien l'utilisation de représentations stimulant la créativité.

Matrice de découverte

La matrice de découverte est un outil très répandu dans les séances de créativité. Cet outil consiste à croiser des variables de deux univers différents afin d'arriver à de nouvelles idées (figure 20). Il peut être pertinent par exemple de confronter des éléments en lien avec le problème de conception étudié et des éléments venant d'un autre secteur. Cet outil s'appuie sur la méthode synectique, et en particulier sur l'analogie directe consistant à mettre en parallèle des faits, des connaissances ou des disciplines différentes (Gordon, 1961).

Moyens de transport / Énergies	Voiture	Train	Vélo	Trottinette
Pétrole	X	X	X	
Solaire	???		???	???
Humaine		???	X	X
Électrique	X	X	X	X

Figure 20 Exemple de matrice de découverte (Debois et al., 2015)

TRIZ

TRIZ est une théorie de la créativité conçue pour résoudre les problèmes d'innovation. TRIZ est un acronyme russe qui signifie "Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs".

Un ingénieur en brevets, Genrich Altshuller, a créé cette théorie dans les années 1940 lorsqu'il a découvert, grâce à un très grand nombre de brevets, que de nombreux problèmes présentaient des similitudes entre eux (G. S. Altshuller, 1984) (G. Altshuller et al., 1996). Par conséquent, Altshuller souligne qu'il est possible de proposer des solutions analogues. L'objectif de TRIZ est de favoriser la créativité et de stimuler la recherche de concepts innovants par un processus

de déblocage de l'inertie mentale. TRIZ ne se base pas sur l'intuition mais sur la logique et les données, ce qui permet de résoudre les problèmes de manière créative (G. S. Altshuller, 1999). Le processus TRIZ s'articule autour d'outils qui encouragent les concepteurs à rechercher l'idéalité en surmontant les contradictions internes. Les contradictions peuvent être techniques ou physiques. Décrire les problèmes comme des contradictions signifie qu'en améliorant une variable, on nuit à une autre et vice versa.

La résolution des problèmes au sein de TRIZ est la question centrale de cette théorie. Moehrle définit cette question en utilisant un modèle en quatre phases (Moehrle, 2005) (Figure 21) :

- 1- Une analyse détaillée du problème spécifique (cette phase est similaire à d'autres approches créatives).
- 2- Une modélisation du problème spécifique avec un problème abstrait.
- 3- Une recherche d'une solution abstraite qui résout le problème abstrait.
- 4- Une interprétation de la solution abstraite pour le problème spécifique afin de trouver une solution spécifique.

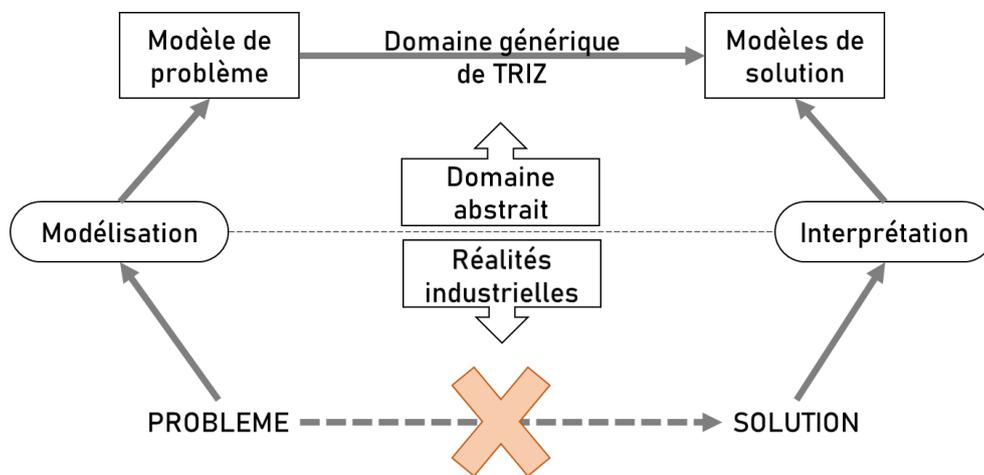


Figure 21 Démarche du processus de TRIZ (G. S. Altshuller, 1999)

Cette approche en quatre phases permet de surmonter les limites des techniques formalisées d'aide à la créativité qui font que la qualité et l'efficacité des solutions générées dépendent fortement des participants (Kavadias & Sommer, 2009). L'inertie psychologique est forte, et les solutions seront fortement influencées par certaines personnes du groupe. Travailler avec TRIZ sur le domaine abstrait (problème abstrait et solution abstraite) permet de limiter ces biais.

TRIZ est une méthode, mais peut aussi être défini comme une philosophie de la conception ; Mann présente la philosophie TRIZ en 4 piliers : la recherche de l'idéalité ; l'utilisation maximale des ressources existantes ; la définition des fonctions ; et l'élimination des contradictions (Mann, 2000).

L'idéalité est l'un des concepts les plus forts de TRIZ. Le rapport entre les fonctions utiles du système et la somme des fonctions nuisibles définit l'idéalité d'un système. Afin d'améliorer l'idéalité, l'utilité du système doit être augmentée et les inconvénients diminués. L'état idéal d'un système est celui où toutes ses fonctions sont réalisables sans poser de problèmes. On obtient le système "parfait" : le meilleur, le plus rapide, le plus efficace, le plus esthétique, le plus économique, etc. Selon la théorie TRIZ, cet état d'idéalité n'existe pas de manière tangible. L'objectif est de se rapprocher de l'idéalité. A travers les fonctions du système, on arrive à une idéalité relative, à un niveau physiquement réalisable.

La recherche de l'idéalité tourne autour d'une segmentation du concept de produit idéal en plusieurs fonctions.

La limite de cette théorie est que l'ensemble du processus TRIZ est souvent difficile à appliquer sans un expert (Cavallucci & Khomenko, 2007). En effet, TRIZ ne propose pas une approche étape par étape pour atteindre un résultat souhaité. Les piliers de la philosophie TRIZ, ainsi que les outils TRIZ, sont un ensemble de possibilités qui peuvent souvent être complétées par d'autres outils de créativité.

Représentations stimulant la créativité

Les représentations sont aussi un moyen important de forcer la créativité par l'apport d'un élément extérieur. Les représentations sont principalement sous forme d'image ou d'objets. L'utilisation d'objets manipulables permettent de manifester des sens faisant passer les raisonnements centrés sur les problématiques techniques au second plan ; les domaines d'expertises habituels deviennent moins importants que les émotions et les ressentis activées par la manipulation (Rias et al., 2017). La manipulation permet donc aux concepteurs d'enrichir leurs idées dans la phase de divergence tout en restant dans du techniquement faisable. Pour transmettre des informations qui vont pousser les concepteurs à re-catégoriser leurs connaissances, les concepteurs ont besoin de matérialisations extérieures (Schön, 2017). Cet

apport permet un enrichissement des connaissances qui entraîne une amélioration des moyens de communication et d'expression de solutions (Bernèche & Plante, 2009).

Boujut introduit le concept d'« objets intermédiaires » pour nommer les représentations tangibles servant à stimuler la créativité en conception (Boujut & Blanco, 2003). Cruz et al. présentent le rôle des objets intermédiaires en phases amont de conception de produit en distinguant les objets dits ouverts et les objets dits fermés. Les objets ouverts ne sont pas destinés à incarner des solutions de conception, leur rôle est purement de stimuler la créativité, alors que les objets fermés valident certaines solutions de conception sous forme de maquettes ou de prototypes par exemple (Cruz & Gaudron, 2010).

Les objets ouverts peuvent être sous forme de fiches, de cartes ou d'objets (figure 22).



Figure 22 Exemple de représentations d'aide à la créativité sous forme d'objets ou de cartes^{8,9}

La production des idées et des solutions proposées par les concepteurs résulte alors d'une interaction entre leurs connaissances antérieures et les connaissances apportées par les représentations extérieures. Les objets ont pour rôle à la fois de transmettre une information aux concepteurs tout en créant un potentiel de discussion entre eux ; l'objectif n'est donc pas de forcer les choix des concepteurs (Boujut & Blanco, 2003). L'information transmise par l'objet a vocation à être reconstruite, retravaillée et interprétée par les concepteurs. Les expériences vécues par les utilisateurs des objets sont un enjeu majeur de la relation entre le concepteur et les objets (Mattelmäki, 2006). En plus de la connaissance transmise, la manipulation de l'objet entraîne des situations, actions, émotions et motivations qui vont affecter le processus de créativité et l'exploration de solutions. Les expériences sensori-

⁸ <https://etapes.com/a-la-rencontre-des-jeunes-designers-diplomes-de-l-ensci/>

⁹ <https://www.metacartes.cc/>

motrices vont déclencher chez le concepteur, la construction d'images mentales et externes qui elles-mêmes sont le moteur du processus créatif (Rias et al., 2017). Certains objets, nommé « technology probes » ou « experience prototype », vise à générer des idées aux participants d'une séance de créativité tout en leur faisant découvrir, par la manipulation, les potentiels d'une technologie (Mattelmäki, 2006) (Hutchinson et al., 2003) (Buchenau & Suri, 2000).

Les objets de stimulation de la créativité présentent plusieurs caractéristiques (Schön, 2017) (Mattelmäki, 2006) (Cruz & Gaudron, 2010) :

- Un caractère exploratoire : ils ont pour enjeux d'orienter les concepteurs vers des connaissances ou des univers pouvant apporter de nouveaux potentiels de résolution de problèmes. L'idée est de ne pas rester dans les connaissances et la culture traditionnelle de l'entreprise.
- Un caractère ludique (« playfulness ») : ils ont pour objectif de créer une atmosphère conviviale entre les concepteurs, leur permettant de ne pas se sentir restreints dans leur créativité. L'association avec le jeu permet de mieux sortir des réalités industrielles et d'oser aller vers des directions « plus folles ».
- Un caractère original (« innovativeness ») : ils ont pour enjeux de modifier la manière de travailler en créant une manière de travailler nouvelle et inattendue.
- Un caractère interactif : ils ont pour rôle de forcer les concepteurs à interagir entre eux, à discuter et à participer. Ils permettent aussi de transmettre des connaissances par la manipulation, ce qui permet à l'utilisateur de devenir acteur dans sa manière de se former.

L'utilisation d'objets manipulables en phases amont de conception va permettre de manifester des sens court-circuitant les inhibiteurs de la créativité, et les domaines d'expertises habituels deviennent moins importants que les émotions et les ressentis activées par la manipulation. La manipulation permettra donc aux concepteurs d'enrichir leurs idées dans la phase de divergence tout en restant dans du techniquement faisable.

2.1.4 Synthèse de l'état de l'art sur la créativité en conception

L'état de l'art sur la créativité en conception, à travers un processus de raisonnement partant des processus de conception jusqu'aux méthodes et outils de stimulation de la créativité, a permis de faire émerger des observations pour l'intégration de la FA en conception de produits, et d'énoncer 2 constats qui nous serviront dans l'élaboration de notre méthodologie (figure 23).

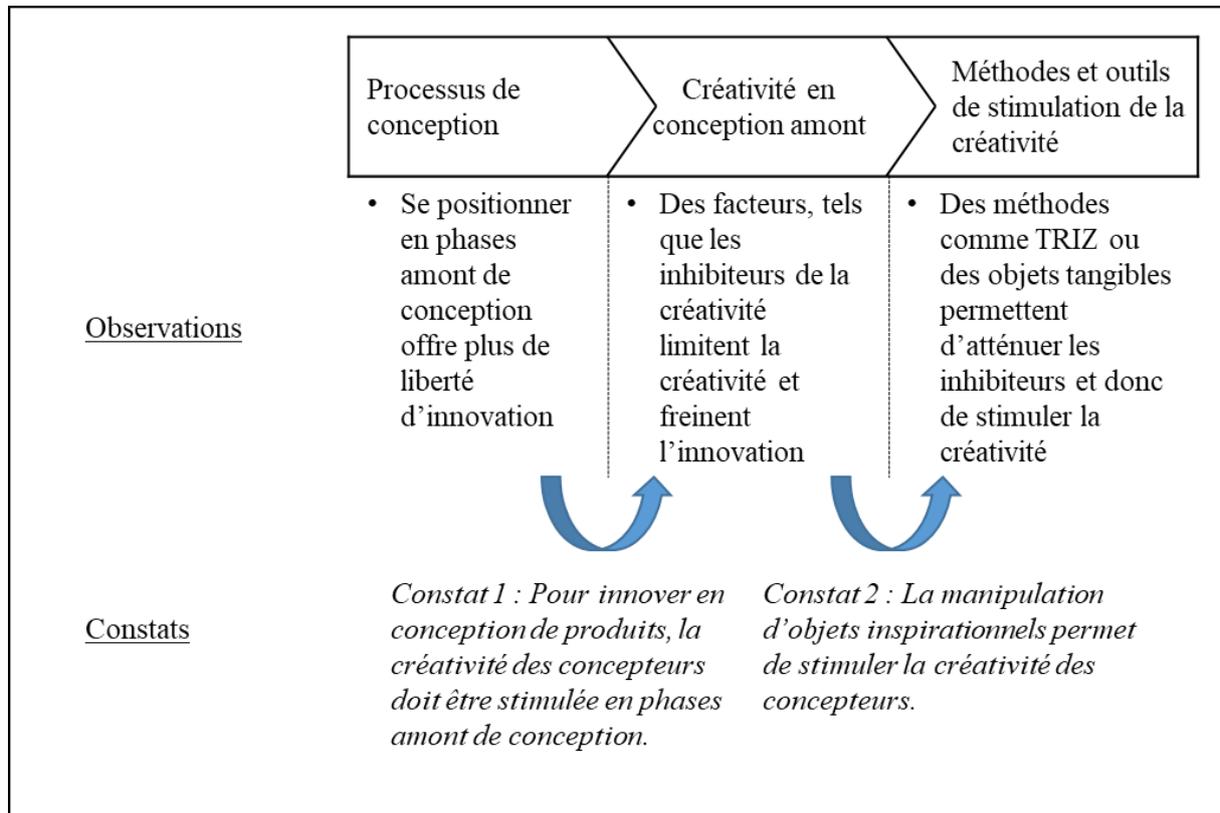


Figure 23 Synthèse de l'état de l'art sur la créativité en conception

Cette partie de l'état de l'art a permis de définir l'importance de la créativité dans les phases amont de processus de conception de produits et de révéler l'efficacité des objets manipulables pour stimuler cette créativité. Pour intégrer la FA en conception de produits, les observations et les constats de cette partie devront être pris en compte dans une approche de conception dédiées FA. C'est pourquoi, dans la partie suivante, seront présentés les différentes approches existantes de conception dédiées FA, ce qui permettra de mettre en avant les différentes limites des approches existantes.

2.2 Approches de conception dédiées fabrication additive

Dans cette partie, seront présentés les approches de Design For Additive Manufacturing (DFAM), les approches de Design With Additive Manufacturing (DWAM), l'approche de (Creativity Through Additive Manufacturing) jusqu'aux approches cherchant à stimuler au maximum la créativité avec des représentations tangibles (figure 24).

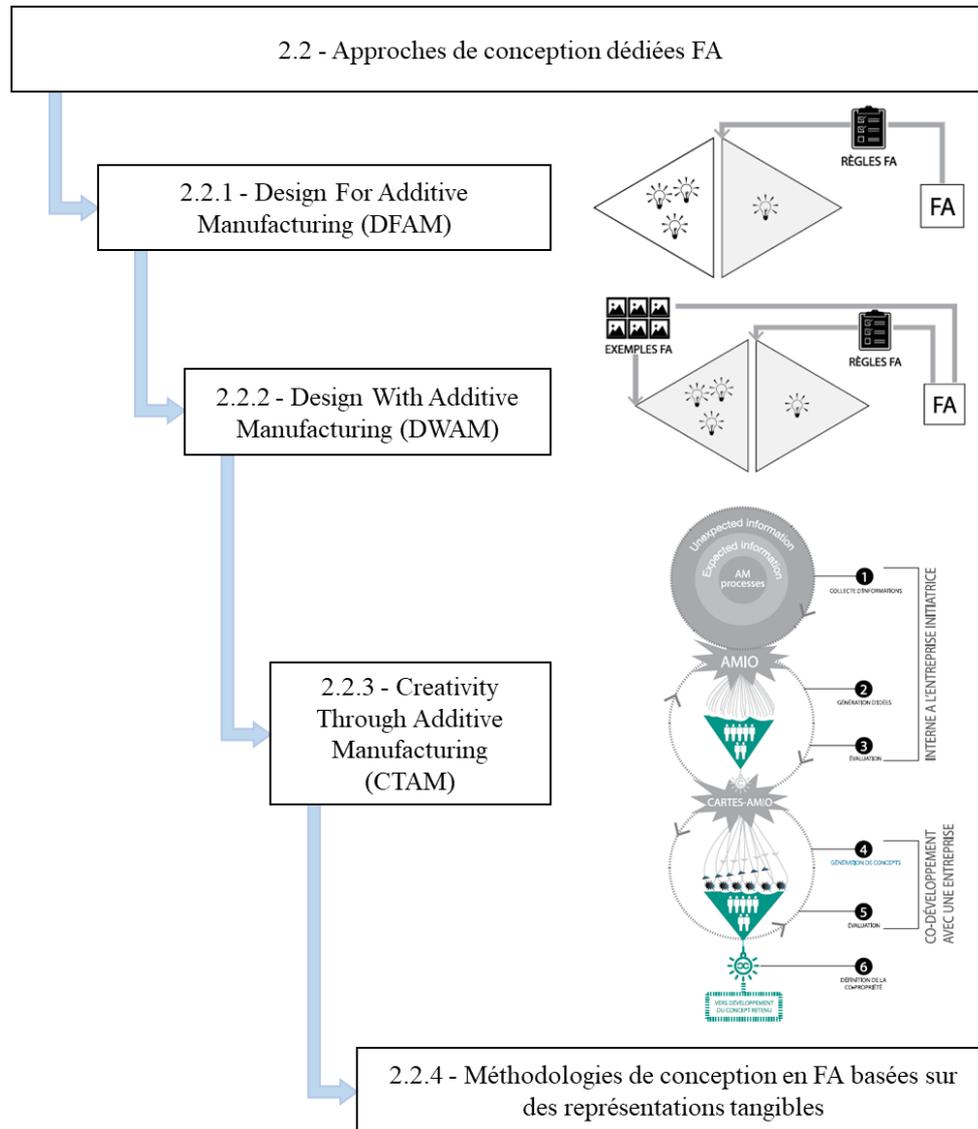


Figure 24 Plan de la partie sur les approches de conception dédiées fabrication additives

2.2.1 Design For Additive Manufacturing (DFAM)

Afin d'exploiter et de mettre à profit la fabrication additive dans un objectif d'innovation de produits, il est devenu impératif de structurer et de développer des outils et méthodes de conception par la fabrication additive pour les équipes de conception. Dans le but de stimuler

la créativité par la fabrication additive, le concepteur a besoin d'une méthodologie outillée, permettant de prendre en compte les spécificités liées à ces nouveaux procédés de fabrication, afin de s'affranchir des barrières cognitives imprimées dans l'inconscient collectif des équipes de conception. Dans ce but, plusieurs travaux s'intéressent au Design For Additive Manufacturing (DFAM) afin de développer des supports méthodologiques répondant aux besoins de promouvoir le potentiel de la fabrication additive.

Les approches DFAM sont « l'ensemble des méthodologies et outils aidant les concepteurs à prendre en compte les spécificités de la fabrication additive (technologique, géométrique, pré- et post-traitement...) lors des phases de conception » (Laverne et al., 2014). Ces méthodes ont pour objectif de permettre aux concepteurs d'exploiter les propriétés propres à la fabrication additive dans le but d'apporter une valeur supplémentaire pour les entreprises et les utilisateurs (Klahn et al., 2015). Les méthodes DFAM présentes dans la littérature peuvent être classées en 2 catégories : les méthodes DFAM orientées conception et les méthodes DFAM orientées fabrication (Kumke et al., 2016). Les approches DFAM, orientées conception, présentent les directives, les règles de conception, les outils et les méthodes pour aider les concepteurs à exploiter le potentiel de la technologie de FA. Les méthodes DFAM, orientées fabrication, vont plutôt présenter aux concepteurs les spécificités à prendre en compte pour la fabrication. Ces spécificités sont propres au type de matériau et au type de procédé choisi. Les deux catégories de DFAM peuvent être associées car elles ne sont pas utilisées exactement au même moment dans le processus de conception ; celles orientées conception précèdent celles orientées fabrication.

Laverne et al. vont plus loin sur ces deux catégories de DFAM en proposant les notions de DFAM Opportunité et de DFAM Contrainte (Laverne et al., 2015) (figure 25).

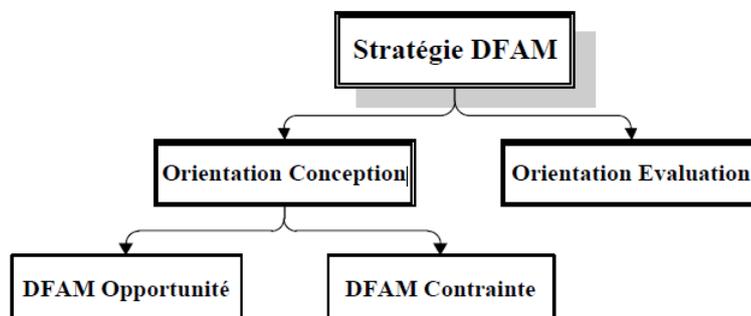


Figure 25 Place des DFAM Contrainte et Opportunité dans la stratégie DFAM (Laverne et al., 2015)

DFAM Opportunité

Les DFAM Opportunité sont les méthodologies qui s'intéressent exclusivement à l'utilisation du potentiel de la FA. Elles présentent donc une approche opportuniste avec pour objectif d'aider les concepteurs en leur apportant de nouveaux espaces de solutions. Ces méthodes s'appuient souvent sur la créativité afin d'amener les concepteurs vers des solutions sortant des procédés traditionnels.

Afin de s'assurer que les concepteurs ne puissent pas être contraints, les méthodologies s'appuient sur deux principes fondamentaux (Hague et al., 2003) (Dobrovski et al., 2011) : il n'existe pas de limitation de forme, de choix de matériaux ou de répartition, et les coûts de fabrication d'un produit sont indépendants de toute forme ou complexité géométrique.

L'objectif de ces DFAM est de détacher les concepteurs de connaissances issues des procédés traditionnels afin de pleinement pouvoir exploiter le potentiel de la FA d'un point de vue géométrique, hiérarchique, fonctionnelle et matériau.

De nombreuses DFAM Opportunité sont dédiées à un seul potentiel de la FA. Certaines vont chercher à optimiser la géométrie à travers de l'optimisation topologique et paramétrique (Vayre et al., 2012) (Rosen, 2007) (Fey et al., 2009) ; d'autres vont chercher à diminuer ou supprimer les processus d'assemblage en s'appuyant sur les géométries complexes qu'offrent la FA (Rodrigue & Rivette, 2010). On peut citer par exemple les travaux de Rodrigue et Rivette qui ont proposé une méthodologie combinant le Design for Assembly et la conception en FA. Cette méthodologie propose un processus commençant par la détermination des pièces d'un assemblage pouvant être consolidées. Les concepteurs redessinent le produit en une unique pièce en s'appuyant sur la théorie TRIZ et sur un logiciel d'analyse par éléments finis. Quant aux DFAM cherchant à optimiser les géométries, elles suivent souvent le même processus. Dans un premier temps, il est important de définir le volume d'étude ; ensuite, les efforts et les chargements sont définis ; puis, l'étape suivante est d'optimiser la matière afin de réduire la matière où elle est peu ou pas contrainte mécaniquement dans un but de diminuer la masse globale ; enfin, il est important de valider la géométrie obtenue après optimisation afin de s'assurer que le produit répond aux exigences mécaniques (Rosen, 2007) (Fey et al., 2009)(Rodrigue et al., 2015).

DFAM Contrainte

Les DFAM Contrainte ont pour objectif d'aider les concepteurs à assurer que leurs pièces seront réalistes et réalisables en FA. Ainsi, ces méthodes sont plus restrictives car le but n'est plus d'imaginer une solution créative mais vraiment d'assurer la validité de la pièce pour cette technologie.

Pour ce type de méthodologie, les contraintes qui vont être présentées portent sur les capacités et les caractéristiques de machines de fabrication additive (dimensions, niveau de résolution et de finition...) (Choi & Chang, 2005), sur les contraintes de matériaux (choix du matériau, comportement du matériau, propriétés mécaniques) (Alimardani et al., 2007) (Rafi et al., 2013) (Ahn *et al.*, 2002) (Muller et al., 2013) et sur les contraintes du procédé (besoin de support, orientation de la pièce, post-traitement) (Strano et al., 2013).

Les DFAM Contrainte étant plus focalisées sur la phase de fabrication, elles peuvent être utilisées à la suite d'une DFAM Opportunité afin d'assurer la fabrication à partir des solutions de cette dernière.

Approches DFAM

Renjith et al. présentent le tableau 4 comprenant les approches récentes de DFAM pour les décisions de conception (Renjith et al., 2020).

Literature	Design problem analysis	Idea generation	Design phase*			AMCs considered in conceptual phase?
			C	E	D	
Rodrigue and Rivette	□	TRIZ	■	■	□	■
Bin Maidin et al.	□	Design feature database	■	□	□	■
Vayre et al.	Parametric optimization	□	■	■	■	■
Boyard et al.	3D modular graph	□	■	■	□	□
Klahn et al.	□	□	■	■	■	□
Laverne et al.	□	Brainstorming	■	□	□	□
Salonitis and Zarban	Specification analysis	□	■	■	■	■
Kumke et al.	DfAM based on VDI2221	Catalogues, feature database	■	■	■	■
Rias et al.	□	Forced association	■	□	□	□
Ko et al.	Finite state automata	□	■	■	□	■
Salonitis	Axiomatic design	□	■	□	□	■
Bikas et al.	Topological optimization	□	■	■	■	■
Kamps et al.	TRIZ	Biomimicry database	■	□	□	■
Sossou et al.	Functional analysis, additive manufacturing contextualization	□	■	■	■	■
Zaman et al.	Multi-criteria decision making	Material process selection database	■	□	□	■

*C: conceptual phase; E: embodiment phase; D: detailed phase; □: not covered; ■: partially covered; ■: covered in detail; AMC: additive manufacturing capability

Tableau 4 Approches DFAM récentes pour les décisions de conception (Renjith et al., 2020)

Les phases de conception incluses dans ce tableau couvrent les trois phases principales d'une méthodologie de conception pour la fabrication additive (Laverne et al., 2017) :

- La phase conceptuelle (phase d'inspiration), au cours de laquelle les principes de base de la solution d'un problème de conception sont identifiés pour s'éloigner du problème initial ou de la conception initiale dans le cas de re-conception.
- La phase de développement (phase d'idéation), au cours de laquelle sont développés les premiers axes d'idées.
- La phase d'approfondissement, au cours de laquelle la conception est affinée pour atteindre un concept.

Plusieurs approches mettent en avant l'importance d'intégrer la connaissance relative à la FA. La notion de la connaissance se distingue de celles de la donnée et de l'information (Zins, 2007). La donnée est un élément brute (nom, chiffre, symbole...); l'information correspond à une donnée dans un contexte particulier; et la connaissance résulte de la rencontre d'une information avec un individu. L'apport de la connaissance est très important en créativité car une innovation s'appuie sur des connaissances (Christiaans, 2002), ainsi, il sera nécessaire

d'introduire les connaissances relatives à la FA (KFA) dans un processus de conception dédié à la FA (Laverne, 2016). De nombreuses méthodologies insistent sur l'importance de transmettre des connaissances sur la technologie durant les phases amont de conception, et pourtant peu d'entre elles proposent un système d'aide permettant aux concepteurs d'identifier le potentiel de la FA pouvant les aider à solutionner leur problème. Si le potentiel de la technologie de FA est peu connu, alors les concepteurs ne pourront pas l'intégrer efficacement dans leurs idées et concepts si la méthodologie ne force pas cette transmission et adoption de la FA.

Malgré les avantages que peuvent offrir les cadres des méthodologies DFAM existantes, la manière de permettre aux concepteurs de mieux intégrer le potentiel de la FA dans la conception des produits n'est pas clairement abordée ; les connaissances FA proposées dans une approche de conception doivent être au « juste besoin », c'est-à-dire proposer une connaissance dont la forme, le contenu, la représentation et l'instanciation seront adaptés aux besoins et aux particularités des concepteurs (Laverne, 2016). Cette prise en compte de la connaissance au juste besoin impose de structurer le potentiel de la FA pour le transmettre aux individus afin qu'ils puissent l'interpréter et se l'approprier. Ce passage de la structuration du potentiel de la FA vers l'interprétation et l'appropriation des connaissances FA impose une approche pédagogique au sein de l'approche de conception (Simpson et al., 2017) (Richter et al., 2018).

Peu d'études prennent réellement en compte le potentiel de la FA dans les phases amont de conception, comme on peut le voir sur le tableau 4. Certaines proposent tout de même une classification des capacités de la FA à travers une approche de conception associée à la théorie TRIZ (Kamps et al., 2017) (Renjith et al., 2020).

L'association entre TRIZ et la FA est de plus en plus fréquente dans les approches de DFAM, car TRIZ permet de proposer des principes d'innovation et ne s'appuie pas exclusivement sur les connaissances existantes des concepteurs comme le Brainstorming par exemple (Mazlan et al., 2021). La fabrication traditionnelle engendre un grand nombre de barrières cognitives au regards de la fabrication additive pour les concepteurs ; or comme TRIZ est basé sur la logique, il peut aider à surmonter ces barrières cognitives. Ainsi, plusieurs auteurs ont associé TRIZ aux méthodes de DFAM.

Certains auteurs utilisent TRIZ comme un outil de résolution de problèmes dans la DFAM, ou pour générer des idées qui peuvent conduire à des solutions innovantes dans les premières

phases de conception (Mawale et al., 2018) (Renjith et al., 2018) (Renjith et al., 2020) (Schulte et al., 2020). Kamps et al. proposent une méthodologie basée sur le domaine abstrait de TRIZ pour introduire les connaissances du biomimétisme dans la conception de produits en FA (Kamps et al., 2017).

Les outils de TRIZ ne peuvent à eux seuls fournir des solutions spécifiques à la fabrication additive car ils n'introduisent pas les spécificités de cette technologie. Les caractéristiques de la fabrication additive ne sont pas mises en évidence par cette théorie antérieure à la technologie. Ainsi, on observe que certains auteurs proposent des outils TRIZ réévalués à la technologie de FA. Certaines méthodes proposent des matrices TRIZ destinées à la fabrication additive. Dans ce cas, les capacités de la FA définissent les critères d'innovation (Gross et al., 2018) (Kretschmar & Chekurov, 2018).

Nous observons dans la littérature d'autres approches que les DFAM pour aider les concepteurs à intégrer les connaissances de la FA en conception de produits.

2.2.2 Design With Additive Manufacturing (DWAM)

Laverne propose une méthodologie sous l'appellation Design With Additive Manufacturing (DWAM) s'appuyant sur l'approche Design With X (DWX). L'approche DWX consiste à aider les concepteurs durant la phase de conception en intégrant les connaissances relatives à X, sans se limiter à cette technologie. L'objectif d'une approche DWX est de permettre d'informer les concepteurs sur les possibilités de X et donc d'étendre l'espace de solution sans pour autant imposer X comme la seule piste de réflexion envisageable. Une approche DWX est basée sur le modèle du double diamant et favorise la divergence tandis qu'une approche DFX va plutôt favoriser la convergence vers une solution unique. Ainsi dans un processus de conception, l'approche DWX précède l'approche DFX (figure 26).

L'avantage de la DWAM est donc qu'elle peut être utilisée dès les phases d'exploration du processus de conception donc au début du processus si on se réfère au modèle du double diamant ; en revanche, cette méthodologie n'a pas pour but d'orienter spécifiquement les concepteurs vers le procédé de FA, mais d'ouvrir le champ des possibles aux autres procédés existants.

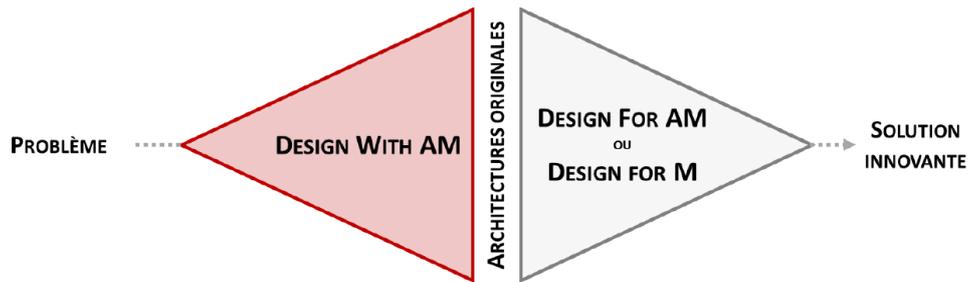


Figure 26 Approches DFAM et DWAM dans le processus de conception (Laverne et al., 2017)

2.2.3 Creativity Through Additive Manufacturing (CTAM)

Certaines recherches vont tenter de regrouper dans leurs méthodologies les approches de DFAM et de DWAM. Nous pouvons par exemple citer les travaux de Rias avec son modèle de créativité par et pour la fabrication additive (Rias et al., 2017). Cette méthodologie a pour objectif de lier la créativité et la fabrication additive et de donner aux concepteurs l’opportunité de « faire l’expérience de la fabrication additive ». Cette méthodologie s’inscrit dans le cadre théorique du Design Through Additive Manufacturing (DTAM), avec « through » signifiant à travers ou à la fois « par » et « pour ». L’approche DTAM intègre la FA dans les phases initiales du processus de conception, avec des informations sur la technologie définie en amont que doivent intégrer les concepteurs, ainsi qu’avec des informations qui émergent des concepteurs grâce à l’expérience qu’ils se font sur la technologie (Lim, 2003). La figure 27 schématise les différences entre les approches DFAM, DWAM et DTAM.

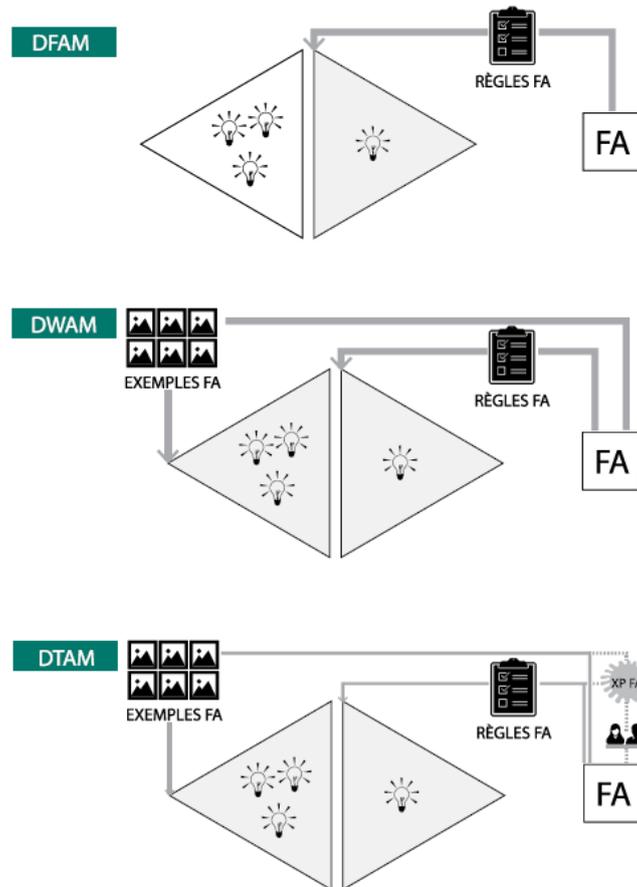


Figure 27 Schématisation des approches DFAM, DWAM et DTAM d'après Rias (Rias, 2017)

La prise en compte du « pour » et du « par » dans la méthodologie CTAM permet d'apporter à la fois les connaissances de bases requises pour intégrer cette technologie, plus les expériences que vont se créer les concepteurs avec cette nouvelle technologie. La particularité de cette méthodologie est qu'elle est destinée aux situations de co-développement entre une entreprise initiatrice de l'intégration et une entreprise partenaire peu experte en conception, en fabrication additive ou en créativité.

La méthodologie propose un processus en 6 phases comme nous pouvons le voir sur la figure 28.

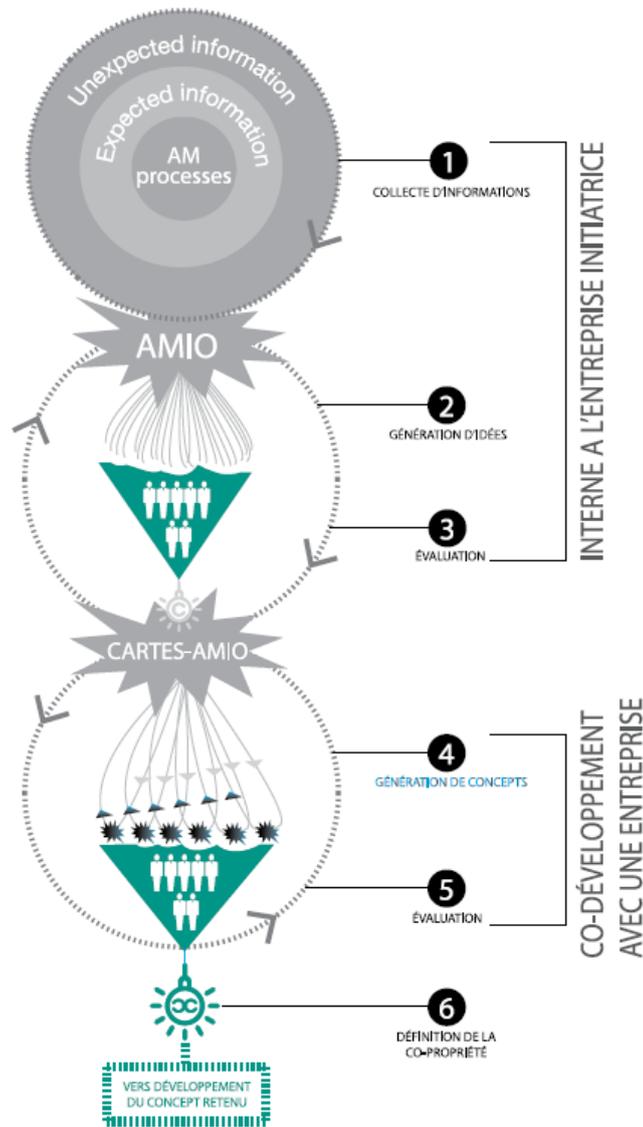


Figure 28 Modèle de créativité par et pour la FA (CTAM) développé par Rias (Rias, 2017)

- Phase 1 – Collecte d’informations : phase permettant aux concepteurs de disposer des connaissances de base de la FA. Les concepteurs collectent des informations en lien avec la FA et des informations issues d’autres domaines. A l’issue de cette phase, les concepteurs conçoivent des représentations tangibles (nommées AMIO) ayant pour finalité de traduire les informations recueillies durant la première phase et pouvant être manipulées en vue de la suite du processus. La figure 29 présente un objet typique en FA présentant une forme optimisée et l’AMIO dérivé comprenant des tubes creux avec un seul tube ouvert à son extrémité afin d’y entrer une bille d’acier.



Figure 29 Objet typique en FA (à gauche) et AMIO dérivé (à droite) (Rias, 2017)

- Phase 2 – Génération d'idées : phase idéation à la base des représentations tangibles permettant de stimuler la créativité des participants. La manipulation des AMIO vont déclencher des états d'étonnements et de surprise ouvrant l'imaginaire des concepteurs et donc leur créativité. La figure 30 représente le scénario de manipulation de l'AMIO présenté dans la phase précédente. Ce scénario consiste à avoir un aimant de petite taille disposé à côté de l'AMIO ; l'aimant étant peu visible au début, une fois l'AMIO manipulé, le concepteur comprend que cet aimant permet de faire sortir la bille d'acier des canaux.

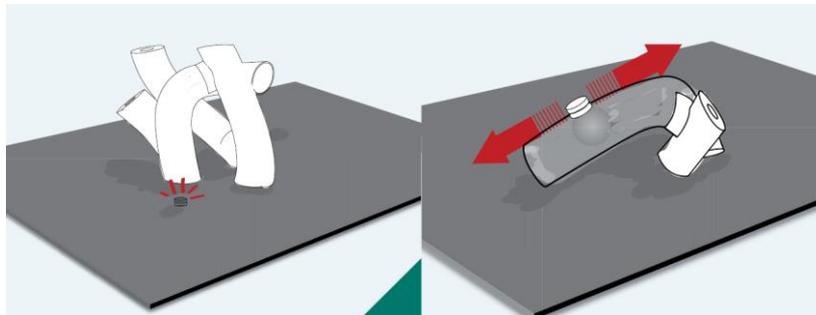


Figure 30 Scénario de manipulation de l'AMIO (Rias, 2017)

- Phase 3 – Evaluation : phase d'évaluation des fiches idées. A l'issue de cette évaluation, des représentations tangibles traduisant les idées sélectionnées sont conçus (nommées cartes-AMIO).
- Phase 4 – Génération de concepts : phase de développement de concepts en s'appuyant sur les représentations cartes-AMIO pour stimuler la créativité.
- Phase 5 – Evaluation : phase d'évaluation des concepts.
- Phase 6 – Définition de la co-propriété intellectuelle : phase d'évaluation de la propriété intellectuelle.

Cette méthodologie permet une forte stimulation de la créativité grâce à l'utilisation et à la manipulation de représentations tangibles. Nous observons que d'autres chercheurs se sont intéressés aussi à forcer l'utilisation de représentations tangibles dans les méthodologies d'aide à la conception en FA.

2.2.4 Méthodologies de conception en FA basées sur des représentations tangibles

Plusieurs auteurs ont exploré l'utilisation d'approches basées sur des cartes pour améliorer la créativité en FA. Les cartes représentent des caractéristiques du potentiel de la FA ou des objets en FA représentatifs de cette technologie (Valjak & Bojčetić, 2019) (Watschke et al., 2017) (Laverne et al., 2017). L'utilisation de représentations sous forme de cartes permet aux concepteurs d'avoir un point de départ pour leurs idées qui ne dépend pas des processus de fabrication traditionnels. Certains auteurs ont basé leur méthodologie autour d'un ensemble d'objets tangibles (Laverne et al., 2015) (Pradel et al., 2018) (Huang et al., 2015). L'objectif de ces objets est de guider les concepteurs vers le potentiel de conception de la FA.

La manipulation d'objets permet de se familiariser et de mieux comprendre les spécificités techniques de la FA. Les objets présents dans la littérature sont conçus soit comme des repères des possibilités pour un type de matériau (Huang et al., 2015), soit à travers un objet représentant une particularité de la FA présente sur une pièce existante (Watschke et al., 2017) (Pradel et al., 2018), soit à travers des conceptions heuristiques basées sur un ensemble de produits existants (Laverne et al., 2015).

Les méthodologies basées sur un ensemble d'objets tangibles sont présentées par des objets avec des designs de produits existants (Laverne et al., 2015) (Watschke et al., 2017), s'appuient sur des procédés de fabrication additive (Huang et al., 2015), ou tentent de présenter simultanément les capacités et les limites de la technologie (Laverne et al., 2017). La limite de ces méthodes est donc de ne pas avoir un niveau d'abstraction assez élevé pour la créativité et d'être plus ou moins adaptées selon les secteurs. Lors d'une approche créative dans la première phase de conception, il est important de sortir des architectures existantes, des contraintes et limites d'une technologie (Moroni et al., 2017).

La difficulté des méthodologies basées sur des objets tangibles est l'alliance entre des objets les plus neutres possibles, permettant un haut niveau d'inspiration créative, et des objets qui

présentent au mieux le potentiel de la FA en ayant une fonction formatrice sur cette technologie. Le défi d'une méthodologie basée sur des objets tangibles est de promouvoir la génération de solutions créatives tout en assurant l'exploitation du potentiel de la fabrication additive au cours des phases amont de conception.

2.2.5 Synthèse des approches de conception dédiées fabrication additive

L'état de l'art sur les approches de conception dédiées FA permet de définir les différentes approches existantes, de faire ressortir des observations générales, de mettre en avant des manques dans les approches existantes (tableau 5). Toutes ces informations nous ont permis d'énoncer deux constats qui nous serviront pour l'élaboration de notre méthodologie.

	Design For Additive Manufacturing (DFAM)	Design With Additive Manufacturing (DWAM)	Creativity Through Additive Manufacturing (CTAM)	Méthodologies de conception en FA basées sur des représentations tangibles
Définitions	Ensemble des méthodologies et outils aidant les concepteurs à prendre en compte les spécificités de la FA lors des phases de conception (Laverne et al., 2014)	Approche consistant à aider les concepteurs durant la phase de conception en intégrant les connaissances relatives à la FA, sans forcer son utilisation (Laverne et al., 2017).	Méthodologie liant la créativité et la FA en donnant aux concepteurs l'opportunité de faire l'expérience de la FA (Rias et al., 2017).	Approches s'appuyant sur l'utilisation de cartes ou d'objets permettant de stimuler les connaissances et la créativité en FA.
Observations	<ul style="list-style-type: none"> • L'ensemble des auteurs annoncent l'importance de transmettre les connaissances relatives à la technologie de FA durant les phases de conception, et pourtant ils ne proposent pas de structure permettant aux concepteurs d'identifier concrètement les connaissances au « juste besoin » pouvant les aider à interpréter le potentiel de la FA (Laverne, 2016). • Le passage de la structuration du potentiel de la FA vers l'interprétation et l'appropriation des connaissances FA par les concepteurs impose d'adopter une approche pédagogique au sein du processus de conception (Simpson et al., 2017) (Richter et al., 2018). • Les approches s'appuyant sur des objets tangibles en FA permettent de plus facilement favoriser la transmission des connaissances FA (Watschke et al., 2017). 			
Manques	<ul style="list-style-type: none"> • Les approches de conception dédiées FA ayant pour objectif de stimuler la créativité ne définissent pas le potentiel de la FA, ce qui limite la transmission des connaissances FA. • Les approches de conception dédiées FA ayant pour objectif d'apporter des connaissances FA vont introduire ces connaissances comme des contraintes et non comme des opportunités. • Aucune approche de conception dédiée FA est structurée afin d'apporter des connaissances FA (approche pédagogique) tout en stimulant la créativité (approche de créativité). • Les approches de conception dédiées FA s'intéressent seulement à la conception de produits sans prendre en compte le contexte de l'entreprise dans le processus d'intégration. 			
Constats	<p><i>Constat 3 : Une bonne intégration de la FA passera par une approche pédagogique associée à une approche de créativité afin de structurer et de transmettre le potentiel d'innovation de la FA aux concepteurs.</i></p> <p><i>Constat 4 : La manipulation d'objets en FA favorise l'interprétation et l'appropriation du potentiel de la FA durant le processus de conception.</i></p>			

Tableau 5 Synthèse de l'état de l'art sur les approches de conception dédiées FA

Cette partie de l'état de l'art a permis de faire ressortir le fait que les approches de conception dédiées FA se focalisent uniquement sur la conception de produits sans prendre en compte le

contexte global de l'entreprise qui peut influencer les décisions des concepteurs. C'est pourquoi dans la partie suivante nous allons nous intéresser aux processus d'intégration de la FA en entreprise, c'est-à-dire avec une vision plus macroscopique.

2.3 Intégration de la fabrication additive en entreprise

Il est important d'analyser l'intégration dans le contexte global de l'entreprise et non exclusivement au niveau des équipes de conception, pour observer si des éléments externes à la conception peuvent avoir une influence sur les décisions des concepteurs, voire même sur leur capacité à innover. Cette partie se décomposera en 3 parties : une introduction sur les processus d'intégration d'une nouvelle technologie, les facteurs de réussites d'une intégration technologique et les processus d'intégration de la FA présentés dans la littérature (figure 31).

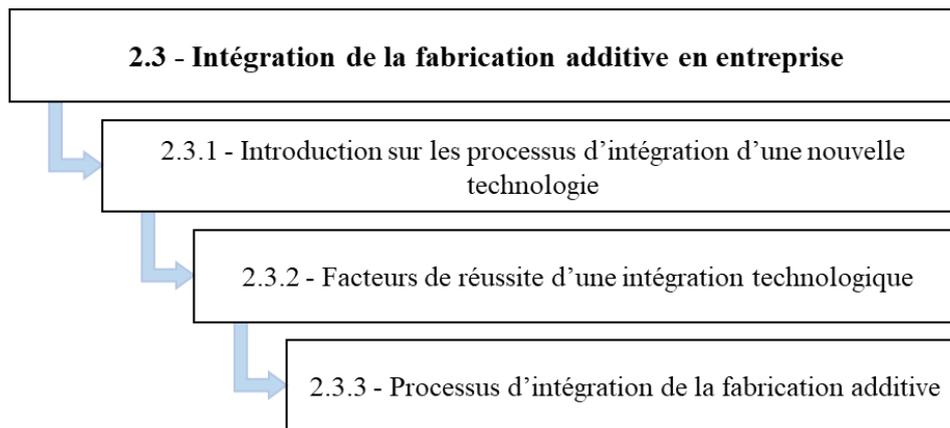


Figure 31 Plan de la partie sur l'intégration de la fabrication additive en entreprise

2.3.1 Introduction sur les processus d'intégration d'une nouvelle technologie

Pendant longtemps, le processus d'intégration d'une nouvelle technologie, et en particulier d'une nouvelle technologie de fabrication (ou procédé de fabrication) a peu été pris en compte dans le domaine de la recherche, aussi bien au niveau de la gestion organisationnelle que dans le management de l'innovation. Dans les années 1980, les chercheurs commencent à s'intéresser à l'intégration d'une nouvelle technologie comme un avantage concurrentiel. Il est important de s'intéresser aux travaux précurseurs de cette époque afin de comprendre les décisions et les orientations des travaux des chercheurs sur l'intégration des nouvelles technologies d'aujourd'hui et en particulier celles de l'industrie 4.0

Skinner introduit au début des années 1980, l'importance de prendre en compte dans la stratégie de l'entreprise le potentiel concurrentiel pouvant être apporté par les innovations de technologie de production et de fabrication (Skinner, 1984) (Skinner, 2007). Cette analyse des innovations technologiques suivait les études sur la prise en compte des procédés de fabrication comme un

élément central du fonctionnement et de l'organisation d'une entreprise industrielle et non juste comme un outil de réalisation des produits (Demeter, 2003).

A cette même période, Porter a introduit le fait que la stratégie d'une entreprise devait se définir en fonction de son positionnement par rapport à ces concurrents. Dans ce contexte concurrentiel, il définit que la technologie est une stratégie compétitive permettant à une entreprise de dépasser ses concurrents (Porter, 1985). Ce contexte de positionnement par rapport à la concurrence va modifier grandement les théories de la stratégie, et aujourd'hui les stratégies d'entreprises sont toujours basées sur ce positionnement.

C'est donc dans ce contexte qu'apparaît les premiers processus d'intégration d'une technologie de fabrication. En 1988, Voss propose le processus d'intégration d'un procédé comme un domaine d'étude distinct dans les domaines de la gestion et de la fabrication (Voss, 1988) (Deradjat & Minshall, 2017). Il met en avant le fait que les recherches existantes sont divisées en deux parties : les recherches sur les processus d'innovation (comment innover) et les recherches sur la diffusion des innovations (comment une innovation évolue sur le marché). Voss met en avant que l'ensemble de la recherche existante s'appuie sur une hypothèse qui est qu'une innovation développée avec succès va obligatoirement bien fonctionner dans ses futures utilisations. Pourtant, lorsqu'une innovation est complexe, comme par exemple avec une nouvelle technologie de fabrication, il est possible que cette innovation ne se diffuse pas car elle ne réussit pas à se faire adopter par les entreprises.

Ainsi, Voss propose un troisième champ de recherche qui est le processus d'adoption des innovations de procédés, ou intégration des procédés.

Ce processus d'intégration de procédé se compose en 3 phases (figure 32) :

- Une phase de pré-installation : durant cette phase, l'entreprise cherche à savoir si l'intégration de la technologie est un avantage pour cette dernière : l'intégration est-elle intéressante d'un point de vue économique et concurrentiel. Cette phase aboutit à une décision de continuer ou non le processus d'intégration de la technologie.
- Une phase d'intégration et de mise en service : c'est durant cette phase que la méthodologie d'intégration va être appliquée afin d'être capable d'assurer une bonne adoption de la technologie en accord avec le contexte de l'entreprise. C'est aussi dans cette phase que se posent toutes les questions organisationnelles et de logistiques.
- Une phase d'après mise en service : cette phase a pour objectif d'assurer le bon fonctionnement de l'intégration, l'évolution de l'intégration en fonction de l'évolution

de la technologie, du contexte industriel et la transmission des connaissances entre les concepteurs ayant été présents durant les phases précédentes et les nouveaux concepteurs.



Figure 32 Modèle des phases du processus d'intégration proposé par Voss (Deradjat & Minshall, 2017)

Les recherches sur le processus d'intégration d'une technologie étudient bien l'ensemble du cycle d'intégration, en particulier l'enjeu de l'adoption des connaissances vis-à-vis de la technologie. Il est aussi important, dans un processus d'intégration, de se poser les questions autour des avantages et des risques selon l'orientation de l'intégration ; une intégration d'une technologie peut être avantageuse pour un type de produit ou activité mais pas pour un autre. Il est primordial de fixer les objectifs en définissant les facteurs de succès et d'échec dans l'intégration de la technologie.

2.3.2 Facteurs de réussite d'une intégration technologique

Les facteurs de réussite d'une intégration technologique ont légèrement évolué dans le temps. Au regard de notre question scientifique, nous allons nous focaliser sur les facteurs liés aux technologies de l'industrie 4.0 dont fait partie la FA. Les chercheurs Sony et Naik ont élaboré une review de l'ensemble des recherches sur l'intégration d'une technologie de l'industrie 4.0 afin de définir les facteurs de réussite pour une telle intégration (Sony & Naik, 2020). Il ressort de leur étude qu'il existe 10 facteurs de réussite pour une intégration d'une technologie de l'industrie 4.0 :

- L'intégration d'une technologie de l'industrie 4.0 doit s'accorder avec la stratégie générale de l'entreprise
- La direction de l'entreprise doit soutenir et encourager l'intégration ; cela ne peut pas être soutenu seulement par une entité de l'entreprise
- Les employés doivent être acteurs dans l'intégration

- La conception de produits ou de services doivent prendre en compte l'intégration de la nouvelle technologie, ce n'est pas juste une modification au niveau de la production
- L'intégration de la technologie doit être prise en compte dans le développement de la chaîne d'approvisionnement
- L'ensemble de l'organisation doit prendre en compte les modifications entraînées par l'intégration de la technologie, en particulier autour de la numérisation
- L'intégration de la technologie doit être étudiée comme un management du changement
- L'intégration de la technologie doit être étudiée comme un management de projet
- Pour les technologies du numérique, la cyber sécurité doit être anticipée dans l'intégration de la technologie
- L'intégration de la technologie doit être pensée dans le long terme

Ces différents facteurs sont dépendants : de la technologie, en particulier au niveau des compétences à intégrer et des méthodes pour les transmettre aux équipes ; de l'organisation, avec les prises en compte des structures et des stratégies ; et d'éléments internes et externes, avec les obstacles et les soutiens à l'intégration (Saber et al., 2010) (figure 33).

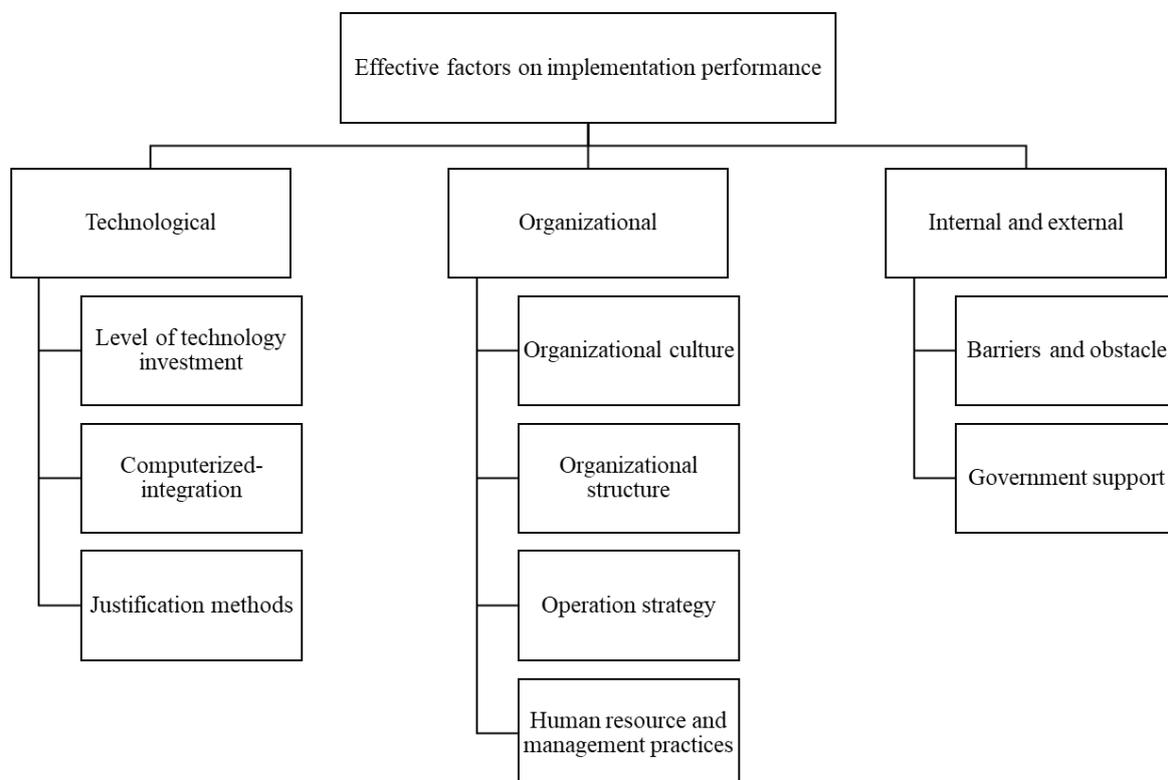


Figure 33 Schématisation des facteurs de réussite de l'intégration d'une technologie en entreprise (Saber et al., 2010)

Cette structuration en trois groupes : technique, organisationnel et interne et externe, peut être repensée en 2 parties. En effet, les facteurs liés à l'organisation peuvent être assimilés à des facteurs internes. Dans la suite de notre travail, nous distinguerons donc 2 groupes, les éléments liés à la technologie et les éléments liés à des forces externes ou internes.

2.3.3 Processus d'intégration de la fabrication additive

Les processus d'intégration de technologies de fabrication et les facteurs de réussites de l'intégration ont permis à des chercheurs de développer des modèles de processus propres à l'intégration de la FA.

Le modèle élaboré par Mellor en 2014 initie la recherche sur ce domaine appliqué à la technologie de fabrication additive (Mellor et al., 2014). Ce modèle met en avant la présence de forces externes qui influent sur la stratégie de l'entreprise vis-à-vis de la FA. Cette stratégie correspond à un des 5 groupes de facteurs qui influence l'approche d'intégration de la FA (figure 34). Les forces externes sont la pression de la concurrence, par exemple si les concurrents utilisent déjà la FA, la législation, en particulier au niveau des normes qui peuvent influencer sur les choix de technologies de fabrication, les demandes des clients, en particulier pour les entreprises dont les clients sont d'autres entreprises (B to B).

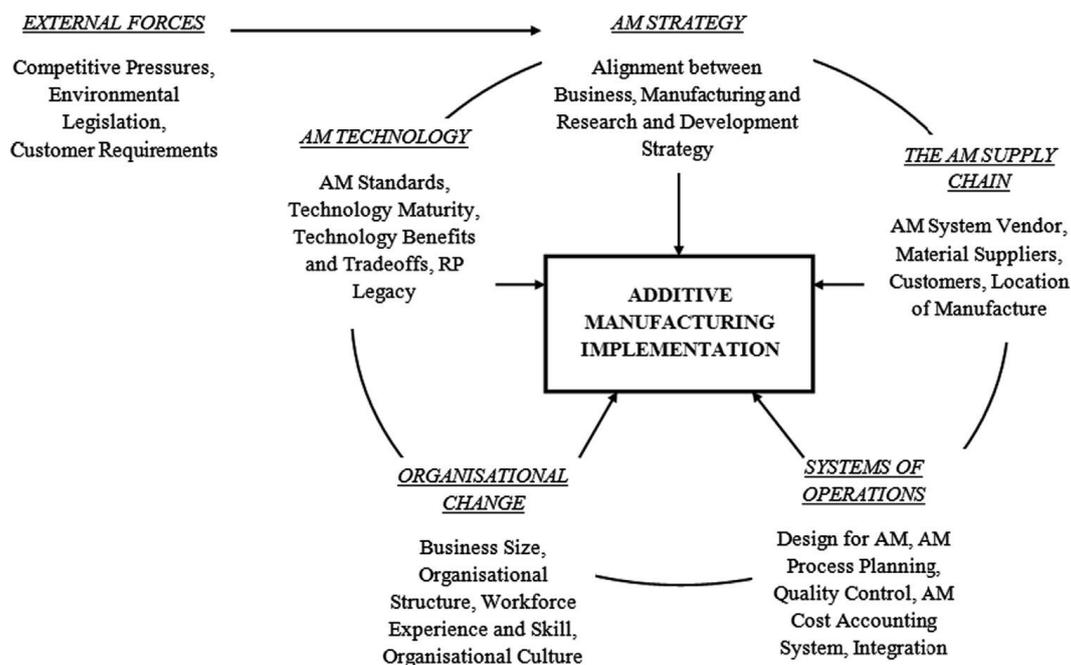


Figure 34 Modèle d'intégration de la FA de Mellor (Mellor et al., 2014)

Ce modèle définit donc 5 groupes de facteurs qui vont avoir une influence sur la bonne intégration de la technologie en entreprise :

- *Les facteurs stratégiques :*

Les décisions d'investissement dans les technologies de fabrication additive doivent être liées aux caractéristiques du marché et du produit. La stratégie de l'entreprise doit définir si les besoins sont en accord avec les investissements possibles. Un investissement dans une nouvelle technologie doit être validé avec l'évaluation du futur niveau d'utilisation en interne de cette technologie (Hill, 1995). Certaines caractéristiques de produits vont avoir tendance à motiver un investissement pour la fabrication additive, comme par exemple le besoin d'un fort taux de personnalisation des produits, un besoin fort d'optimiser les masses des produits car la masse est le coût principal du produit ou des produits avec des volumes de série très faibles. Les enjeux d'intégration de la FA doivent être un accord entre les différentes stratégies de l'entreprise, de la R&D, du commercial et de l'attractivité du marché. L'investissement dans la FA doit être aussi mis en place dans le cadre d'une vision future de nouvelles capacités de fabrication et de conception.

- *Les facteurs technologiques :*

Les facteurs technologiques sont extrêmement importants dans un processus d'intégration de la FA. Il est primordial qu'une entreprise définisse les avantages que peuvent apporter la technologie avant de l'intégrer. Lors de l'expansion de nouvelles technologies, il est fréquent d'observer des entreprises qui investissent dans ces technologies sans prendre en compte les caractéristiques techniques de ces dernières, les contraintes nouvelles, les coûts d'utilisation, les délais de fabrication et les étapes de finition associées (Sonntag, 2003). Les normes vis-à-vis de la technologie doivent aussi être étudiées pour les types d'applications voulues.

- *Les facteurs organisationnels :*

Les facteurs organisationnels influencent grandement un investissement dans la FA. Pour commencer, la taille de l'organisation va jouer un rôle très important ; il est beaucoup plus difficile pour une petite entreprise d'investir dans la FA si son activité n'est pas axée sur cette technologie par rapport à une grande entreprise. Ainsi, il est à noter que les processus d'intégration de la FA pour les grandes entreprises ne sont pas adaptables pour les petites entreprises (Federici, 2009) (Martinsuo & Luomaranta, 2018). Par ailleurs, la structure de l'entreprise est un facteur clé de la réussite d'intégration de la FA ; ce qui veut dire qu'une

entreprise doit repenser la structure et les processus organisationnels au préalable de l'intégration (Xiao-lin et al., 2007) (Saberli et al., 2010). L'intégration de la FA va aussi avoir un impact sur la culture de l'entreprise, en particulier au niveau des équipes de conception et de R&D. Ce facteur est très lié à l'ensemble des travaux que l'on a vu précédemment sur les DFAM.

- *Les facteurs opérationnels :*

La technologie de fabrication additive entraîne des modifications très importantes au niveau des opérations de conception et de fabrication, et donc par conséquent sur les opérateurs et sur les concepteurs (Hague et al., 2004) (Mansour & Hague, 2003) (Hao et al., 2010). Les caractéristiques uniques des systèmes de FA nécessitent le développement de nouveaux outils et pratiques de conception. De plus, la planification de la production et le contrôle de la qualité constituent un autre domaine d'activité susceptible de changer de manière significative avec l'intégration de la FA. Les activités de FA ne se limitent pas seulement à l'opérateur faisant fonctionner la machine, mais à l'ensemble de l'écosystème autour de cette machine allant des concepteurs, jusqu'aux assembleurs, en passant par les opérations de post-traitement. L'intégration de la FA doit être étudiée comme l'intégration de tout un nouveau système de production.

- *Les facteurs liés à la chaîne d'approvisionnement*

L'intégration de la FA oblige les entreprises à travailler avec de nouvelles matières premières qui ne sont pas utilisées dans les procédés traditionnelles (poudres métalliques...). La prise en compte de nouvelles chaînes d'approvisionnement doit être initiée assez tôt dans le processus d'intégration. Les processus de FA, principalement métalliques, imposent des décisions de sécurité importante au niveau des lieux de fabrication. L'évolution permanente de la technologie et la mise en concurrence forte entre les procédés de fabrication de FA entraînent un lien fort avec les fournisseurs initiaux car en fonction des types de machines les matériaux diffèrent.

Mellor présente un modèle complet ne prenant pas en compte l'aspect temporel d'un processus d'intégration. En effet, en phase de planification de l'intégration ou en phase de mise en service, les facteurs de décisions ne sont pas les mêmes. C'est pourquoi, Deradjat a cherché dans son

modèle à lier le modèle de Mellor avec les trois phases d'intégration d'une technologie de fabrication de Voss (figure 35) (Deradjat & Minshall, 2017).



Figure 35 Modèle d'intégration de la FA de Deradjat (Deradjat & Minshall, 2017)

Par ailleurs, dans ce modèle, un ordre entre les groupes est défini. La stratégie commerciale de l'entreprise a une influence directe sur le choix de s'orienter vers la technologie de FA (Saber et al., 2010). Le choix de la technologie de FA entraîne des différences importantes sur les processus de fabrication par rapport aux fabrications traditionnelles, ce qui entraîne des modifications dans les décisions sur les aspects opérationnels. Les différences opérationnelles obligent des modifications au niveau de l'organisationnel. Et l'ensemble de ces décisions va influencer l'environnement externe, incitant les différents acteurs à revoir leurs propres décisions. Finalement les décisions de l'environnement externe vont entraîner une adaptation de la stratégie commerciale. Ainsi, avec ce modèle un cycle d'intégration de la FA est bien défini.

Le modèle d'Oettmeier diffère les facteurs amonts à la mise en service de l'intégration de la FA des facteurs liés à la mise en service (Oettmeier & Hofmann, 2017). Dans ce modèle, trois éléments font partie de la phase de pré-installation (les facteurs liés à la technologie, les facteurs liés à l'entreprise et les facteurs liés à la structure du marché) et un élément fait partie de la phase d'installation (les facteurs liés à la chaîne d'approvisionnement) (figure 36).

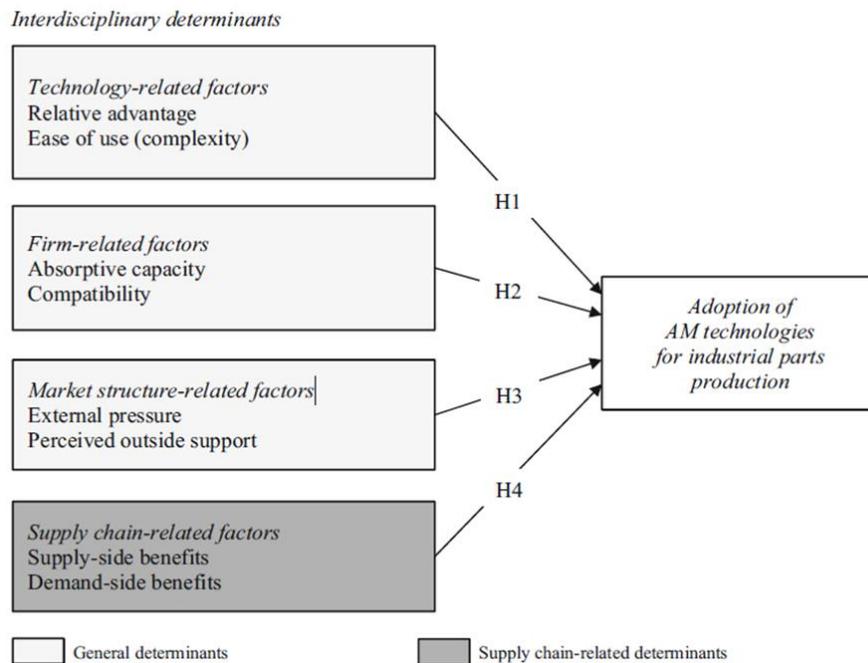


Figure 36 Modèle d'intégration de la FA d'Oettmeier (Oettmeier & Hofmann, 2017)

Les trois premiers groupes de facteurs comprennent des éléments issus de la littérature sur l'innovation et l'adoption des technologies tandis que les facteurs liés à la chaîne d'approvisionnement reflètent plus des questions spécifiques à l'inclusion des fournisseurs et des clients dans le processus d'intégration. Ainsi, le dernier axe est plus lié à chaque cas d'application alors que les 3 premiers peuvent être intégrés dans un modèle standard d'intégration de la FA. Une méthode sur l'intégration d'une méthodologie consiste à allier plusieurs domaines scientifiques de recherche, mettant en avant une recherche interdisciplinaire. Les facteurs liés à la technologie sont principalement basés sur la recherche en gestion des technologies et sur les recherche en ingénierie. Les facteurs liés à l'entreprise reflètent des aspects spécifiques à l'organisation, tels que les capacités à assimiler de nouvelles connaissances. Les facteurs liés à la structure du marché relèvent plutôt du domaine de la microéconomie. La littérature sur la gestion de l'innovation et les sciences du comportement constitue les éléments de liaison entre les facteurs.

Pour chacun des groupes de facteurs, les auteurs ont mis en avant les hypothèses à prendre en compte dans une méthodologie d'intégration de la FA.

Pour les facteurs liés à la technologie, les hypothèses sont l'avantage relatif et la facilité d'utilisation (complexité). L'avantage relatif correspond aux apports et atouts reconnus de la technologie de FA par rapport aux autres procédés d'un point de vue technique (potentiel

technique). La facilité d'utilisation est un facteur déterminant dans le cadre où la FA permet de simplifier une fabrication par rapport à un procédé traditionnel ; l'idée est de supprimer les complexités. Par exemple, si la FA permet de fabriquer en une fois un produit qui demande en fabrication traditionnelle des procédés complexes associés à un assemblage minutieux, alors en effet, la FA permet de simplifier la fabrication.

Pour les facteurs liés à l'entreprise, la méthodologie doit prendre en compte la capacité d'absorption et la compatibilité. La capacité d'absorption est le niveau de capacité d'apprentissage des équipes au sein d'une entreprise. La compatibilité est le fait d'intégrer la FA dans un système déjà existant et donc d'assurer la compatibilité de son apport avec l'existant. L'intégration de la FA ne remet pas en cause l'ensemble des technologies existantes et doit donc s'allier avec ces dernières.

Pour les facteurs liés à la structure du marché, la méthode doit prendre en compte la pression externe et le soutien extérieur perçu. La pression extérieure comprend la concurrence, la communication autour de cette technologie. Le soutien extérieur perçu est l'ensemble des possibilités qui permettent d'assurer une bonne intégration grâce à des soutiens extérieurs.

Pour les facteurs liés à la chaîne d'approvisionnement, les avantages du côté de l'offre et les avantages du côté de la demande sont à prendre en compte. Ces éléments sont liés aux avantages vis-à-vis des fournisseurs pour l'offre et vis-à-vis des clients pour la demande.

2.3.4 Synthèse sur l'intégration de la fabrication additive en entreprise

Cette partie de l'état de l'art sur l'intégration de la FA en entreprise a permis de mettre en avant le fait que l'intégration ne peut pas être pensée seulement au niveau du processus de conception, car il existe des facteurs du contexte de l'entreprise qui vont influencer le processus d'intégration. L'étude de la littérature sur les processus de conception nous ont permis de faire des observations et de mettre en avant les manques des processus de la littérature (tableau 6). Cette partie de l'état de l'art a permis d'énoncer deux nouveaux constats qui nous serviront pour la suite du travail.

Intégration de la fabrication additive en entreprise	
Observations	<ul style="list-style-type: none"> • L'intégration d'une nouvelles technologies doit s'appuyer sur des facteurs de réussites • Les facteurs de réussites sont liés soit à la technologie, soit à des forces externes et internes (en intégrant les facteurs liés à l'organisation) • Les éléments stratégiques, technologiques, organisationnels, opérationnels et liés à la chaîne d'approvisionnement, ainsi que l'existence de forces externes à l'entreprise peuvent influencer l'intégration de la FA. • L'intégration de la FA doit être étudiée comme un processus global, et doit être planifié
Manques	<ul style="list-style-type: none"> • Les processus d'intégration de la FA en entreprise ont exclusivement une vision macroscopique et ne prennent pas en compte d'éléments propres à la conception. • La littérature ne définit pas quelles sont les forces externes ou internes qui ont le plus d'influence (positive ou négative) sur l'intégration de la FA
Constats	<p><i>Constat 5 : L'intégration de la FA en entreprise doit se planifier en associant une vision macroscopique (le contexte de l'entreprise) avec un vision microscopique (le processus de conception de produit).</i></p> <p><i>Constat 6 : Les forces externes et internes à l'entreprise sont à prendre en compte dans l'intégration de la FA en plus de critères technologiques.</i></p>

Tableau 6 Synthèse de l'état de l'art sur l'intégration de la fabrication additive en entreprise

Cette partie a permis de faire ressortir l'existence de forces externes et internes à l'entreprise influençant le processus d'intégration de la FA. Mais la littérature ne permet pas de dire quelles sont les forces qui vont le plus influencer l'intégration et quels sont les forces qui influencent l'ensemble des secteurs industriels. Pour mieux définir ces forces, nous avons choisi d'effectuer un état de l'art industriel multi-secteurs.

2.4 Etat de l'art industriel

A la suite de l'étude de la littérature, plusieurs interrogations sur l'intégration de la FA se posent à nous. Les approches de conception dédiées FA ont une vision ancrée sur le processus de conception et les approches d'intégration de la FA ont une vision macroscopique. Ces deux types d'approches semblent ne pas être liées dans la littérature alors que l'objectif des deux est le même : intégrer la FA pour innover. Ainsi, afin d'avoir une meilleure vision des actions menées en entreprise pour intégrer la FA, de définir les liens entre le processus de conception et le contexte industriel, un état de l'art industriel est nécessaire. Cette partie va se composer de 2 sous-parties allant de l'élaboration des entretiens avec des industriels, jusqu'à l'analyse des résultats de ces derniers (figure 37).

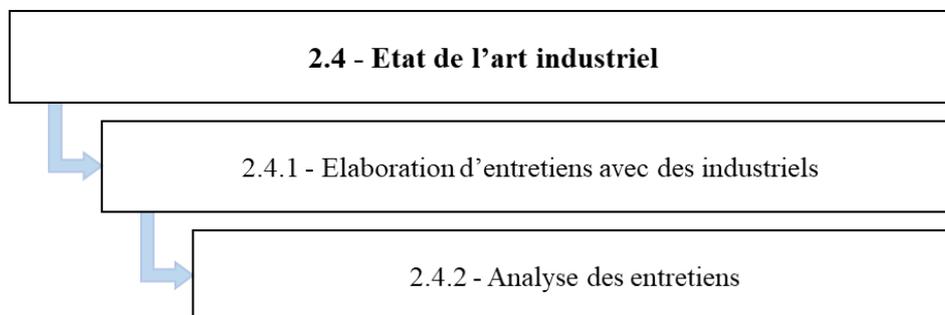


Figure 37 Structure de l'état de l'art industriel

2.4.1 Elaboration d'entretiens avec des industriels

Introduction

Plusieurs secteurs sont en pleine intégration de la fabrication additive au sein de leurs entreprises. Certaines entreprises ont déjà bien avancé dans leur processus d'intégration et proposent plusieurs produits en FA à leurs clients, d'autres ont conçu des prototypes et s'intéressent à la FA au niveau de la R&D, tandis que certaines entreprises sont encore à l'état initial d'intégration de la FA. Afin d'améliorer notre compréhension sur les besoins des entreprises et en particulier des équipes de conception durant l'intégration de la FA, nous avons voulu faire un ensemble d'entretiens avec des responsables d'intégration de la FA dans plusieurs entreprises.

Etant donné que l'intégration de cette technologie n'est pas au même niveau dans tous les secteurs industriels, nous voulions avoir une représentation de l'ensemble des secteurs. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur le rapport annuel de Wohlers présentant l'état

d'avancement de l'utilisation de la FA dans l'industrie (Campbell et al., 2018). Les différents secteurs utilisant le FA sont présentés dans la figure 38 ; les répartitions figurant dans cette figure correspondent à une étude réalisée en 2018 sur 175 entreprises de la FA, ce qui représente plus de 100000 entreprises (ou organisations) utilisant des technologies de FA. Nous observons que le secteur de l'aéronautique et du spatial est une industrie majeure dans l'utilisation de la FA avec 19% du marché, l'automobile représente 16% du marché et les industries utilisant des machines industrielles (ferroviaire, sidérurgie, énergie...) représentent 20% du marché. Il est à noter que ces chiffres représentent la part de dépense dans la fabrication additive, indépendamment du type de procédé et du type d'utilisation.

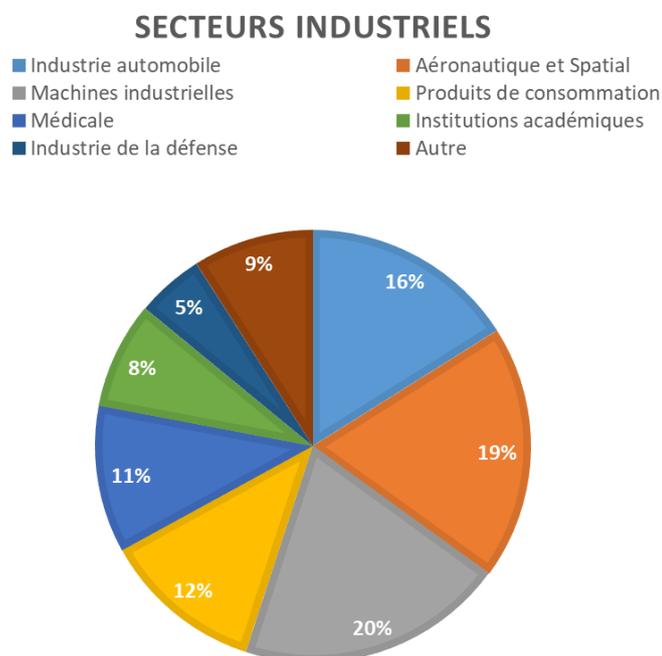


Figure 38 Répartition de l'utilisation de la FA dans les secteurs industriels (Campbell et al., 2018)

Afin d'avoir une vision exhaustive des besoins, notre objectif a été donc d'interroger des personnes d'entreprises venant de l'ensemble de ces secteurs.

Présentation des entretiens

L'objectif des entretiens était d'avoir une vision chronologique du processus d'intégration de la FA, allant du contexte, avant son intégration dans l'entreprise, jusqu'à la vision future pour l'entreprise sur l'utilisation de cette technologie dans leurs activités. Pour définir les étapes chronologiques, nous nous sommes appuyés sur trois domaines de la recherche en plus des

modèles d'intégration de la technologie de fabrication : les travaux sur le management de la transition numérique permettent de définir l'évolution des entreprises durant l'adoption d'autres technologies de l'industrie 4.0 (Ustundag & Cevikcan, 2017) ; les modèles de stratégie de fabrication à la fin des années 1960 présentent les réflexions sur la prise en compte des technologies de fabrication comme un élément central de l'activité d'une entreprise et non comme juste un outil permettant de fabriquer (Skinner, 1969) ; enfin, les travaux sur la conduite du changement sont pertinents car il s'agit d'analyser la transition entre un état initial et un état final. Cette phase de transition est dans notre cas le processus d'intégration entre la phase où la FA n'est pas intégrée et la phase où la FA est intégrée.

Cette analyse nous a permis de définir 4 phases chronologiques que nous voulions distinguer dans les entretiens (figure 39).



Figure 39 Phases des entretiens

Les entretiens ont donc été structurés selon ces 4 phases avec pour chacune une question d'entame. Les questions d'entame et les objectifs de chacune des 4 phases sont présentées dans l'annexe 1.

Durant les entretiens, 26 personnes ont été interviewées, venant de 23 entreprises différentes (une interview a été faite avec 4 interlocuteurs). Nous avons cherché à avoir un échantillon représentatif des secteurs industriels, plus 2 entretiens avec des entreprises du monde de la FA (tableau 7).

Secteurs industriels	Part du marché	Nombre d'entretiens
Industrie automobile	16	3
Aéronautique et Spatial	19	4
Machines industrielles	20	4
Produits de consommation	12	2
Médicale	11	3
Industrie de la défense	5	1
Institutions académique	8	2
Autre	9	2
Industrie de la FA	/	2

Tableau 7 Nombre d'entretiens par secteur

Par rapport au nombre d'entretiens prévus, nous en avons fait un en plus dans le secteur du médical car deux interlocuteurs ont accepté en même temps et étant des profils d'entreprises différentes, il était intéressant de les garder tous les deux. Pour l'ensemble des secteurs industriels, nous avons cherché à avoir des profils d'entreprises différentes. L'ensemble des entretiens avec le secteur industriel de l'entreprise, les activités principales, le type d'entreprise et les postes des personnes interviewées est présenté dans le tableau 8.

Pour l'industrie automobile, nous avons cherché à avoir un constructeur automobile, un fournisseur en court d'intégration de la FA et un fournisseur très avancé sur l'utilisation de la FA. Pour l'aéronautique et le spatial, nous avons sélectionné un constructeurs d'avions, un motoriste aéronautique, un fournisseur orienté électronique et un fournisseur orienté mécanique. Trois des quatre entreprises ont des activités d'aéronautique, ainsi que de spatial. Pour les machines industrielles, nous avons voulu interviewer des personnes issues d'entreprises de la sidérurgie, de l'énergie et du ferroviaire. Pour le ferroviaire, nous avons choisi un constructeur et un client. Pour les produits de consommation, l'objectif était d'avoir une entreprise du luxe et une entreprise de grande distribution. Pour le médical, les interviews ont été faites avec des personnes venant d'entreprises d'orthopédie et de prothésistes. Une entreprise de prothèse a orienté son activité autour de la FA alors que l'autre a mis en place récemment un département spécifique. Pour l'industrie de la défense, nous avons cherché un fournisseur connaissant bien l'ensemble du secteur. Pour le monde académique, les interviews se sont orientés vers un établissement privilégiant la recherche et un autre privilégiant la pédagogie. Ensuite pour les autres secteurs, nous avons interviewé une personne d'une entreprise de l'Oil and Gas qui commence à chercher à intégrer la FA, et une startup de l'industrie de la musique qui s'est construit autour de cette technologie. Enfin, pour les

entreprises du domaine de la fabrication additive, les interviews ont été réalisés avec une entreprise fabricante de machines FA métalliques et avec une entreprise de vente et de consulting de machines de fabrication ayant un département spécialisé dans les technologies de FA.

Secteur industriel	Entretien Code	Activités	Type d'entreprise	Poste personne interviewé
Automobiles	A.1	Chassis ; Sidérurgie	Grande entreprise	Ingénieur R&D
Automobiles	A.2	Vehicules ; Sport	Grande entreprise	Ingénieur Fablab
Automobiles	A.3	Pneumatique	Grande entreprise	Responsable FA
Aéronautique et spatial	B.1	Aéronautique ; Spatial	Grande entreprise	Responsable FA
Aéronautique et spatial	B.2	Aéronautique ; Défense	Grande entreprise	Responsable FA
Aéronautique et spatial	B.3	Aéronautique ; Spatial ; Défense	Grande entreprise	Coach FA
Aéronautique et spatial	B.4	Aéronautique ; Spatial	Grande entreprise	Vice Président
Machines industrielles	C.1	Sidérurgie	Grande entreprise	Responsable FA
Machines industrielles	C.2	Energie	Grande entreprise	Responsable FA
Machines industrielles	C.3	Ferroviaire	Grande entreprise	Responsable FA
Machines industrielles	C.4	Mobilité ; Ferroviaire	Grande entreprise	Responsable maintenance ; Responsable FabLab ; Ingénieur Maintenance ; Ingénieur Prototype
Produits de consommation	D.1	Grande distribution ; Sport	Grande entreprise	Responsable FA
Produits de consommation	D.2	Luxe ; Horlogerie	Grande entreprise	Responsable innovation
Médicale	E.1	Prothèse	PME / ETI	Responsable Bureau d'étude
Médicale	E.2	Orthopédie	PME / ETI	PDG
Médicale	E.3	Prothèse	Grande entreprise	Responsable Bureau d'étude
Industrie de la défense	F.1	Défense ; Electronique	Grande entreprise	Ingénieur R&D
Institution académique	G.1	Académique ; Recherche	Université	Responsable FA
Institution académique	G.2	Académique ; Recherche	Université	Chercheur FA
Autre	H.1	Oil and Gas	Grande entreprise	Responsable FA
Autre	H.2	Musique	PME / ETI	Responsable technique
Industrie de la FA	I.1	Imprimantes FA ; Consulting	Grande entreprise	Consultant
Industrie de la FA	I.2	Vente imprimantes FA ; Consulting	PME / ETI	Responsable FA

Tableau 8 Liste des entretiens avec les caractéristiques de chacun

Collecte des données des entretiens

L'ensemble des entretiens était prévu sur un créneau d'une heure avec une introduction sur nos travaux de thèse pendant 10 minutes avant de passer à la phase d'entretien semi-directif. Les quatre questions d'entame étaient présentées à la fin de l'introduction et rappelées à chaque début de parties. Tous les entretiens ont été effectués par visio-conférence, ce qui a permis d'enregistrer l'ensemble des contenus. Par ailleurs, des notes ont été prises pendant l'entretien. Les enregistrements ont été retranscrits. Certaines questions ont été posées pendant les

entretiens pour avoir plus de détails sur certains éléments ou pour comparer des éléments avec d'autres issus des autres entretiens.

Ensuite, les entretiens ont été analysés et les informations importantes ont été recensées dans un tableau mettant en lien les entretiens entre eux afin de faire ressortir les points communs et les divergences entre les entretiens d'un même secteur. Les données ont été étudiées selon les 4 parties chronologiques afin de définir les objectifs de l'intégration de la FA pour les entreprises interrogées.

2.4.2 Analyse des entretiens

L'étude des entretiens, nous a permis de faire ressortir des informations pour les différents secteurs au niveau du contexte, des raisons et du potentiel, des démarches et des visions futures. L'ensemble de ces informations est présenté et détaillé dans l'annexe 2. Ces informations ont permis de faire ressortir les objectifs principaux d'intégration de la FA pour les différents secteurs, qui sont présentés dans la tableau 9. Le secteur autre n'est pas représenté car les objectifs d'intégration de la FA de l'entreprise du Oil and Gas interviewée se rapprochent de ceux des industries de machines industrielles et les objectifs de la startup de musique se rapprochent de ceux des industries de produits de consommation.

Industries	Objectifs d'intégration de la FA
Industrie automobile	L'objectif principale d'intégration de la FA pour les entreprises interviewées de l'industrie automobile est de se familiariser avec cette technologie afin que les concepteurs soient prêts quand il existera des procédés de FA matures pour les activités principales du secteur.
Aéronautique et spatial	L'objectif de l'intégration de la FA pour les entreprises interrogées de l'aéronautique et du spatial est de concevoir en augmentant la performance et en diminuant les coûts.
Machines industrielles	Les objectifs d'intégration de la FA pour les entreprises sollicitées de machines industrielles sont d'augmenter la flexibilité et l'agilité dans leurs activités et d'améliorer la maintenance.
Produits de consommation	L'objectif d'intégrer la FA pour les entreprises interviewées de produits de consommation est de proposer de nouveaux produits et services aux clients, et de préparer les concepteurs au cas où la FA devenait une technologie majeure de leur activité.
Médical	L'objectif de l'intégration de la FA pour les entreprises sollicitées de l'industrie médicale est de proposer des produits sur-mesure afin de concevoir des solutions le plus « patient-spécifique » possibles.
Industrie de la défense	L'objectif pour l'entreprise interrogée de la défense d'intégrer la FA est d'augmenter les performances des produits en diminuant les coûts et d'assurer un maintien opérationnel.
Institutions académiques	L'objectif d'intégrer la FA dans les institutions académiques sondées est de former les concepteurs à la FA et d'améliorer le potentiel de la technologie.

Tableau 9 Objectifs d'intégration de la FA des entreprises interviewées

Les objectifs des différentes entreprises vont nous permettre de définir le positionnement de notre recherche en fonction des besoins industriels. Pour cela, une classification des entretiens est nécessaire dans un premier temps.

Classification des entretiens

Durant les entretiens, les interlocuteurs présentent plusieurs types de produits où il a été intéressant pour eux d'intégrer la FA. Nous avons remarqué que deux critères sont souvent mis en avant pour catégoriser les produits : le niveau d'innovation et la taille de la série.

Le niveau d'innovation est toujours énoncé par les interlocuteurs. Ils vont parler parfois de nouveaux produits avec un objectif d'innovation de rupture ; l'idée est de profiter du potentiel de la FA pour créer des produits permettant de résoudre des problèmes encore jamais résolus. Le potentiel de la fabrication additive, par ces spécificités, va permettre de concevoir des produits avec des géométries et des fonctions nouvelles qui modifient l'utilité du produit par

rapport à ceux faits en fabrication traditionnelle. Les interlocuteurs vont aussi parler d'améliorations ou d'innovation continue lorsque la fabrication additive va permettre d'améliorer un produit existant ; en particulier avec l'idée de concevoir des parties d'un produit pour assurer que le produit reste opérationnel. Par exemple, dans le domaine du ferroviaire, la FA est utilisée pour reconcevoir des pièces de matériels roulants facilement endommageables. En pensant la pièce en FA, l'ensemble du processus de réparation est simplifié, ce qui permet de limiter les périodes où le matériel est non fonctionnel.

La figure 30 positionne les différentes entreprises interrogées en fonction de la taille de la série et du niveau d'innovation souhaitée. La croix représente les activités principales de l'entreprise dans son intégration de la FA, car il est sûr que les activités intégrant la FA dans les entreprises représente plus une zone qu'un point ; la croix peut être caractérisée comme le centre de gravité de cette zone.

Grâce aux différents entretiens dans un même secteur, nous avons pu définir la zone correspondant à chaque secteur. Sur la figure, nous n'avons pas représenté les entretiens d'institutions académiques car la recherche dépend souvent des secteurs des entreprises partenaires ce qui fait qu'en fonction des projets, il serait possible de les positionner dans toutes les zones des secteurs industriels. Nous n'avons pas représenté non plus les entretiens des entreprises du monde de la FA, mais ils nous ont permis d'apporter d'autres exemples des différents secteurs et donc de la définition des zones présentées dans la figure 40. Pour les deux entretiens de la catégorie « autre », nous avons choisi d'intégrer celui du domaine du Oil and Gas au secteur des machines industrielles et celui de la musique au secteur des produits de consommation car les spécificités de chacun correspondent à celles de ces deux secteurs.

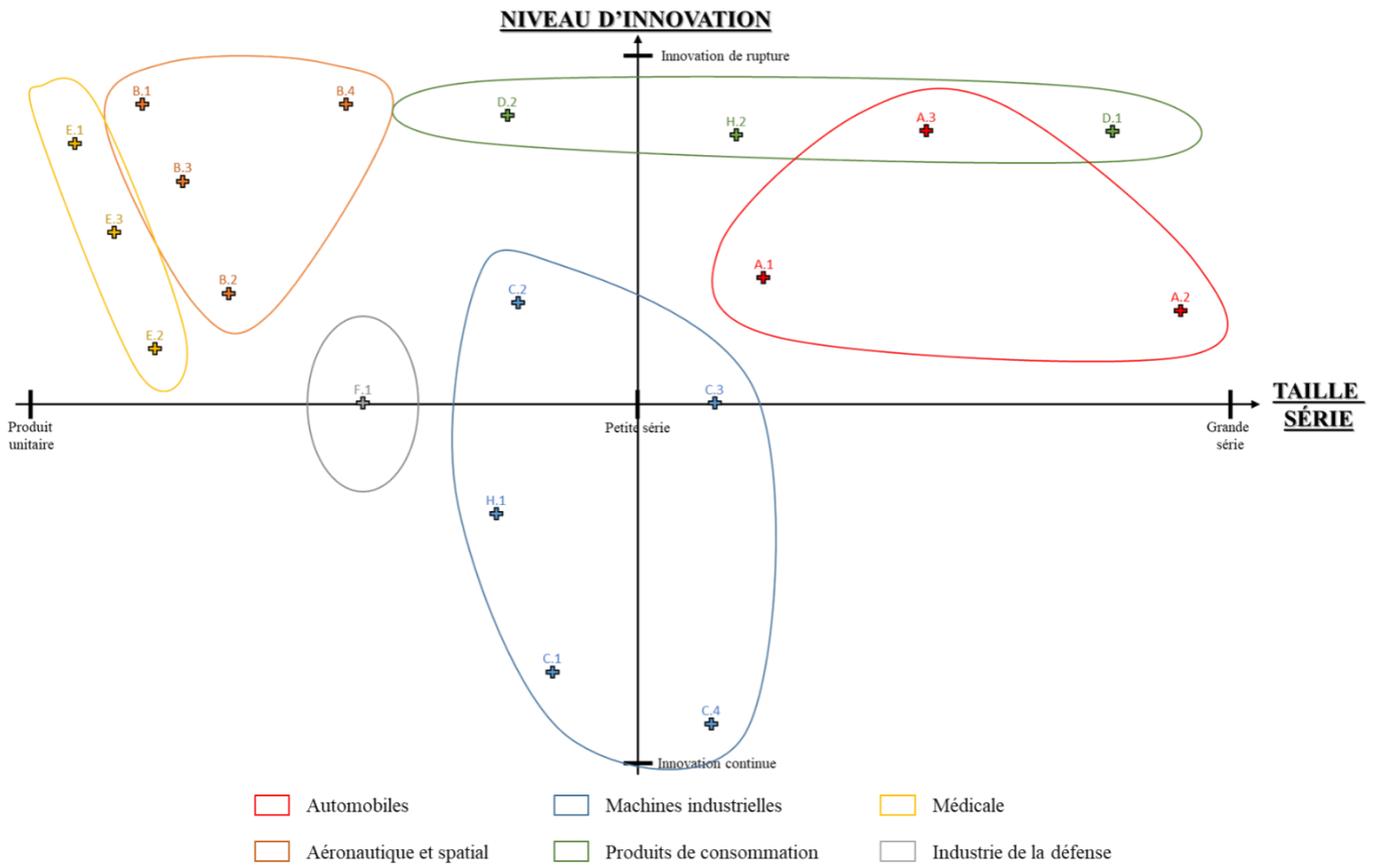


Figure 40 Positionnement des intégrations de la FA des entreprises en fonction du niveau d'innovation et de la taille de série

Nous pouvons différencier 4 ensembles où les besoins d'intégrer la FA diffèrent, présentés sur la figure précédente. Ces 4 ensembles représentent 4 stratégies d'intégration différentes :

- Stratégie 1 (niveau d'innovation \nearrow ; taille série \searrow) :

Les projets de cet ensemble sont des projets centrés sur un besoin ou un produit où l'utilisation de la FA permet d'avoir une conception inexistante avant et qui résout un problème jamais résolu avant. Il s'agit de produit en très petite série, voire unitaire, qui demande des caractéristiques très spécifiques, où la construction avec la FA assure aussi un avantage économique fort. Les procédés de FA actuels répondent aux spécificités de ces produits au niveaux des propriétés et des fonctions voulues. Nous pouvons remarquer que les projets du secteur de l'aéronautique et spatial ainsi que celui du médical correspondent à cet ensemble car les problématiques de personnalisation et d'optimisation des masses et

des fonctions sont primordiales. Les projets de cet ensemble vont bien jusqu'à la commercialisation du produit et au brevetage des nouvelles fonctions.

- Stratégie 2 (niveau d'innovation ↗ ; taille série ↗) :

Les projets de cet ensemble correspondent à des projets dont le but est de créer une culture de la FA auprès des concepteurs. La finalité de ces projets est, à travers des produits « annexes » à l'activité principale, de former les ingénieurs sur cette technologie. Ces types de projets sont dans des secteurs où la taille des séries est souvent grande, et donc où les procédés de FA actuels ne correspondent pas totalement aux contraintes industrielles. Cependant, les entreprises savent que la technologie va évoluer jusqu'à être utilisable pour les grandes séries, et souhaitent définir en amont où il y a du potentiel avec les caractéristiques de la FA. Les secteurs de l'automobile et des produits de consommation ont la majorité de leurs projets dans cet ensemble. Les projets de cet ensemble sont plus libres que ceux de la stratégie 1 car l'objectif n'est pas obligatoirement d'aller jusqu'au produit final, mais de se faire des idées sur l'utilisation de la FA dans le secteur.

- Stratégie 3 (niveau d'innovation ↘ ; taille série ↘) :

Les projets de cet ensemble correspondent à l'ensemble des projets où le but est d'assurer une meilleure agilité et flexibilité. L'objectif de ces projets est de permettre le maintien opérationnel ; il peut s'agir des projets autour de l'outillage, de la retro-conception ou de la réparation. Ces projets sont très importants dans les secteurs où le maintien opérationnel est la priorité comme la défense ou l'énergie.

- Stratégie 4 (niveau d'innovation ↘ ; taille série ↗) :

Les projets de cet ensemble consistent à penser le produit durant sa vie après sa vente. Il s'agit de projet de mise à niveau, de maintenance. Certains projets consistent à proposer des pièces de rechange en FA ; mais le but est commercial dans le sens où cette possibilité de fabriquer des pièces de rechange est vendue avec le produit. Par exemple dans le secteur ferroviaire, l'entreprise qui achète du matériel, achète avec des fichiers CAO de certaines pièces pour pouvoir les re-fabriquer quand elles ne sont plus fonctionnelles.

Positionnement de notre recherche

Cette classification des projets grâce aux entretiens nous permet de mieux définir la zone d'application voulue par rapport à notre question scientifique. Nous observons que les projets de l'ensemble logistique et service se rapprochent plus à des enjeux de maintenance et moins de conception de produits innovants. Notre méthodologie ayant comme objectif d'intégrer la FA dans les phases amont de conception de produits, notre positionnement se trouve sur la zone des projets ayant une stratégie 1 ou 2, que l'on pourrait nommer de stratégie d'innovation pour la stratégie 1 et de stratégie d'initiation à une innovation pour la stratégie 2 (figure 41).

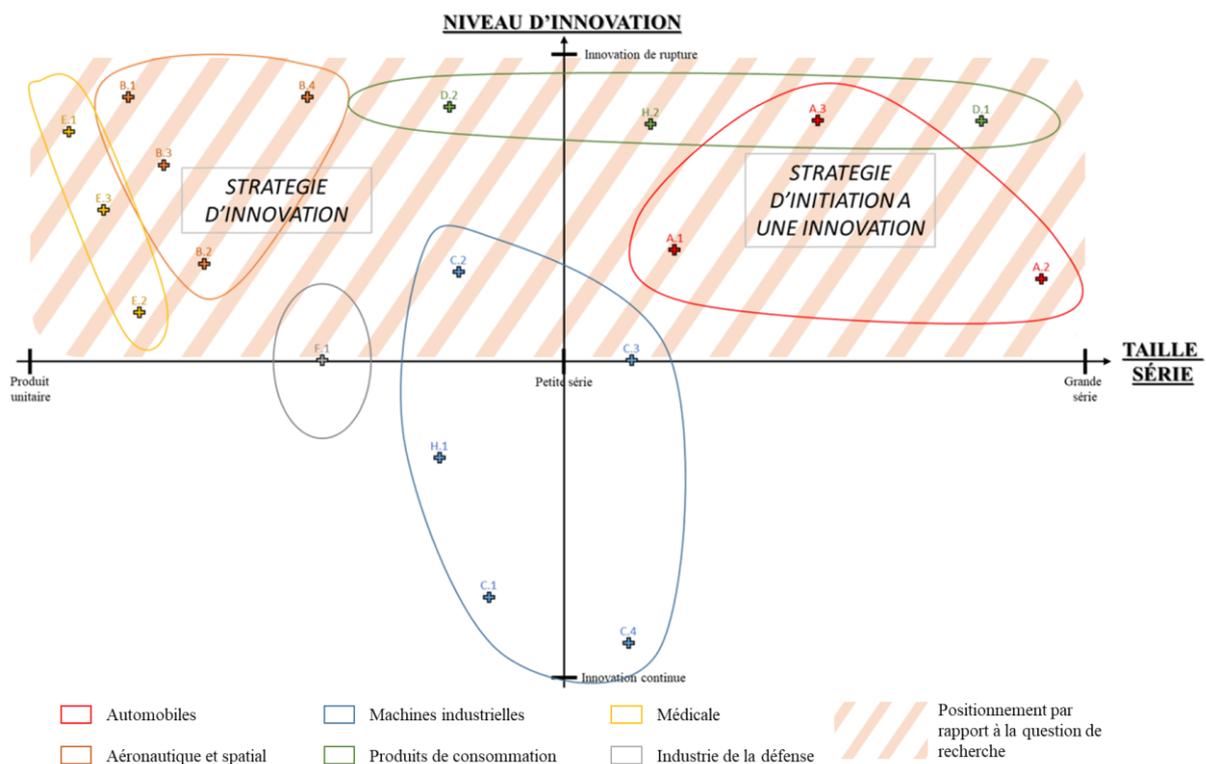


Figure 41 Positionnement de notre méthodologie dans les projets de FA dans l'industrie

Nous pouvons remarquer que notre méthodologie s'adresse à l'ensemble des secteurs industriels.

Nous allons étudier plus en détails les entretiens où le processus d'intégration correspond aux deux stratégies en accord avec notre question scientifique. Nous allons en particulier nous intéresser aux éléments à prendre en compte dans l'intégration qui ne sont pas des éléments techniques.

Enjeu des forces internes et externes à l'entreprise

Les entretiens nous ont permis de faire ressortir certaines forces internes et externes aux entreprises qui freinent l'intégration de la FA. Ces forces sont liées principalement à la peur du changement. En effet, le manque de connaissances vis-à-vis de la technologie crée une mystification de la FA.

« J'étais dans un laboratoire qui voulait travailler sur cette technologie, mais on n'avait pas de moyen donc même seulement le fait d'en parler c'était difficile pour les personnes. » (A.1)

En plus de ce manque de connaissances, il existe une forte médiatisation externe de la FA par les médias et les entreprises de conseil, en particulier autour de l'industrie 4.0. Ce manque de connaissance, associé à la médiatisation forte, entraîne une remise en question des concepteurs sur leurs connaissances et donc sur leur utilité.

« Ce n'est pas évident de dire que les gens doivent être motivés par l'innovation. Un concepteur lambda, face à la médiatisation de la fabrication additive, il comprend qu'on lui dit qu'il est "out" et qu'il doit devenir "in" ; ça entraîne n'importe quoi ! Au lieu de choisir des opportunités à faire de nouvelles choses, ils vont protéger leurs connaissances des anciennes ; ça les remet en cause et ils ont peurs ! Le grand frein c'est la peur ! » (B.3)

La remise en question de leur utilité est vu comme une peur car, pour les concepteurs, la FA est une technologie qui va tout changer, alors qu'il s'agit d'un outil en plus. Il y a un besoin fort d'acculturation et de sensibiliser les concepteurs afin qu'ils comprennent cette technologie et qu'elle entre dans leur culture.

« Montrer aux concepteurs que ce n'est pas "rocket science" [...], de démystifier la fabrication additive, ça c'est d'un point de vue culturel » (D.2)

Cette acculturation de la FA semble devoir se faire par une compréhension que cette technologie ne va pas à l'encontre des autres technologies. Dans l'ensemble des secteurs, il y a une difficulté des concepteurs à se détacher des technologies existantes et à toujours voir la nouveauté comme quelque chose qui va bousculer l'existant.

« Il y a des personnes qui sont réticentes aux changements, c'est une technologie qui reste nouvelle par rapport à la fonderie et à l'usinage, avec des prises de risque plus importantes, il y a toujours cette image de technologie pas mature, etc. Il y a encore un travail culturel à faire pour que la FA soit pour tout le monde un procédé mature » (A.3)

« Il ne faut pas voir la FA comme quelque chose qui va remplacer les procédés de fabrications conventionnelles mais comme un nouvel outil à la boîte à outils des méthodes de fabrication qui sont à disposition de l'industriel, du concepteur. On a une nouvelle manière de penser les choses et de concevoir et donc de répondre à des problématiques. Il ne faut pas s'obliger à intégrer cette technologie mais l'intégrer dans le processus de pensée. » (E.1)

Cet enjeu de faire comprendre aux concepteurs qu'intégrer la FA ne veut pas dire qu'il faut obligatoirement fabriquer en FA est primordial. La pire intégration serait de perdre en solutions innovantes en se focalisant trop sur la FA et en oubliant les autres technologies.

« C'est encore un peu délicat l'intégration de la FA parce que, je pense que les gens ne connaissent pas bien la technologie et nous c'est récurrent de recevoir des pièces qui sont clairement conçus pour l'usinage ou pour être découpées et soudées ; c'est vrai que c'est un challenge pour nous de faire évoluer les mentalités sur cette technologie. » (E.3)

2.4.3 Synthèse sur l'état de l'art industriel

L'état de l'art industriel a permis de positionner nos travaux de recherche en fonction des besoins des entreprises et a fait ressortir l'importance de la culture de l'entreprise et des procédés de fabrication traditionnelle dans l'orientation des stratégie d'intégration de la FA des entreprises (tableau 10). Ces apports de l'état de l'art industriel nous ont permis d'énoncer deux constats supplémentaires.

Etat de l'art industriel	
<p>Positionnement de notre recherche par rapport aux entretiens en fonction du niveau d'innovation et de la taille des séries</p>	<p> ■ Automobiles ■ Machines industrielles ■ Médicale ■ Aérospatial et spatial ■ Produits de consommation ■ Industrie de la défense </p> <p> ▨ Positionnement par rapport à la question de recherche </p>
<p>Observations des résultats des entretiens</p>	<ul style="list-style-type: none"> Les entreprises industrielles s'intéressent à la FA pour la conception de produits, mais la culture des entreprises, les compétences et connaissances des procédés de fabrications traditionnelles et le manque de connaissances sur la FA sont des biais qui freinent la bonne intégration de la FA au sein des équipes de concepteurs.
<p>Constats</p>	<p><i>Constat 7 : L'intégration de la FA dans le cadre d'une stratégie d'innovation est peu formalisée dans les entreprises, pourtant c'est un enjeu majeur pour l'ensemble des secteurs de l'industrie manufacturière.</i></p> <p><i>Constat 8 : Des forces internes et externes à l'entreprise, telles que la culture de l'entreprise et des procédés de fabrication traditionnelle sont un réel frein, obligeant à orienter la stratégie d'intégration de la FA</i></p>

Tableau 10 Synthèse de l'état de l'art industriel

2.5 Synthèse de l'état de l'art

L'état de l'art a permis de définir un certain nombre de constats et de mettre en avant des manques dans la littérature. Dans cette synthèse de l'état de l'art, nous allons rappeler les constats issus de l'état de l'art (tableau 11) et présenter en quoi notre proposition répond aux manques de l'état de l'art.

Constats de la partie créativité en conception	
<i>Constat 1</i>	<i>Pour innover en conception de produits, la créativité des concepteurs doit être stimulée en phases amont de conception.</i>
<i>Constat 2</i>	<i>La manipulation d'objets inspirationnels permet de stimuler la créativité des concepteurs.</i>
Constats de la partie approches de conception dédiées FA	
<i>Constat 3</i>	<i>Une bonne intégration de la FA passera par une approche pédagogique associée à une approche de créativité afin de structurer et de transmettre le potentiel d'innovation de la FA aux concepteurs.</i>
<i>Constat 4</i>	<i>La manipulation d'objets en FA favorise l'interprétation et l'appropriation du potentiel de la FA durant le processus de conception.</i>
Constats de la partie intégration de la FA en entreprise	
<i>Constat 5</i>	<i>L'intégration de la FA en entreprise doit se planifier en associant une vision macroscopique (le contexte de l'entreprise) avec un vision microscopique (le processus de conception de produit).</i>
<i>Constat 6</i>	<i>Les forces externes et internes à l'entreprise sont à prendre en compte dans l'intégration de la FA en plus de critères technologiques.</i>
Constats de la partie état de l'art industriel	
<i>Constat 7</i>	<i>L'intégration de la FA dans le cadre d'une stratégie d'innovation est peu formalisée dans les entreprises, pourtant c'est un enjeu majeur pour l'ensemble des secteurs de l'industrie manufacturière.</i>
<i>Constat 8</i>	<i>Des forces internes et externes à l'entreprise, telles que la culture de l'entreprise et des procédés de fabrication traditionnelle sont un réel frein, obligeant à orienter la stratégie d'intégration de la FA.</i>

Tableau 11 Constats issues de l'état de l'art

Les manques mis en avant par l'état de l'art soulignent d'une part les séparations au sein des approches de conception et d'autre part entre les approches de conception et les processus

d'intégration. En effet, dans les approches de conception dédiées FA, on observe que celles orientées créativité ne structure pas le potentiel de la FA qui permettra aux concepteurs d'interpréter et de s'appropriier les connaissances au « juste besoin », et à l'inverse les approches de conception orientées sur les caractéristiques de la FA vont structurer une partie du potentiel mais sous forme de contraintes et donc limiter l'innovation. Les premières offrent seulement une approche créative, alors que les autres offrent seulement une approche pédagogique.

De même, on observe une séparation entre les approches de conception dédiées à la FA qui vont se limiter aux aspects techniques de la technologie ignorant le contexte de l'entreprise, et les processus d'intégration qui vont se focaliser sur le contexte de l'entreprise sans s'intéresser réellement aux problématiques de conception.

L'état de l'art présente donc 3 démarches différentes et distinctes comme le représente la figure 42.

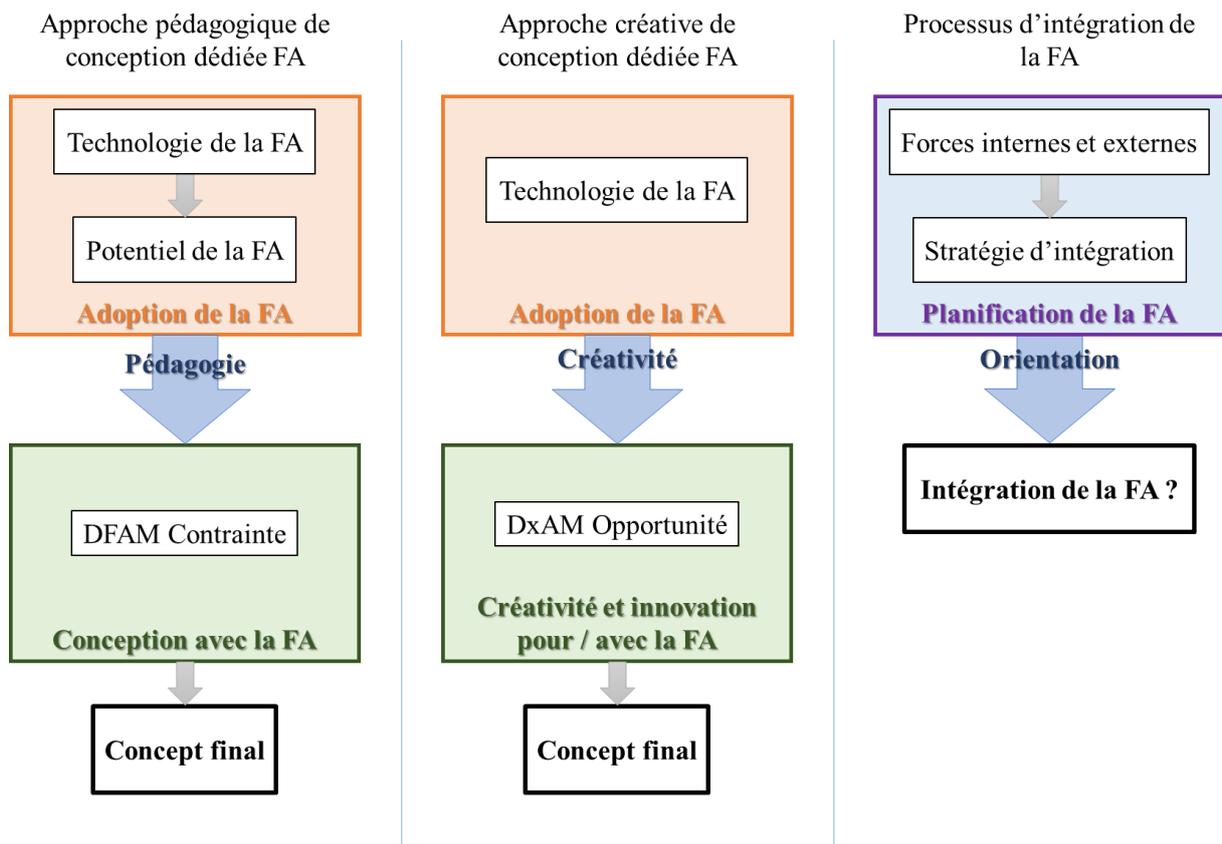


Figure 42 Limites de la littérature : 3 démarches différentes et distinctes

Ces trois démarches apportent des éléments importants dans l'intégration de la FA, il sera donc primordial de les réunir toutes les trois dans un seul et unique processus d'intégration de la FA en conception de produits.

Ces constats et les manques mis en avant par l'état de l'art seront pris en compte dans notre travail de thèse et dans l'élaboration de notre problématique et de notre hypothèse.

3 Problématique et hypothèse

L'état de l'art nous a permis de définir les manques de la littérature et de ce fait les directions à prendre pour notre méthodologie. En partant de la synthèse de l'état de l'art et de la nécessité de regrouper en un unique processus d'intégration l'ensemble des constats de l'état de l'art, nous avons pu définir une problématique et proposer une méthodologie et une hypothèse pour répondre à cette problématique (figure 43).

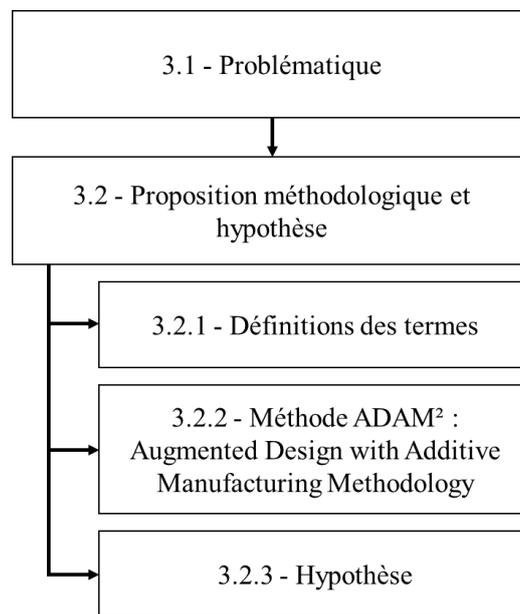


Figure 43 Plan du chapitre problématique et hypothèse

3.1 Problématique

Les constats et les manques de l'état de l'art vont nous aider à formuler la problématique de notre thèse. Ils nous permettent d'identifier les éléments à prendre en compte dans la problématique et dans la construction de notre méthodologie que nous présenterons par la suite. La prise en compte de ces constats va permettre d'améliorer le processus de conception et de proposer un modèle d'intégration de la FA en conception de produits.

Les constats font apparaître l'importance de la créativité et la nécessité d'intégrer le potentiel de la FA le plus tôt possible dans le processus de conception, au niveau des phases amont de conception. Les constats montrent aussi l'importance du contexte industriel qui fait que

l'intégration doit être étudiée au regard des particularités et des difficultés du monde des entreprises.

L'ensemble de ces informations nous permet de structurer la problématique de cette thèse :

Dans une entreprise de l'industrie manufacturière, comment intégrer la fabrication additive en phase amont de conception comme source de créativité dans une stratégie d'innovation ?

Cette problématique impose de structurer la méthode en cohérence avec la stratégie d'innovation des entreprises et de créer un outil de créativité qui, par son utilisation, va permettre de stimuler l'innovation des concepteurs et de favoriser l'exploitation du potentiel qu'offre la technologie de fabrication additive.

Pour cela, nous allons présenter dans un premier temps une structuration méthodologique et définir les termes principaux ; puis nous ferons une proposition méthodologique qui nous permettra d'énoncer une hypothèse pour répondre à la problématique.

3.2 Proposition méthodologique et hypothèse

3.2.1 Définition des termes

Notre méthodologie d'intégration de la FA en conception de produit doit être pensée dans une vision globale de l'entreprise. En reprenant les travaux présentés dans l'état de l'art sur les processus d'intégration de la FA en entreprise, nous avons pu définir une structuration méthodologique. Dans la littérature, les frontières du terme intégration ne sont pas toujours claires. Pour notre méthodologie et pour la suite de notre travail, nous allons bien différencier trois termes que sont l'implémentation, l'intégration et le déploiement en proposant une définition pour chacun pour la suite de notre travail. Ces définitions vont permettre de délimiter trois phases différentes.

Le terme d'implémentation représente l'ensemble du processus allant de la prise en compte de la FA dans l'entreprise jusqu'à la fabrication et commercialisation du produit final. La phase

d'implémentation peut être divisée en deux phases distinctes : une phase d'intégration et une phase de déploiement.

La phase d'intégration consiste à incorporer et à assimiler des connaissances pas encore présentes dans l'entreprise et à tester si l'apport de ces connaissances à un potentiel pour l'activité de l'entreprise. C'est donc bien sur cette phase que notre problématique fait référence.

La phase de déploiement s'effectue à l'issue de la phase d'intégration et exclusivement si le potentiel pour l'activité de l'entreprise a été validé. Le déploiement consiste à réadapter l'organisation de l'entreprise pour profiter du potentiel dans les activités de l'entreprise.

Dans notre contexte, l'intégration va consister à étudier et exploiter le potentiel de la FA pour la conception de produits ; et si ce potentiel permet de tirer profit dans l'activité de l'entreprise alors la phase de déploiement consiste à mettre en place la FA dans les activités de l'entreprise.

Pour répondre à notre problématique et maintenant que nous avons défini le terme d'intégration, nous proposons une méthodologie de conception avec la fabrication additive : la méthode ADAM², Augmented Design with AM Methodology. Cette proposition méthodologique nous permettra ensuite de définir notre hypothèse.

3.2.2 Méthode ADAM² : Augmented Design with AM Methodology

La méthode ADAM² s'appuie sur les travaux des approches DWAM que nous avons présentés dans l'état de l'art. Le terme « augmented » met l'accent sur le fait que nous étudions le processus de conception avec une vision plus globale.

La figure 44 présente la schématisation de la méthode ADAM².

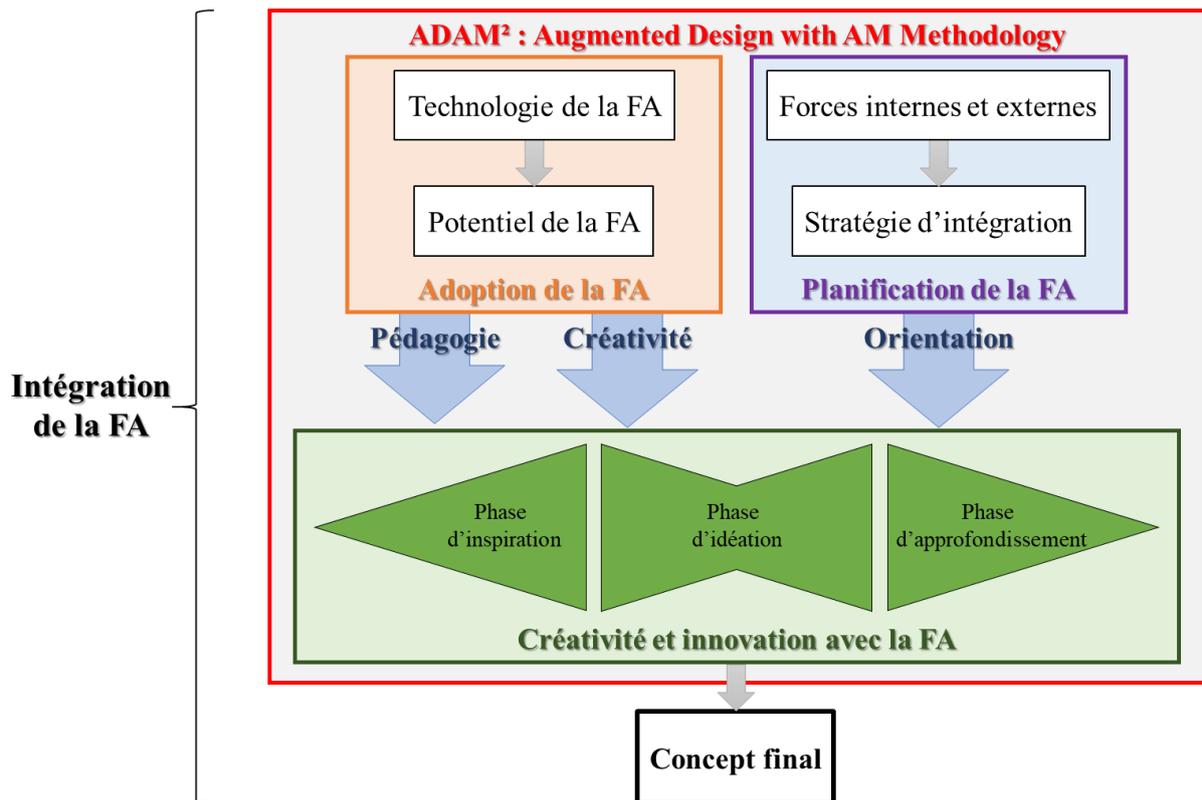


Figure 44 Schématisation de la méthode ADAM²

La méthode ADAM² se décompose en 3 phases :

- **La phase d'adoption de la FA :**

Elle consiste, en partant de la *technologie de la FA*, à définir le *potentiel de la FA*, c'est-à-dire les caractéristiques propres à cette technologie ; qu'est-ce qui est faisable en FA et qui est difficilement, voire infaisable, avec les procédés traditionnels. Cette phase d'adoption a pour objectif de structurer les caractéristiques de la FA, ce qui va simplifier la compréhension de la technologie par les concepteurs.

Cette phase doit assurer deux aspects dans l'intégration de la FA en conception de produits : un **aspect de pédagogie**, durant la phase d'adoption, les concepteurs doivent être formés sur le potentiel de la FA ; et un **aspect de créativité**, durant cette phase, les concepteurs doivent pouvoir stimuler leur créativité en conception de produits par l'apport du potentiel de la FA.

- **La phase de planification de la FA :**

Elle consiste, en partant des *forces internes et externes de l'entreprise*, à définir la *stratégie d'intégration* à adopter par l'entreprise afin d'optimiser l'innovation au regard

du contexte industriel. Le fait de prendre en compte le contexte industriel est indispensable pour assurer une intégration cohérente.

Cette phase doit assurer un troisième aspect dans l'intégration de la FA en conception de produit : un **aspect d'orientation**, la prise en compte de la stratégie d'intégration doit permettre de proposer une orientation de conception avec la FA afin de favoriser l'innovation.

- **La phase de créativité et d'innovation avec la FA :**

Elle comprend trois phases différentes : *une phase d'inspiration* permettant de favoriser la divergence ; *une phase d'idéation* permettant d'intégrer les connaissances de la FA dans des idées de solutions ; et *une phase d'approfondissement* favorisant la convergence vers le concept final. Cette phase s'appuie sur le processus en double diamant.

3.2.3 Hypothèse

La prise en compte d'une phase d'adoption et d'une phase de planification en amont de la phase de créativité et d'innovation avec la FA a pour objectif d'assurer une intégration permettant d'exploiter le potentiel de la technologie, tout en restant en accord avec le contexte de l'entreprise.

La structuration du potentiel associée à la prise en compte de la stratégie d'intégration sont absentes des méthodologies de conception en FA actuelles. Or, à travers les différents éléments de l'état de l'art de recherche et industriel, nous avons souligné le besoin de mieux structurer le potentiel et de penser l'intégration de la FA dans une vision globale de l'entreprise.

Ces éléments nous amènent à énoncer notre hypothèse de résolution :

Dans une entreprise de l'industrie manufacturière, la méthode ADAM² permet d'assurer l'intégration du potentiel de la FA en conception de produits.

La méthode ADAM² doit donc permettre de définir le potentiel de la FA en caractéristiques claires, exhaustives et structurées ; ce qui sera présenté dans la première partie des expérimentations avec la construction d'un outil comprenant des objets en FA. La méthode doit

s'assurer que l'outil définissant le potentiel peut être utilisé pour un processus de conception et qu'il permet à la fois de stimuler la créativité et de forcer l'exploitation du potentiel de la FA ; la deuxième partie des expérimentations a pour but de valider ce critère. La méthode ADAM² doit aussi permettre d'assurer qu'elle s'adapte aux forces internes et externes de l'entreprise afin de bien orienter le processus de conception à la stratégie voulue ; la troisième partie des expérimentations a pour finalité cette problématique.

4 Expérimentations

Cette partie va présenter les différentes expérimentations qui ont été effectuées durant cette thèse afin de structurer et de valider la méthode ADAM². Cette partie se compose en 3 parties, la première présentant le développement et la validation d'un outil d'adoption du potentiel de la FA, la deuxième s'appuyant sur 2 pré-expérimentations et une expérimentation pour valider les aspects pédagogiques et créatifs de la méthode ADAM² en conception de produits, et la troisième assurant la planification de l'adoption de la FA en prenant en compte les forces externes et internes de l'entreprise afin d'orienter les concepteurs dans les processus de conception (figure 45).

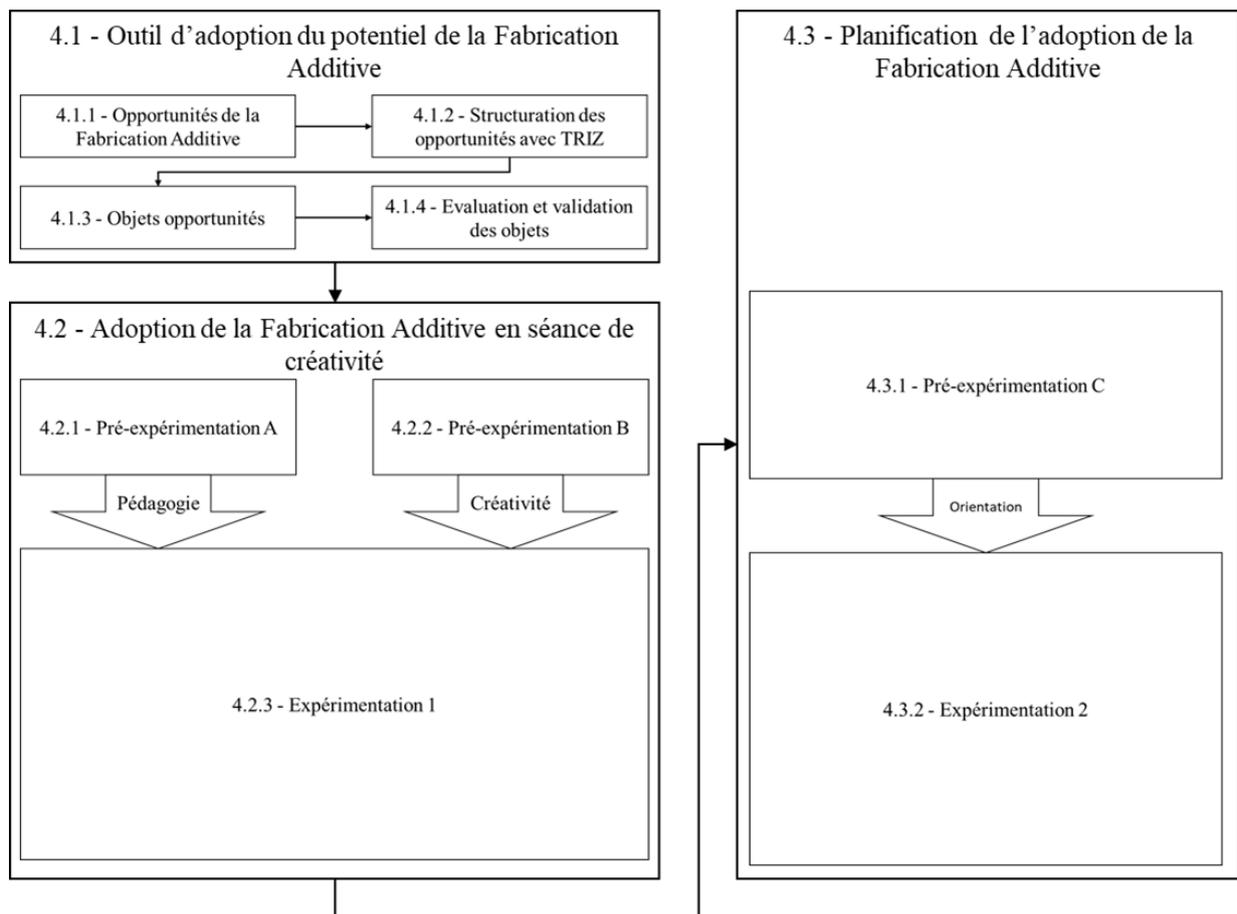


Figure 45 Plan du chapitre sur les expérimentations

4.1 Outil d'adoption du potentiel de la Fabrication Additive

La méthode ADAM² est basée sur un outil permettant de présenter et d'exploiter le potentiel de la FA. Dans cette partie, nous allons présenter cet outil qui est au centre du processus proposé par notre méthodologie. Nous allons commencer par définir le potentiel de la FA avec les opportunités de la FA, qui permettront de développer un outil d'adoption du potentiel de la FA pour former les concepteurs (aspect pédagogique) et pour stimuler leur créativité (aspect créativité) : les objets opportunités (figure 46).

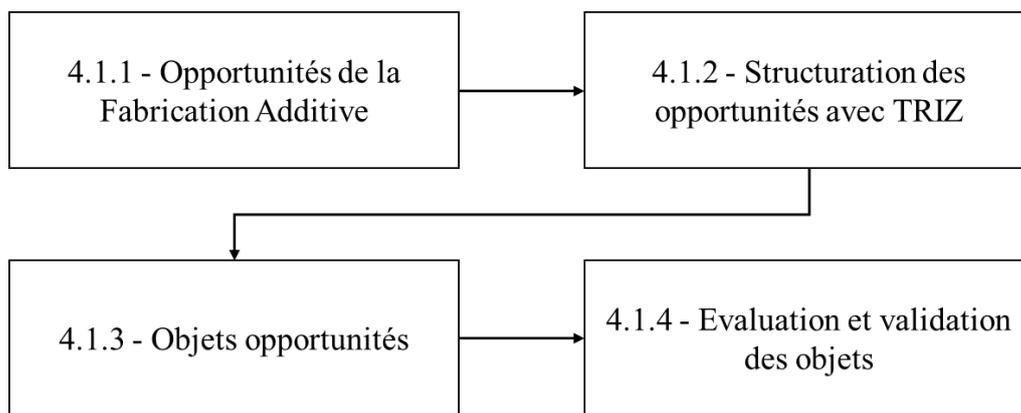


Figure 46 Schématisation de développement et de la validation de l'outil d'adoption du potentiel de la FA

4.1.1 Opportunités de la Fabrication Additive

Un élément central de notre méthode est la définition du potentiel technique de la FA ; ce qui est faisable avec cette technologie et qui est difficilement faisable, voire infaisable avec les autres procédés de fabrication.

Certaines publications ont présenté des caractéristiques de la FA, nous nous sommes appuyés sur leurs travaux ainsi que sur les complexités de Gibson, présentées dans le chapitre sur le contexte, pour définir le potentiel de la FA (Gibson et al., 2015) (Gross et al., 2018) (Renjith et al., 2020).

Les quatre complexités de Gibson sont fréquemment utilisées comme base du potentiel de la FA, mais l'échelle de la complexité est trop élevée pour faire comprendre à des concepteurs les caractéristiques du potentiel de la technologie, principalement au niveau de la complexité fonctionnelle. En nous appuyant sur la littérature et sur l'analyse d'un grand nombre d'objets en FA, nous avons divisés les complexités en opportunités. Chaque opportunité correspond à une caractéristique du potentiel. En cherchant à atteindre la connaissance FA au juste besoin et proposant une classification structurée et exhaustive, nous obtenons 14 opportunités.

Le tableau 12 présente les 14 opportunités. Les définitions détaillées des opportunités et des exemples de pièces correspondant aux différentes opportunités sont présentés dans l'annexe 3.

Complexités de Gibson	Opportunités de la Fabrication Additive	Caractéristiques
Complexité géométrique	Liberté de géométrie	Possibilité de construire presque toutes les formes
	Objets issus de scans 3D	Possibilité de fabriquer des pièces correspondant à des objets scannés
Complexité hiérarchique	Variation de microstructure	Possibilité de faire varier la porosité et la densité d'une pièce
	Texture	Possibilité de créer des surfaces variantes en fonction du besoin
Complexité fonctionnelle	Monobloc	Possibilité de réduire le nombre de parties d'une pièce
	Optimisation topologique	Possibilité d'avoir des géométries organiques grâce à l'analyse d'éléments finis
	Mécanisme non assemblé	Possibilité de faire des joints cinématiques
	Segmentation	Possibilité de fabriquer les pièces séparément pour créer un kit
	Inclusion	Possibilité d'emprisonner un élément dans la pièce pendant la construction
	Réseau interne	Possibilité de concevoir un réseau interne durant la fabrication
	Structure interne	Possibilité d'ajuster les motifs internes de la structure en fonction du besoin
Structure auxétique	Possibilité de faire varier le module de Poisson d'une pièce grâce à la structure	
Complexité matériau	Choix matériaux	Possibilité d'utiliser un grand choix de matériaux
	Multi-matériaux	Possibilité de concevoir des pièces multi-matériaux

Tableau 12 Opportunités de la fabrication additive (Lang et al., 2021)

4.1.2 Structuration des opportunités avec TRIZ

Après avoir défini les 14 opportunités, l'objectif était de rendre les opportunités utilisables en séance de créativité, et plus particulièrement en phase amont de conception. Grâce à l'état de l'art, l'idée était d'avoir une représentation manipulable des opportunités car la manipulation d'objets favorise la génération d'idées et de concepts créatifs (Rias et al., 2017). Le choix a été de s'orienter vers une représentation par opportunité : un objet par opportunité.

La théorie TRIZ a permis de structurer la conception des objets opportunités. En effet, la théorie TRIZ offre des solutions générales innovantes pouvant être adaptées aux caractéristiques de la FA, étant donné que cette théorie consiste à modéliser un problème de conception afin d'atteindre une solution à travers un modèle de solutions (Gross et al., 2018). Les opportunités ont un rôle de modèles de solutions qui devront être interprétés par les concepteurs en fonction du produit sur lequel ils travaillent. L'apport de solutions innovantes et indépendantes d'un secteur spécifique permet aux concepteurs d'interpréter ces solutions pour leurs propres problèmes de conception (A. Lang et al., 2019). L'utilisation des principes de TRIZ permet de structurer les décisions de design des objets, et ainsi, de limiter les biais de design pouvant court-circuiter la compréhension des opportunités associées à chaque objet. L'idée a donc été d'associer les principes d'innovation de TRIZ au 14 opportunités afin d'aider dans la conception des objets opportunités. La figure 47 présente le processus de conception des objets opportunités à l'aide des principes de TRIZ.

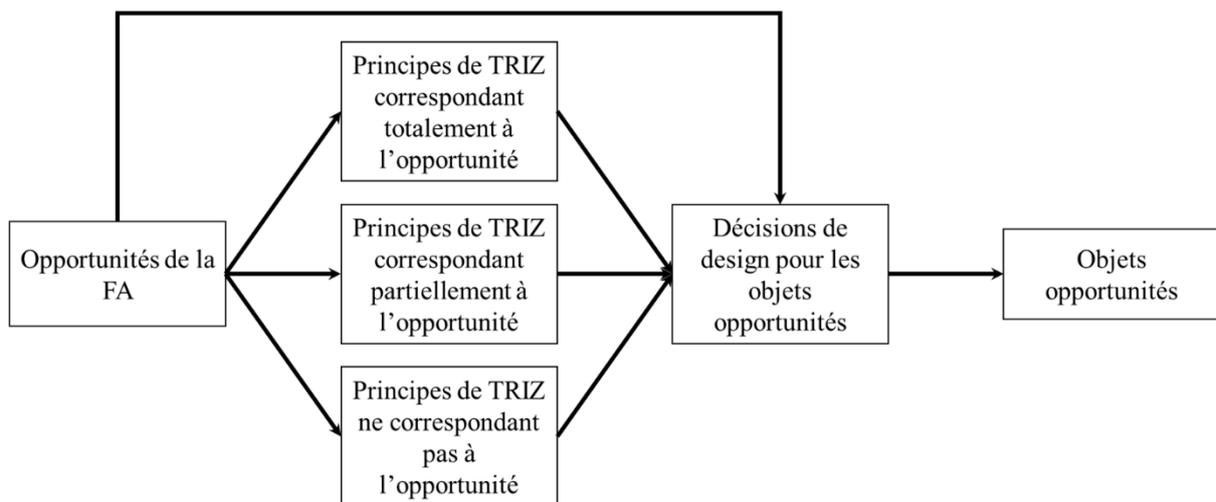


Figure 47 Schématisation du processus de conception des objets opportunités

Pour concevoir ces objets, une correspondance entre les 40 principes de TRIZ et les 14 opportunités de la fabrication additive a été faite. Cette correspondance présentée sur le tableau 13 a été la base de la conception de nos objets opportunités. Deux niveaux de lien ont été créés, le niveau « plein » (représenté en rouge et avec des « X ») et le niveau « partiel » (représenté en orange et avec des « x »).

Les 40 principes de TRIZ	Complexité Géométrique		Complexité Hiérarchique		Complexité Fonctionnelle							Complexité Matériau		
	Liberté de géométrie	Objets issus de scans 3D	Variation de la microstructure	Texture	Monobloc	Optimisation topologique	Mécanisme non-assemblé	Segmentation	Inclusion	Réseau interne	Structure interne	Structure auxétorique	Choix matériaux	Multi-matériaux
Segmentation			x	x			x	x	x			x		x
Extraction					x	x		x						
Qualité locale	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x		x
Asymétrie	x	x				x					x			
Groupement					x		x	x	x					x
Universalité							x		x	x	x			x
Poupée russe			x						x	x				x
Contrepoids			x							x	x			x
Action opposée préventive														
Action préliminaire		x					x	x	x					
Prévention								x						
Equipotentialité														
Inversion							x							
Sphéricité	x					x					x			
Dynamisme							x		x			x		
Action partielle ou excessive				x							x		x	x
Changement de dimension	x													
Vibration mécanique														
Action périodique														
Continuité d'une action utile														
Action rapide														
Transformation d'un moins en plus				x										
Asservissement														
Intermédiaire							x	x	x					x
Self-service									x					
Copie	x	x									x		x	
Ephémère bon marché au lieu de longévité couteuse		x	x	x		x					x		x	
Substitution d'un système mécanique														
Système hydraulique ou pneumatique									x	x				
Enveloppe flexible et film de faible épaisseur	x					x		x			x	x		x
Matériau poreux			x						x					
Changement de couleur			x										x	x
Homogénéité													x	x
Rejet et régénération des parties			x	x				x			x			x
Changement de paramètres physique et chimique d'un objet			x	x					x		x			x
Transition de phases													x	x
Expansion thermique									x				x	x
Oxydants forts														
Environnement inerte														
Matériaux composites									x		x			x

Légende:	x	L'opportunité FA correspond totalement au principe de TRIZ
	x	Seulement une partie des conceptions avec l'opportunité donnée répond au principe de TRIZ

Tableau 13 Tableau de correspondance entre les 40 principes de TRIZ et les opportunités de la FA

Le niveau « plein » a été choisi quand l'opportunité correspond totalement au principe de TRIZ ; c'est-à-dire que l'ensemble des conceptions ayant les caractéristiques de l'opportunité répond au principe d'innovation. Lorsque que seulement une partie des conceptions avec les caractéristiques de l'opportunité donnée répond à un principe, le niveau est défini comme « partiel ». Enfin, si aucune conception avec une caractéristique d'une opportunité donnée correspond au principe d'innovation, alors la case n'est pas cochée.

Pour obtenir cette correspondance, nous avons fait remplir le tableau par 3 personnes ayant à la fois une connaissance sur les technologies de FA ainsi que sur la théorie TRIZ. Ensuite, ces 3 personnes ont mis en commun leurs résultats durant une séance de travail afin de proposer une unique version. L'objectif est d'obtenir un outil d'analyse des opportunités pour la suite de la conception des objets opportunités.

En final, nous remarquons que 30 principes correspondent à une ou plusieurs opportunités et 10 principes ne correspondent à aucune des opportunités. Certains principes correspondent à plusieurs opportunités ; par exemple, le principe de qualité locale correspond parfaitement à 7 opportunités et partiellement à 4 autres.

Ce tableau nous permet de mieux comprendre les particularités à faire ressortir dans les représentations des opportunités. Le fait d'associer les opportunités de TRIZ aux opportunités de la FA a permis de ne pas introduire trop de biais de conception pouvant orienter les concepteurs vers des principes d'innovation ne correspondant pas à la définition de l'opportunité. Par exemple, si nous prenons l'opportunité mécanisme non-assemblé, le principe d'extraction ne correspond pas à l'opportunité, et cela nous a aidé dans les décisions de conception afin de bien faire ressortir le fait que les différentes parties du mécanisme ne doivent pas pouvoir s'extraire les unes par rapport aux autres. Le design de cet objet ne doit donc pas correspondre au principe d'extraction afin d'accentuer l'aspect non-assemblé de cet objet opportunité.

L'ensemble des décisions de conception, nous a amené à l'élaboration d'un outil comprenant les 14 objets opportunités.

4.1.3 Objets opportunités

Les objets opportunités sont un ensemble d'objets inspirationnels et formateurs. Le but de ces objets est d'orienter les concepteurs vers le potentiel technique de la FA.

Les appellations des opportunités ne sont pas toujours claires pour une équipe de conception n'ayant pas de connaissance en FA. Il est donc difficile avec seulement le nom et l'explication associée de comprendre les aspects techniques des opportunités.

Les objets vont donc avoir un objectif instructif afin que les concepteurs comprennent l'opportunité associée, et un objectif créatif afin de débloquer les barrières cognitives associées à la fabrication traditionnelle.

Pour cela, nous avons cherché à ce que l'objet soit le plus neutre dans sa forme générale et en même temps qu'il représente au mieux l'opportunité. En nous appuyant sur la littérature sur les objets inspirationnels dans les processus de conception (Cruz & Gaudron, 2010) (Mer et al., 1995) nous sommes partis sur des objets de forme cubique d'une taille de 3cm de côté.

La conception définitive des objets est présentée dans ce chapitre. Ils n'ont pas tous été fabriqués avec le même procédé de FA. Trois types de procédé ont été employés : la fusion sélective par laser SLM (machine SLM[®]125), la projection de matière (machine Stratasys Objet260 Connex) et le dépôt de fil en fusion FDM (machines Stratasys Dimension ELITE, MakerBot Replicator 2).

Représentation des objets

Liberté de géométrie

Cette objet comprend un tube allant dans tous les sens pour former un nœud complexe (figure 48). Les orientations de ce tube sont totalement aléatoires. Le tube décrit un circuit fermé passant dans tout le volume du cube. Cette forme est infaisable dans les procédés de fabrications traditionnelles car l'accès entre les différentes parties du tube sont inaccessibles. Ce cube a été fabriqué avec une machine Stratasys Dimension ELITE en ABS.

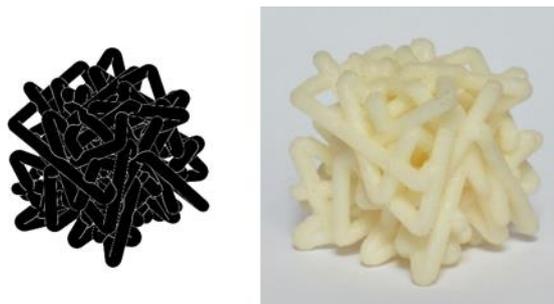


Figure 48 Objet opportunité Liberté de géométrie

Objets issus de scans 3D

Ce cube a été obtenu grâce à un scan de pièces de Lego® pour pouvoir intégrer dans la conception les surfaces des Lego® permettant de lier des pièces existantes avec la pièce en FA (figure 49). Les pièces de Lego® ayant aussi une géométrie très simple, elles n'imposent pas des formes aux concepteurs lors des séances de conception. L'objet a été fabriqué avec une machine Stratasys Objet260 Connex et une matière transparente le VeroClear.

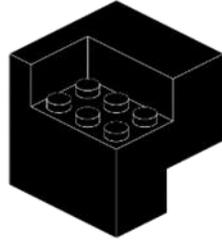


Figure 49 Objet opportunité Objets issus de scan 3D

Variation de microstructure

Cet objet opportunité se compose de 8 parties avec chacune une dureté différente (figure 50). L'idée est de montrer que l'on obtient des propriétés mécaniques différentes en fonction des propriétés de porosité définies pour la fabrication. Le choix d'un matériau mou permet de sentir la différence de dureté en manipulant l'objet. Ce matériau est du TangoBlack, et la machine une Stratasys Objet260 Connex.

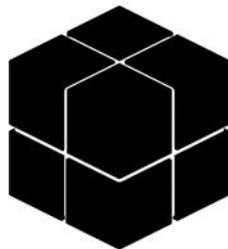


Figure 50 Objet opportunité Variation de microstructure

Texture

L'objet représentant la texture est un cube transparent ayant 6 types de surfaces différentes (figure 51). Il a été fabriqué avec la Stratasys Objet260 Connex (VeroClear) car le procédé de jet de matière (material jetting) permet d'obtenir un très bel état de surface, ce qui est important pour distinguer les différentes textures.

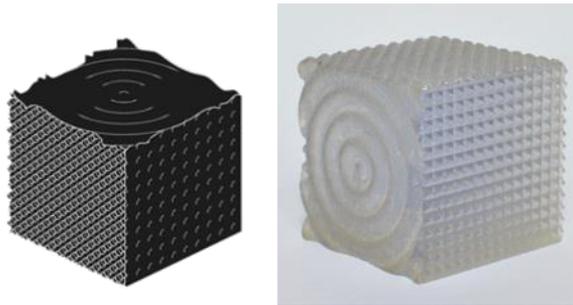


Figure 51 Objet opportunité Texture

Monobloc

Le cube monobloc comprend une spirale cubique avec une colonne centrale (figure 52). L'idée de cet objet est de montrer qu'il n'y avait pas besoin de 2 pièces pour le concevoir (la spirale et la colonne), mais qu'il est possible d'obtenir l'ensemble avec une unique pièce en FA. Cet objet opportunité a été fabriqué en FDM avec une machine MakerBot Replicator et du PLA en matériau.

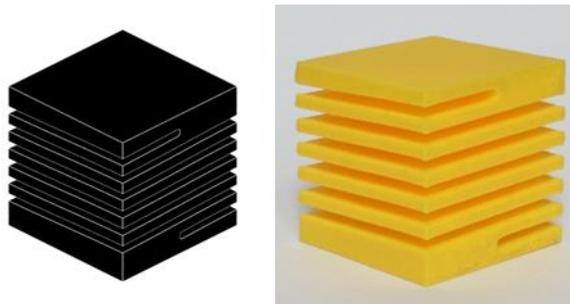


Figure 52 Objet opportunité Monobloc

Optimisation topologique

L'objet optimisation topologique représente une structure organique rappelant les formes obtenues à la suite d'une réduction de la matière par optimisation topologique (figure 53). Cet objet montre le potentiel de forme proche des os qui permet d'optimiser au maximum les formes en gardant de bonnes propriétés mécaniques. Ce cube est dans un alliage ferreux et a été fabriqué avec une machine SLM[®] 125.

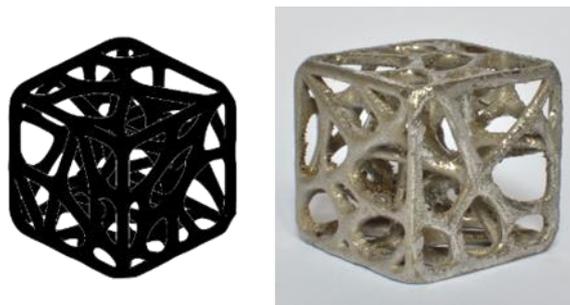


Figure 53 Objet opportunité Optimisation topologique

Mécanisme non-assemblé

Le cube correspondant à l'opportunité mécanisme non-assemblé comprend 3 trois liaisons mécaniques : un pivot, une glissière et une hélicoïdale (Figure 54). Grâce aux 3 liaisons différentes, il est possible de montrer que le potentiel pour des mécanismes est très important. Les liaisons ont été pensées pour montrer aux concepteurs qu'il n'y a pas eu de procédé d'assemblage, et que la pièce a été fabriquée en une fois. Cet objet a été fabriqué avec du PLA sur une machine MakerBot Replicator.

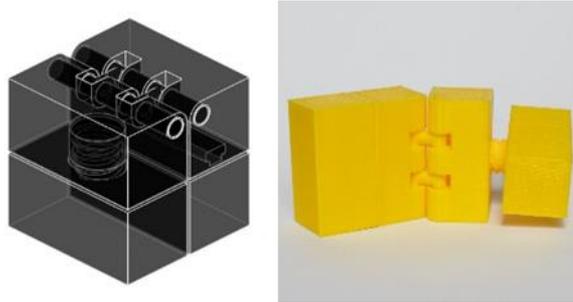


Figure 54 Objet opportunité Mécanisme non-assemblé

Segmentation

Cet objet se décompose en 4 parties démontables : 2 correspondant à un petit cube (1,5*1,5*1,5), 1 correspondant à 2 petits cubes liés et 1 correspondant à 4 petits cubes liés (figure 55). L'ensemble de l'objet a été fabriqué en une fois dans la version assemblée. Le cube peut facilement se démonter à la main. Pour la fabrication, nous avons utilisé la machine Stratasys Objet260 Connex et le matériau transparent VeroClear pour que les concepteurs comprennent comment l'objet doit être manipulé pour être démonté ou assemblé.

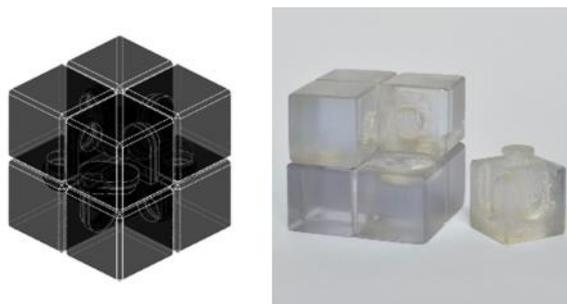


Figure 55 Objet opportunité Segmentation

Inclusion

Le cube inclusion se compose d'une « cage » fabriqué en FA, encapsulant un cube en bois ne pouvant pas être retiré de la « cage » (figure 56). Le cube en bois a été mis dans la « cage » durant la fabrication de cette dernière de manière à ne pas gêner le procédé de fabrication. Il a

été choisi un cube en bois pour montrer que la pièce incluse n'est pas faite en FA. Par ailleurs, le choix de faire une « cage » est de permettre aux concepteurs de voir la partie incluse dans la pièce. La « cage » en FA a été fabriquée en PLA sur une machine MakerBot Replicator.

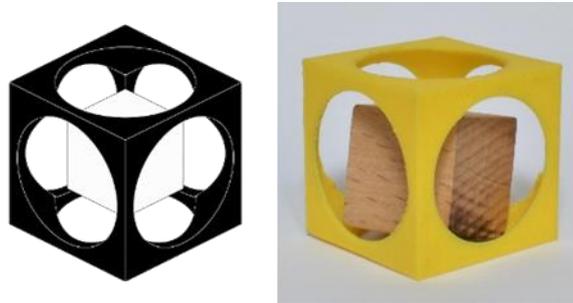


Figure 56 Objet opportunité Inclusion

Réseau interne

Le cube représentant l'opportunité réseau interne est un cube transparent comprenant des canaux internes de manière strictement aléatoire (figure 57). Les canaux ont des orientations très complexes afin de montrer qu'il n'est pas possible de trouver des outils en fabrication traditionnel pouvant obtenir de tels canaux. L'utilisation de la matière transparente (VeroClear) de la machine Stratasys Objet260 Connex permet de montrer aux concepteurs la complexité des formes des canaux.

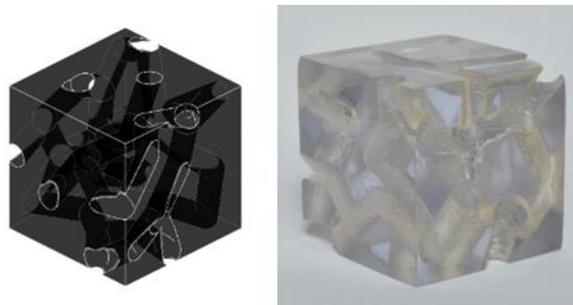


Figure 57 Objet opportunité Réseau interne

Structure interne

L'objet de l'opportunité structure interne représente 8 structures internes différentes (figure 58). L'objectif à travers ce cube est de montrer les possibilités au niveau des motifs de remplissage et de montrer qu'il est possible de faire varier ces motifs dans une unique pièce étant donné la présence de ces 8 motifs sur une pièce fabriquée en une fois. La pièce a été fabriquée en PLA avec une imprimante MakerBot Replicator.

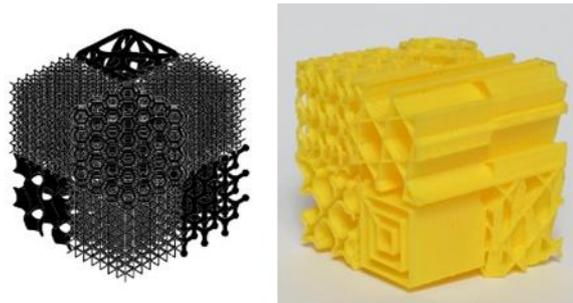


Figure 58 Objet opportunité Structure interne

Structure auxétique

Ce cube comprend une structure avec un motif permettant d'avoir un module de poisson négatif (figure 59). L'objet est dans une matière molle afin d'être manipulable par les concepteurs. Lorsqu'un effort est exercé sur deux faces lisses opposées, le cube est comprimé entre ces 2 faces ; avec un tel effort, une compression perpendiculaire est aussi observé au lieu d'une extension comme sur une structure non-auxétique. Cet objet opportunité a été fabriqué avec une machine Stratasys Objet260 Connex et le matériau TangoBlack.

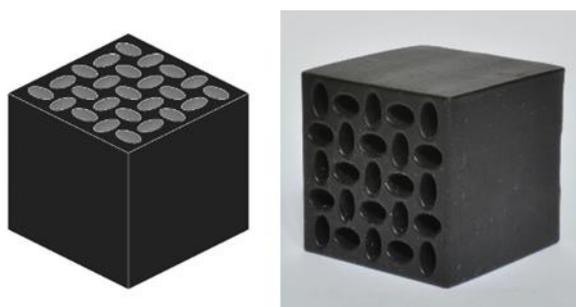


Figure 59 Objet opportunité Structure auxétique

Choix matériaux

Ce cube se présente sous la forme d'une plaque avec une colonne sur laquelle se positionnent 5 plaques de matières différentes (figure 60). L'idée de ce cube est de présenter l'étendue des matériaux utilisables en FA, tel un « nuancier ». Les plaques ont été fabriquées avec les 4 machines afin d'avoir une plaque en alliage ferreux, une plaque en PLA, une plaque en ABS, une plaque en matière transparente et une plaque en matière molle (type élastomère).

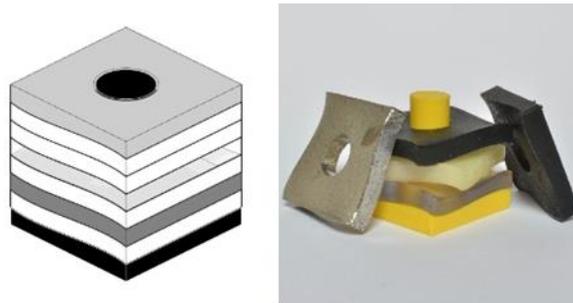


Figure 60 Objet opportunité Choix matériaux

Multi-matériaux

Le cube associé à l'opportunité multi-matériaux se compose de 2 matériaux différents : un transparent (VeroClear) et un mou de type élastomère (Tangoblack) (Figure 61). Le cube a été fabriqué en une seule fois et la matière molle sépare les deux parties en matière transparente afin de bien montrer qu'il n'y a pas eu de procédé d'assemblage pour avoir les 2 matériaux sur la même pièce. Un objet de ce type est totalement infaisable avec des procédés de fabrication traditionnels. L'objet a été fabriqué avec une machine Stratasys Objet260 Connex.

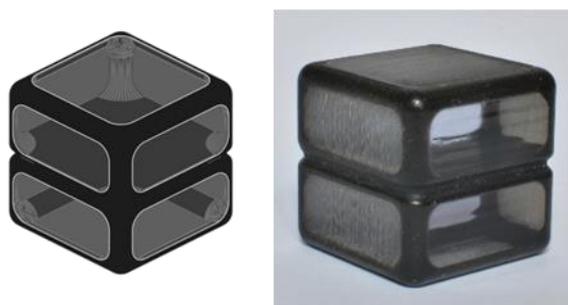


Figure 61 Objet opportunité Multi-matériaux

4.1.4 Evaluation et validation du design des objets

Les objets ci-dessus sont représentés selon leur conception définitive. Avant d'utiliser ces objets en séance de créativité, nous avons voulu faire évaluer le design des cubes afin de valider leur conception par rapport à l'opportunité associée à chacun, afin de s'assurer que les objets évoquent bien l'opportunité visée. Cela a permis d'adapter et d'améliorer les conceptions afin de ne pas avoir de biais de compréhension lors de l'utilisation de l'outil.

Ainsi, les objets opportunités ont été évalués par 3 échantillons. Le premier échantillon se compose de 18 étudiants du Politecnico di Torino en Italie en cursus de Management Engineering ; plusieurs nationalités étaient représentées. Le deuxième échantillon est un échantillon d'académiques se composant de 6 professeurs de 3 établissements universitaires

français. Le troisième échantillon se compose de 5 industriels de 5 entreprises basées en France ou en Suisse. Ces 5 industriels pilotent l'intégration de la fabrication additive dans les activités de leurs entreprises.

L'évaluation a consisté à effectuer une analyse par verbalisation des objets. Chaque participant a eu pendant 1 à 2 minutes chaque objet dans les mains et devait noter tous les mots qui lui venaient à l'esprit.

L'objectif de cette évaluation est de faire énoncer le nom de l'opportunité ou un synonyme de ce dernier pour valider la conception des objets ou les améliorer. Cette analyse a aussi pour objectif de savoir si les objets peuvent être utilisés seuls en séance de créativité, avec les noms des opportunités associées, ou avec une introduction sur les opportunités.

Les séances de créativité se faisant en groupe, la manipulation des objets entraîne des discussions et des interrogations entre les participants. Les participants vont exprimer leurs sensations au reste du groupe, ainsi on peut valider la conception des objets si une personne sur 2, voire une personne sur 3 donne au minimum un synonyme. La figure 62 présente des exemples de synonymes donnés par les participants pour certaines opportunités.

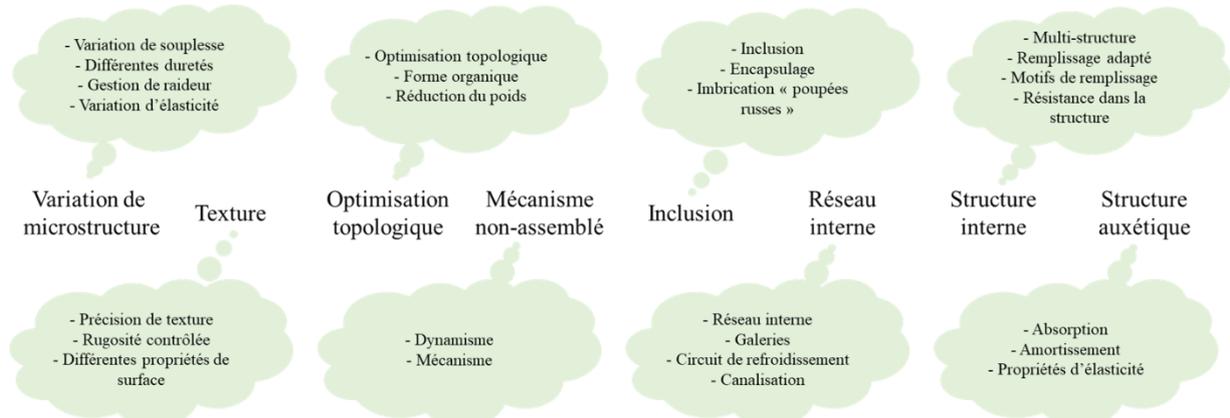


Figure 62 Exemples de synonymes pour certaines opportunités

Pour chaque participant, on a donné la note de 1 quand celui-ci donnait le nom de l'opportunité ou un synonyme et la note de 0 dans le cas contraire. On a pris ensuite les notes de tous les participants et on les a étudiées de 3 différentes manières :

- Avec 3 panels de même poids : Industriels (5), académiques (6) et étudiants (18)
- Avec 2 panels de même poids : expérimentés (11) représentés par les industriels plus les académiques, et les novices (18) représentés par les étudiants
- Avec 1 seul panel comprenant les 39 participants à l'évaluation.

On observe qu'il y a très peu de différences au niveau des valeurs avec 1, 2 ou 3 panels, comme on peut le remarquer sur le graphique sur la figure 63.

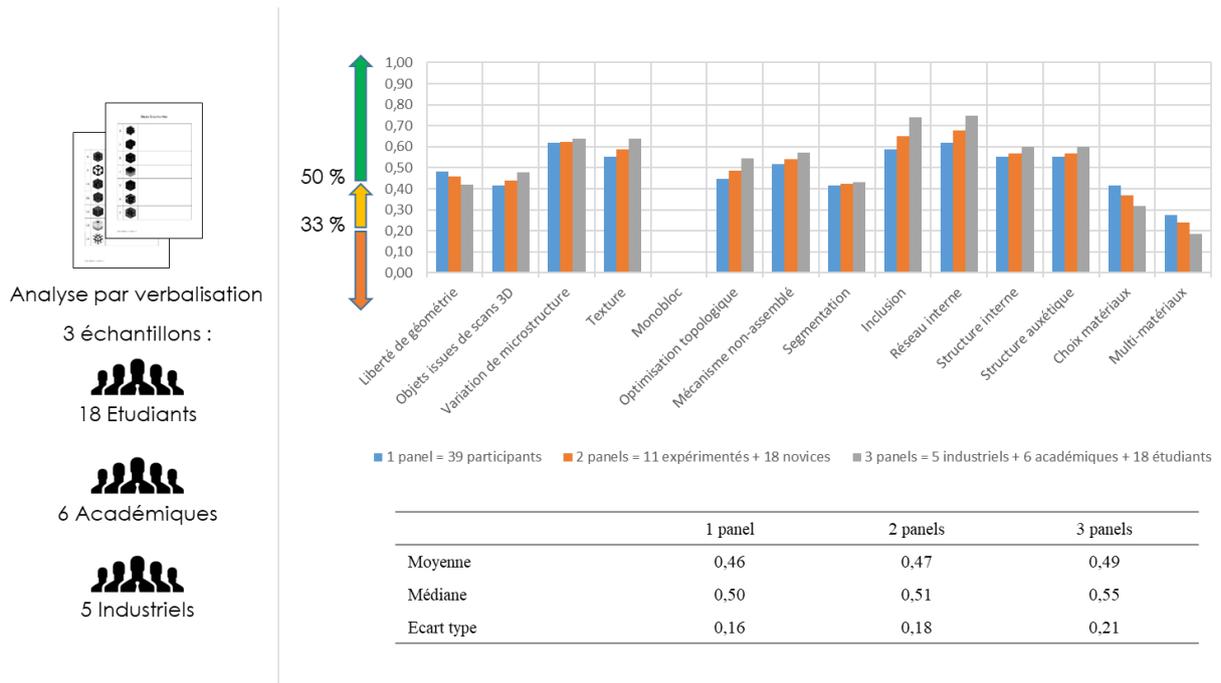


Figure 63 Evaluation des objets opportunités

Pour chaque objet, on obtient une note comprise entre 0 et 1. Avec les mots donnés par les participants, nous avons validé un grand nombre d'objets. On a pu observer des mots mettant en avant des biais de conception, cela nous a permis d'améliorer ou d'adapter la conception des objets. Par exemple, notre premier objet représentant la texture était compris par les participants, mais les motifs choisis entraînaient la présence de nombreux mots sur les qualités de surface et non sur le potentiel de faire varier les propriétés de surface. Ainsi, nous avons retravaillé cet objet afin d'avoir des motifs de surface n'entraînant pas ce biais (figure 64).

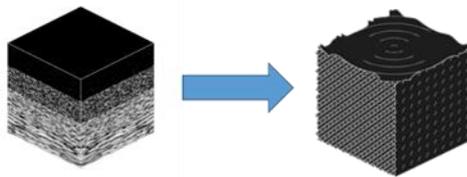


Figure 64 Evolution de l'objet opportunité Texture

L'évaluation a mis en avant des similitudes de conception trop importantes entre certains cubes obligeant d'augmenter les disparités entre ces derniers. Le premier lot d'objets était entièrement en matériau plastique ; le panel d'industriels nous a informé que la présence d'objets en métal

dans le lot permettrait d'avoir un aspect plus attractif auprès des professionnels. L'évaluation a mis en avant la difficulté de compréhension de l'objet associé à l'opportunité monobloc.

Ainsi, cette évaluation a permis d'améliorer la conception de 4 objets et d'intégrer le métal dans la conception de 2 objets.

Les remarques des participants ont mis en avant qu'une courte présentation des opportunités et des objets opportunités avant leur utilisation en séance de créativité pouvait améliorer la compréhension de ces derniers.

Une fois l'ensemble des objets validés, une boîte permettant de transporter les objets pour les utiliser durant des séances de créativité a été conçue (figure 65).

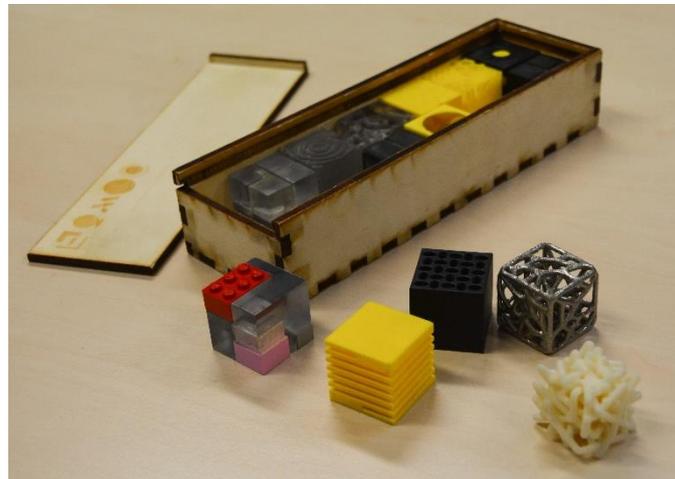
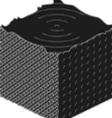
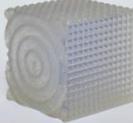
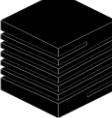
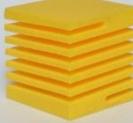
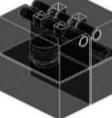


Figure 65 Boite avec les objets opportunités

4.1.5 Synthèse de l'outil d'adoption du potentiel de la FA

Le tableau 14 présente une synthèse des opportunités avec leurs noms, leurs descriptions, les représentations des objets opportunités sous forme de schéma et des photos des objets opportunités. Ces opportunités représentent le potentiel technique de la FA, leur design a été conçu afin de faire comprendre l'opportunité de la FA associée à chaque objet. Les opportunités ont été définies afin de présenter de manière exhaustive tout ce qui est faisable en FA et qui est difficilement faisable, voire infaisable avec des procédés de fabrication traditionnelle.

Opportunité de la Fabrication Additive	Description	Schéma	Objet
Liberté de géométrie	Possibilité de construire presque toutes les formes		
Objets issus de scans 3D	Possibilité de fabriquer des pièces correspondant à des objets scannés		
Variation de microstructure	Possibilité de faire varier la porosité et la densité d'une pièce		
Texture	Possibilité de créer des surfaces variantes en fonction du besoin		
Monobloc	Possibilité de réduire le nombre de parties d'une pièce		
Optimisation topologique	Possibilité de supprimer la matière non soumise à des efforts		
Mécanisme non-assemblé	Possibilité de faire des joints cinématiques		

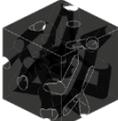
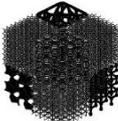
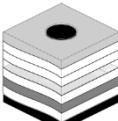
Segmentation	Possibilité de fabriquer les pièces séparément pour créer un kit		
Inclusion	Possibilité d'emprisonner un élément dans la pièce pendant la construction		
Réseau interne	Possibilité de concevoir un réseau interne durant la fabrication		
Structure interne	Possibilité d'ajuster l'intérieur de la structure en fonction du besoin		
Structure auxétique	Possibilité de faire varier le module de Poisson d'une pièce grâce à la structure		
Choix matériaux	Possibilité d'utiliser un grand choix de matériaux		
Multi-matériaux	Possibilité de concevoir des pièces multi-matériaux		

Tableau 14 Synthèse des opportunités de la FA

La structuration du potentiel de la FA en opportunités et la représentation de ces opportunités sous forme d'objets nous a permis de concevoir et de valider la phase d'adoption de la FA de notre méthode ADAM² (encadré orange) (figure 66).

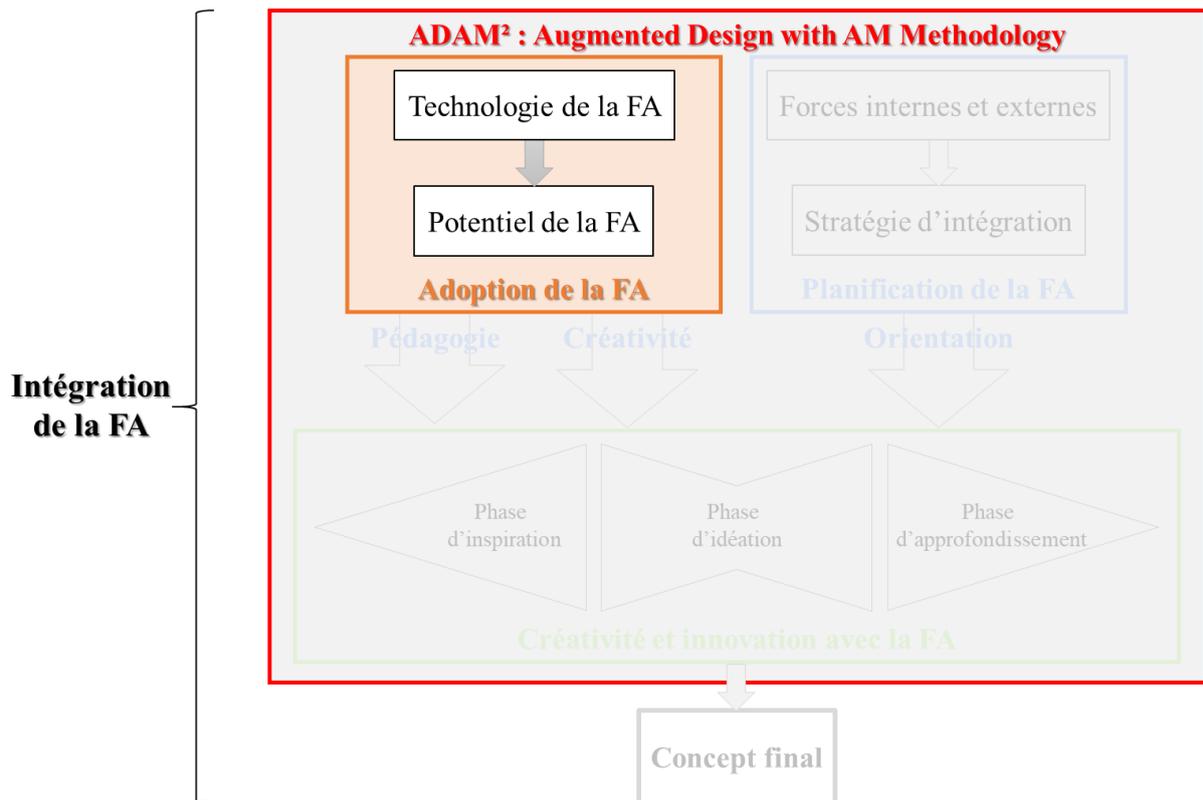


Figure 66 Phase d'adoption de la FA validée par la conception des opportunités

Maintenant que nous avons défini le potentiel de la FA et que nous avons conçu un outil exhaustif pour transmettre ce potentiel en séance de conception de produits, nous allons dans la partie suivante développer le processus de conception qui va permettre d'assurer l'adoption de la FA pour les séances de créativité. Il s'agit donc de créer le lien entre la phase d'adoption de la FA et la phase de créativité et innovation avec la FA, assuré par les aspects de pédagogie et de créativité.

4.2 Adoption de la Fabrication Additive en séance de créativité

Dans cette partie, nous allons présenter la construction du protocole de conception permettant d'assurer l'intégration de la FA par la prise en compte de l'adoption du potentiel de la FA dans une séance de créativité. L'objectif est double : un objectif de compréhension et d'exploitation des opportunités de la FA ; et un objectif de stimulation de la créativité par les objets opportunités. Pour atteindre ce double objectif, nous avons effectué deux pré-expérimentations (pré-expérimentation A et pré-expérimentation B) et une expérimentation (expérimentation 1). La pré-expérimentation A a pour objectif de valider l'aspect pédagogique de notre méthode, la pré-expérimentation B a pour objectif de valider l'aspect de créativité de notre méthode, et l'expérimentation 1 a pour finalité de valider les deux aspects dans les phases amonts de conception de produit (figure 67).

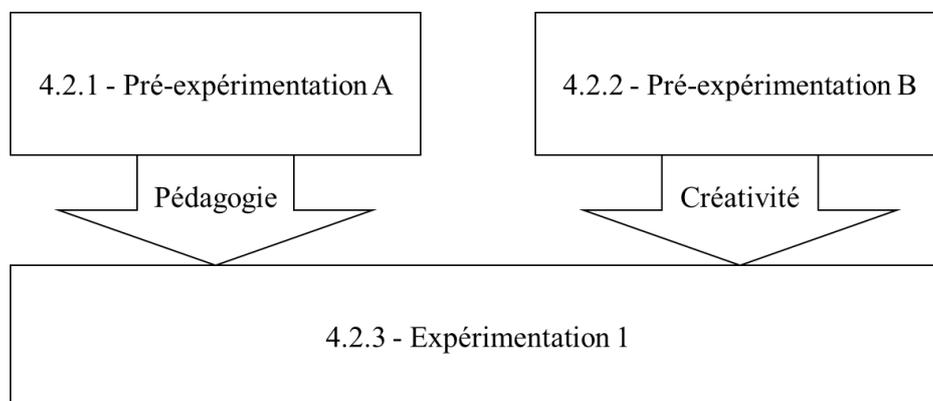


Figure 67 Plan d'expérience sur l'adoption de la FA en séance de créativité

4.2.1 Pré-expérimentation A

Introduction et objectif

La première pré-expérimentation a pour but de valider le fait que nos objets opportunités ont un potentiel pédagogique. L'idée est donc de vérifier qu'en utilisant l'outil, nous arrivons à assurer la compréhension et l'adoption du potentiel de la FA. L'objectif est de s'assurer qu'en utilisant les objets opportunités en séance de conception de produits, nous arrivons à obtenir des idées et des concepts prenant en compte des caractéristiques qu'offrent la fabrication additive. Il est aussi important d'observer si la transmission des connaissances sur la FA permet à des concepteurs n'ayant pas ces connaissances de pouvoir les intégrer dans un concept fabricable en FA. Les idées et les concepts doivent pouvoir être concrétisés durant la phase de fabrication. C'est pourquoi, pour notre pré-expérimentation, nous avons voulu travailler avec

une population totalement novice en FA, et nous voulions à la fin de cette pré-expérimentation, nous assurer que les concepts proposés étaient bien fabricables en FA.

Présentation pré-expérimentation A

Cette pré-expérimentation A a été effectuée avec des étudiants. Elle se décomposait en 2 parties : une première partie avait pour objectif de concevoir des produits innovants pour la vie de tous les jours ; la seconde partie intégrait nos objets opportunités et avait pour objectif de repenser les concepts issus de la première partie avec comme contrainte le fait de fabriquer en FA. La finalité de cette pré-expérimentation est donc d'améliorer des concepts en les fabriquant en FA, et d'analyser les améliorations qui sont proposées.

Population

Les participants étaient des étudiants français en dernière année de cycle d'ingénierie, à l'Ecole de Biologie Industrielle (EBI), option conception et développement. Pour cette pré-expérimentation, 47 étudiants ont participé, avec une moyenne d'âge de 23 ans ; ils étaient divisés en 5 groupes (2 groupes de 10 participants et 3 groupes de 9 participants). La population était principalement féminine (43 femmes et 4 hommes). L'ensemble des groupes n'a pas participé à la séance en même temps. La séance a été sur 3 jours, les 2 premiers jours avec 2 groupes chacun et le troisième jour avec le dernier groupe. Il n'y avait pas d'interaction entre les groupes car chaque groupe travaillait sur son propre concept. Tous les participants n'avaient aucune connaissance en fabrication additive et n'avaient jamais participé à des projets sur la FA.

Protocole

La séance s'est déroulée en une séance de créativité préliminaire et 6 étapes (figure 68).

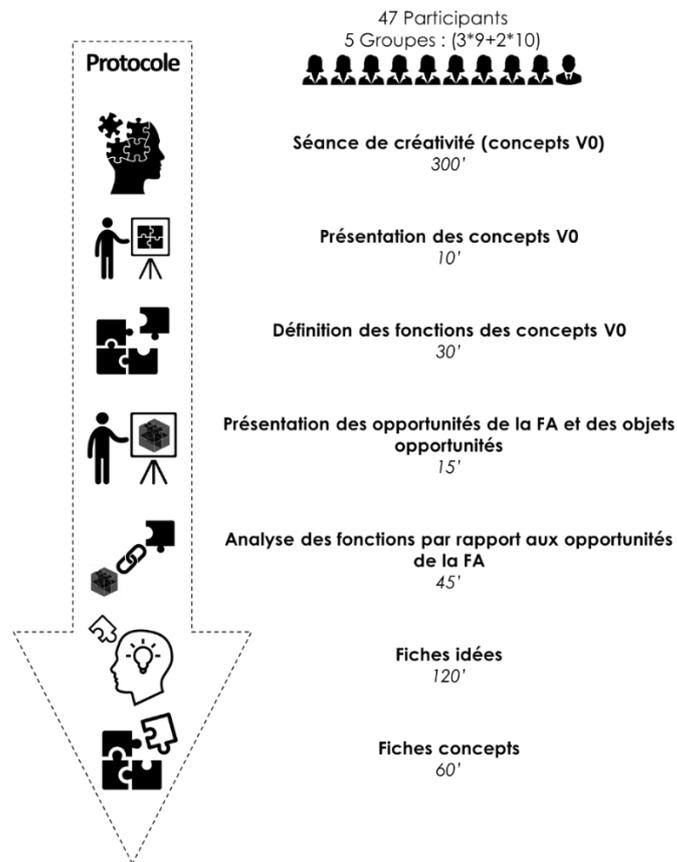


Figure 68 Protocole du workshop de la pré-expérimentation A

Les participants ont eu préalablement une séance de créativité sur la conception de produits. Cette séance comprenait des méthodes standards de créativité (purge, brainstorming...) et n'était pas orientée fabrication additive. Ainsi, à l'issue de cette séance d'une durée de 5h, les participants avaient un concept par groupe. Nous nommerons ces concepts, les concepts V0 en distinction des concepts finaux.

La pré-expérimentation a réellement commencé à la suite de cette séance de créativité, qui nous permettait d'avoir des sujets de travail sur lesquelles il était possible d'intégrer des problématiques de conception en FA.

Nous avons commencé la séance par une présentation par chacun des groupes de leur concept V0. Cette présentation a duré 10 minutes. Ensuite les participants ont retravaillé sur le concept V0 afin de définir l'ensemble des fonctions que devait avoir le produit. L'idée a été de définir plus concrètement et d'une manière plus technique le cahier des charges du produit. Cette analyse fonctionnelle a été faite durant 30 minutes.

A la suite de cette analyse, le sujet de conception en fabrication additive a été initié. Une présentation des opportunités de la FA et les objets associés a été faite durant 15 minutes. Il a été demandé par la suite aux différents groupes de reprendre les différentes fonctions de leur produit et de les lier avec les opportunités de la FA. Cette analyse de 45 minutes a permis aux participants de s'intéresser plus en détails au potentiel de la FA et de commencer à chercher en quoi la FA pouvait apporter des avantages aux différentes fonctions du produit. Pour cette analyse, nous avons distribué aux différents groupes un tableau leur permettant de mettre au propre, avec des phrases, les liens entre les fonctions et les opportunités. Ce tableau a été une base de travail pour la phase d'idéation.

Les groupes ont ensuite travaillé sur l'élaboration de fiches idées. Cette phase d'élaboration a duré 2h et nous avons proposé aux participants de chercher des idées au niveau de la fonction du produit et non au niveau du produit global. Le fait de travailler avec les fonctions permet de plus facilement s'éloigner du design initial du produit.

Un regroupement des fiches idées a permis, à chacun des groupes, de concevoir une fiche concept proposant un produit pouvant être fabricable en FA.

Nous avons ensuite récupéré ces concepts et avons demandé à deux ingénieurs de concevoir une CAO imprimable en 3D en se basant exclusivement sur les fiches concepts pour analyser si ces dernières proposaient bien des produits compatibles avec la technologie.

Résultats

L'analyse des fiches idées et des fiches concepts nous a permis d'observer quelles opportunités de la FA ont le plus été utilisées par les participants. Nous observons que l'ensemble des opportunités sont présentes dans au moins une fiche idée et 12 des 14 opportunités sont présentes dans les fiches concepts. Le tableau 15 présente les différentes opportunités de la FA qui ont été utilisées.

Groupes	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
Nombre de fonctions	5	5	6	4	5
Opportunités de la FA utilisées	Liberté de géométrie Variation de microstructure Monobloc Mécanisme non-assemblé Réseau interne	Liberté de géométrie Texture Optimisation topologique Mécanisme non-assemblé Choix des matériaux	Objets issus de scans 3D Texture Inclusion Réseau interne Structure interne Choix des matériaux	Mécanisme non-assemblé Structure interne Multi-matériaux	Variation de microstructure Texture Mécanisme non-assemblé Réseau interne Choix des matériaux

Tableau 15 Opportunités de la FA utilisées pour les concepts de la pré-expérimentation A

Nous remarquons que chaque concept comprend entre 3 et 6 opportunités différentes. Les participants ont toujours lié une fonction avec une opportunité de la FA. Le groupe 4 a utilisé l'opportunité mécanisme non-assemblé pour 2 fonctions alors que les autres ont choisi pour chaque fonction une opportunité différente. Il est intéressant de remarquer que les 2 opportunités non utilisées sont la segmentation et la structure auxétique ; étant présentes dans certaines fiches idées, nous pouvons penser que ces opportunités ont été comprises par les participants mais n'apportaient rien de plus pour les différents concepts.

Nous remarquons que l'utilisation des opportunités diffère beaucoup entre les groupes. Aucune opportunité n'a été utilisée pour l'ensemble des concepts. L'opportunité mécanisme non-assemblé est la plus utilisée (4 groupes) ; les opportunités texture, réseau interne et choix des matériaux sont utilisées par 3 groupes ; les opportunités liberté de géométrie, variation de microstructure, structure interne sont utilisées par 2 groupes ; les opportunités objets issus de scans 3D, monobloc, optimisation topologique et multi-matériau sont utilisées par 1 groupe sur les 5.

Nous allons seulement présenter plus en détail les résultats d'un seul groupe, en nous intéressant au groupe 5 et au concept « Brosse douche ».

Ce concept correspond à une brosse nettoyante contenant un réservoir à savon liquide. Le savon est donc intégré dans la structure, et le réservoir doit pouvoir être rechargé quand le savon a été consommé. La brosse doit être ergonomique, aussi bien au niveau du maintien, qu'au niveau de la surface d'utilisation, et esthétique. Le choix d'un tel produit a été fait à la suite de la séance de créativité préliminaire. L'image de gauche de la figure 69 représente le schéma du concept V0.

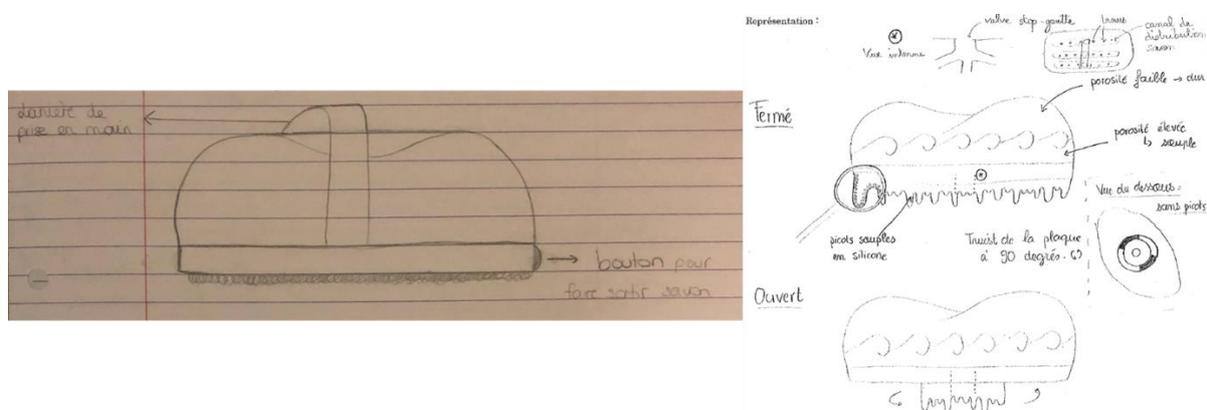


Figure 69 Schéma du concept V0 (à gauche) et du concept final (à droite)

Le schéma informe seulement sur la géométrie globale du produit et ne présente que très peu d'informations techniques. La partie droite de la figure 69 correspond au schéma du concept final à la suite du workshop. Nous observons la présence de beaucoup plus d'informations, aussi bien sur la géométrie externe qu'interne et sur les éléments techniques. Les participants du groupe « brosse douche » ont structuré les différents éléments du concept dans le tableau 16 présentant donc l'analyse complète du produit avec les différentes fonctions, les éléments correspondants sur le produit, les opportunités de la FA associées à chaque fonction et la nature des fonctions (principale ou complémentaire ; technique ou ergonomique ou esthétique).

Concept Brosse douche					
Élément du concept	Surface d'application	Système de rotation	Surface d'application	Canal distribution savon	Coque
Fonction	Variation de dureté	Remplir la brosse	Assurer l'action de savonner sur la peau	Distribuer de manière homogène le savon	Avoir une matière élastique
Opportunité associée	Variation de microstructure	Mécanisme non-assemblé	Texture	Réseau interne	Choix des matériaux
Type de fonction	Complémentaire	Complémentaire	Principale	Principale	Complémentaire
Nature de la fonction	Ergonomique	Technique	Ergonomique	Technique	Esthétique

Tableau 16 Analyse fonctions du concept "Brosse douche"

Les fonctions principales ont été assurées par les opportunités textures et réseau interne. En effet, un réseau interne permet la distribution du savon liquide sur l'ensemble de la surface de contact ; et cette dernière est adaptée pour assurer l'action de savonner. La variation de microstructure assure à cette même surface de contact des duretés différentes pour le confort. Un mécanisme de rotation de l'ensemble du produit est assuré par une liaison pivot permettant d'accéder à l'orifice de remplissage de savon. Le choix d'une matière plastique a pu être défini afin d'être adapté à l'utilisation. A la suite du workshop, et avec les informations indiquées sur la fiche concept, il a été possible de concevoir en fichier CAO ce produit, et de l'imprimer. Les figures suivantes présentent le fichier CAO de ce produit (figure 70).



Figure 70 Représentation CAO de la "Brosse douche"

Cet représentation CAO nous montre bien le système de réseau interne pour le savon liquide, ainsi que le mécanisme permettant de recharger le savon.

Conclusion et limites

Cette pré-expérimentation nous a permis de valider l'aspect pédagogique de nos objets opportunités. En effet, avec les concepts issus du workshop, nous observons que des personnes totalement novices en FA arrivent à exploiter le potentiel technique de la FA pour obtenir des propositions nouvelles et réalisables. Il est normal qu'en apportant de nouvelles connaissances, les concepteurs arrivent à les utiliser dans un processus de conception, mais il est difficile d'évaluer à quel point les concepteurs vont être capable d'exploiter ces connaissances. Avec cette pré-expérimentation, nous remarquons qu'ici les participants ont réellement étaient capable d'exploiter les connaissances que nous leurs apportions avec les opportunités de la FA et les objets associées. Par la suite, il sera important pour nous de mieux valider cette observation avec un échantillon témoin utilisant un autre moyen d'apport de la connaissance. Cette observation est très positive et sera pris en compte dans l'élaboration du protocole de l'expérimentation 1 pour bien valider le fait que notre méthode permet aux concepteurs d'exploiter le potentiel technique de la fabrication additive en conception de produit.

En plus de ces conclusions positives, cette pré-expérimentation A présente tout de même un certain nombre de limites. En effet, l'échantillon des participants est peu représentatif de la réalité. Les participants sont des étudiants en biologie industrielle, donc ne représentent pas une population standard de concepteurs en entreprise ; la FA étant une totale nouveauté, les participants étaient très intéressés par l'expérimentation, et donc, la transmission de connaissances s'est faite assez facilement. Par ailleurs, la population était presque entièrement féminine, ce qui ne représente pas non plus une réalité. Le sujet permettait une très grande facilité d'utilisation de la FA (grande liberté de géométrie), d'où la facilité d'intégrer le potentiel de cette technologie.

4.2.2 Pré-expérimentation B : Truck de skateboard

Introduction et objectif

La deuxième pré-expérimentation a pour but de valider le fait que nos objets opportunités ont un potentiel créatif. L'idée est donc de vérifier qu'en utilisant notre méthode, nous arrivons à assurer une stimulation de la créativité durant le processus amont de conception.

Une intégration d'une nouvelle technologie auprès des équipes de conception entraîne un management du changement. Dans le cadre de l'intégration de la fabrication additive, la majorité des concepteurs a très peu travaillé avec cette technologie, étant une technologie récente, et leur manière de travailler est basée sur les procédés de fabrication traditionnelle. Ce changement a donc des répercussions sur la conception des produits. En effet, le management du changement a des conséquences négatives sur la motivation des individus (Sidikova, 2011) (Worrall & Cooper, 2006) ; et, la motivation et le niveau de créativité des individus sont dépendants l'un de l'autre (MASMouDI, 2010). Plus les concepteurs auront un haut niveau de motivation, plus ils stimuleront leur créativité. Ainsi, l'intégration de la FA dans les équipes de conception risque d'entraîner une baisse de la créativité de ces dernières et en conséquence aura un effet négatif sur la conception de produit. L'objectif est donc d'augmenter la motivation des concepteurs durant la phase de conception afin de s'assurer de l'augmentation de la créativité de ces derniers.

Nous avons, de ce fait, choisi de tester à travers une pré-expérimentation l'effet de nos objets opportunités sur la motivation des concepteurs. L'idée est de mesurer la différence de motivation entre deux équipes de conception, l'une utilisant les objets opportunités et l'autre non. En parallèle, nous pourrions étudier les idées et les concepts ressortissants de cette pré-expérimentation afin d'évaluer les différences au niveau de la créativité des idées et au niveau de l'exploitation du potentiel technique de la FA. La finalité de cette pré-expérimentation est de montrer que notre méthode améliore la motivation et donc génère des idées créatives.

Présentation pré-expérimentation B

Cette pré-expérimentation B a été effectuée avec des étudiants ; elle se composait de 2 séances. L'objectif était de définir le truck de skateboard du futur en fabrication additive métallique et sans procédé d'assemblage. Le truck de skateboard est la pièce sous la planche de skateboard qui permet le lien entre cette dernière et les roues ; ce produit comprend un assez grand nombre

de pièces (métallique et en plastique élastomère) afin d'assurer son rôle qui est de guider le skateboard dans les courbes (figure 71). Les avantages de ce produit sont sa facile compréhension et en même temps sa complexité technique et mécanique.

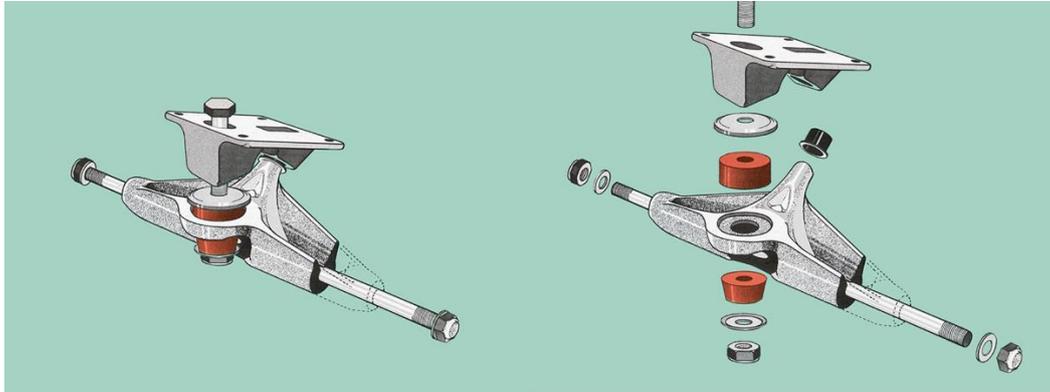


Figure 71 Truck de skateboard (assemblé et vue éclatée)

Population

Les participants étaient des étudiants français en dernière année de cycle d'ingénierie. Les séances se sont déroulées dans le cadre d'un atelier sur la fabrication additive métallique. Les participants des 2 séances étaient tous différents. Pour la première séance, 9 étudiants ont participé (1 femme et 8 hommes), avec une moyenne d'âge de 25 ans ; pour la deuxième, 12 étudiants hommes ont participé, avec une moyenne d'âge de 23,75 ans. Les participants ont une légère connaissance en fabrication additive plastique ayant eu des projets sur ce sujet dans le cadre de leur formation.

Protocole

La séance était divisée en 3 phases (figure 72) : une phase de réflexion divergente, une phase de réflexion convergente et une phase d'élaboration.

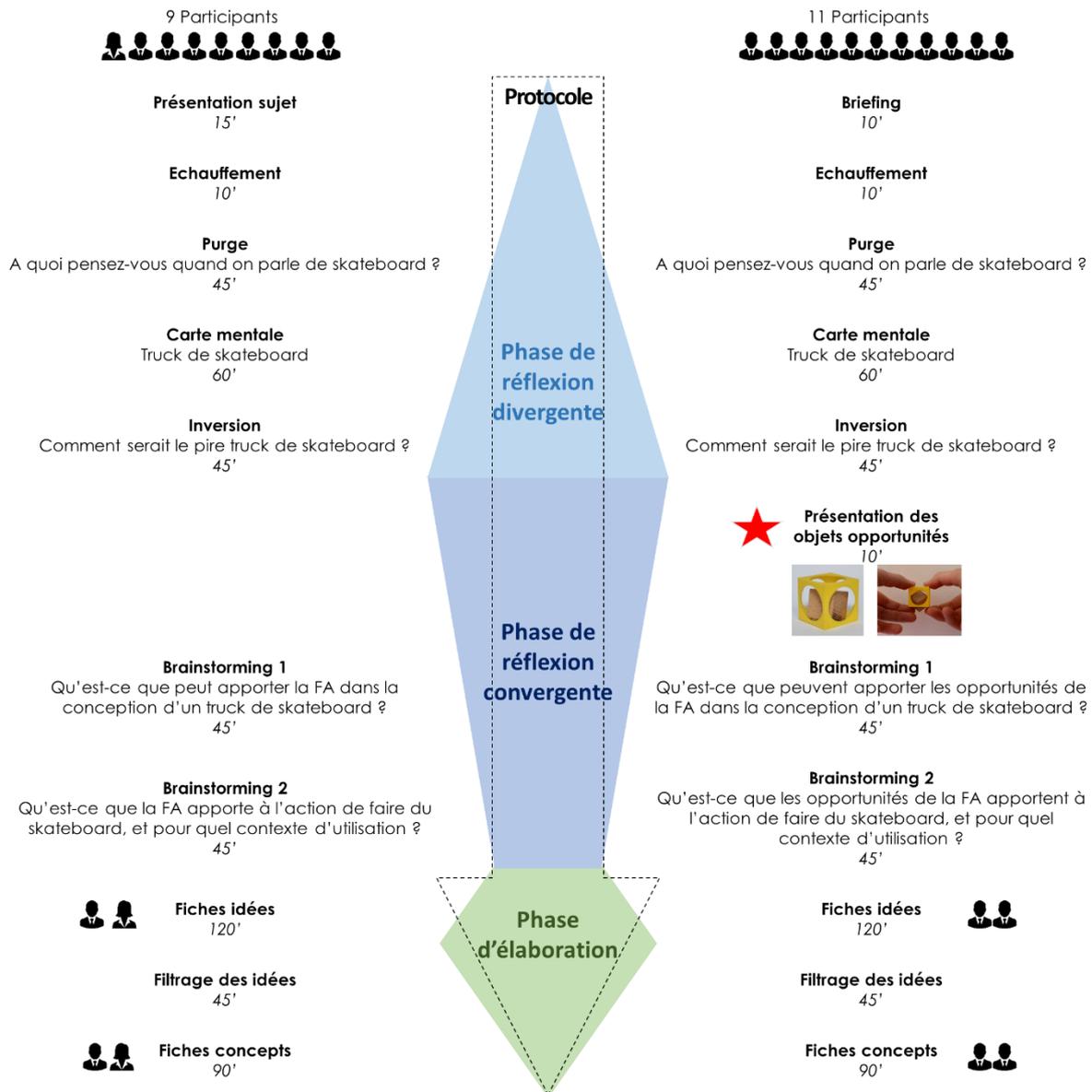


Figure 72 Protocole des 2 workshops de la pré-expérimentation B

La phase de réflexion divergente est la même pour les 2 séances. Elle a commencé par une présentation de 10 minutes pour présenter le contexte et les objectifs de la séance, puis d'un échauffement de 10 minutes pour rendre les étudiants plus actifs pour la suite du travail. Les participants ont poursuivi avec une purge de 30 minutes répondant à la question « A quoi pensez-vous quand on parle de skateboard ? ». Pendant 15 minutes, ils ont effectué une carte mentale sur le truck de skateboard avant de faire une inversion de 20 minutes répondant à la question « Comment serait le pire truck de skateboard ? ».

Pour la phase de réflexion convergente, les protocoles des 2 groupes diffèrent. Pour le premier groupe, cette phase se compose de 2 brainstormings répondant aux questions suivantes :

« Qu'est-ce que peut apporter la fabrication additive dans la conception d'un truck de skateboard ? » et « Qu'est-ce que la fabrication additive apporte à l'action de faire du skateboard, et pour quel contexte d'utilisation ? ». Pour le second groupe, cette phase se compose d'une présentation de 10 minutes des opportunités de la FA et des objets opportunités et de 2 brainstormings répondant aux questions suivantes : « Qu'est-ce que peuvent apporter les opportunités de la fabrication additive dans la conception d'un truck de skateboard ? » et « Qu'est-ce que les opportunités de la fabrication additive apportent à l'action de faire du skateboard, et pour quel contexte d'utilisation ? ».

La phase d'élaboration s'est composée pour les 2 groupes, de 60 minutes d'élaboration de fiches idées en binôme, de 45 minutes de tri des idées et de mise en commun des idées similaires et de 1h30 d'élaboration d'une ou 2 fiches concepts par binôme.

A la fin de la séance, un questionnaire sur l'étude de la motivation et sur l'expertise en créativité a été rempli individuellement par les participants.

Un questionnaire sur le domaine du skateboard a aussi été rempli individuellement par les participants afin de s'assurer que les connaissances dans ce domaine étaient les mêmes pour les 2 groupes et ne biaisaient pas les données ; ce qui a pu être confirmé par les résultats. En effet, les résultats nous ont confirmé qu'il n'y avait pas d'écart significatif entre les 2 groupes ($F = 0,288$; $p\text{Value} = 0,598$). Ainsi, les connaissances du domaine du skateboard ne seront pas un biais dans nos résultats.

Résultats motivation

L'objectif étant de mesurer le niveau de motivation des participants, nous avons demandé aux participants de remplir, à la fin du workshop, une auto-évaluation pour définir leur niveau individuel de motivation. Nous leur avons aussi demandé de remplir un questionnaire d'expertise sur la créativité, afin d'évaluer leur expertise ressentie en créativité.

L'auto-évaluation pour définir le niveau de motivation s'appuie sur une échelle de motivations situationnelles en 8 questions (Guay et al., 2000), avec pour chaque question une échelle de Likert comprenant 7 choix de réponse allant de 1 (pas du tout) à 7 (tout à fait).

Cette évaluation permet d'estimer le niveau de 4 types de motivation :

- La motivation intrinsèque (J'étais engagé dans la séance de créativité : Parce que je trouve cette activité intéressante ; Parce que je trouve cette activité agréable).
- La motivation identifiée (J'étais engagé dans la séance de créativité : Parce que j'ai choisi de le faire pour mon bien ; Parce que je crois que cette activité est importante pour moi).
- La motivation extrinsèque (J'étais engagé dans la séance de créativité : Parce que je sens que je suis supposé la faire ; Parce que je sens que je n'ai pas d'autres choix que de la faire).
- L'amotivation (J'étais engagé dans la séance de créativité : Je ne sais pas, je ne vois pas ce que cela me procure ; Il y a peut-être de bonnes raisons pour faire cette activité mais personnellement je n'en vois pas).

Le questionnaire d'expertise sur la créativité est, quant à lui, composé de 5 questions avec une échelle de Likert comprenant 5 choix de réponse allant de 1 (pas du tout d'accord) à 5 (tout à fait d'accord). Les 5 questions étaient : grâce au workshop... je connais les outils de créativité ; je sais mettre en pratique un outil de créativité ; je sais mettre en pratique entre 2 à 5 outils de créativité ; je sais mettre en pratique plus de 5 outils de créativité ; je peux animer une séance complète de créativité.

Les données statistiques sont recensées dans le tableau 17, en supprimant les valeurs statistiquement aberrantes.

	α (Cronbach)	Groupe 1 moyenne (ET)	Groupe 2 moyenne (ET)	F (Fisher)	pValue (ANOVA)
Motivation intrinsèque	0,841	9,33 (2,83)	10,58 (1,68)	0,37	0,55
Motivation identifiée	0,689	7,56 (1,81)	9,67 (1,88)	6,71	0,018
Motivation extrinsèque 1	0,574	4,77 (1,20)	3,33 (1,50)	5,62	0,028
Motivation extrinsèque 2		3,50 (1,77)	2,50 (1,68)	5,06	0,038
Amotivation	0,888	4,89 (2,37)	3,42 (1,73)	5,79	0,027
Expertise créativité	0,793	2,98 (0,79)	3,84 (0,29)	11,2	0,0036

Tableau 17 Evaluation motivations et expertise ressentie en créativité des individus pour le cas d'application pour le truck de skateboard

Entre les 2 groupes, aucune différence significative n'a été constatée pour la motivation intrinsèque ($F = 0,37$; $p\text{Value} = 0,55$).

Nous observons un écart significatif de la motivation identifiée ($F = 6,71$; $p\text{Value} = 0,018$), montrant que cette dernière est plus importante pour le groupe 2 ayant utilisé les objets opportunités.

Nous observons un écart significatif de la motivation extrinsèque ($F = 5,62$; $p\text{Value} = 0,028$ et $F = 5,06$; $p\text{Value} = 0,038$), montrant que cette dernière est plus importante pour le groupe 1 n'ayant pas utilisé les objets opportunités.

Nous observons un écart significatif de l'amotivation ($F = 5,79$; $p\text{Value} = 0,027$), montrant que cette dernière est plus importante pour le groupe 1 n'ayant pas utilisé les objets opportunités.

Nous observons un écart très significatif de l'expertise en créativité ($F = 11,2$; $p\text{Value} = 0,0036$), montrant que cette dernière est beaucoup plus importante pour le groupe 2 ayant utilisé les objets opportunités.

Ces résultats mettent en avant le fait que les participants du « groupe 2 avec l'outil » trouvent l'activité avantageuse pour eux alors que les participants du « groupe 1 sans l'outil » semblent plus subir l'activité. Par ailleurs, l'écart sur l'expertise de créativité montre que les participants du « groupe 2 avec les objets » ont un ressenti de compétences plus élevées en créativité que les participants de l'autre groupe.

Ces éléments permettent de valider que la méthode a un effet positif sur la motivation et sur l'expertise ressentie en créativité par les individus durant les phases amont de conception.

Résultats innovation

En parallèle de l'analyse de la motivation et de l'expertise ressentie en créativité, nous avons voulu analyser le niveau de créativité et le niveau d'exploitation du potentiel de la FA dans les différentes fiches concepts. En effet, certains concepts ont été particulièrement innovants et ont pleinement exploités les avantages qu'offrent la FA (figure 73).

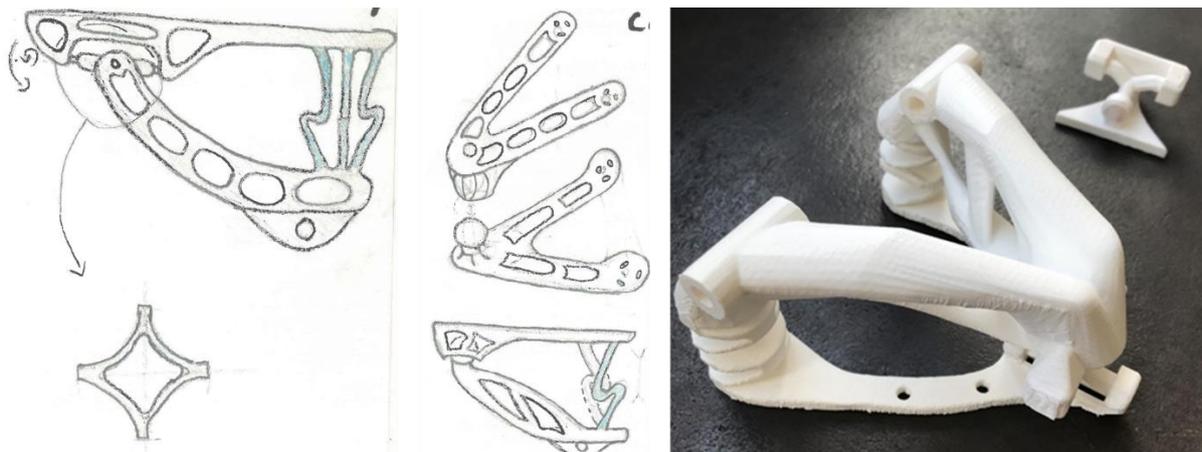


Figure 73 Exemple de concept de truck en FA issu du workshop

Pour l'analyse de la créativité dans les concepts, les 17 fiches concepts développées ont été évaluées par 7 experts en conception de produits. La grille d'évaluation avait pour objectif d'évaluer le niveau de créativité ; les critères de créativité sont la pertinence, l'amélioration, l'élégance et la vision. Les critères étaient évalués avec une échelle de Lickert comprenant 5 choix de réponse allant de 1 à 5. Nous développerons et présenterons plus en détails ces critères dans la partie suivante présentant l'expérimentation 1.

L'accord entre les juges est acceptable pour effectuer une analyse fiable ($\alpha = 0,72$).

L'évaluation de la créativité fait apparaître une moyenne légèrement supérieure du groupe utilisant les objets opportunités par rapport à celle du groupe n'utilisant pas les objets, avec une moyenne de 3,22 (écart type de 0,61) pour le premier groupe et une moyenne de 3,06 (écart type de 0,30) pour le second groupe. Les valeurs des évaluations du groupe 2 sont par ailleurs assez disparates alors que pour le groupe 1, l'évaluation montre une régularité du niveau de créativité sur l'ensemble des concepts.

Malgré l'absence d'écart significatif entre les 2 groupes, nous pouvons observer que les 4 fiches concepts les mieux évalués sont toutes issues du groupe ayant utilisé les objets opportunités. Par ailleurs, l'évaluation du deuxième groupe fait apparaître 2 ensembles, un ensemble de 4 concepts avec des notes supérieures à 3,60 et 6 concepts avec des notes inférieures à 2,89. En analysant plus en profondeur les concepts, on observe que 4 des 6 binômes ont effectué 2 fiches concepts. Or 2 binômes ont un concept bien noté et un autre mal noté. Ainsi, les 4 concepts les mieux notés représentent 8 participants sur les 12. Seuls 2 binômes ont leurs concepts mal évalués.

Avec cette analyse par des experts, nous observons que pour deux tiers des participants du groupe 2, l'utilisation des objets opportunités améliorent la créativité de leurs concepts. La pré-expérimentation valide donc partiellement le fait que l'outil favorise des solutions créatives.

Pour l'analyse de l'exploitation du potentiel technique de la fabrication additive, les 17 fiches concepts ont aussi été évaluées par 7 experts en conception de produits. La grille d'évaluation avait pour objectif d'évaluer le niveau d'utilisation du potentiel de la FA. La grille se composait de 4 critères d'évaluation avec une échelle de Lickert comprenant 5 choix de réponse allant de 1 à 5 ; les critères sont issus des complexités de Gibson (géométrique, hiérarchique, fonctionnelle, matériaux), mais nous les présenterons et les développerons plus en détails dans la partie suivante présentant les résultats de l'expérimentation 1.

L'accord entre les juges est tout à fait acceptable pour effectuer une analyse fiable ($\alpha = 0,83$).

L'évaluation du potentiel technique de la FA fait apparaître une moyenne légèrement supérieure du groupe utilisant les objets opportunités ($M = 3,22$; $ET = 0,65$) par rapport à celle du groupe n'utilisant pas les objets ($M = 3,01$; $ET = 0,29$). Comme pour l'évaluation de la créativité, les valeurs des évaluations du groupe 2 sont disparates alors que pour le groupe 1, l'évaluation montre une régularité de niveau entre les concepts.

Les écarts entre les 2 groupes ne permettent pas d'avoir un écart significatif, mais nous observons que les 3 concepts les mieux évalués sont issus de binômes du groupe utilisant les objets opportunités. Avec une observation similaire à celle faite pour l'évaluation de la créativité, nous remarquons que l'utilisation de l'outil favorise l'exploitation du potentiel technique de la FA pour 50% des participants ; 3 binômes sur 6 du groupe 2 se distinguent par rapport à ceux du groupe 1. Cette observation valide partiellement le fait que l'outil permet l'exploitation du potentiel de la FA.

Conclusion et limites

Cette pré-expérimentation nous a permis de valider l'aspect que nos objets opportunités stimulaient la motivation des participants. En effet, les résultats mettent en avant une différence significative sur les motivations ; le groupe utilisant les objets opportunités se sentent plus impliqués dans la conception de produits, alors que le premier groupe subit plus les changements. Cette sensation de se sentir impliqué est très importante. Comme nous l'avons

vu dans l'introduction de cette pré-expérimentation, la baisse de motivation durant l'intégration de la FA est dû à un management du changement. Or, un des risques principaux du management du changement est le fait que les concepteurs ne se sentent pas impliqués, voire pas utiles. Notre méthode permet de supprimer ce biais dû au management du changement qui a une répercussion très forte sur la créativité et donc sur les qualités des concepts et des produits développés.

L'analyse des fiches concepts nous montre que l'utilisation de nos objets opportunités peuvent avoir un aspect positif dans la conception de solutions créatives et dans l'exploitation du potentiel de la FA ; mais les résultats ne valident pas totalement cet aspect-là. Le fait que les participants soient des étudiants, que cette expérimentation a été développée et évaluée dans le cadre de leur formation, est un assez grand biais pour nos résultats. Ces limites dues à la population étudiante dans un contexte de formation montrent la nécessité de concevoir une expérimentation avec des participants correspondant plus aux réalités industrielles ; en prenant en compte les apprentissages issus de cette pré-expérimentation. En conséquence, les observations de cette pré-expérimentation seront pris en compte dans la conception du protocole de notre expérimentation 1 et dans le choix des participants et du sujet.

4.2.3 Expérimentation 1 : Luxe & FA

Introduction et objectif

Cette expérimentation 1 a pour objectif de valider le fait que notre méthode permette bien d'assurer l'adoption de la fabrication additive en conception de produits. Pour assurer l'adoption, la méthode doit garantir deux finalités, qui correspondent aux 2 aspects de la méthode ADAM². La première finalité est une finalité pédagogique : la méthode doit permettre aux concepteurs d'exploiter le potentiel technique de la FA. Avec l'utilisation de la méthode et en particulier des objets opportunités, les concepteurs doivent être en capacité de comprendre et de mettre à profit le potentiel de la FA dans leurs idées et concepts de produits. Les concepteurs ayant souvent des compétences assez faibles en FA, dues à la nouveauté de cette technologie, ils doivent pourvoir avec les objets opportunités corriger ce manque de compétences. La seconde finalité est une finalité de créativité et d'innovation : notre méthode est avant tout un outil pour stimuler la créativité et permettre aux concepteurs de générer des solutions innovantes pendant le processus de conception, en particulier en phase amont.

Avec les objectifs que nous cherchons à atteindre, et en nous aidant des résultats et des observations des deux pré-expérimentations, nous avons cherché à concevoir une expérimentation correspondant à la réalité industrielle. C'est pourquoi, pour cette expérimentation, nous voulions travailler dans un contexte d'entreprise, avec de réels enjeux industriels et des réalités de terrain. Nous avons retravaillé le protocole en prenant en compte les limites observées durant les pré-expérimentations.

Présentation expérimentation 1

Comme énoncé précédemment, cette expérimentation 1 a donc été effectuée en entreprise ; en Suisse. L'entreprise est un groupe spécialisé dans l'industrie du luxe, qui regroupe plusieurs marques, en particulier dans les domaines de l'horlogerie et de la joaillerie. Cette expérience comprenait deux workshops. L'objectif des deux workshops était de concevoir des produits en FA pour l'industrie horlogère ou la joaillerie.

Population

Les deux workshops ont été réalisés dans les locaux de l'entreprise. Les participants de ces workshops sont des designers et des ingénieurs des différentes marques du groupe. Les participants ne sont pas les mêmes dans les 2 workshops. Pour le premier workshop, 11 concepteurs ont participé (6 ingénieurs et 5 designers), dont 8 hommes et 3 femmes. Pendant le second workshop, 16 concepteurs ont participé (10 ingénieurs et 6 designers), dont 12 hommes et 4 femmes. L'ensemble des participants a des connaissances très faibles en FA.

Protocole

Les protocoles des deux workshops ont la même structure. Les workshops sont divisés en 3 phases (figure 74) : une phase d'inspiration, une phase d'idéation et une phase d'approfondissement.

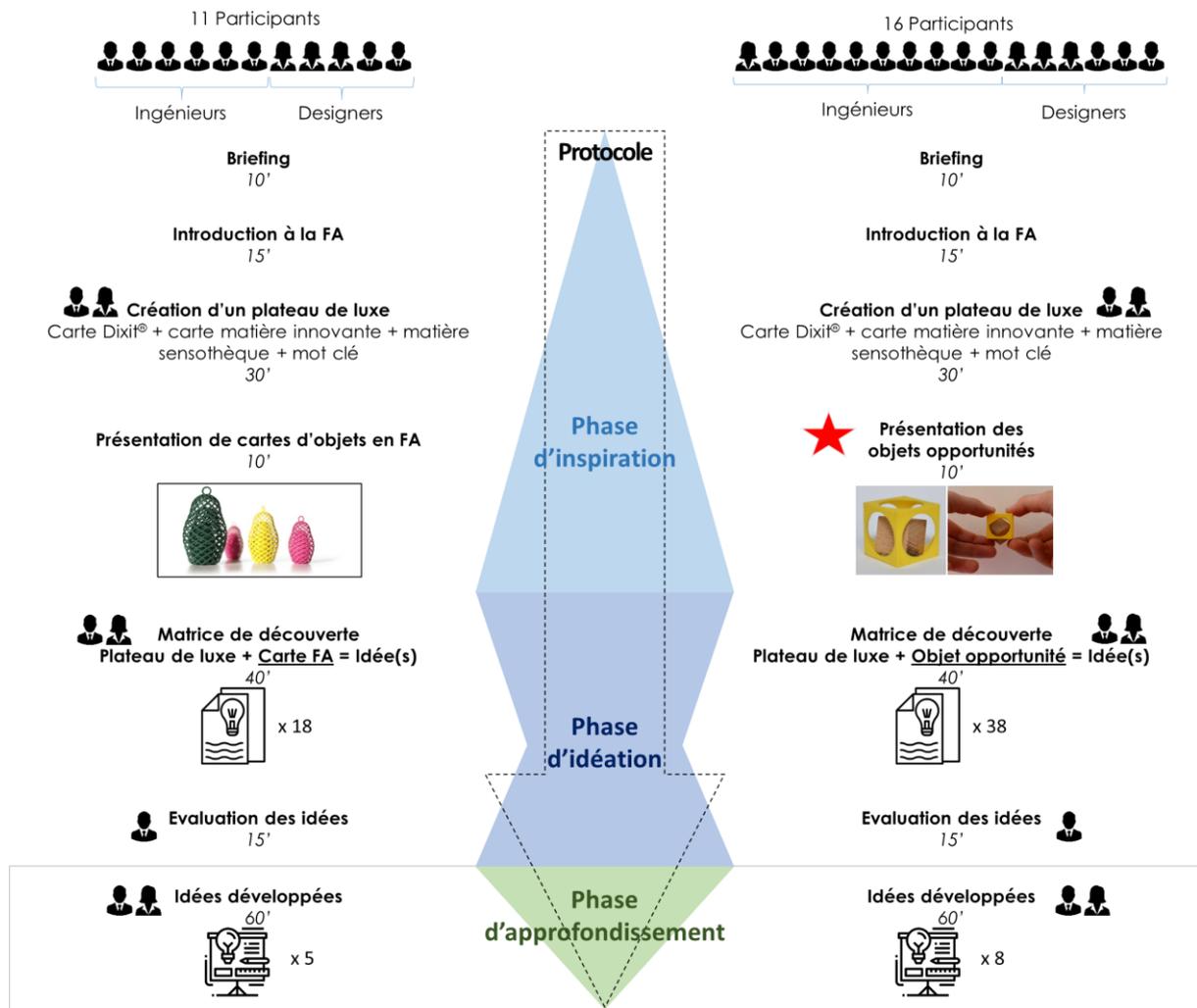


Figure 74 Protocole des 2 workshops de l'expérimentation 1

La phase d'inspiration a commencé par un brief de 10 minutes. Cela a permis de présenter le contexte et les objectifs de la journée. Après un court « ice breaker » pour créer une atmosphère de créativité, une introduction de 15 minutes sur la FA a été faite. Les participants ont été répartis en binôme d'une manière à ne pas avoir dans le même binôme 2 femmes, 2 designers ou 2 concepteurs d'une même marque. Les participants ont eu 30 minutes, en binôme, pour concevoir un plateau représentant le luxe avec 4 éléments : une carte du jeu Dixit, une carte présentant un matériau innovant, un échantillon de matière issu d'une sensorielle, et un mot clé. Les binômes ont présenté, aux autres participants, leur plateau de luxe.

La différence au niveau du protocole des 2 workshops apparaît après la conception de ces plateaux, car seulement le groupe du second workshop va utiliser notre méthode. Les participants de ce groupe ont eu une présentation de 10 minutes des opportunités de la FA et des objets opportunités.

La phase d'idéation a été organisée autour d'une matrice de découverte de 40 minutes. Pour le premier workshop, les binômes ont dû élaborer des fiches idées en associant à chaque fois un plateau de luxe avec une carte représentant un objet en FA.

Les binômes du deuxième workshop ont associé, pour chaque fiche idée, un plateau de luxe et un objet opportunité de notre outil. Cette matrice a permis d'obtenir un assez grand nombre de fiches idées.

Ces différentes fiches idées ont été ensuite évaluées par les participants. Chaque participant avait 3 gommettes de couleurs qu'il pouvait disposer librement sur les idées en fonction de ses préférences. Les 5 idées les mieux notées du premier workshop et les 8 du second workshop ont ensuite été approfondies par les binômes. C'est la phase d'approfondissement.

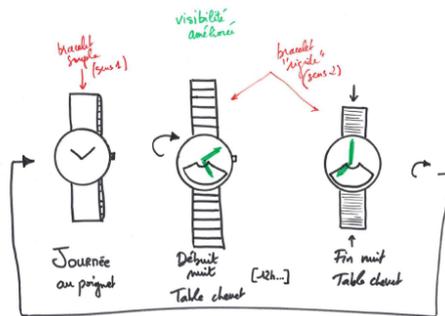
Résultats

Pour vérifier les deux finalités présentées dans l'introduction de cette expérimentation, nous avons choisi d'utiliser comme livrables les idées développées à la suite des 2 workshops. Nous avons défini des critères d'évaluation qui nous permettront de définir si notre méthode permet de bien générer des solutions plus créatives et si elle permet aux concepteurs d'exploiter plus en profondeur le potentiel technique de la FA.

Pour la finalité sur la génération de solutions créatives, nous avons choisi de faire une évaluation par des juges, experts en innovation ou en conception de produits. Pour cela, on a envoyé toutes les idées développées aux juges avec des critères d'évaluation. Les fiches développées ont été envoyées avec le schéma de l'idée, la description et la grille d'évaluation (figure 75).

#11 – VICE & VERSA

Schéma :



Description :

Bracelet de montre imprimé en 3D qui en se tournant devient rigide pour devenir un réveil et qui par la gravité se recharge. 3 fonctions en 1 : montre, réveil et remontage automatique.

Evaluation de la créativité :

Pertinence : Le concept répond aux exigences du problème d'un point de vue usage et performance (ex : le concept semble faire ce qu'il est censé faire, le concept semble facile à utiliser, le concept répond aux objectifs...)

Pas du tout d'accord Pas d'accord Neutre D'accord Tout à fait d'accord

Amélioration (innovation incrémentale) : Le concept s'inspire de connaissances extérieures pour améliorer le produit existant (ex : le concept attire l'attention sur les lacunes des produits existants, le concept montre comment les produits existants pourraient être améliorés, le concept utilise des connaissances existantes pour générer de la nouveauté...)

Pas du tout d'accord Pas d'accord Neutre D'accord Tout à fait d'accord

Élégance : Le concept est élégant car la solution est à la fois performante, parcimonieuse et satisfaisante intellectuellement, d'où un certain sentiment esthétique (ex : on voit tout de suite que le concept a du sens, le concept est bien fini et habilement exécuté, le concept est surprenant de simplicité et est « malin »...)

Pas du tout d'accord Pas d'accord Neutre D'accord Tout à fait d'accord

Vision (innovation de rupture) : Le concept propose de nouvelles façons d'aborder les problèmes existants pour innover (ex : le concept est conçu avec de nouvelles bases, le concept transforme les problèmes en avantages, le concept apporte un produit encore inexistant...)

Pas du tout d'accord Pas d'accord Neutre D'accord Tout à fait d'accord

Evaluation de la Fabrication Additive :

Potentiel géométrique : Le concept met en avant la possibilité de réaliser n'importe quelle géométrie grâce à l'utilisation de la fabrication additive (ex : formes complexes, intégration de forme unique, propriétés de surface...)

Pas du tout d'accord Pas d'accord Neutre D'accord Tout à fait d'accord

Potentiel hiérarchique : Le concept met en avant la possibilité d'améliorer la performance structurelle du produit grâce à la fabrication additive (ex : diminution du poids, amélioration propriétés mécaniques (densité, dureté, solidité, adhérence...), optimisation des formes...)

Pas du tout d'accord Pas d'accord Neutre D'accord Tout à fait d'accord

Potentiel fonctionnel : Le concept met en avant l'apport de nouvelles fonctions grâce à la fabrication additive (ex : fonctions secondaires ajoutés, modification des fonctions du produit avec le temps, multi-produit en un...)

Pas du tout d'accord Pas d'accord Neutre D'accord Tout à fait d'accord

Potentiel matériau : Le concept met en avant l'utilisation de plusieurs matériaux grâce à la fabrication additive (ex : pièce en multi-matériaux, choix du matériau indépendant de la conception, même fichier CAO pour fabriquer en plastique ou en métal...)

Pas du tout d'accord Pas d'accord Neutre D'accord Tout à fait d'accord

Figure 75 Exemple de fiche d'évaluation d'une idée développée

Pour les critères d'évaluation de la créativité, 4 critères ont été définis, en s'appuyant sur les travaux des « P de la créativité » (Process, Product, Person et Place) (Rhodes, 1961) (Richards, 1999), et plus particulièrement sur les critères de la créativité du produit présentés dans les travaux de Cropley (D. Cropley & Cropley, 2005) (D. H. Cropley & Kaufman, 2012).

Les 4 critères d'évaluation de la créativité sont :

- La pertinence : Le concept répond aux exigences du problème d'un point de vue usage et performance (ex : le concept semble faire ce qu'il est censé faire, le concept semble facile à utiliser, le concept répond aux objectifs, ...).
- L'amélioration (innovation incrémentale) : Le concept s'inspire de connaissances extérieures pour améliorer le produit existant (ex : le concept attire l'attention sur les lacunes des produits existants, le concept montre comment les produits existants pourraient être améliorés, le concept utilise des connaissances existantes pour générer de la nouveauté, ...).
- L'élégance : Le concept est élégant car la solution est à la fois performante, parcimonieuse et satisfaisante intellectuellement, d'où un certain sentiment esthétique (ex : on voit tout de suite que le concept a du sens, le concept est bien fini et habilement exécuté, le concept est surprenant de simplicité et est « malin », ...).

- La vision (innovation de rupture) : Le concept propose de nouvelles façons d’aborder les problèmes existants pour innover (ex : le concept est conçu avec de nouvelles bases, le concept transforme les problèmes en avantages, le concept apporte un produit encore inexistant, ...).

Les 13 idées détaillées ont été évaluées par 5 experts en innovation, dont l’un sur l’innovation dans le domaine du luxe. Chaque expert a dû évaluer chaque idée détaillée selon les 4 critères sur une échelle de Likert comprenant 5 choix de réponse (Pas du tout d’accord, Pas d’accord, Neutre, D’accord, Tout à fait d’accord). L’accord entre les juges est acceptable pour effectuer une analyse fiable ($\alpha = 0,78$). Les évaluations sont présentées dans le tableau 18.

Critères de créativité	Idées_{Groupe1} (n=5) moyenne (ET)	Idées_{Groupe2} (n=8) moyenne (ET)	DDL₁	DDL₂	F (Fisher)	pValue (ANOVA)
Pertinence	3.36 (0.22)	4.38 (0.13)	1	11	114	4.10^{-7}
Amélioration	3.32 (0.23)	4.50 (0.24)	1	11	77.5	3.10^{-6}
Elégance	2.96 (0.62)	4.15 (0.30)	1	11	22.1	7.10^{-4}
Vision	2.92 (0.39)	4.20 (0.43)	1	11	29.4	2.10^{-4}

Tableau 18 Evaluation de la créativité des idées détaillées

L’évaluation fait apparaître un écart très significatif entre les idées détaillées du groupe n’utilisant pas l’outil et celles du groupe utilisant l’outil ($F = 61$, $pValue = 8,2E-06$). Cet écart suggère que les objets opportunités ont permis de générer des solutions plus créatives que l’utilisation de cartes représentant des produits en fabrication additive. Ces résultats valident le fait que notre méthode favorise la génération de solutions créatives durant une séance de créativité.

Pour la finalité sur l’exploitation du potentiel technique de la FA, nous avons aussi choisi de faire une évaluation par des juges, experts en fabrication additive ou en conception de produits. Pour cela, on a envoyé toutes les idées développées aux juges avec des critères d’évaluation que l’on trouve aussi sur la figure 62.

Critères d'évaluations :

Les critères d'évaluation du potentiel technique de la FA sont au nombre de 4 et ont été définis en s'appuyant sur les complexités de Gibson (Gibson et al., 2015) (Laverne et al., 2017).

Les 4 critères d'évaluation du potentiel technique de la FA sont :

- Le potentiel géométrique : Le concept met en avant la possibilité de réaliser n'importe quelle géométrie grâce à l'utilisation de la fabrication additive (ex : formes complexes, intégration de forme unique, propriétés de surface, ...).
- Le potentiel hiérarchique : Le concept met en avant la possibilité d'améliorer la performance structurelle du produit grâce à la fabrication additive (ex : diminution du poids, amélioration des propriétés mécaniques (densité, dureté, solidité, adhérence, ...), optimisation des formes, ...).
- Le potentiel fonctionnel : Le concept met en avant l'apport de nouvelles fonctions grâce à la fabrication additive (ex : fonctions secondaires ajoutées, modification des fonctions du produit avec le temps, multi-produit en un, ...).
- Le potentiel matériau : Le concept met en avant l'utilisation de plusieurs matériaux grâce à la fabrication additive (ex : pièce en multi-matériaux, choix du matériau indépendant de la conception, même fichier numérique pour fabriquer en plastique, en métal ou dans une autre matière, ...).

Les 13 idées détaillées ont été évaluées par 5 experts en fabrication additive. Chaque expert a dû évaluer chaque idée détaillée selon les 4 critères sur une échelle de Likert comprenant 5 choix de réponse (Pas du tout d'accord, Pas d'accord, Neutre, D'accord, Tout à fait d'accord). L'accord entre les juges est acceptable pour effectuer une analyse fiable ($\alpha = 0,79$). Les évaluations sont présentées dans le tableau 19.

Critères du potentiel de la FA	Idées_{Groupe1} (n=5) moyenne (ET)	Idées_{Groupe2} (n=8) moyenne (ET)	DDL₁	DDL₂	F (Fisher)	pValue (ANOVA)
Potentiel géométrique	3.24 (0.52)	4.23 (0.27)	1	11	20.7	8.10 ⁻⁴
Potentiel hiérarchique	2.72 (0.27)	4.18 (0.29)	1	11	81.1	2.10 ⁻⁶
Potentiel fonctionnel	2.84 (0.43)	4.00 (0.26)	1	11	37	8.10 ⁻⁵
Potentiel matériau	2.76 (0.57)	4.08 (0.37)	1	11	25.8	4.10 ⁻⁴

Tableau 19 Evaluation du potentiel de la FA des idées détaillées

L'évaluation fait apparaître un écart très significatif entre les idées détaillées du groupe n'utilisant pas l'outil et celles du groupe utilisant l'outil ($F = 107$, $p\text{Value} = 5,21\text{E}-07$). Cet écart suggère que les objets opportunités ont permis de largement favoriser la prise en compte du potentiel technique de la FA par rapport à l'utilisation de cartes représentant des produits en fabrication additive. Cela valide le fait que notre méthode favorise l'exploitation du potentiel technique de la FA durant une séance de créativité.

Observations

Les évaluations nous montrent que l'utilisation d'objets est plus efficace pour générer des solutions créatives et exploiter le potentiel de la FA. Ces ateliers nous ont également permis d'observer une réelle différence entre l'utilisation de cartes FA et l'utilisation des objets opportunités. Certains participants du groupe 2 ont pris beaucoup plus de temps pour essayer d'interpréter les objets opportunités pour leurs idées, que le groupe 1 avec les cartes. Comme la manipulation des objets était facile, nous avons observé que les participants avaient tendance à prendre et reprendre les objets dans leurs mains pendant tout le temps de la conception des idées. A l'inverse, les participants du groupe 1 ont regardé les cartes d'objets en FA au début avant de les reposer sur la table pendant toute la phase de développement des idées. Les objets opportunités entraînent beaucoup plus de discussions entre les membres d'un binôme que les cartes. Le temps nécessaire pour développer l'idée avant de la mettre sur papier était plus long avec les objets car les idées étaient plus détaillées ; les participants du groupe 2 ont eu plus de difficultés à finaliser les idées en 10 minutes, alors que les participants du groupe 1 ont eu en moyenne beaucoup plus de facilité. Pour présenter les idées à l'ensemble des participants, les

participants du groupe 1 ont eu tendance à utiliser les plateaux de luxe pour argumenter leur idée, alors que les participants du groupe 2 se sont appuyés sur les objets opportunités. Il existe une réelle différence entre les idées des deux groupes, car dans le premier groupe, les descriptions des idées sont principalement générales et axées sur la forme, alors que dans le second groupe, les descriptions des idées contiennent déjà les bases des propriétés mécaniques et techniques, tout en ayant des descriptions sur la forme. En lisant les idées des deux groupes, on constate immédiatement que celles du second groupe sont plus complètes et plus globales. La conséquence de cette différence est que les dessins et croquis du second groupe sont plus travaillés, plus détaillés et présentent donc une meilleure cohérence.

De plus, les participants se sont montrés beaucoup plus intéressés par les questions techniques en utilisant les objets opportunités plutôt que les cartes d'objets en FA. Le fait d'avoir un objet entre les mains intrigue les participants qui cherchent à comprendre comment il est possible de fabriquer cet objet ; cet aspect de curiosité pour le processus de fabrication est beaucoup plus absent avec les cartes. Le fait que les objets présentent les opportunités de manière « assez neutre » permet aux concepteurs d'interpréter plus facilement le potentiel de la FA pour les produits de leur secteur. Avec les images FA du groupe 1, les concepteurs reproduisent le concept illustré par la carte dans leur fiche idée, ou les laisse de côté en ne l'utilisant pas dans l'élaboration des fiches idées.

Les résultats de notre expérience pour une application industrielle ont mis en évidence la force de notre méthode pendant les sessions de créativité.

Conclusion et limites

Cette expérimentation nous a permis de valider l'axe adoption de notre méthode. En effet, à travers nos résultats nous arrivons à valider le fait que les objets opportunités permettent de stimuler la créativité des concepteurs en phase amont de conception et qu'ils permettent l'exploitation du potentiel technique de la FA. Le tableau 20 présente les effets en pourcentage de l'utilisation de notre méthode sur la créativité des participants et sur le niveau d'adoption du potentiel de la FA.

Créativité des participants (+37%)	Adoption du potentiel de la FA (+42%)
Niveau de pertinence +30%	Potentiel géométrique +30%
Niveau d'amélioration (innovation incrémentale) +35%	Potentiel hiérarchique +53%
Niveau d'élégance +40%	Potentiel fonctionnel +40%
Niveau de vision (innovation de rupture) +43%	Potentiel matériau +47%

Tableau 20 Effets de l'utilisation de la méthode sur la créativité des participants et l'adoption du potentiel de la FA

Par ailleurs, les observations durant cette expérimentation ont fait ressortir une facilité d'utilisation de notre outil par les concepteurs. Ils comprenaient facilement les opportunités associées et s'appuyaient sur les objets opportunités pour expliquer les critères techniques de leurs concepts. Le choix de la population a montré que la méthode était totalement adaptée à un contexte industriel avec les enjeux associés.

Le protocole a permis de lier les connaissances des participants avec les connaissances de la FA, ce qui a permis de les mettre en confiance car ils apportaient réellement leurs compétences dans le workshop. Il est important de noter que la bonne adoption des opportunités de la FA a été assurée par le fait que la FA était seulement un outil proposé aux concepteurs et non le centre de la séance. Comme nous l'avons vu dans la partie sur l'intégration de la FA dans l'état de l'art, l'adoption de la FA doit être plus qu'une nouvelle fonction mais une capacité de repenser sa manière de concevoir ; or, durant cette expérimentation, l'apport des opportunités de la FA a permis aux participants de penser différemment la conception de bijoux et de montres car ils étaient dans la capacité de fabriquer des éléments qui étaient non fabricables avant et donc par conséquent impensables. Néanmoins, plusieurs limites doivent être soulignées. Tout d'abord, nous avons une limite en termes de profils de participants. En effet, tous les participants étaient volontaires pour les ateliers. Ils n'étaient donc pas réticents à l'utilisation des nouvelles technologies, même au contraire, ils étaient très réceptifs à l'utilisation de nouveaux outils de créativité. De plus, malgré le fait que les participants étaient des employés dans une entreprise et avaient beaucoup de compétences dans leur domaine professionnel, leurs compétences en FA étaient presque inexistantes pour beaucoup d'entre eux. Deuxièmement, nous avons des limites au niveau du protocole. En effet, avec notre étude de cas, nous montrons une différence entre l'utilisation de notre méthodologie et l'utilisation d'images de produits en fabrication additive proposée par d'autres méthodologies. Cependant, il aurait été intéressant d'essayer

d'autres formes d'outils comme des vidéos d'objets, ou des produits physiques en FA qui ne sont pas des objets d'inspiration.

4.2.4 Synthèse adoption de la Fabrication Additive en séance de créativité

Le tableau 21 fait une synthèse des différentes expérimentations de cette partie en représentant les objectifs et les conclusions de chacune.

Expérimentations	Objectifs	Conclusions
Pré-expérimentation A	<ul style="list-style-type: none"> • Valider le potentiel pédagogique des objets opportunités • Assurer la compréhension et l'exploitation des opportunités de la FA 	<ul style="list-style-type: none"> • Les participants arrivent à comprendre et à utiliser les opportunités dans leurs idées et leurs concepts
Pré-expérimentation B	<ul style="list-style-type: none"> • Valider le potentiel créatif des objets opportunités • Augmenter la motivation des participants, car elle est liée à la créativité • Evaluer les niveaux de créativité et d'exploitation du potentiel de la FA des idées 	<ul style="list-style-type: none"> • Les objets opportunités ont un effet positif sur la motivation et sur l'expertise ressentie en créativité par les individus • Les objets opportunités ont un effet partiel sur les niveaux de créativité et d'exploitation du potentiel de la FA des idées
Expérimentation 1	<ul style="list-style-type: none"> • Valider le fait que notre méthode permette d'assurer l'intégration de la FA par la prise en compte de l'adoption du potentiel de la FA dans une séance de créativité • Valider la capacité de compréhension et d'exploitation des opportunités de la FA • Valider la capacité de stimulation de la créativité par les objets opportunités 	<ul style="list-style-type: none"> • Les opportunités et les objets associés favorisent la génération de solutions créatives durant une séance de créativité • Les opportunités et les objets associées favorisent l'exploitation du potentiel technique de la FA durant une séance de créativité

Tableau 21 Synthèse des expérimentations sur l'adoption de la FA en séance de créativité

Ces deux pré-expérimentations et cette expérimentation nous ont permis de valider le lien entre la phase d'adoption de la FA et la phase de créativité et innovation de la FA de la méthode ADAM² assuré par les aspects de pédagogie et de créativité (figure 76).

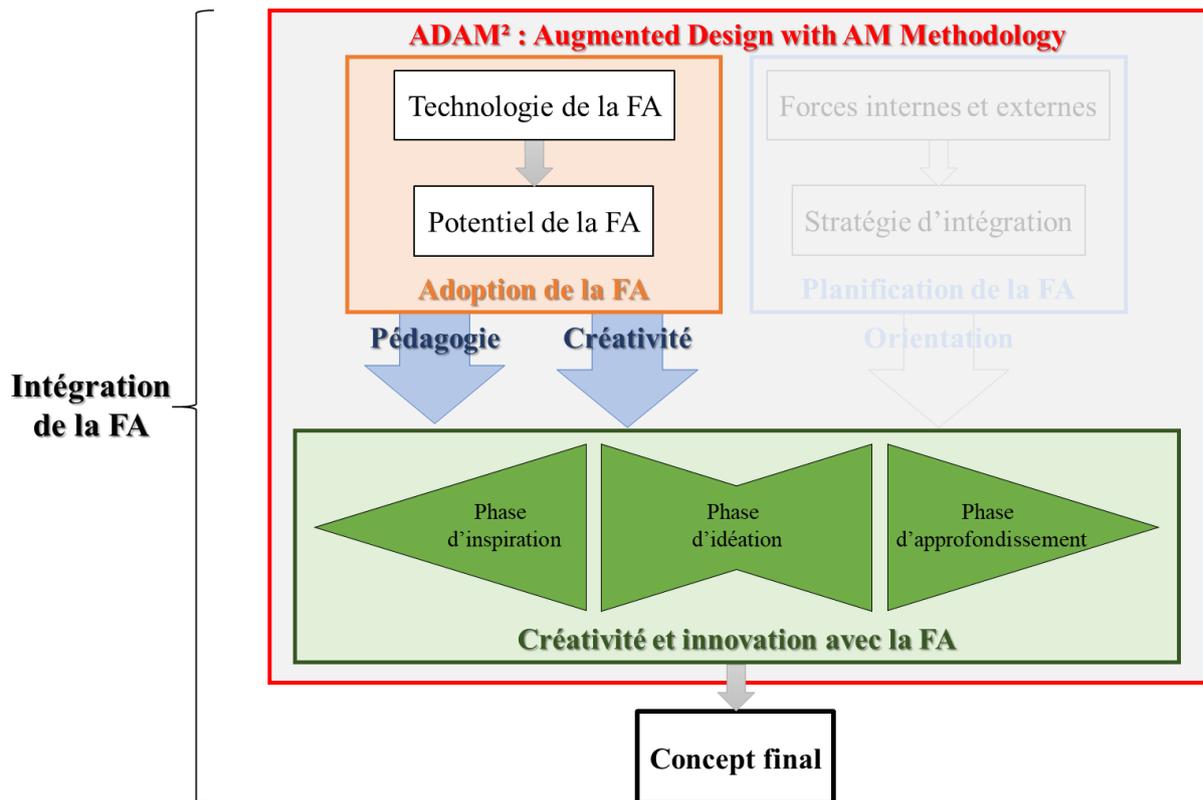


Figure 76 Lien entre la phase d'adoption et la phase de créativité et innovation validé par les expérimentations

Avec l'expérimentation 1 nous avons une première version de notre méthodologie ADAM², intégrant les phases d'adoption et de conception, mais ne prenant pas encore en compte la phase de planification. La partie suivante va avoir pour objectif de prendre en compte cette phase et d'observer les modifications à apporter à la méthodologie.

4.3 Planification de l'intégration de la Fabrication Additive

Dans cette partie, nous allons présenter la construction du protocole de conception permettant d'assurer l'intégration de la FA par la prise en compte de l'adoption du potentiel de la FA et de la planification de cette adoption dans une séance de créativité. L'objectif est donc de prendre en compte les forces externes et internes à l'entreprise qui vont avoir une influence sur la stratégie d'intégration de la FA. Pour atteindre cet objectif, nous avons effectué une pré-expérimentations (pré-expérimentation C) en reprenant un protocole proche de celui de l'expérimentation 1 mais dans un contexte où les forces externes et internes sont très importantes (en particulier la culture de l'entreprise et des procédés de fabrications traditionnelles) ainsi qu'une expérimentation (expérimentation 2) adaptant le protocole en orientant les concepteurs vers une phase d'idéation avec les objets opportunités ou vers une idéation avec un outil de créativité pour la fabrication traditionnelle afin de neutraliser les biais induits par les forces externes et internes à l'entreprise (figure 77).

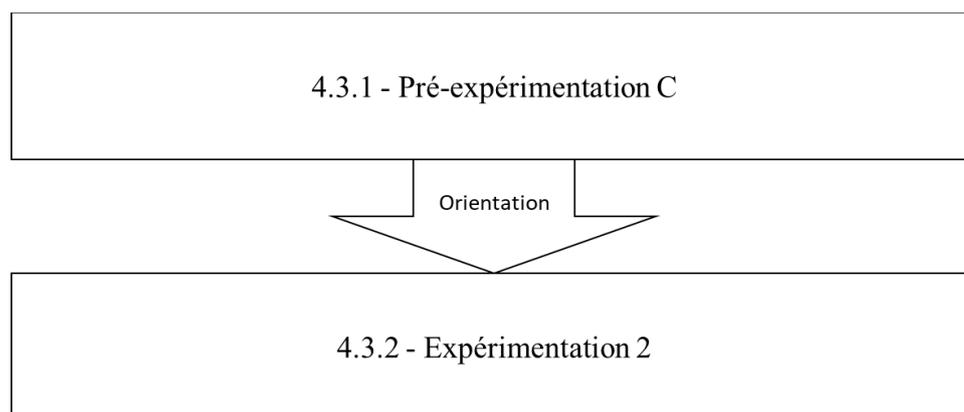


Figure 77 Plan d'expérience sur la planification de l'intégration de la FA

4.3.1 Pré-expérimentation C : Caisse en blanc de voiture

Introduction et objectif

L'objectif de la pré-expérimentation C a été de tester notre méthodologie et les objets opportunités dans un contexte où les fabrications traditionnelles ont un poids beaucoup plus fort sur les décisions des concepteurs et sur la culture de l'entreprise. Pour cela l'idée était de tester la méthodologie afin d'observer si les résultats de l'expérimentation 1 étaient les mêmes dans un secteur où certains procédés de fabrication traditionnelle étaient fondamentaux. Le but de cette expérience a été d'observer si la culture de fabrication allait avoir un impact sur

l'adoption de la FA, et si oui quelles sont les éléments qui bloquent le plus, et quelles sont les réactions des concepteurs.

Nous avons donc choisi de tester notre méthodologie dans une entreprise d'équipements automobiles, où les procédés de fabrications traditionnelles ont un poids très important dans les décisions des concepteurs.

Présentation pré-expérimentation

De plus en plus d'équipementiers automobiles veulent s'orienter vers des plateformes de production flexibles, c'est-à-dire que différents véhicules sont assemblés sur la même ligne, et qu'il n'y a plus une ligne pour chaque modèle. En parallèle, les gammes de voitures sont étendues et donc il y a de plus en plus de modèles différents. Si le nombre de modèles augmentent et le nombre de lignes de production diminues alors ça veut dire que les lignes vont devoir être de plus en plus flexibles. Ce besoin important de flexibilité oblige un coût important d'outillage. L'objectif des équipementiers est donc la recherche de conceptions pouvant diminuer les coûts d'outillage et donc simplifier les lignes de production. Cette objectif est en particulier très important pour la structure de la voiture, qui va donner le design final du véhicule. Cette structure, appelé caisse en blanc, est l'ensemble des tôles, fabriquées par emboutissage et assemblées par soudage. La figure 78 représente une caisse en blanc sur sa ligne d'assemblage.

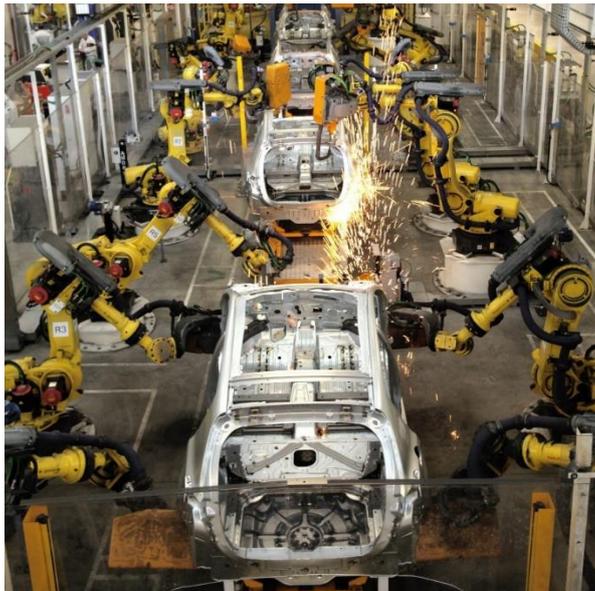


Figure 78 Caisse en blanc de voiture sur sa ligne de production

La finalité d'intégrer la FA dans l'entreprise est de réduire les étapes d'assemblages, et donc l'outillage, en proposant des concepts de caisse en blanc utilisant les technologies de FA. Le but de la séance était donc de créer une culture et une connaissance de cette technologie en gardant l'idée qu'elle pouvait avoir un rôle important dans les futures conceptions des caisses en blanc. Ainsi, l'objectif du workshop de la pré-expérience 3 a été de développer des concepts de véhicule, plutôt futuriste (pour ne pas être restreint dans les idées), intégrant la technologie de fabrication additive. La séance a été animé par deux spécialistes de la créativité en entreprise, et nos outils ont été utilisés au milieu de la séance comme nous allons le voir dans la partie sur le protocole.

Population

Les participants étaient des professionnels du secteur de l'automobile, 12 d'entre eux sont des ingénieurs de l'entreprise où le workshop était organisé (dont le responsable de la FA de l'entreprise), et les 2 autres participants sont des ingénieurs d'un bureau d'étude externe. La population était principalement masculine car 13 des 14 participants étaient des hommes.

Un questionnaire a été distribué aux participants afin d'avoir des informations sur leur ancienneté dans l'entreprise et dans le monde industriel, ainsi que sur leur expertise sur la fabrication additive. L'idée est d'avoir une évaluation sur l'influence de la culture de l'entreprise et du secteur, ainsi que sur leurs connaissances sur la technologie de fabrication additive.

Pour l'ancienneté, les participants ont répondu à deux questions (ancienneté dans le secteur et ancienneté dans l'entreprise) avec chacune 4 réponses possibles : moins d'un an, moins de 5 ans, moins de 10 ans et plus de 10 ans. Les 2 ingénieurs du bureau d'étude externe ont répondu seulement à la question sur le secteur. Les informations issues de ces 2 questions sont présentées dans le tableau 22.

Ancienneté	Moins d'un an	Moins de 5 ans	Moins de 10 ans	Plus de 10 ans
dans le secteur	0 participant	6 participants	4 participants	4 participants
dans l'entreprise	0 participant	8 participants	1 participant	3 participants

Tableau 22 Ancienneté des participants dans l'entreprise et dans le secteur

Nous pouvons observer que l'ensemble des participants sont dans le secteur et dans l'entreprise depuis plus d'un an ; ce qui veut dire que l'ensemble des participants ont subi une certaine influence de la culture de l'entreprise et du secteur. Cela est intéressant pour nous car nous cherchons bien à analyser le fonctionnement de notre méthodologie sur des concepteurs ayant une forte dépendance des procédés traditionnellement utilisés dans le secteur. Plus de la moitié des participants travaille depuis plus de 5 ans dans le secteur.

Pour l'expertise en fabrication additive, les participants ont répondu aussi à deux questions ; la première sur le niveau de connaissance de la FA plastique, et la deuxième sur le niveau de connaissance de la FA métallique. Les participants avaient pour chacune 5 réponses possibles :

- Niveau inexistant : « j'avais entendu parlé de cette technologie »
- Niveau faible : « je me suis intéressé superficiellement à cette technologie par curiosité »
- Niveau moyen : « je me suis intéressé à cette technologie dans un but professionnel »
- Niveau plutôt élevé : « j'ai utilisé au moins une fois cette technologie »
- Niveau élevé : « j'utilise cette technologie fréquemment »

Les informations issues de ces deux questions sont présentées dans le tableau 23 :

Niveau de connaissance	inexistant	Faible	Moyen	Plutôt élevé	Elevé
FA plastique	0 participant	7 participants	1 participant	2 participants	4 participants
FA métallique	0 participant	4 participants	8 participants	1 participant	1 participant

Tableau 23 Niveau d'expertise des participants en FA

Nous observons qu'il n'y a pas de participant qui a juste entendu parler de la FA. Au niveau de la FA plastique, 4 participants l'utilisent fréquemment et 2 l'ont déjà utilisé ; en demandant plus de détails aux participants, ils utilisent cette technologie dans le cadre de prototypages rapides et de démonstrateurs. Au niveau de la FA métallique, seulement le responsable FA de l'entreprise utilise fréquemment la technologie et seulement un autre participant a utilisé une fois cette technologie. Nous remarquons pourtant que plus de la moitié des participants se sont déjà intéressés à la technologie dans un but professionnel mais sans l'utiliser par la suite. En discutant avec les participants, certains nous ont dit qu'ils s'intéressent à la technologie parce

que la concurrence a conçu des produits en FA, mais qu'ils ne voient pas réellement d'application pour eux pour l'instant.

Cette analyse de la population est intéressante pour nous car l'échantillon représente bien ce que nous cherchions, c'est-à-dire des concepteurs avec un historique de conception avec des procédés traditionnels et une légère connaissance de la technologie sans pour autant l'utiliser dans leurs conceptions.

Protocole

Le protocole du workshop est présenté dans la figure 79. Le workshop est divisé en 3 phases : une phase d'inspiration, une phase d'idéation et une phase d'approfondissement.

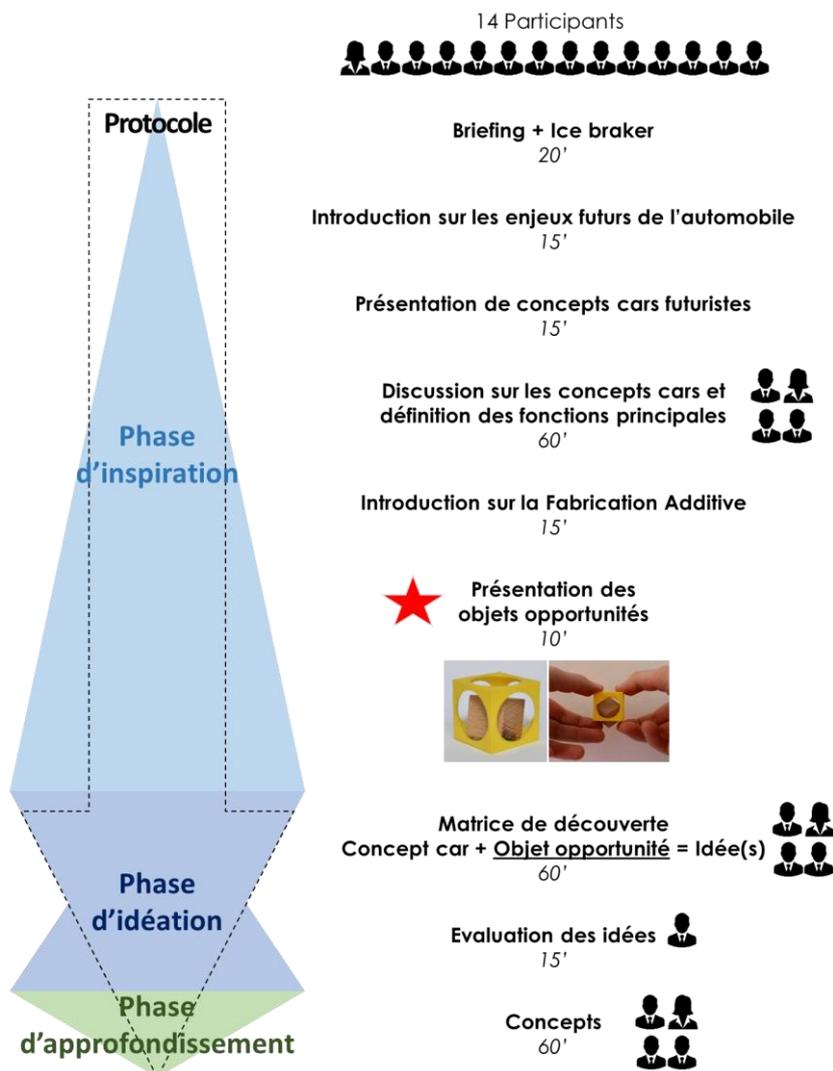


Figure 79 Protocole du workshop de la pré-expérimentation C

La phase d'inspiration a commencé par un briefing de 10 minutes sur le planning de la journée, suivi d'un « ice breaker » de 10 minutes afin de mettre à l'aise les participants pour la séance de travail en groupe. Ensuite, les organisateurs de la séance ont fait une introduction d'une quinzaine de minutes sur les enjeux futurs de l'automobile, et en particulier sur la nécessité de simplifier les chaînes de production en limitant les processus d'assemblage au niveau des caisses en blanc. Nous sommes ensuite rentrés réellement dans le workshop avec une présentation de 15 minutes de concepts cars futuristes par les deux spécialistes de la créativité ; l'idée étant d'avoir une base de départ pour les concepts. Il a été demandé ensuite aux participants de se mettre en groupe de 3 ou 4 (2 groupes de 3 personnes et 2 groupes de 4), et de discuter ensemble des concepts afin d'en choisir un par groupe. Ils devaient ensuite définir les fonctions principales du concept choisies ; l'objectif de cette analyse fonctionnelle était de faire ressortir les fonctions des « concepts cars » pour avoir une base de fonctions dites « futuristes » et se détacher du design proposé dans le concept car.

Après cette analyse de concept car en groupe durant environ 60 minutes, les participants ont eu le droit à une introduction sur la technologie de fabrication additive durant 15 minutes. Après, nous avons présenté les opportunités de la FA et les objets opportunités associées durant 10 minutes.

La phase d'idéation a été organisée autour d'une matrice de découverte de 60 minutes. Les groupes ont dû élaborer des « fiches idées » en associant leur analyse de « concept car » aux différents objets opportunités. A la différence de l'expérience 1 présentée plus tôt, les groupes ont travaillé seulement sur leur concept car et non sur ceux des autres groupes. Cette matrice a permis d'obtenir un certain nombre de fiches idées.

Ces différentes fiches idées ont été ensuite évaluées par les participants, après avoir été présentées. Chaque participant avait 5 gommettes (1 rouge et 4 oranges), qu'il pouvait disposer librement sur les idées des autres groupes en fonction de leur préférence ; les gommettes rouges représentant des « coups de cœur » et les gommettes oranges représentant des idées intéressantes. Les 4 idées les mieux notées étaient reprises par les groupes correspondant afin de développer un concept. C'est la phase d'approfondissement.

A la suite de la séance, un feedback a été rempli par les participants afin d'évaluer leur ressenti sur les objets opportunités et leur utilisation durant la séance de créativité.

Résultats

Ce feedback comprenant 2 parties. La première partie était composée de 4 questions, et la seconde partie était qualitative et demandait aux participants d'écrire l'ensemble de leurs remarques et observations sur les objets opportunités et sur leur utilisation.

La première partie avait pour objectif d'évaluer les objets opportunités sur 4 niveaux :

- Le niveau inspirationnel : « les objets opportunités vous ont-ils permis d'être plus créatif ? »
- Le niveau pédagogique : « les objets opportunités vous ont-ils aidé à comprendre le potentiel de la fabrication additive ? »
- Le niveau de flexibilité : « les objets opportunités ont-ils laissé libre votre créativité personnelle ? »
- Le niveau d'utilisation : « les objets opportunités sont-ils faciles à utiliser dans le cadre d'une séance de créativité ? »

Pour chaque question, les participants répondaient sur une échelle de Likert comprenant 7 choix de réponse (1-très faible, 2-faible, 3-assez faible, 4-moyen, 5-assez élevé, 6-élevé, 7-très élevé).

Le tableau 24 présente les résultats avec en particulier les occurrences pour chaque valeur.

Niveaux	Niveau inspirationnel	Niveau pédagogique	Niveau de flexibilité	Niveau d'utilisation	
Moyenne	5,14	5,21	4,57	5,93	
ecart type	1,41	1,81	1,50	0,92	
Occurrences	1	0	1	0	
	2	1	1	0	
	3	0	0	0	
	4	3	1	6	1
	5	5	3	1	3
	6	2	5	4	6
	7	3	3	1	4

Tableau 24 Evaluation des objets opportunités

Les résultats de l'évaluation nous montrent que la grande majorité des participants ont trouvé les objets opportunités faciles à utiliser dans le cadre d'une séance de créativité. Pour le niveau inspirationnel et le niveau pédagogique, les résultats font ressortir que dans l'ensemble les participants ont trouvé que les objets opportunités permettent d'être plus créatif et aide à comprendre le potentiel de la FA ; mais 2 participants ont au contraire trouvé que les objets ne permettent pas d'être plus créatif ou de mieux comprendre la FA. Pour le niveau de flexibilité,

nous observons qu'une grande partie des participants a trouvé que les objets opportunités laissaient moyennement ou faiblement libre leur créativité personnelle.

La deuxième partie du questionnaire consistait à évaluer sous forme qualitative les objets opportunités. Les remarques et les observations des participants ont permis de mieux comprendre les avis de ceux ayant évalué faiblement les différents niveaux d'évaluation.

Parmi les remarques qui définissent une limite des objets opportunités, nous pouvons les classer en deux groupes. Pour le premier groupe, plusieurs remarques mettent en avant le besoin d'opposer la fabrication additive aux fabrications traditionnelles :

« Beaucoup d'objets ne sont pas forcément unique dans leur forme à l'impression 3D » (Participant N°1) ; *« Une bonne partie des objets ne mettaient pas réellement la fabrication additive au regard des moyens de fabrication existants »* (Participant N°3) ; *« Un certain nombre d'objets sont fabricables sans impression 3D »* (Participant N°14)

Pour le deuxième groupe, les remarques définissent la difficulté de se détacher des opportunités de la FA pour les appliquer à la problématique industrielle :

« Méthode orientée fonctionnalités et moins possibilités (très utile) » (Participants N°9) ;
« J'ai eu du mal à me détacher des objets pour appliquer les concepts à notre problématique » (Participant N°13)

Conclusion et limites

Cette pré-expérimentation nous a permis d'observer une difficulté d'utilisation de nos objets opportunités dans certains contextes industriels. En effet, à travers cette application dans une entreprise du secteur de l'automobile où les procédés traditionnels sont très importants, les participants ont eu du mal à penser la FA comme une technologie en plus, et cherchent plutôt à opposer cette technologie aux autres. Nous avons pu voir des participants cherchaient à trouver comment un tel cube serait faisable avec différents procédés de fabrication traditionnelle au lieu d'essayer de comprendre en quoi le faire en FA permet de simplifier la phase de fabrication. Nous avons aussi observé que certains participants ont du mal à interpréter les opportunités de la FA aux problématiques industrielles.

Cette pré-expérimentation montre l'importance du contexte industriel et en particulier la culture d'entreprise ; il est important de montrer que la FA est une technologie en plus, elle ne se

substitue pas aux technologies traditionnelles. A travers cette pré-expérimentation, nous avons observé que les concepteurs cherchent à intégrer la FA sur toute la conception et non seulement sur les problèmes où la FA offre un fort potentiel de résolution. Le fait d'utiliser la FA sur l'ensemble de la conception entraîne, de la part des concepteurs, une interrogation sur l'efficacité de la technologie. Il sera donc important d'intégrer à notre méthodologie une prise en compte de la situation industrielle de l'entreprise pour optimiser l'efficacité de l'utilisation des objets opportunités, et d'aider les concepteurs à segmenter les problèmes où la FA a un potentiel de résolution des autres problèmes ; ce que nous avons fait avec l'expérimentation 2.

4.3.2 Expérimentation 2 : Segmenter pour mieux intégrer la FA

Introduction et objectif

Cette expérimentation 2 a pour objectif de proposer et de valider une version améliorée du processus de conception proposé pour l'expérimentation 1. Cette version doit permettre aux concepteurs de mieux planifier l'intégration de la FA, en distinguant les problèmes de conception où la FA a un fort potentiel de résolution et les problèmes de conception où les procédés traditionnels de fabrication semblent plus adaptés. La méthode proposée doit permettre aux concepteurs de segmenter le produit en plusieurs problèmes afin d'orienter ensuite la recherche d'idée à ou aux techniques de fabrication les plus adaptées.

Avec cette méthodologie prenant en compte l'intégration en 2 deux phases, une phase d'adoption et une phase de planification, il faut que la culture de l'entreprise ne soit pas un biais à la créativité et à l'innovation.

Présentation de l'expérimentation 2

Pour cette expérimentation 2, nous avons choisi une entreprise du secteur de l'Oil and Gas car dans ce secteur les procédés de forges sont très importants et sont ancrés dans les décisions actuelles des concepteurs. Par ailleurs, à la différence de secteur comme l'aéronautique ou le médical, la FA est très peu intégrée, ce qui amplifie la méfiance que peuvent avoir les concepteurs, vis-à-vis de cette technologie.

Par ailleurs, cette expérimentation a été immersive dans le contexte industriel, car elle résulte d'un travail d'intégration de la technologie et de la méthode ADAM² sur 6 mois avec en particulier 3 cas d'études, allant jusqu'à la fabrication sous forme de maquettes des différents concepts.

Initialement, il a été important de définir des produits où il est potentiellement intéressant de les concevoir avec une partie en FA. Après avoir choisi 3 produits (2 produits à reconcevoir et 1 produit en étude), nous avons développé le processus de conception par segmentation et orientation qui va nous permettre de lier l'adoption et la planification de l'intégration de la FA.

Processus de conception par segmentation et orientation

Dans cette partie, nous présentons le processus qui va nous permettre de :

- Segmenter un système en plusieurs problèmes de conception
- Guider les concepteurs vers une phase d'idéation avec la objets opportunités de la FA ou avec un outil de conception plus appropriée aux technologies de fabrication traditionnelle.

La figure 80 illustre ce processus et ses différentes phases, en s'appuyant toujours sur des phases convergentes et des phases divergentes.

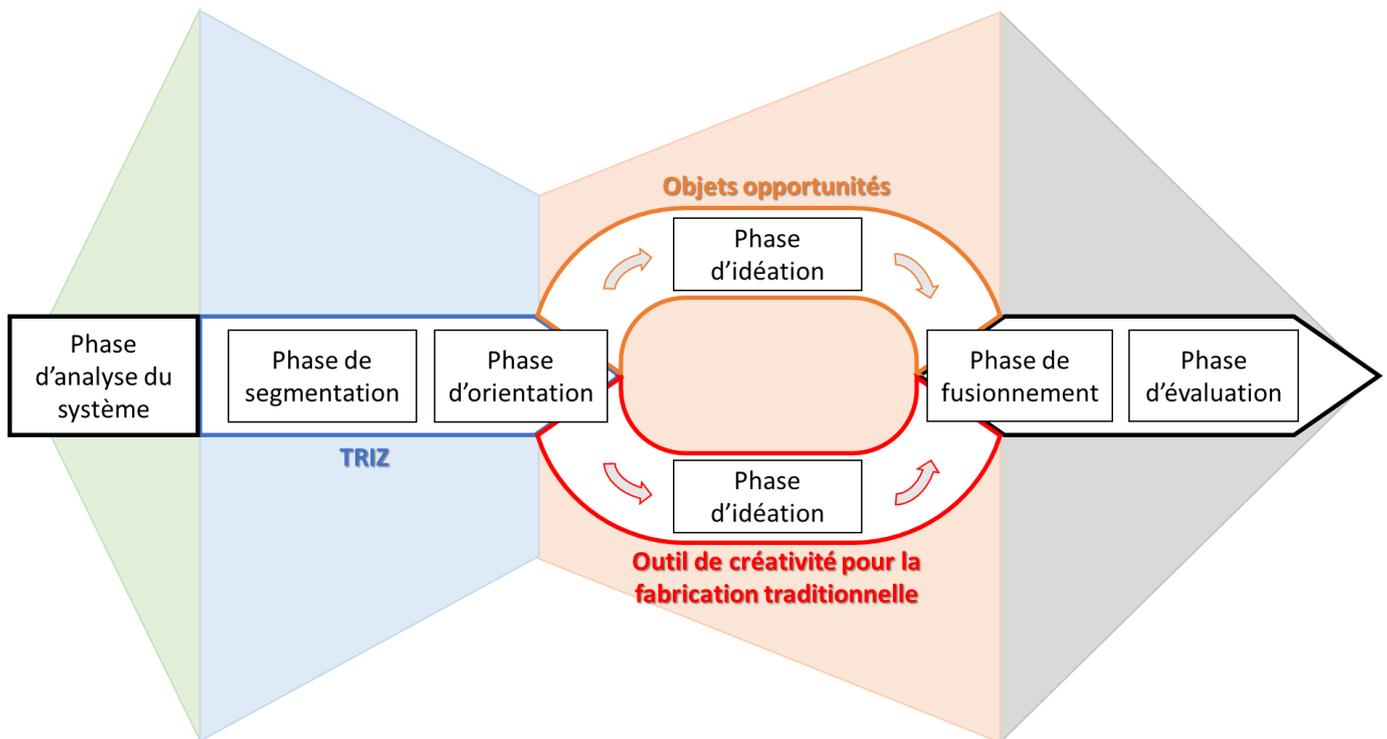


Figure 80 Processus de conception par segmentation et orientation

- *Phase d'analyse du système*

Au cours de cette phase, le système est présenté aux participants. L'objectif est de s'assurer que tous les concepteurs disposent de toutes les connaissances sur le sujet. Souvent, dans la conception de produits, lorsque l'on commence le processus, seul un petit nombre de concepteurs a déjà travaillé sur les détails du sujet. Il est donc important que ces personnes transmettent l'ensemble des connaissances aux autres. Cette phase prend souvent la forme d'une discussion au cours de laquelle les participants posent de nombreuses questions pour bien comprendre le système et les objectifs.

- *Phase de segmentation*

Cette phase marque le véritable début de notre proposition car c'est cette segmentation qui va nous permettre d'assurer une bonne distinction entre les problèmes qui peuvent être résolus par la fabrication additive de ceux qui peuvent plus facilement être résolus par un procédé de fabrication traditionnelle. Cette phase est basée sur la notion d'idéalité de TRIZ car il est plus simple de segmenter les problèmes au niveau d'un produit idéal plutôt qu'au niveau d'un produit industriel (cette phase de recherche de l'idéalité correspond à la conception des plateaux de luxe dans l'expérimentation 1). Pour prendre un exemple, avec un produit idéal, il est possible de

séparer le volume du poids ; un produit idéal peut être de taille microscopique mais peser plusieurs tonnes. Plusieurs outils peuvent être utilisés pour atteindre le produit idéal : le résultat idéal final (RIF) et les contradictions de TRIZ ou l'outil d'inversion. À la fin de cette phase, les participants obtiennent un ensemble de problèmes ou de fonctions du système.

- *Phase d'orientation*

La phase d'orientation consiste à guider les concepteurs vers une phase d'idéalité avec la FA ou sans la FA pour chacun des problèmes ou fonctions. Si la phase de segmentation a été bien faite, cette phase peut être très rapide, mais elle correspond à la phase la plus importante de ce processus. En effet, la phase d'orientation correspond à la stratégie d'intégration de l'entreprise. Dans certains cas, elle peut se faire par une discussion entre les participants, par une évaluation par des personnes connaissant la fabrication additive, ou en donnant aux concepteurs la liberté de choisir les problèmes de conception qui leur semblent les plus appropriés pendant la phase d'idéation. La décision d'orientation doit prendre en compte l'inertie du contexte. Si par exemple un type de procédé est très ancré dans la culture de l'entreprise et que pour une fonction ou un problème, la FA ou ce procédé ont un potentiel de solution, alors il est possible de faire le choix d'orientation vers le procédé traditionnel dans le cas où l'orientation vers la FA entraîne plus de freins que d'avancés. La phase d'orientation impose donc une décision managériale et stratégique, avec toujours l'idée d'orienter vers une décision favorisant au maximum l'innovation.

Au cours de cette phase, nous commençons à présenter le potentiel de la FA avec les opportunités pour aider les participants à orienter les problèmes de conception vers la phase d'idéation la plus appropriée.

- *Phase d'idéation avec les objets opportunités*

Au cours de cette phase, les concepteurs vont travailler à l'élaboration de fiches idées basées sur les objets opportunités de la FA. Pour ce faire, les participants, seuls ou en binôme, proposeront des idées pour répondre aux différents problèmes de conception en exploitant le potentiel de la FA. Cette phase est assez longue, car il est important que les participants prennent le temps de comprendre les opportunités et de trouver autant d'idées que possible. L'animateur de la session fixera une limite de temps maximale par idée (environ 10-15 minutes) pour s'assurer que les participants trouvent le maximum d'idées et ne passent pas trop de temps à affiner une seule idée (cette phase correspond à la matrice de découverte dans l'expérimentation 1).

- *Phase d'idéation avec un outil de créativité pour la fabrication traditionnelle*

Cette phase peut utiliser différents outils de créativité pour permettre aux concepteurs d'obtenir le maximum d'idées. Avec la présence d'un animateur TRIZ, il est possible d'assurer la continuité du processus TRIZ en utilisant, par exemple, les contradictions issues de la matrice des principes de TRIZ. Il est également possible de laisser les participants libres d'utiliser les résultats des phases précédentes comme base pour la rédaction de leurs idées. Cette phase est similaire à une session standard d'idéation créative.

- *Phase de fusionnement*

La phase de fusionnement est très importante dans notre processus car elle nous permet de réfléchir à nouveau au système dans son ensemble. Cette phase nous permet d'ajouter les fonctions dont le système aura besoin. Comme les deux phases d'idéation n'ont pas porté sur les mêmes problèmes, l'addition entre les idées est généralement assez simple dans le sens où les idées provenant d'une des deux phases ne modifient pas les idées provenant de l'autre. Cette phase permet d'obtenir des propositions de concepts.

- *Phase d'évaluation*

La phase d'évaluation est spécifique à un processus de créativité standard. Après l'élaboration de plusieurs concepts, les participants les évaluent et les retravaillent pour orienter la suite de la conception vers un ou plusieurs concepts finaux.

Présentation et Population des études de cas 1 et 2

Pour les deux premières études de cas, nous avons testé l'association d'une phase de segmentation par TRIZ avec une phase d'idéation avec les objets opportunités.

Pour l'étude de cas 1, 7 personnes ont participé à la session de créativité : 3 ingénieurs de l'entreprise, 2 étudiants en ingénierie en stage de 6 mois dans l'entreprise dans le cadre de leur projet de recherche de fin d'étude, un doctorant en conception de produits et un professeur en conception de produits. Pour l'étude de cas 2, 8 personnes ont participé à la session de créativité : 2 ingénieurs de l'entreprise, 2 étudiants en stage de 6 mois dans l'entreprise dans le cadre de leur projet de recherche de fin d'étude, un étudiant designer en stage de 6 mois dans un laboratoire de recherche en conception de produits dans le cadre de projet de recherche de

fin d'étude, un doctorant en conception de produits et 2 professeurs d'université en conception de produits.

Protocole des études de cas 1 et 2

Le protocole pour les études de cas 1 et 2 est présenté dans cette partie (figure 81).

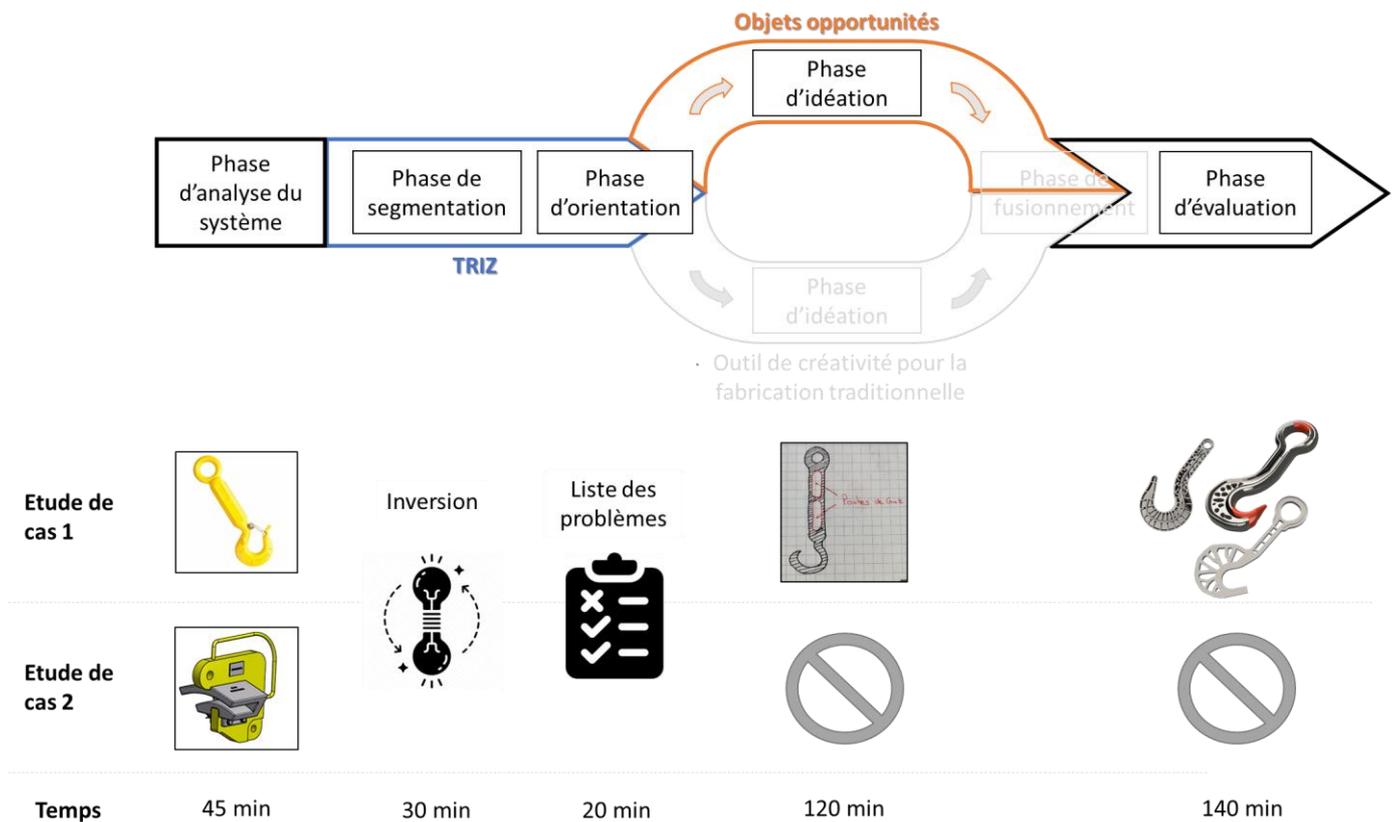


Figure 81 Protocole des études de cas 1 et 2

- Phase d'analyse des systèmes

Cette partie a commencé par la présentation des systèmes. L'étude de cas 1 représente un crochet, il a la particularité d'être manipulable par un robot sous-marin. Cette pièce est de grande taille, elle mesure entre 0,5 et 1,5 mètre de haut et pèse environ 250kg. L'étude de cas 2 représente un crochet pour la manipulation de tuyaux de transport de pétrole (pipeline), il est utilisé par paire et permet de tenir le pipeline aux deux extrémités. Cette pièce mesure environ 0,5 mètre de haut et pèse environ 20 kg.

Même si les sujets ne nécessitent pas beaucoup de connaissances pour être compris, une présentation approfondie des contraintes spécifiques de l'industrie de l'énergie offshore était nécessaire. Le fait de se concentrer sur l'industrie du Oil and Gas fait ressortir des contraintes techniques qui ne sont pas conventionnelles, comme l'environnement de travail sous-marin et les conditions difficiles. Par conséquent, ce type de contraintes techniques devait être présenté pour déterminer le contexte de l'étude ainsi que les limites dans lesquelles le processus de conception devait rester. De plus, l'analyse du cas d'étude a l'avantage d'élargir le sujet, de comprendre pleinement son utilisation ainsi que les raisons pour lesquelles la conception doit être repensée.

- *Phase de segmentation*

Pour cette phase, nous utilisons l'inversion. L'inversion est une forme de brainstorming où l'objectif est de définir les caractéristiques d'une solution si l'on voulait obtenir le pire design, voire si l'on voulait saboter le design. L'idée ici est d'augmenter autant que possible les fonctions néfastes du produit. Les concepteurs vont donc aller à l'opposé de l'idéalité. Les barrières cognitives induites par les limites de la technologie sont beaucoup plus faibles lorsqu'on recherche le pire produit. En se basant sur les fonctions du pire produit, il est facile pour les concepteurs de définir par inversion les fonctions du produit idéal.

L'exercice de pensée inverse est un moyen simple d'orienter les concepteurs vers l'idéalité TRIZ sans avoir besoin d'outils TRIZ complexes quand le produit n'est pas trop complexe. A la fin de cette phase, les participants ont défini la liste des fonctions du produit idéal et donc les problèmes à résoudre pour améliorer le système.

- *Phase d'orientation*

Au cours de cette phase, les participants mettent en évidence les problèmes pour lesquels la fabrication additive semble être une bonne solution. C'est la phase où nous passons de TRIZ aux objets opportunités. Nous avons présenté aux participants les opportunités de la FA et les objets correspondants. Cette phase permet aux participants de se projeter dans la phase d'idéation. En présentant le potentiel de la FA, les participants commencent à relier les opportunités à certains problèmes de conception. Par conséquent, ils orienteront eux-mêmes l'utilisation des opportunités vers des problèmes où l'utilisation de la FA permet l'innovation.

Pour ces 2 cas d'études, la décision a été d'orienter obligatoirement vers une idéation en FA afin d'observer si cette décision est positive dans le cadre d'une stratégie d'innovation.

Cette phase a mis en évidence que pour l'étude de cas 1, le potentiel de la FA semble être un bon choix pour améliorer plusieurs fonctions du système. Pour l'étude de cas 2, cette phase a permis aux participants de constater que les contraintes de forme et d'utilisation du produit faisaient que seule l'opportunité d'optimisation topologique semblait être un choix d'amélioration pour le produit. Cette phase a donc permis de mettre en évidence que, pour l'étude de cas 2, l'utilisation de la FA n'est pas le meilleur choix pour innover. Ainsi l'étude de cas 2 met en avant l'importance de cette phase d'orientation, qui est réellement une phase stratégique et managériale, car le rôle du manager ou du chef de projet est de prendre la décision d'orientation assurant le plus grand potentiel d'innovation. Cette phase est propre au contexte de chaque entreprise, voire de chaque équipe de conception, car les décisions ne peuvent pas être universelles mais propre à la situation de l'entreprise.

- *Phase d'idéation avec les objets opportunités*

Dans cette phase, pour l'étude de cas 1, les participants ont confronté les problèmes aux opportunités de la fabrication additive pour proposer des idées. Ils ont dessiné et expliqué leurs idées. Les participants ont travaillé seuls sur les fiches idées et n'étaient pas autorisés à travailler plus de 15 minutes par idée.

- *Phase d'évaluation*

Une fois que toutes les idées ont été générées, les participants ont chacun présenté leurs idées au reste du groupe. Cette phase a d'abord créé une discussion entre les participants avec des questions pour chaque idée et des améliorations. Dans une deuxième phase, les participants ont relié les idées qui pouvaient être combinées pour aboutir à des concepts. A la fin de cette phase, le choix était de travailler sur les trois meilleurs concepts.

Ces trois concepts ont été développés en interne dans l'entreprise. La figure 82 présente les modèles 3D de ces concepts.



Figure 82 Modèles 3D des trois concepts de « ROV Hook »

Présentation et population de l'étude de cas 3

Pour la troisième étude de cas, nous avons testé le processus complet avec une phase d'idéation utilisant les objets opportunités de la FA et une phase d'idéation utilisant la matrice des principes TRIZ.

Pour cette étude de cas, 9 participants ont travaillé sur le sujet : 5 ingénieurs de l'entreprise, 2 étudiants en stage de 6 mois dans l'entreprise dans le cadre de leur projet de recherche de fin d'étude, un doctorant en conception de produits et un professeur d'université expert en TRIZ.

Protocole de l'étude de cas 3

Le protocole suivie pour l'étude de cas 3 est présenté dans cette partie (figure 83).

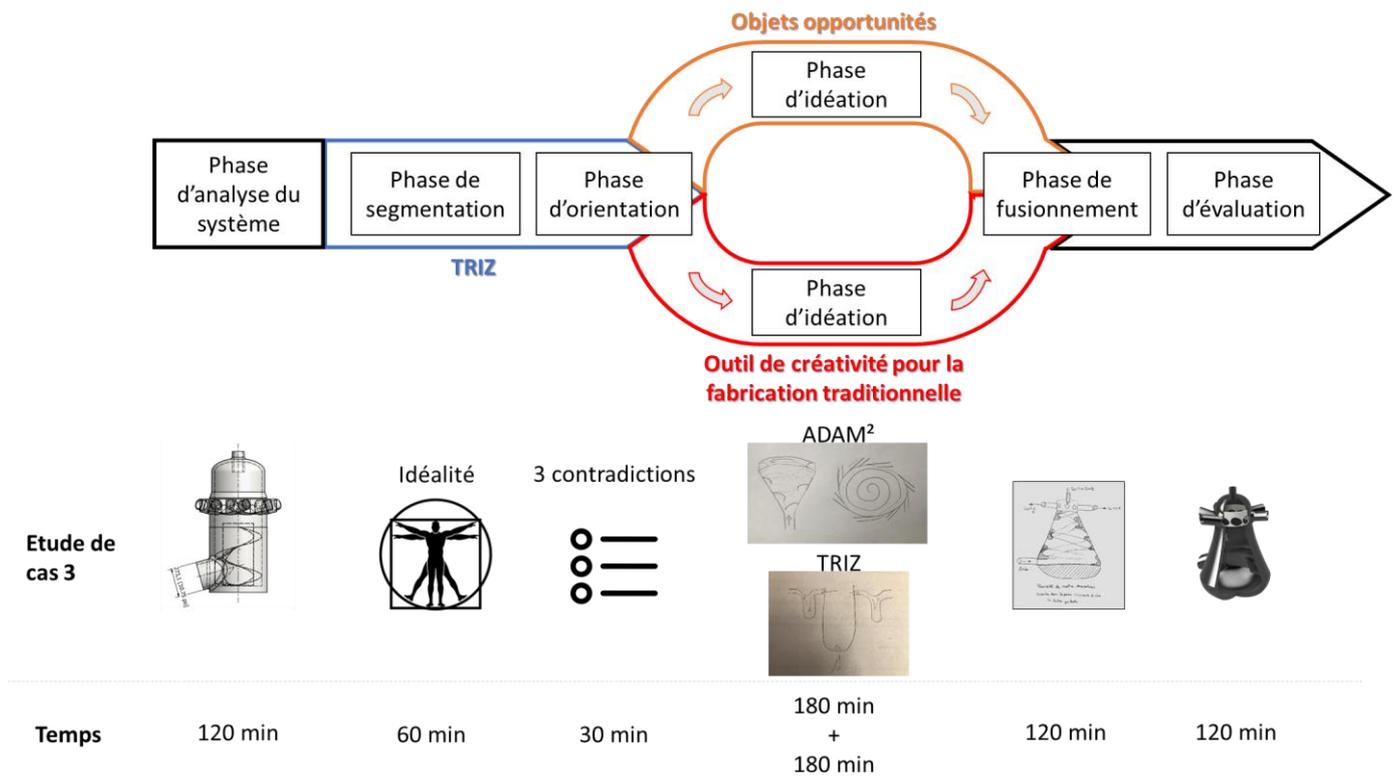


Figure 83 Protocole de l'étude de cas 3

- Phase d'analyse du système

Dans cette partie, les ingénieurs travaillant sur le système actuel l'ont présenté à tous les participants. Cette étude de cas 3 représente un distributeur d'écoulement multiphasique. Il permet la distribution d'un fluide dans 9 sorties avec les mêmes proportions de composants (gaz, huile, etc). Le produit actuel a une hauteur d'environ 1,5 mètre et une largeur d'environ 0,8 mètre.

- Phase de segmentation

Pour la phase de segmentation, nous avons segmenté le produit en travaillant sur la notion d'idéalité. L'expert TRIZ a animé cette session en poussant tous les participants à bien comprendre toutes les fonctions du produit. Il encourage les participants à s'interroger sur les phénomènes physiques derrière ces fonctions et aussi à se détacher du prototype existant dès que tout le monde a compris le fonctionnement du produit. Au cours de cette étape, les concepteurs vont se concentrer sur les fonctions principales du système et définir le résultat

idéal final (RIF). Cette phase a conduit à la définition du produit idéal et à sa problématisation sous la forme de 3 contradictions.

- *Phase d'orientation*

Pour s'orienter vers les phases d'idéation, les participants ont discuté ensemble des trois contradictions. Parmi ces trois contradictions, une est issue du domaine de la thermodynamique et les deux autres mélangent mécanique et thermodynamique. Les responsables du projet ont analysé les contradictions pour la phase d'orientation. Ce travail a permis de caractériser deux contradictions où le potentiel de la fabrication additive est fort pour les résoudre, et une contradiction où le potentiel de la fabrication additive semble plus difficile à appliquer car le domaine de la thermodynamique est le cœur de métier de l'entreprise et donc il existe trop d'inertie dans ce domaine dans l'entreprise pour intégrer des modifications de procédés.

- *Phase d'idéation avec la matrice TRIZ*

Pour la contradiction où la fabrication additive ne semblait pas apporter de solution, la phase d'idéation a été réalisée avec une approche TRIZ en utilisant la matrice TRIZ. Une phase d'idéation menée par une approche TRIZ dépend de l'hôte qui dirige les réunions. Dans le cadre de ce projet, les sous-phases suivantes ont été menées afin de développer de nouvelles idées : (1) définition des paramètres améliorés et dégradés ; (2) confrontation des paramètres à la matrice issue de TRIZ ; (3) interprétation des principes d'innovation issus de la matrice ; (4) proposition d'idées.

- *Phase d'idéation avec les objets opportunités*

Dans cette phase, les participants ont développé les deux autres contradictions. Les opportunités et les objets associés ont été à nouveau présentés. Puis les participants ont confronté les deux contradictions avec les opportunités afin de proposer des idées. Ils ont dessiné et expliqué leurs idées. Les participants ont travaillé seuls pour les idées et n'ont pas été autorisés à passer plus de 15 minutes par idée.

- *Phase de combinaison*

Au cours de cette phase, toutes les idées ont été présentées par les participants. Ils ont ensuite développé des concepts en s'inspirant des idées des deux sessions d'idéation. Les différentes idées des deux phases étaient facilement compatibles car elles portaient sur des problèmes de conception différents, il a donc été simple de les combiner au cours de cette phase.

- Phase d'évaluation

Chaque participant a évalué les concepts avant de les discuter tous ensemble afin de définir les concepts sur lesquels il était intéressant de poursuivre le processus de conception. A la fin de cette phase, un concept général a été choisi. En interne, les ingénieurs ont développé ce concept.

Résultats

Les deux premières études de cas ont le même processus mais les résultats sont différents. En effet, dès la phase de segmentation, nous observons que l'étude de cas 2 offre très peu de potentiel d'innovation en matière de fabrication additive. Le poids est le seul problème qui peut être résolu grâce à la fabrication additive. En effet, avec l'optimisation topologique, il serait possible de réduire le poids du produit. Sur les 10 problèmes définis lors de la phase de segmentation de l'étude de cas 2, il n'y a donc qu'un seul problème qui peut être résolu par le potentiel de la fabrication additive ; et seule une opportunité est utile (Tableau 25).

	Nombre de fonctions ou contradictions	Nombre de fonctions ou contradictions traitées par au moins une idée développée avec les objets opportunités	Nombre d'opportunités de la FA utilisées dans au moins une idée développée avec les objets opportunités	Niveau de potentiel de FA
Etude de cas 1	9	6	10 sur 14	Fort potentiel
Etude de cas 2	10	1	1 sur 14	Très faible potentiel
Etude de cas 3	3	2	13 sur 14	Fort potentiel

Tableau 25 Résultats de la phase d'idéation avec les objets opportunités

A l'inverse, pour l'étude de cas 1, la phase de segmentation a mis en évidence le fait que la FA avait un très fort potentiel d'innovation pour ce produit. En effet, la segmentation a permis de définir 9 fonctions à améliorer. Parmi ces 9 fonctions, les participants ont apporté des idées de solutions pour 6 d'entre elles. Ainsi, deux tiers des problèmes de conception peuvent être résolus avec cette technologie. De plus, 10 des 14 opportunités de la FA se retrouvent dans les 17 idées développées par les participants.

Comme indiqué dans la section précédente, le processus pour l'étude de cas 3 est légèrement différent. La phase de segmentation a donné lieu à 3 contradictions, dont 2 étaient compatibles

avec le potentiel de la FA. Ensuite, lors de l'idéation avec les objets opportunités, 13 des 14 opportunités sont présentes au moins sur une idée. Les participants ont donc utilisé la quasi-totalité du potentiel de la fabrication additive. Cette forte utilisation des opportunités souligne que la FA apporte effectivement un fort potentiel d'innovation pour l'étude de cas 3.

Dans les trois études de cas, les 14 opportunités ont été utilisées par les participants pour au moins une idée. Certaines opportunités, comme la structure interne, ont été beaucoup utilisées pour l'étude de cas 1, et très peu pour l'étude de cas 3 car le sujet n'était pas approprié à cette opportunité.

Pour l'étude de cas 1, 3 concepts ont été développés. Le tableau 26 présente ces concepts. Le premier concept améliore 4 fonctions par rapport au système actuel. Pour ce faire, le concept est basé sur 4 opportunités de la FA. Le deuxième concept permet d'améliorer 3 fonctions en utilisant 2 opportunités de la FA dans sa conception. Le troisième concept améliore 3 fonctions en intégrant 3 opportunités de la FA dans sa conception.

Concept	Nombre de fonctions améliorées	Nombre d'opportunités de la FA utilisées
	4	4
	3	2
	3	3

Tableau 26 Résultats de l'étude de cas 1

Pour l'étude de cas 3, la phase de combinaison visait à associer les idées des deux phases d'idéation (celle avec les objets opportunités et celles avec la matrice TRIZ). Dans le concept final, cette combinaison est bien présente. La phase d'idéation avec la matrice TRIZ a permis d'avoir 31 idées, et celle avec les objets a permis d'avoir 35 idées. Le concept développé prend en compte 6 des 31 idées de la phase d'idéation avec TRIZ et 10 des 35 idées de la phase

d'idéation avec les objets (tableau 27). Ces résultats montrent que les idées issues des 2 phases d'idéation sont bien compatibles et apportent des solutions qui peuvent être associées. On trouve ainsi des solutions pour des problèmes liés à des questions thermodynamiques et des solutions liées à des questions mécaniques. L'utilisation des idées développées avec ADAM² permet d'intégrer 3 opportunités de la fabrication additive dans la conception.

Concept	Nombre d'idées exploitées provenant de l'idéalité avec la matrice TRIZ	Nombre d'idées exploitées provenant de l'idéalité avec les objets opportunités	Nombre d'opportunités de la FA utilisées
	6 sur 31	10 sur 35	3

Tableau 27 Résultats de l'étude de cas 3

Observation

Les résultats des études de cas 1 et 2 montrent que l'association entre une phase d'idéalité et une phase d'idéation avec les opportunités de la FA permet trois choses. Premièrement, la phase d'idéation permet de caractériser les propriétés "idéales" que le produit devrait avoir, et d'orienter vers des propriétés où le potentiel de la fabrication additive est pertinent. Deuxièmement, la phase d'idéation permet de savoir s'il est nécessaire d'investir dans une phase d'idéation avec la FA. Troisièmement, cette méthode permet d'exploiter le potentiel de la fabrication additive pour intégrer les propriétés du produit "idéal" dans le produit existant.

Dans l'étude de cas 3, avec le processus complet, la phase d'idéation de 2 contradictions avec les objets opportunités et une avec la matrice TRIZ a permis d'observer la différence entre le type d'idée résultant des deux phases d'idéation. Les idées issues de la matrice TRIZ sont plutôt générales, le niveau d'abstraction est important. Les idées issues des opportunités de la FA sont plus spécifiques et localisées. La méthode ADAM² ainsi facilite la projection, et les opportunités qu'elle offre conduiront les concepteurs à des solutions plus spécifiques. La méthode ADAM², et la présence d'objets physiques non industriels, ont permis aux participants de s'éloigner psychologiquement de la pensée de l'innovation uniquement en termes de performance technique au premier abord.

En outre, la phase d'évaluation a montré que les idées des deux phases d'idéation sont totalement compatibles. Les concepts définis après la phase d'évaluation et les modèles CAO sont le résultat d'un mélange d'idées provenant des 3 contradictions. Les idées provenant de la première contradiction sont rarement contraignantes pour celles des contradictions 2 et 3 ; et vice versa.

Tous ces résultats montrent que l'association entre une phase d'idéalité (TRIZ) pour les procédés de fabrication traditionnelle et une phase d'idéation avec les objets opportunités de la FA permet trois bénéfices :

- 1- Les concepteurs ne se perdent pas dans l'utilisation de la fabrication additive en pensant nécessairement le produit de manière globale mais en le structurant en plusieurs contradictions, ayant oui ou non un potentiel d'idéation via la fabrication additive.
- 2- Les idées issues d'une idéation avec les objets opportunités sont compatibles avec les idées issues d'autres outils de créativité comme la matrice TRIZ ; donc des idées utilisant la FA sont compatibles avec des idées utilisant une autre technologie.
- 3- L'intégration d'outils de TRIZ au sein de la méthode ADAM² permet d'avoir à la fois des idées générales avec un haut niveau d'abstraction et des idées plus spécifiques avec une projection vers la phase de fabrication.

Ces trois études de cas mettent donc en évidence que segmenter le système avant une phase d'idéation améliore l'efficacité de la méthode ADAM² car les concepteurs auront plus de facilité à orienter leur idée vers une technologie en fonction des différents problèmes du système. Le processus proposé permet d'utiliser le potentiel créatif de la fabrication additive tout en gardant celui de la fabrication traditionnelle.

Conclusion et limites

Avec cette expérimentation 2 et l'adaptation de la méthode ADAM² avec le processus de conception par segmentation et orientation, nous arrivons à assurer l'adoption de la FA par une prise en compte de la culture de l'entreprise. En effet, le fait de faire comprendre aux concepteurs que l'ensemble des connaissances qu'ils ont sur les technologies de fabrications traditionnelles n'est pas obsolète avec l'apparition de la FA, permet à ces derniers d'avoir un regard différent sur cette technologie et d'être ouvert à son adoption et utilisation dans leur travail de concepteur. Il est très important de bien faire comprendre aux concepteurs que la FA

ne va pas remplacer les procédés traditionnels de fabrication mais qu'il s'agit d'un nouvel outil qu'ils peuvent utiliser. Avec la fabrication additive, les concepteurs ont une nouvelle manière de penser les choses, de solutionner des problèmes et de concevoir. L'intégration de la FA ne signifie pas une obligation de l'intégrer dans les conceptions mais une aptitude à l'intégrer dans le processus de pensée des concepteurs.

Bien que les résultats de nos cas d'application soient très prometteurs, nous observons un certain nombre de limites dans notre étude. Tout d'abord, l'étude ayant été réalisée en entreprise, nous avons dû nous adapter aux contraintes de cette dernière. Les préoccupations d'une entreprise ne sont pas les mêmes que celles de la recherche universitaire et il est donc très difficile d'adapter les expérimentations dans le seul but de valider un processus méthodologique. Les différentes expériences que nous avons réalisées portent sur des produits différents. Il est donc difficile de comparer sans tenir compte de cet aspect. Il est compliqué d'avoir un grand nombre de participants, et les participants qui ont suivi l'étude se sont de plus en plus adaptés aux méthodologies. En entreprise, il est difficile de faire une expérience témoin en séparant totalement TRIZ et ADAM² car l'objectif de l'entreprise est que les résultats des expériences soient efficaces et efficaces. De plus, il est important de noter que la situation nous a permis de découvrir une ouverture à notre travail. L'ensemble du travail sur les 3 cas a duré plus de 6 mois et a été fortement affecté par la crise sanitaire de Covid-19. La situation a obligé à faire certaines parties en vidéo conférence. En particulier, nous avons parfois utilisé les objets d'opportunités de la méthode ADAM² sous forme de vidéos montrant la manipulation des objets. Cette situation nous a permis de mettre en évidence que les outils de créativité étaient utilisables par vidéo conférence.

4.3.3 Synthèse de la planification de l'intégration de la Fabrication Additive

Le tableau 28 fait une synthèse des différentes expérimentations de cette partie en représentant les objectifs et les conclusions de chacune.

Expérimentations	Objectifs	Conclusions
Pré-expérimentation C	<ul style="list-style-type: none"> • Tester la méthodologie et les objets opportunités dans un contexte où les fabrications traditionnelles ont un poids important sur les décisions des concepteurs et sur la culture de l'entreprise 	<ul style="list-style-type: none"> • Les participants ont un besoin d'opposer la FA aux fabrications traditionnelles • Les participants ont des difficultés à se détacher des opportunités de la FA pour les appliquer à leur problématique industrielle
Expérimentation 2	<ul style="list-style-type: none"> • Valider une version améliorée du processus de conception • Planifier l'intégration en segmentant les problèmes de conception pour orienter vers une idée avec les objets opportunités ou avec un outil de créativité pour la fabrication traditionnelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Les participants sont ouverts à l'utilisation des opportunités de la FA • La segmentation puis l'association d'idées permettent de ne pas mettre en opposition les techniques de fabrication et donc de contourner les difficultés entraînées par les forces externes et internes à l'entreprise • Les concepteurs développent une nouvelle manière de penser et de solutionner les problèmes de conception

Tableau 28 Synthèse des expérimentations sur la planification de l'intégration de la FA en séance de créativité

La pré-expérimentation C et l'expérimentation 2 nous ont permis de valider l'importance de la phase de planification de la FA dans le processus d'intégration de cette technologie. Les résultats nous ont aussi montrés que le lien entre la phase d'adoption et la phase de créativité et d'innovation doit absolument passer par la phase de planification (figure 84). La phase de créativité et d'innovation s'appuie sur les données venant des phases d'adoption et de planification. L'aspect d'orientation permettant de planifier l'intégration de la FA s'appuie sur les informations engendrées par les aspects de pédagogie et de créativité.

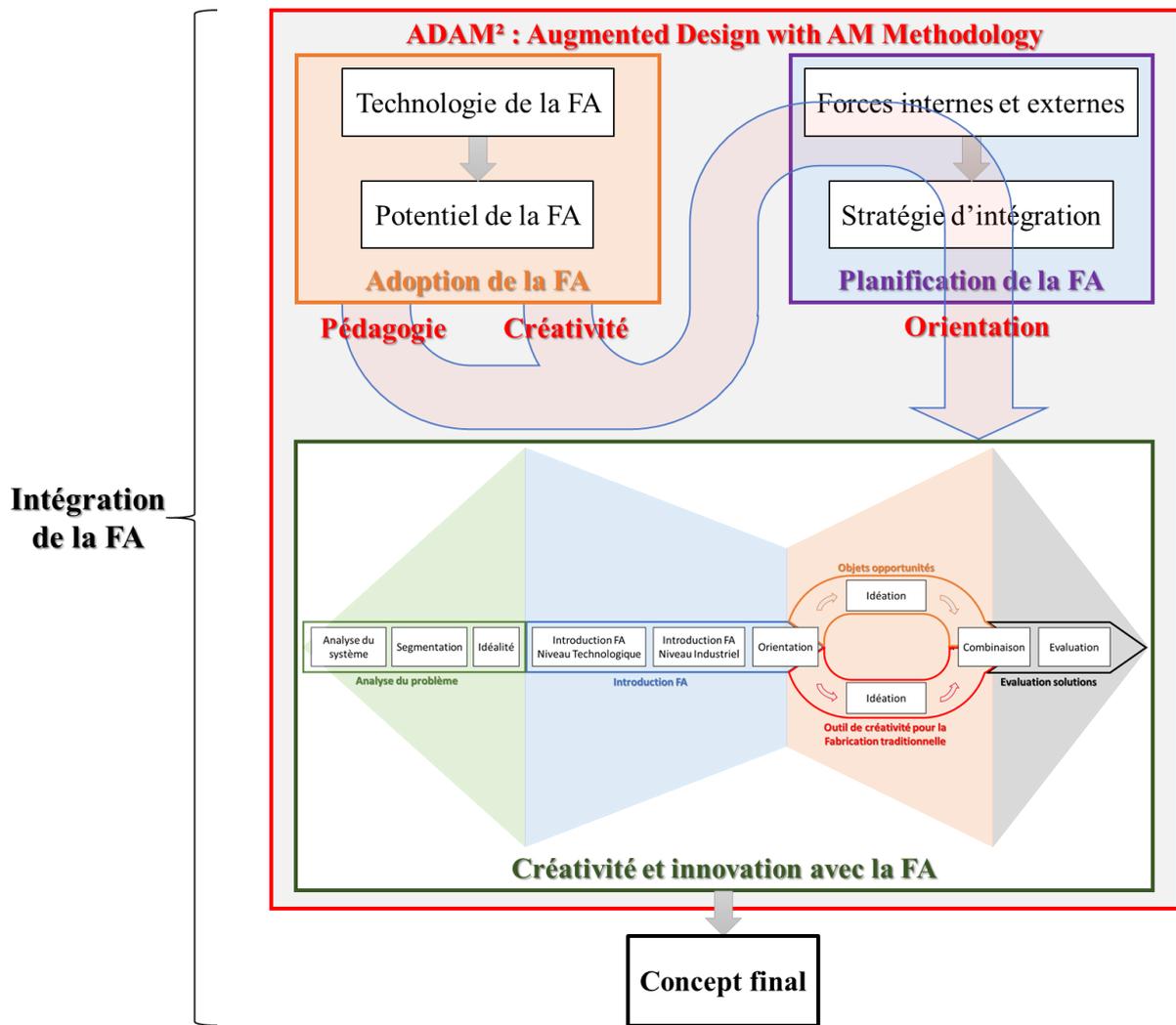


Figure 84 Lien entre la phase d'adoption et la phase de créativité et d'innovation passant par la phase de planification

Avec les résultats de l'ensemble des expérimentations, nous avons élaboré une version améliorée de la méthode ADAM² avec un processus de conception que nous avons pu développer, utiliser et valider durant l'expérimentation 2. Cette version améliorée de la méthode ADAM² et le processus de conception associé sont les apports de nos travaux de thèse.

5 Apports

Dans cette partie, nous allons présenter les apports de la thèse en nous aidant des différents résultats des expérimentations.

5.1 Méthode ADAM² : Augmented Design with Additive Manufacturing Methodology

L'apport de notre thèse est la méthode ADAM² qui est une proposition de méthode permettant d'aider les entreprises à intégrer la technologie de fabrication additive. La structuration du potentiel de la FA à travers les opportunités et son application pour les séances de créativité avec les objets opportunités ont permis de créer un outil nouveau, pédagogique et stimulant la créativité. Cet outil est nouveau car il propose un agencement de l'ensemble des caractéristiques de la technologie sans pour autant refermer les concepteurs vers des objets déjà existants, ce qui limite l'innovation. Cette double capacité est nouvelle dans la littérature.

Par ailleurs, les expérimentations sur l'adoption de cet outil et sur la planification de l'intégration de la technologie en séance de créativité nous a permis de proposer une méthode complète pour les entreprises les aidant à orienter leurs décisions durant cette intégration en phases amont de conception afin d'optimiser la capacité d'innovation au regard du contexte industriel. Les expérimentations nous ont permis d'adapter notre méthodologie, proposée initialement, afin de la rendre plus cohérente avec les enjeux des entreprises. La figure 85 présente la version définitive de la méthode ADAM².

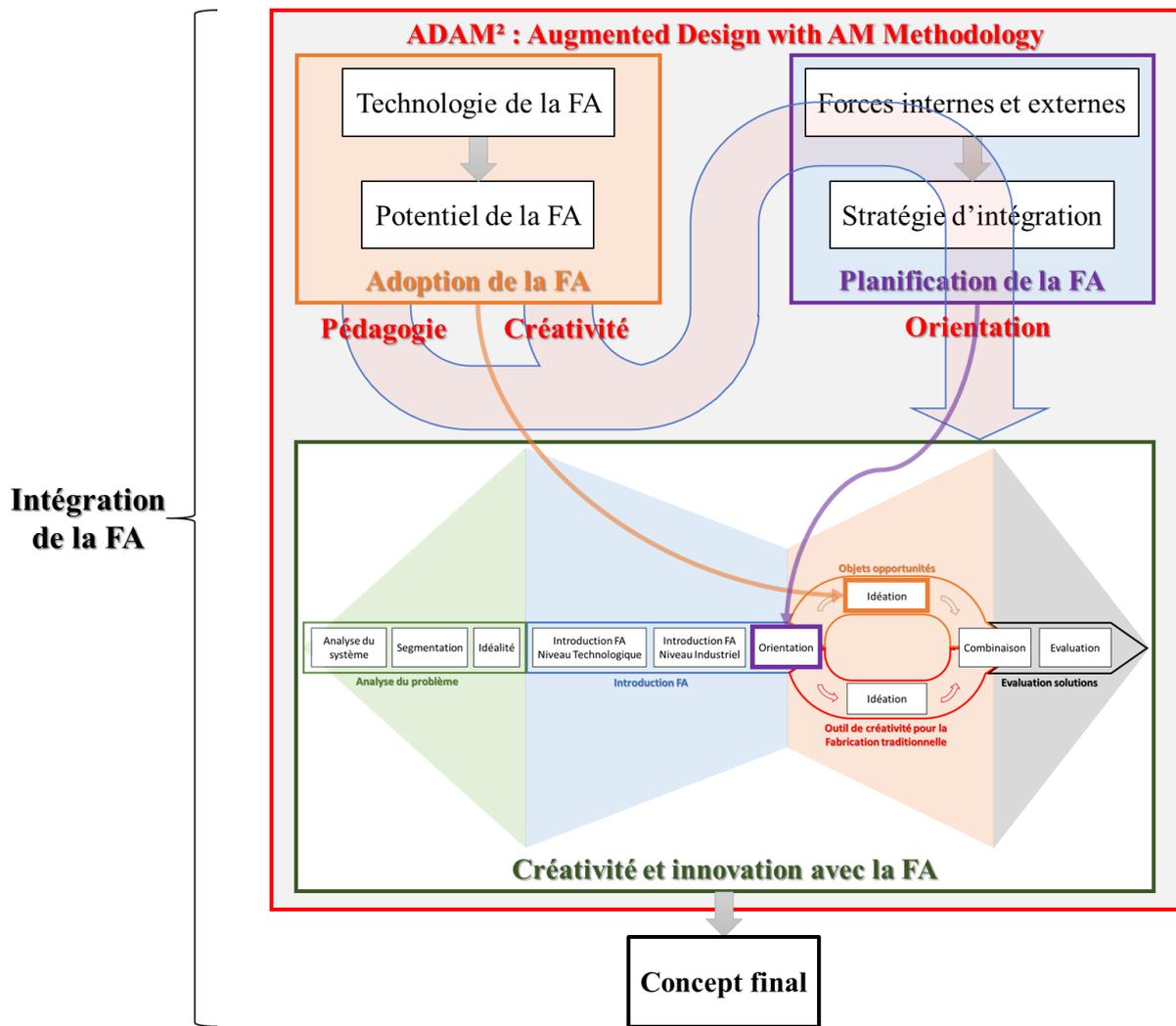


Figure 85 Schématisation de la méthode ADAM²

Présentation générale

La méthode ADAM² propose un processus d'intégration de la FA en 3 phases : une phase d'adoption, une phase de planification et une phase de créativité et innovation. Les 2 premières phases proposent une réflexion stratégique et managériale des décisions à prendre dans le cadre de l'intégration de la FA autour de 3 aspects ; un aspect de pédagogie, un aspect de créativité et un aspect d'orientation. La troisième phase propose un processus de conception avec la FA s'appuyant sur les 2 premières phases pour les étapes d'orientation et d'idéation. Ainsi, la méthode ADAM² propose donc bien un **processus d'intégration de la FA** et un **processus de conception avec la FA**.

Phase d'adoption de la FA

A travers la phase d'adoption, nous avons proposé une définition du potentiel de la FA, axée autour de 14 opportunités. Ces opportunités définissent l'ensemble des caractéristiques de la technologie de FA. La création des objets opportunités permet d'avoir un outil formateur et stimulant la créativité (figure 86). Cet outil avec les 14 objets opportunités est un réel apport des travaux de thèse car il permet de structurer les connaissances sur la FA, tout en ouvrant l'inventivité des concepteurs. Cet outil est une réelle valeur ajoutée pour les résultats en séances de créativité comme nous avons pu l'observer avec les résultats de l'expérimentation 1. En effet, cet outil permet de former les concepteurs sur le potentiel de la FA (aspect de pédagogie), et de profiter de ce même potentiel pour stimuler la créativité durant le processus de conception (aspect de créativité). Cet outil sera utilisé durant l'étape d'idéation avec la FA.



Figure 86 Outil objets opportunités

Phase de planification de la FA

A travers la phase de planification, nous avons étudié les conséquences des forces externes et internes (en particulier la culture de l'entreprise et des technologies de fabrications traditionnelles) sur la capacité d'innover en conception de produits si elles n'étaient pas prises en compte dans la stratégie d'intégration. Cette partie a mis en avant l'importance des décisions stratégiques et managériales au moment de l'intégration d'une nouvelle technologie comme la FA, obligeant une orientation dans les étapes de conception afin d'optimiser l'innovation. La culture de l'entreprise et des procédés traditionnels de fabrication, et la tendance à l'inertie de ces derniers, renforcent l'importance de la prise de décisions, en particulier, le choix des

orientations, dans le processus de conceptions de produits. Par ailleurs, les expérimentations sur cette phase ont mis en avant l'importance de la phase d'adoption dans les orientations choisies en phase de planification. La phase de planification est donc une nécessité entre la phase d'adoption et la phase de créativité et d'innovation pour assurer une bonne intégration de la technologie de FA.

Phase de créativité et d'innovation

Avec la phase de créativité et d'innovation, nous avons proposé et défini un processus de conception. Ce processus s'appuie sur les résultats des différentes expérimentations. La figure 87 est une schématisation de ce processus.

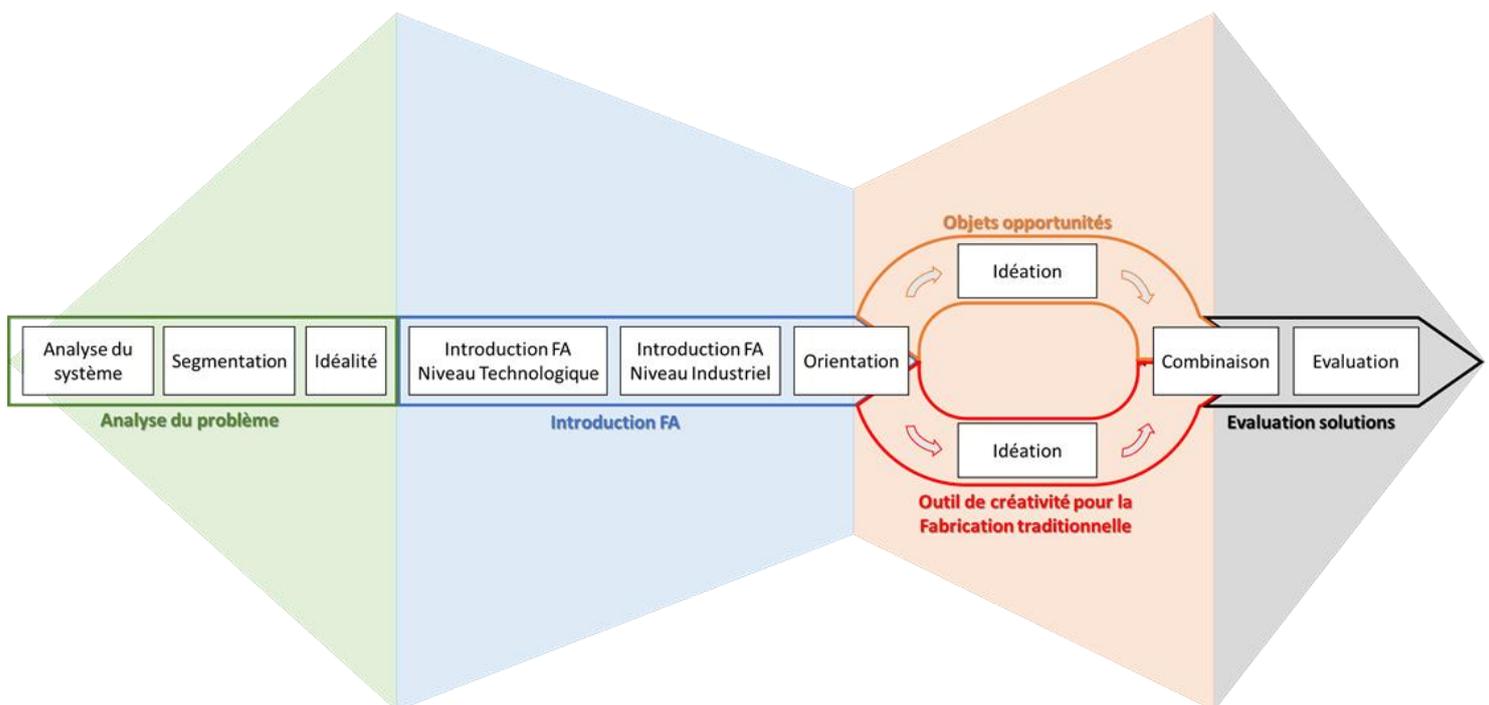


Figure 87 Schématisation du processus de conception de la méthode ADAM²

Notre processus de conception se décompose en 4 phases, qui sont :

- *Phase d'analyse du problème :*

Cette phase consiste à mieux comprendre le besoin, le produit ou le problème initial sur lequel les concepteurs vont travailler. L'objectif de cette phase est de décomposer les problèmes afin de s'assurer de bien comprendre les fonctions voulues et les enjeux de la

phase de conception. Par ailleurs, afin de se séparer des conceptions existantes ou des premières idées, il est nécessaire de chercher à définir l'objet idéal indépendant de toutes contraintes extérieures (propriétés mécaniques, fabrication, aspects économiques...). Ainsi, cette phase d'analyse du problème s'articule autour de 3 étapes :

- Analyse du système
- Segmentation
- Idéarité

- *Phase d'introduction à la FA :*

Cette phase consiste à introduire les éléments permettant d'effectuer l'adoption et la planification de l'intégration de la FA. L'introduction comprend ainsi un niveau technologique avec la présentation du potentiel de la technologie et un niveau industriel avec les types de procédés existants. Cette double présentation permet d'orienter les concepteurs vers les besoins de la technologie. Nous avons donc 3 étapes dans cette phase :

- Introduction FA au niveau technologique
- Introduction FA au niveau industriel
- Orientation

L'étape d'orientation s'appuie sur les informations issues de la planification de la FA (flèche violette sur la figure 85). Cette étape est propre à chaque entreprise car son objectif est bien d'optimiser l'innovation en prenant des décisions au regard de la culture de l'entreprise et de l'inertie des connaissances des procédés de fabrications traditionnelles au sein des concepteurs. Cette étape demande une réelle décision managériale et stratégique, et changera en fonction du contexte et de l'évolution de l'entreprise

- *Phase d'idéarité :*

La phase d'idéarité succède à l'étape d'orientation entre les problèmes où la FA offre un fort potentiel de résolution et les problèmes où la fabrication traditionnelle semble mieux adaptée dans le contexte de l'entreprise. Cette phase consiste en l'élaboration des fiches idées qui seront la base des futurs concepts et donc du futur produit. Cette phase se compose en deux étapes en parallèle (il n'y a pas de d'ordre entre ces deux étapes) :

- Idéation avec les objets opportunités
- Idéation avec les outils de créativité pour la fabrication traditionnelle

L'étape d'idéation avec les objets opportunités va s'appuyer sur l'adoption de la FA (flèche orange sur la figure 85). Cette étape va permettre aux concepteurs de se former sur la FA et de stimuler leur créativité grâce aux objets opportunités.

- *Phase d'évaluation des solutions :*

Cette phase consiste en l'élaboration des concepts. Comme il y a eu deux étapes d'idéation, le premier enjeu de cette phase est de combiner les idées intégrant la FA et les idées avec d'autres procédés de fabrication. Le fait d'avoir segmenter les problèmes fait que les solutions avec la FA sont des réponses à des problèmes différents de ceux des solutions sans FA ; ainsi la combinaison se fait plus facilement, les finalités des deux étapes d'idéation ne sont pas les mêmes. Une fois les concepts développés à partir de la combinaison des idées, il est important de les évaluer afin d'orienter les concepteurs vers un ou deux concepts. Il y a donc deux étapes pour cette phase :

- Combinaison
- Evaluation

6. Conclusion et perspectives

6.1 Conclusion

De nombreuses études se sont intéressées à l'intégration de la fabrication additive en conception de produits, mais elles restent focalisées sur la conception sans prendre en compte la globalité de l'entreprise et en particulier la culture des entreprises et des fabrications traditionnelles qui sont un réel frein à l'intégration de cette technologie. Par ailleurs, les études actuelles mettent en avant l'importance de transmettre les connaissances de la FA aux concepteurs et pourtant cette transmission est très rarement structurée afin de transmettre l'intégralité du potentiel de la technologie aux concepteurs.

L'objectif de nos travaux de thèse ont donc été de structurer l'adoption du potentiel qu'offre la FA et de planifier l'intégration de la technologie dans le contexte de l'entreprise.

Ce document présente donc la synthèse de nos travaux qui nous ont permis de répondre à cet objectif ; ce document s'articule autour de 5 chapitres.

Le premier chapitre nous a permis de structurer le contexte qui explique l'intérêt des entreprises et de la recherche pour la technologie de FA. Nous avons positionné nos travaux dans les thématiques du laboratoire LCPI.

Le deuxième chapitre est un état de l'art sur les processus de conception, sur les approches de conception en fabrication additive et sur les processus d'intégration de la FA ; un état de l'art industriel est aussi présenté dans ce chapitre.

Le troisième chapitre présente la problématique, la structuration méthodologique et l'hypothèse. Cette thèse visait à répondre à la problématique suivante : **dans une entreprise de l'industrie manufacturière, comment intégrer la fabrication additive en phase amont de conception dans une stratégie d'innovation ?**

Pour répondre à cette problématique, nous avons élaboré une méthode : la méthode ADAM² (Augmented Design with Additive Manufacturing Methodology), qui se structure en 3 phases : une phase d'adoption de la FA, une phase de planification de la FA et une phase de créativité et innovation avec la FA. Les expérimentations du quatrième chapitre nous ont permis de présenter et valider ces 3 phases ainsi que les liens entre elles. Ces expérimentations nous ont permis d'améliorer la proposition méthodologique.

Le cinquième chapitre présente les apports de nos travaux de thèse qui sont un processus d'intégration de la FA avec la méthode ADAM². Cette méthode comprend, dans sa phase de créativité et d'innovation avec la FA, un processus de conception de produits permettant aux entreprises d'intégrer la technologie de FA en conception, tout en adoptant d'une manière structurée le potentiel de la technologie et en planifiant cette adoption en accord avec le contexte de l'entreprise et la stratégie souhaitée pour cette intégration. Ce chapitre met en avant les perspectives de nos travaux de thèse avec, en particulier, l'ouverture vers une adaptation de la méthode pour la maintenance avec la fabrication additive et avec la standardisation de la méthode ADAM² vers une méthode de conduite du changement.

La thèse a montré d'un point de vue global que l'intégration de la fabrication additive est une question très importante pour les entreprises et que le besoin de méthodes d'intégration est une réalité industrielle. Ces travaux montrent aussi l'aspect universelle d'une telle recherche car si dans le futur la FA sera totalement intégrée dans les entreprises et que la méthode dans sa forme actuelle sera obsolète, les problématiques d'intégration de nouvelles technologies ou de nouvelles manières de travailler en entreprise seront toujours d'actualité pour l'industrie et pour la recherche.

6.2 Perspectives

Nos travaux ont permis ainsi de proposer une méthodologie comprenant un processus d'intégration de la FA conception de produits en adoptant le potentiel de la technologie et en planifiant la stratégie d'intégration en fonction du contexte industriel. L'ensemble de ces travaux nous permet de dégager des perspectives de développement et de recherche, à court, moyen et long terme.

Perspectives à court terme

A court terme, la principale perspective de développement est l'évolution de la méthode ADAM² dans le cadre d'une réelle intégration de la FA, avec plusieurs projets. Notre méthode propose actuellement un processus d'intégration pour une conception de produits qui s'appuie sur le contexte d'entreprise avec les forces externes et internes. La méthode aujourd'hui ne prend pas en compte les connaissances emmagasinées par les projets précédents utilisant la méthode ADAM². Il serait intéressant d'étudier les variations qu'entraîneraient une répétition

de la méthode ; quels seraient les modifications à faire au niveau de la phase d'adoption et de la phase de planification. Les objets opportunités seront-ils toujours nécessaires ou le potentiel sera totalement transmis aux concepteurs ; et la phase de planification sera-t-elle toujours aussi nécessaire ou bien l'étape d'orientation deviendra logique pour l'ensemble des concepteurs. Ainsi, il serait intéressant à court terme d'intégrer la notion, de temps et d'expérience d'utilisation dans la méthode.

Perspectives à moyen terme

Pour les perspectives à moyen terme, une évolution pertinente de la méthode serait de l'adapter pour animer des séances de créativité permettant de stimuler les concepteurs vers la FA sans volonté systématique d'intégrer cette technologie mais en vue d'apporter des idées nouvelles. Au cours de ces animations, les connaissances sur cette technologie pourront être transmises d'une manière créative et ludique. Ce type d'animation pourrait être facilement fait pour des FabLab par exemple où la FA est une technologie facilement accessible et pourtant peu utilisée avec l'ensemble de son potentiel de conception.

Une autre perspective à moyen terme serait une évolution de notre phase d'adoption. Pour la phase d'adoption, notre méthodologie présente le potentiel de la FA, mais nous ne présentons pas les spécificités propres aux différents procédés de FA, ainsi que les différentes contraintes. En effet, pour améliorer l'adoption de la FA, il serait intéressant de proposer un « benchmark » complet de la technologie avec les caractéristiques globales : opportunités, contraintes et limites. Les caractéristiques que nous présentons avec les opportunités sont exclusivement des propriétés technologiques, il pourrait être intéressant d'intégrer des propriétés économiques en plus. La difficulté qui résulterait de la prise en compte de l'ensemble de ces éléments en plus, serait de ne pas perdre le rôle de stimulation de créativité qu'offre les objets opportunités actuellement. Un travail pour enrichir nos travaux serait donc de développer des outils présentant les contraintes, les différentes technologies et les aspects économiques, tout en stimulant encore plus la créativité des concepteurs.

A moyen terme, une perspective est d'adapter la méthode ADAM² pour des enjeux de maintenance et moins d'innovation et de créativité. En effet, l'analyse des entretiens et la

définition des types de stratégie nous ont permis de positionner notre méthode sur deux stratégies, ce qui veut dire qu'il reste deux stratégies que nous ne prenons pas en compte. Ces deux stratégies sont plus liées aux enjeux de maintenance que d'innovation de conception, ainsi il serait pertinent d'essayer d'enrichir notre méthodologie pour une application d'intégration de la FA dans un objectif de maintenance. Cet enjeu est une demande des entreprises en particulier des secteurs des machines industrielles et de la défense. Par ailleurs, avec les enjeux climatiques et écologiques, les questions du recyclage et de l'obsolescence des produits deviennent une problématique majeure dans la conception de produit. L'utilisation de la FA pour la maintenance est une réponse à ces questions, ce qui fait que son utilisation est une problématique d'actualité.

Perspectives à long terme

Les perspectives à long terme qu'ouvrent ce travail sont assez diverses ; mais la plus pertinente d'entre elles serait la généralisation de cette méthodologie vers d'autres disciplines.

Dans notre travail, nous nous intéressons à l'intégration de la FA en entreprise au niveau de la conception de produits, mais il serait possible de l'adapter à l'intégration d'un autre procédé, voire même d'un élément autre. Notre méthodologie basée sur une phase d'adoption et une phase de planification avant une phase que nous pourrions appeler phase d'application, peut être étudié comme une méthodologie de conduite du changement. En effet, si on prend un exemple avec l'intégration d'un nouveau management dans une entreprise ; avant d'aller vers une phase d'application de ce nouveau management, il serait pertinent d'avoir au préalable une phase d'adoption de ce management avec une ouverture sur les bienfaits (la créativité et l'innovation pour la méthode actuelle) et une phase de planification avec l'analyse du besoin stratégique et des biais dans l'intégration de ce management.

Le sujet de notre thèse accède sur le processus de conception de produits, l'intégration de la fabrication additive et la créativité est une forme d'application de la conduite du changement avec un état initial (le processus de conception de produits n'intégrant pas la FA), un état final (le processus de conception de produits intégrant la FA) et un vecteur qui permet le passage de l'état initial à l'état final (la créativité).

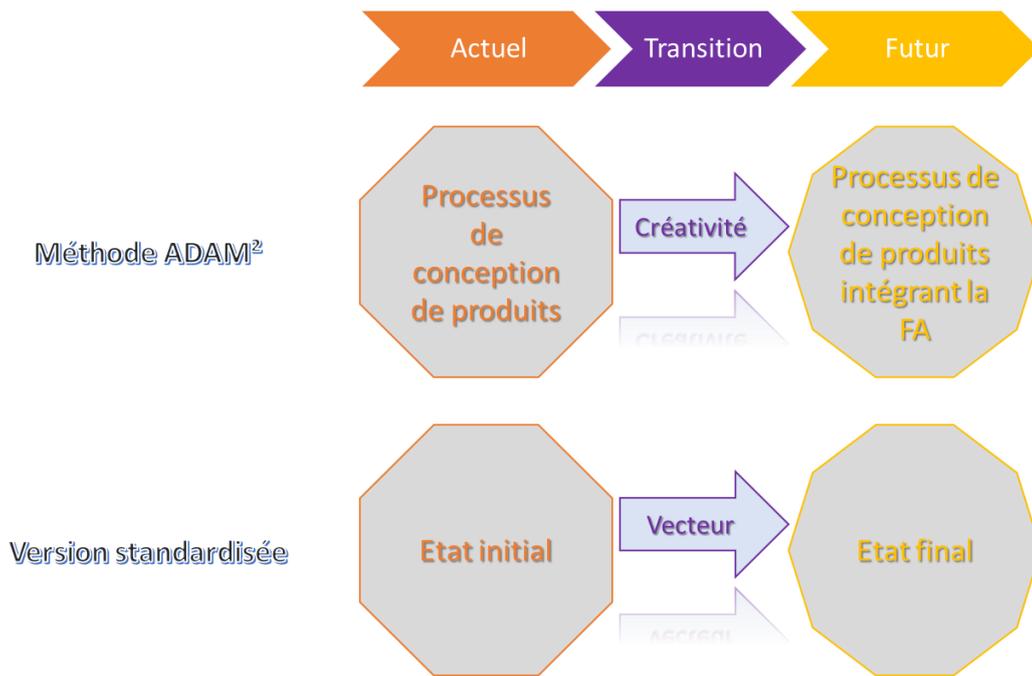


Figure 88 Méthode ADAM² comme conduite du changement

La figure 88 présente une schématisation de la méthode ADAM² comme conduite du changement, et la définition de la version standardisée de la méthode pour d'autres applications. Ainsi, l'étude d'adaptation de la méthode ADAM² vers une méthode standard de méthodologie de conduite du changement est une réelle perspective.

Production scientifique

Revues scientifiques internationales

3D Printing and Additive Manufacturing

Lang, A., Segonds, F., Jean, C., Gazo, C., Guegan, J., Buisine, S., & Mantelet, F. (2021). Augmented Design with Additive Manufacturing Methodology: Tangible Object-Based Method to Enhance Creativity in Design for Additive Manufacturing. *3D Printing and Additive Manufacturing*.

Conférence internationale

TRIZ Future Conference (TFC)

Lang, A., Gazo, C., Segonds, F., Mantelet, F., Jean, C., Guegan, J., & Buisine, S. (2019, October). A proposal for a methodology of technical creativity mixing TRIZ and additive manufacturing. *In International TRIZ Future Conference* (pp. 106-116). Springer, Cham.

Conférence nationale

CONFERE

Lang, A., Kaufmann, N., Segonds, F., Gazo, C., Mantelet, F., Jean, C., Guegan, J., & Buisine, S. (2019, Juillet). Créativité par la Fabrication Additive : Structuration d'une méthodologie fondée sur TRIZ. *CONFERE'19*, Galway, Ireland

Autres

Techniques de l'ingénieur

Segonds, F., & Lang, A. (2019). Infographie : fabrication additive et créativité. *Techniques de l'Ingénieur*.

Bibliographie

- Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*.
- Alimardani, M., Toyserkani, E., & Huissoon, J. P. (2007). A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(12), 1115–1130.
- Altshuller, G., Al'tov, G., & Altov, H. (1996). *And suddenly the inventor appeared: TRIZ, the theory of inventive problem solving*. Technical Innovation Center, Inc.
- Altshuller, G. S. (1984). *Creativity as an exact science: the theory of the solution of inventive problems*. Gordon and Breach Science Publishers.
- Altshuller, G. S. (1999). *The innovation algorithm: TRIZ, systematic innovation and technical creativity*. Technical innovation center, Inc.
- André, J., Cabrera, M., Jezequel, Y., & Karrer, P. (1988). *Process and device for producing models of industrial parts by the action of light*.
- Banathy, B. H. (2013). *Designing social systems in a changing world*. Springer Science & Business Media.
- Bandyopadhyay, A., & Heer, B. (2018). Additive manufacturing of multi-material structures. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 129(March), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001>
- Bernèche, R., & Plante, P. (2009). L'art-thérapie: un espace favorable à la résurgence du potentiel créateur. *Revue Québécoise de Psychologie*, 30(3), 11–28.
- Berry, M. (1983). Une technologie invisible. *Paris, Centre de Recherche En Gestion de l'École Polytechnique*.
- Besançon, M., & Lubart, T. (2015). Influence de l'environnement sur les performances créatives. *PSY-Evaluation, Mesure, Diagnostic*, 65–94.
- Bila Deroussy, P. (2015). *Approche systémique de la créativité: outils et méthodes pour aborder la complexité en conception amont*. Paris, ENSAM.
- Bouchard, C., & Aoussat, A. (2002). Modernization of the car design process. *Int. J. Vehicule*

Design, 1–10.

- Boujut, J.-F., & Blanco, E. (2003). Intermediary objects as a means to foster co-operation in engineering design. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 12(2), 205–219.
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(2), 659–681. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- Buchenau, M., & Suri, J. F. (2000). Experience prototyping. *Proceedings of the 3rd Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques*, 424–433.
- Cahen, P. (2010). *Signaux faibles, mode d'emploi - Déceler les tendances, anticiper les ruptures*. Eyrolles.
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Pavese, M., & Fino, P. (2014). Direct fabrication of joints based on direct metal laser sintering in aluminum and titanium alloys. *Procedia CIRP*, 21, 129–132. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.155>
- Campbell, I., Diegel, O., Kowen, J., & Wohlers, T. (2018). *Wohlers report 2018: 3D printing and additive manufacturing state of the industry: annual worldwide progress report*. Wohlers Associates.
- Cavallucci, D., & Khomenko, N. (2007). From TRIZ to OTSM-TRIZ: addressing complexity challenges in inventive design. *International Journal of Product Development*, 4(1–2), 4–21.
- Chekurov, S., & Lantela, T. (2017). Selective Laser Melted Digital Hydraulic Valve System. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 4(4), 215–221. <https://doi.org/10.1089/3dp.2017.0014>
- Choi, J., & Chang, Y. (2005). Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4–5), 597–607.
- Christiaans, H. H. C. M. (2002). Creativity as a design criterion. *Communication Research Journal*, 14(1), 41–54.
- Chua, C. K., Teh, S. H., & Gay, R. K. L. (1999). Rapid prototyping versus virtual prototyping

- in product design and manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(8), 597–603.
- Cropley, D., & Cropley, A. (2005). *Engineering creativity: A systems concept of functional creativity*. Psychology Press.
- Cropley, D. H., & Kaufman, J. C. (2012). Measuring functional creativity: Non-expert raters and the Creative Solution Diagnosis Scale. *The Journal of Creative Behavior*, 46(2), 119–137.
- Cross, N. (2008). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. Wiley.
- Cruz, V., & Gaudron, N. (2010). Open-ended objects: a tool for brainstorming. *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems*, 85–88.
- Cuellar, J. S., Smit, G., Plettenburg, D., & Zadpoor, A. (2018). Additive manufacturing of non-assembly mechanisms. *Additive Manufacturing*, 21(May 2017), 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.02.004>
- De Martino, T., Falcidieno, B., & Haßinger, S. (1998). Design and engineering process integration through a multiple view intermediate modeller in a distributed object-oriented system environment. *Computer-Aided Design*, 30(6), 437–452.
- Debois, F., Groff, A., & Chenevier, E. (2015). *La Boîte à outils de la créativité-2e éd.* Dunod.
- Demeter, K. (2003). Manufacturing strategy and competitiveness. *International Journal of Production Economics*, 81, 205–213.
- Deradjat, D., & Minshall, T. (2017). Implementation of rapid manufacturing for mass customisation. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(1), 95–121. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2016-0007>
- Dorst, K., & Cross, N. (2001). Creativity in the design process: co-evolution of problem–solution. *Design Studies*, 22(5), 425–437.
- Dobrovski, Z., Verlinden, J. C., & Geraedts, J. M. P. (2011). Optimal design for additive manufacturing: opportunities and challenges. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 54860, 635–646.
- Durakovic, B. (2018). Design for additive manufacturing: Benefits, trends and challenges.

- Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 6(2), 179–191.
<https://doi.org/10.21533/pen.v6i2.224>
- Eder, W. E. (1998). Design modeling—a design science approach (and why does industry not use it?). *Journal of Engineering Design*, 9(4), 355–371.
- Egan, P. F., Gonella, V. C., Engensperger, M., Ferguson, S. J., & Shea, K. (2017). Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing. *PLoS ONE*, 12(8), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182902>
- Ettlie, J. E. (2000). *Managing technological innovation*. John Wiley and Sons.
- Fan, H., Fu, J., Li, X., Pei, Y., Li, X., Pei, G., & Guo, Z. (2015). Implantation of customized 3-D printed titanium prosthesis in limb salvage surgery: A case series and review of the literature. *World Journal of Surgical Oncology*, 13(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1186/s12957-015-0723-2>
- Federici, T. (2009). Factors influencing ERP outcomes in SMEs: a post-introduction assessment. *Journal of Enterprise Information Management*.
- Fey, N. P., South, B. J., Seepersad, C. C., & Neptune, R. R. (2009). Topology optimization and freeform fabrication framework for developing prosthetic feet. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 607–619.
- Fox, J. C., Moylan, S. P., & Lane, B. M. (2016). Effect of Process Parameters on the Surface Roughness of Overhanging Structures in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 45, 131–134.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.347>
- Garciamendez-Mijares, C. E., Agrawal, P., García Martínez, G., Cervantes Juárez, E., & Zhang, Y. S. (2021). State-of-art affordable bioprinters: A guide for the DiY community. *Applied Physics Reviews*, 8(3), 31312.
- Garel, G., & Hock, E. (2012). *La fabrication de l'innovation*. Dunod.
- Gibbons, G. J., & Hansell, R. G. (2005). Direct tool steel injection mould inserts through the Arcam EBM free-form fabrication process. *Assembly Automation*, 25(4), 300–305.
<https://doi.org/10.1108/01445150510626433>
- Gibson, I., Rosen, D. R., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies 2nd*

Edition. Springer US.

Gordon, W. J. J. (1961). *Synectics: The development of creative capacity*.

Gross, J., Park, K., & Kremer, G. E. O. (2018). Design for additive manufacturing inspired by TRIZ. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 51791, V004T05A004.

Guay, F., Vallerand, R. J., & Blanchard, C. (2000). On the assessment of situational intrinsic and extrinsic motivation: The Situational Motivation Scale (SIMS). *Motivation and Emotion*, 24(3), 175–213. <https://doi.org/10.1023/A:1005614228250>

Guttag, M., & Boyce, M. C. (2015). Locally and dynamically controllable surface topography through the use of particle-enhanced soft composites. *Advanced Functional Materials*, 25(24), 3641–3647. <https://doi.org/10.1002/adfm.201501035>

Hague, R., Campbell, I., & Dickens, P. (2003). Implications on design of rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), 25–30.

Hague, R., Mansour, S., & Saleh, N. (2004). Material and design considerations for rapid manufacturing. *International Journal of Production Research*, 42(22), 4691–4708.

Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., & Sloan, M. (2010). Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 5(2), 57–64.

Henderson, R. M., & Clark, K. B. (1990). Architectural innovation: The reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms. *Administrative Science Quarterly*, 9–30.

Hill, T. (1995). *Manufacturing strategy: text and cases*. Macmillan International Higher Education.

Hirt, L., Reiser, A., Spolenak, R., & Zambelli, T. (2017). Additive Manufacturing of Metal Structures at the Micrometer Scale. *Advanced Materials*, 29(17). <https://doi.org/10.1002/adma.201604211>

Howard, T. J., Culley, S., & Dekoninck, E. A. (2011). Reuse of ideas and concepts for creative stimuli in engineering design. *Journal of Engineering Design*, 22(8), 565–581.

- Howard, T. J., Culley, S. J., & Dekoninck, E. (2008). Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design Studies*, 29(2), 160–180.
- Howard, T. J., Dekoninck, E. A., & Culley, S. J. (2010). The use of creative stimuli at early stages of industrial product innovation. *Research in Engineering Design*, 21(4), 263–274.
- Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., & Donmez, A. (2015). Additive manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 137(1), 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4028725>
- Hutchinson, H., Mackay, W., Westerlund, B., Bederson, B. B., Druin, A., Plaisant, C., Beaudouin-Lafon, M., Conversy, S., Evans, H., & Hansen, H. (2003). Technology probes: inspiring design for and with families. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 17–24.
- Ion, A., Frohnhofen, J., Wall, L., Kovacs, R., Alistar, M., Lindsay, J., Lopes, P., Chen, H. T., & Baudisch, P. (2016). Metamaterial mechanisms. *UIST 2016 - Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 529–539. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984540>
- Janis, I. L. (1972). *Victims of Groupthink: A psychological study of foreign-policy decisions and fiascoes*.
- Kahneman, D. (2012). *Système 1/Système 2: Les deux vitesses de la pensée*. Flammarion.
- Kamps, T., Gralow, M., Schlick, G., & Reinhart, G. (2017). Systematic biomimetic part design for additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 65, 259–266.
- Kavadias, S., & Sommer, S. C. (2009). The effects of problem structure and team diversity on brainstorming effectiveness. *Management Science*, 55(12), 1899–1913.
- Klahn, C., Leutenecker, B., & Meboldt, M. (2015). Design strategies for the process of additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 36, 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.082>
- Kretschmar, N., & Chekurov, S. (2018). The applicability of the 40 Triz principles in design for additive manufacturing. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 29.
- Kruth, J.-P., Leu, M.-C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid

- prototyping. *Cirp Annals*, 47(2), 525–540.
- Kudrowitz, B. M., & Wallace, D. (2013). Assessing the quality of ideas from prolific, early-stage product ideation. *Journal of Engineering Design*, 24(2), 120–139.
- Kumke, M., Watschke, H., & Vietor, T. (2016). A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(1), 3–19.
- Lang, A., Gazo, C., Segonds, F., Mantelet, F., Jean, C., Guegan, J., & Buisine, S. (2019). A Proposal for a Methodology of Technical Creativity Mixing TRIZ and Additive Manufacturing. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 572). https://doi.org/10.1007/978-3-030-32497-1_10
- Lang, Armand, Segonds, F., Jean, C., Gazo, C., Guegan, J., Buisine, S., & Mantelet, F. (2021). Augmented Design with Additive Manufacturing Methodology: Tangible Object-Based Method to Enhance Creativity in Design for Additive Manufacturing. *3D Printing and Additive Manufacturing*.
- Langelaar, M. (2017). An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55(3), 871–883. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1522-2>
- Laverne, F. (2016). *Concevoir avec la Fabrication Additive: Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique*. Paris, ENSAM.
- Laverne, F., Anwer, N., Coq, M. L. E., St, I. U. T., Tech, P., Cpi, L., Cachan, E. N. S., & Cedex, C. (2014). DFAM in the design process: A proposal of classification to foster early design stages. *Confere 2014*, 1–12.
- Laverne, F., Segonds, F., Anwer, N., & Le Coq, M. (2015). Assembly based methods to support product innovation in design for additive manufacturing: An exploratory case study. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 137(12). <https://doi.org/10.1115/1.4031589>
- Laverne, F., Segonds, F., D'Antonio, G., & Le Coq, M. (2017). Enriching design with X through tailored additive manufacturing knowledge: a methodological proposal. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(2), 279–288.
- Le Masson, P., Weil, B., & Hatchuel, A. (2014). *Théorie, méthodes et organisations de la*

conception. Presses des Mines.

Lestienne, R. (2012). *Dialogues sur l'émergence*. Edition Le Pommier.

Li, D., Liao, W., Dai, N., Dong, G., Tang, Y., & Xie, Y. M. (2018). Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design*, 104, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.06.003>

Liedtka, J. (2015). Perspective: Linking design thinking with innovation outcomes through cognitive bias reduction. *Journal of Product Innovation Management*, 32(6), 925–938.

Lim, D. (2003). *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*. Arts et Métiers ParisTech.

Liseli Baich, G. M. and H. M. (2015). Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts Liseli Baich , Guha Manogharan *. *Int. J. Rapid Manufacturing*, 5, 308–319.

Livesu, M., Ellero, S., Martínez, J., Lefebvre, S., & Attene, M. (2017). From 3D models to 3D prints: an overview of the processing pipeline. *Computer Graphics Forum*, 36(2), 537–564. <https://doi.org/10.1111/cgf.13147>

Luo, L., Baran, I., Rusinkiewicz, S., & Matusik, W. (2012). Chopper: Partitioning models into 3D-printable parts. *ACM Transactions on Graphics*, 31(6). <https://doi.org/10.1145/2366145.2366148>

Mann, D. (2000). The four pillars of TRIZ. *Engineering Design Conference, Brunel*.

Mansour, S., & Hague, R. (2003). Impact of rapid manufacturing on design for manufacture for injection moulding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(4), 453–461.

Mao, Y., Wu, L., Yan, D. M., Guo, J., Chen, C. W., & Chen, B. (2018). Generating hybrid interior structure for 3D printing. *Computer Aided Geometric Design*, 62, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2018.03.015>

Martinsuo, M., & Luomaranta, T. (2018). Adopting additive manufacturing in SMEs: exploring the challenges and solutions. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6),

937–957. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0030>

- MASMOUDI, S. (2010). Créativité, cognition et modulation motivationnelle. *Du Percept à La Décision: Intégration de La Cognition, l'émotion et La Motivation*, 197–226.
- Mattelmäki, T. (2006). *Design probes*. Aalto University.
- Mawale, M. B., Kuthe, A., Mawale, A. M., & Dahake, S. W. (2018). Development of an ear cap in chronic suppurative otitis media using additive manufacturing and TRIZ. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 232(7), 733–738.
- Mazlan, S. N. H., Kadir, A. Z. A., Deja, M., Zieliński, D., & Alkahari, M. R. (2021). Development of Technical Creativity Featuring Modified TRIZ-AM Inventive Principle to Support Design for Additive Manufacturing. *JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN*, 1–49.
- Mellor, S., Hao, L., & Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International Journal of Production Economics*, 149, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008>
- Mer, S., Jeantet, A., & Tichkiewitch, S. (1995). Les objets intermédiaires de la conception: modélisation et communication. *Le Communicationnel Pour Concevoir*, 21–41.
- Micaëlli, J.-P., & Forest, J. (2003). *Artificialisme: introduction à une théorie de la conception*. PPUR presses polytechniques.
- Midler, C. (2012). *L'Auto qui n'existait pas: Management des projets et transformation de l'entreprise*. Dunod.
- Midler, C., Beaume, R., & Maniak, R. (2012). *Réenchanter l'industrie par l'innovation: L'expérience des constructeurs automobiles*. Dunod.
- Moehrle, M. G. (2005). What is TRIZ? From conceptual basics to a framework for research. *Creativity and Innovation Management*, 14(1), 3–13.
- Mohsenizadeh, M., Gasbarri, F., Munther, M., Beheshti, A., & Davami, K. (2018). Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption. *Materials and Design*, 139, 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.037>
- Moroni, G., Petrò, S., & Polini, W. (2017). Geometrical product specification and verification

- in additive manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66(1), 157–160. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.043>
- Muller, P., Mognol, P., & Hascoet, J.-Y. (2013). Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(5), 685–692.
- Oettmeier, K., & Hofmann, E. (2017). Additive manufacturing technology adoption: an empirical analysis of general and supply chain-related determinants. *Journal of Business Economics*, 87(1), 97–124. <https://doi.org/10.1007/s11573-016-0806-8>
- Oh, Y., Zhou, C., & Behdad, S. (2018). Part decomposition and assembly-based (Re) design for additive manufacturing: A review. *Additive Manufacturing*, 22(September 2017), 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.018>
- Onuiké, B., & Bandyopadhyay, A. (2018). Additive manufacturing of Inconel 718 – Ti6Al4V bimetallic structures. *Additive Manufacturing*, 22(June), 844–851. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.025>
- Orqu era, M., Campocasso, S., & Millet, D. (2017). Design for Additive Manufacturing Method for a Mechanical System Downsizing. *Procedia CIRP*, 60, 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.011>
- Pahl, G., Beitz, W., & Grote, K. (1996). Engineering design: a systematic approach. *Mrs Bulletin*, 71.
- Panesar, A., Ashcroft, I., Brackett, D., Wildman, R., & Hague, R. (2017). Design framework for multifunctional additive manufacturing: Coupled optimization strategy for structures with embedded functional systems. *Additive Manufacturing*, 16, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.009>
- Perez, B., Hilburn, S., Jensen, D., & Wood, K. L. (2019). Design principle-based stimuli for improving creativity during ideation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(2), 493–503.
- Petrovic, V., Haro, J. V., Jord a, O., Delgado, J., Blasco, R., & Portol es, L. (2011). *Additive Layer Manufacturing : State of the art in industrial applications through case studies To cite this version : r P F o r R w O n l y*.
- Plank, H., Winkler, R., Schwalb, C. H., H utner, J., Fowlkes, J. D., Rack, P. D., Utke, I., & Huth,

- M. (2020). Focused electron beam-based 3D nanoprinting for scanning probe microscopy: A review. *Micromachines*, *11*(1). <https://doi.org/10.3390/mi11010048>
- Pol, G., Legardeur, J., Minel, S., & Merlo, C. (2005). *Les phases informelles en amont des projets de conception*.
- Porter, M. E. (1985). Technology and competitive advantage. *Journal of Business Strategy*.
- Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R., & Moultrie, J. (2018). A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design. *Journal of Engineering Design*, *29*(6), 291–326.
- Rafi, H. K., Starr, T. L., & Stucker, B. E. (2013). A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti–6Al–4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *69*(5), 1299–1309.
- Ramírez, E. A., Caicedo, F., Hurel, J., Helguero, C. G., & Amaya, J. L. (2019). Methodology for design process of a snap-fit joint made by additive manufacturing. *Procedia CIRP*, *79*, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.021>
- REDWOOD, B., SCHFFER, F., & GARRET, B. (2017). *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. 3D Hubs.
- Renjith, S. C., Okudan Kremer, G. E., & Park, K. (2018). *A design framework for additive manufacturing through the synergistic use of axiomatic design theory and TRIZ*.
- Renjith, S. C., Park, K., & Okudan Kremer, G. E. (2020). A Design Framework for Additive Manufacturing: Integration of Additive Manufacturing Capabilities in the Early Design Process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *21*(2), 329–345. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00253-3>
- Rhodes, M. (1961). An analysis of creativity. *The Phi Delta Kappan*, *42*(7), 305–310.
- Rias, A.-L. (2017). *créativité par et pour la fabrication additive: proposition d'une méthodologie outillée*. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.
- Rias, A.-L., Segonds, F., Bouchard, C., & Abed, S. (2017). Towards additive manufacturing of intermediate objects (AMIO) for concepts generation. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, *11*(2), 301–315.

- Ricard, J. (2008). *Pourquoi le tout est plus que la somme de ses parties*. Hermann.
- Richards, R. (1999). Four Ps of creativity. *Encyclopedia of Creativity*, 1, 733–742.
- Richter, T., Watschke, H., Schumacher, F., & Vietor, T. (2018). Exploitation of potentials of additive manufacturing in ideation workshops. *DS 89: Proceedings of The Fifth International Conference on Design Creativity (ICDC 2018)*, University of Bath, Bath, UK, 354–361.
- Rodrigue, H., & Rivette, M. (2010). An assembly-level design for additive manufacturing methodology. *IDMME-Virtual Concept*.
- Rodrigue, H., Rivette, M., Rodrigue, H., Rivette, M., Design, A. A., & Methodology, M. (2015). *An Assembly-Level Design for Additive Manufacturing Methodology To cite this version : HAL Id : hal-01099485 An Assembly-Level Design for Additive Manufacturing Methodology*.
- Rosen, D. W. (2007). Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(5), 585–594.
- Saberi, S., Mohd Yusuff, R., Zulkifli, N., & Megat Ahmad, M. (2010). Effective Factors on AMT Implementation Performance: A Review. In *Journal of Applied Sciences* (Vol. 10, Issue 13, pp. 1229–1242).
- Saltzman, D., Bichnevicius, M., Lynch, S., Simpson, T. W., Reutzel, E. W., Dickman, C., & Martukanitz, R. (2018). Design and evaluation of an additively manufactured aircraft heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 138(February), 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.032>
- Sass, L., & Oxman, R. (2006). Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design. *Design Studies*, 27(3), 325–355.
- Schmelzle, J., Kline, E. V., Dickman, C. J., Reutzel, E. W., Jones, G., & Simpson, T. W. (2015). (Re)Designing for Part Consolidation: Understanding the Challenges of Metal Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 137(11), 1–12. <https://doi.org/10.1115/1.4031156>
- Schön, D. A. (2017). *The reflective practitioner: How professionals think in action*. Routledge.
- Schulte, F., Würtenberger, J., Steffan, K.-E., & Kirchner, E. (2020). TRIZ als Schlüssel zu den

- Potentialen additiver Fertigungsverfahren. In *Konstruktion für die Additive Fertigung 2018* (pp. 55–75). Springer.
- Segonds, F., Cohen, G., Véron, P., & Peyceré, J. (2016). PLM and early stages collaboration in interactive design, a case study in the glass industry. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, *10*(2), 95–104. <https://doi.org/10.1007/s12008-014-0217-4>
- Segonds, F., & Lang, A. (2019). Infographie : fabrication additive et créativité. *Techniques de l'Ingénieur*.
- Sidikova, M. (2011). *The impact of change on employees' motivation*.
- Simon, H. A. (1957). *Models of man: social and rational; mathematical essays on rational human behavior in society setting*. New York: Wiley.
- Simpson, T. W., Williams, C. B., & Hripko, M. (2017). Preparing industry for additive manufacturing and its applications: Summary & recommendations from a National Science Foundation workshop. *Additive Manufacturing*, *13*, 166–178.
- Sing, S. L., An, J., Yeong, W. Y., & Wiria, F. E. (2016). Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *Journal of Orthopaedic Research*, *34*(3), 369–385. <https://doi.org/10.1002/jor.23075>
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, *25*, 185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>
- Skinner, W. (1969). *Manufacturing-missing link in corporate strategy*.
- Skinner, W. (1984). Operations technology: blind spot in strategic management. *Interfaces*, *14*(1), 116–125.
- Skinner, W. (2007). Manufacturing strategy: the story of its evolution. *Journal of Operations Management*, *25*(2), 328–335.
- Song, P., Fu, Z., Liu, L., & Fu, C. W. (2015). Printing 3D objects with interlocking parts. *Computer Aided Geometric Design*, *35–36*, 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2015.03.020>
- Sonntag, V. (2003). The role of manufacturing strategy in adapting to technological change. *Integrated Manufacturing Systems*.

- Sony, M., & Naik, S. (2020). Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. *Production Planning & Control*, 31(10), 799–815.
- Sossou, G., Demoly, F., Montavon, G., & Gomes, S. (2018). An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(1), 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.11.005>
- Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., & Evans, K. E. (2013). A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9–12), 1247–1254.
- Syam, W. P., Jianwei, W., Zhao, B., Maskery, I., Elmadih, W., & Leach, R. (2018). Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation. *Precision Engineering*, 52(May 2017), 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.09.010>
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- Tiner, C., Bapat, S., Nath, S. D., Atre, S. V., & Malshe, A. (2019). Exploring convergence of snake-skin-inspired texture designs and additive manufacturing for mechanical traction. *Procedia Manufacturing*, 34, 640–646. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.116>
- Townsend, A., Senin, N., Blunt, L., Leach, R. K., & Taylor, J. S. (2016). Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precision Engineering*, 46, 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001>
- Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2017). *Industry 4.0: managing the digital transformation*. Springer.
- Valjak, F., & Bojčetić, N. (2019). Conception of design principles for additive manufacturing. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 689–698.
- Van Rompay, T. J. L., Kramer, L. M., & Saakes, D. (2018). The sweetest punch: Effects of 3D-printed surface textures and graphic design on ice-cream evaluation. *Food Quality and Preference*, 68(March), 198–204. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.02.015>
- Vayre, B., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2012). Designing for additive manufacturing. *Procedia*

CIrP, 3, 632–637.

- Voss, C. A. (1988). Implementation: A key issue in manufacturing technology: The need for a field of study. *Research Policy*, 17(2), 55–63. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(88\)90021-2](https://doi.org/10.1016/0048-7333(88)90021-2)
- Watschke, H., Bavendiek, A.-K., Giannakos, A., & Vietor, T. (2017). A methodical approach to support ideation for additive manufacturing in design education. *DS 87-5 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 5: Design for X, Design to X, Vancouver, Canada, 21-25.08. 2017*, 41–50.
- Wittbrodt, B., & Pearce, J. M. (2015). The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing*, 8, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>
- Wohlers, T. T., Associates, W., Campbell, I., Huff, R., Diegel, O., & Kowen, J. (2019). *Wohlers Report 2019: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Wohlers Associates. <https://books.google.fr/books?id=jy4KxQEACAAJ>
- Worrall, L., & Cooper, C. L. (2006). *The Quality of Working Life: Managers' Health and Well-being: Executive Summary*. Chartered Management Institute.
- Xiao-lin, S., Ye-zhuang, T., & Guo-gang, C. (2007). The empirical study on the impact of advanced manufacturing technology on organizational structure and human resources management. *2007 International Conference on Management Science and Engineering*, 1548–1553.
- Yan, Y., Li, S., Zhang, R., Lin, F., Wu, R., Lu, Q., Xiong, Z., & Wang, X. (2009). Rapid prototyping and manufacturing technology: principle, representative technics, applications, and development trends. *Tsinghua Science and Technology*, 14(S1), 1–12.
- Yang, S., Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2015). A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 444–449. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.024>
- Yang, S., & Zhao, Y. F. (2015). Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1–4), 327–342. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6994-5>
- Yannou, B., Jankovic, M., Leroy, Y., & Okudan Kremer, G. E. (2013). Observations from

radical innovation projects considering the company context. *Journal of Mechanical Design*, 135(2), 21005.

Yu, H., Peng, C., Zhao, Z., Bai, L., & Han, J. (2019). Visual Texture-Based 3-D Roughness Measurement for Additive Manufacturing Surfaces. *IEEE Access*, 7, 186646–186656. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919682>

Zegard, T., & Paulino, G. H. (2016). Bridging topology optimization and additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(1), 175–192. <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1274-4>

Zins, C. (2007). Conceptual approaches for defining data, information, and knowledge. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 58(4), 479–493.

Tables des figures

Figure 1 Structure du document	14
Figure 2 Plan chapitre contexte et positionnement	15
Figure 3 Evolution des ventes de systèmes de FA métallique entre 2002 et 2018 (Wohlers et al., 2019).....	16
Figure 4 : Les trois types de fabrication (REDWOOD et al., 2017)	17
Figure 5 Pièces en FA métallique présentant des géométries trop complexes pour la fabrication traditionnelle.....	19
Figure 6 Prothèse d'épaule avec une structure infaisable par un procédé traditionnelle.....	20
Figure 7 Composant hydraulique en FA fabriqué un seul bloc.....	20
Figure 8 Moule de fonderie en sable fabriqué en FA.....	21
Figure 9 Cartographie des acteurs de la filière FA en France faite par le CETIM/Carnot ¹	23
Figure 10 Thématiques de recherche du Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation	25
Figure 11 Structure du chapitre Etat de l'Art.....	28
Figure 12 Processus d'analyse de l'état de l'art sur la créativité en conception.....	29
Figure 13 Processus de conception de Pahl and Beitz (Pahl et al., 1996) (représentation détaillée).....	31
Figure 14 Processus de conception en double diamant (Segonds & Lang, 2019)	32
Figure 15 Processus en éventail alternant des phases de divergence et de convergence	34
Figure 16 Design thinking.....	35
Figure 17 Illustration du paradoxe de conception (Laverne, 2016)	36
Figure 18 Localisation des phases amont de conception en fonction du type de projet de conception	37
Figure 19 Similitudes entre les processus de créativité et de conception (Bila Deroussy, 2015)	40
Figure 20 Exemple de matrice de découverte (Debois et al., 2015)	43
Figure 21 Démarche du processus de TRIZ (G. S. Altshuller, 1999).....	44
Figure 22 Exemple de représentations d'aide à la créativité sous forme d'objets ou de cartes.....	46
Figure 23 Synthèse de l'état de l'art sur la créativité en conception.....	48
Figure 24 Plan de la partie sur les approches de conception dédiées fabrication additives.....	49
Figure 25 Place des DFAM Contrainte et Opportunité dans la stratégie DFAM (Laverne et al., 2015).....	50

Figure 26 Approches DFAM et DWAM dans le processus de conception (Laverne et al., 2017)	56
Figure 27 Schématisation des approches DFAM, DWAM et DTAM d'après Rias (Rias, 2017)	57
Figure 28 Modèle de créativité par et pour la FA (CTAM) développé par Rias (Rias, 2017).	58
Figure 29 Objet typique en FA (à gauche) et AMIO dérivé (à droite) (Rias, 2017)	59
Figure 30 Scénario de manipulation de l'AMIO (Rias, 2017)	59
Figure 31 Plan de la partie sur l'intégration de la fabrication additive en entreprise	64
Figure 32 Modèle des phases du processus d'intégration proposé par Voss (Deradjat & Minshall, 2017)	66
Figure 33 Schématisation des facteurs de réussite de l'intégration d'une technologie en entreprise (Saberri et al., 2010)	67
Figure 34 Modèle d'intégration de la FA de Mellor (Mellor et al., 2014)	68
Figure 35 Modèle d'intégration de la FA de Deradjat (Deradjat & Minshall, 2017)	71
Figure 36 Modèle d'intégration de la FA d'Oettmeier (Oettmeier & Hofmann, 2017)	72
Figure 37 Structure de l'état de l'art industriel	75
Figure 38 Répartition de l'utilisation de la FA dans les secteurs industriels (Campbell et al., 2018)	76
Figure 39 Phases des entretiens	77
Figure 40 Positionnement des intégrations de la FA des entreprises en fonction du niveau d'innovation et de la taille de série	83
Figure 41 Positionnement de notre méthodologie dans les projets de FA dans l'industrie	85
Figure 42 Limites de la littérature : 3 démarches différentes et distinctes	90
Figure 43 Plan du chapitre problématique et hypothèse	93
Figure 44 Schématisation de la méthode ADAM ²	96
Figure 45 Plan du chapitre sur les expérimentations	99
Figure 46 Schématisation de développement et de la validation de l'outil d'adoption du potentiel de la FA	100
Figure 47 Schématisation du processus de conception des objets opportunités	102
Figure 48 Objet opportunité Liberté de géométrie	106
Figure 49 Objet opportunité Objets issus de scan 3D	107
Figure 50 Objet opportunité Variation de microstructure	107
Figure 51 Objet opportunité Texture	108
Figure 52 Objet opportunité Monobloc	108

Figure 53 Objet opportunité Optimisation topologique	108
Figure 54 Objet opportunité Mécanisme non-assemblé.....	109
Figure 55 Objet opportunité Segmentation	109
Figure 56 Objet opportunité Inclusion	110
Figure 57 Objet opportunité Réseau interne.....	110
Figure 58 Objet opportunité Structure interne	111
Figure 59 Objet opportunité Structure auxétique	111
Figure 60 Objet opportunité Choix matériaux	112
Figure 61 Objet opportunité Multi-matériaux	112
Figure 62 Exemples de synonymes pour certaines opportunités	113
Figure 63 Evaluation des objets opportunités	114
Figure 64 Evolution de l'objet opportunité Texture	114
Figure 65 Boite avec les objets opportunités	115
Figure 66 Phase d'adoption de la FA validée par la conception des opportunités	118
Figure 67 Plan d'expérience sur l'adoption de la FA en séance de créativité.....	119
Figure 68 Protocole du workshop de la pré-expérimentation A	121
Figure 69 Schéma du concept V0 (à gauche) et du concept final (à droite)	123
Figure 70 Représentation CAO de la "Brosse douche".....	124
Figure 71 Truck de skateboard (assemblé et vue éclatée).....	127
Figure 72 Protocole des 2 workshops de la pré-expérimentation B.....	128
Figure 73 Exemple de concept de truck en FA issu du workshop	132
Figure 74 Protocole des 2 workshops de l'expérimentation 1	136
Figure 75 Exemple de fiche d'évaluation d'une idée développée.....	138
Figure 76 Lien entre la phase d'adoption et la phase de créativité et innovation validé par les expérimentations	145
Figure 77 Plan d'expérience sur la planification de l'intégration de la FA	146
Figure 78 Caisse en blanc de voiture sur sa ligne de production	147
Figure 79 Protocole du workshop de la pré-expérimentation C.....	150
Figure 80 Processus de conception par segmentation et orientation.....	156
Figure 81 Protocole des études de cas 1 et 2.....	159
Figure 82 Modèles 3D des trois concepts de « ROV Hook »	162
Figure 83 Protocole de l'étude de cas 3	163
Figure 84 Lien entre la phase d'adoption et la phase de créativité et d'innovation passant par la phase de planification.....	171

Figure 85 Schématisation de la méthode ADAM ²	174
Figure 86 Outil objets opportunités.....	175
Figure 87 Schématisation du processus de conception de la méthode ADAM ²	176
Figure 88 Méthode ADAM ² comme conduite du changement	183
Figure 89 Œuvre d'art en FA de Joshua Harker	218
Figure 90 Embouts d'écouteurs adaptés aux structures internes des oreilles	219
Figure 91 Microstructure en impression 3D (Garciamendez-Mijares et al., 2021)	220
Figure 92 Echantillon présentant plusieurs niveaux de rugosité.....	220
Figure 93 Conduit d'avion en 16 composants initialement, comprenant plus qu'une pièce en FA (Gibson et al., 2015).....	221
Figure 94 Pédale conçue par optimisation topologique	222
Figure 95 Pièce avec des liaisons fabriquée en une fois (Cuellar et al., 2018)	222
Figure 96 Chaise en kit à assembler (Luo et al., 2012).....	223
Figure 97 Moule en acier avec un conduit de refroidissement en cuivre encapsulé (Thompson et al., 2016).....	223
Figure 98 Echangeur de chaleur imprimé en FA	224
Figure 99 Pièce avec structure interne complexe inspirée par la nature	225
Figure 100 Poignée de porte conçue grâce à des structures auxétiques (Ion et al., 2016)	225
Figure 101 Vases imprimés à partir du même fichier CAO mais avec des matériaux différents	226
Figure 102 Corps d'un moteur électrique imprimé à partir de fer, de cuivre et de céramique	227

Table des tableaux

Tableau 1 Liste d'acteurs de la recherche travaillant sur la créativité /innovation et le design associé à la FA.....	24
Tableau 2 : Recherches présentant une évaluation des solutions selon des critères de créativité (Kudrowitz & Wallace, 2013).....	39
Tableau 3 Liste de biais pouvant limité la créativité en conception de produits (Kahneman, 2012).....	41
Tableau 4 Approches DFAM récentes pour les décisions de conception (Renjith et al., 2020)	53
Tableau 5 Synthèse de l'état de l'art sur les approches de conception dédiées FA	62
Tableau 6 Synthèse de l'état de l'art sur l'intégration de la fabrication additive en entreprise .	74
Tableau 7 Nombre d'entretiens par secteur	78
Tableau 8 Liste des entretiens avec les caractéristiques de chacun	79
Tableau 9 Objectifs d'intégration de la FA des entreprises interviewées.....	81
Tableau 10 Synthèse de l'état de l'art industriel	88
Tableau 11 Constats issues de l'état de l'art	89
Tableau 12 Opportunités de la fabrication additive (Lang et al., 2021).....	101
Tableau 13 Tableau de correspondance entre les 40 principes de TRIZ et les opportunités de la FA.....	104
Tableau 14 Synthèse des opportunités de la FA.....	117
Tableau 15 Opportunités de la FA utilisées pour les concepts de la pré-expérimentation A.	122
Tableau 16 Analyse fonctions du concept "Brosse douche"	124
Tableau 17 Evaluation motivations et expertise ressentie en créativité des individus pour le cas d'application pour le truck de skateboard.....	130
Tableau 18 Evaluation de la créativité des idées détaillées.....	139
Tableau 19 Evaluation du potentiel de la FA des idées détaillées	141
Tableau 20 Effets de l'utilisation de la méthode sur la créativité des participants et l'adoption du potentiel de la FA	143
Tableau 21 Synthèse des expérimentations sur l'adoption de la FA en séance de créativité .	144
Tableau 22 Ancienneté des participants dans l'entreprise et dans le secteur	148
Tableau 23 Niveau d'expertise des participants en FA	149
Tableau 24 Evaluation des objets opportunités.....	152
Tableau 25 Résultats de la phase d'idéation avec les objets opportunités.....	165

Tableau 26 Résultats de l'étude de cas 1	166
Tableau 27 Résultats de l'étude de cas 3	167
Tableau 28 Synthèse des expérimentations sur la planification de l'intégration de la FA en séance de créativité.....	170

Annexes

Annexe 1 : Questions d'entame et objectifs des phases des entretiens

Les 4 phases des entretiens (contexte, raisons et potentiels, démarches, visions futures) sont présentées dans cette annexe avec les questions d'entame introduites pour chacune des phases.

Le contexte initial correspond à la situation avant l'intégration qui explique pourquoi l'entreprise s'intéresse à cette technologie. La question d'entame pour cette phase est la suivante :

Quel était le contexte qui a entraîné un intérêt pour la FA ?

L'objectif de cette partie est déjà de comprendre les activités et les produits de l'entreprise, de connaître la stratégie globale de l'entreprise, le marché de l'entreprise, l'avancées des concurrents et l'écosystème industriel de l'entreprise. Il est intéressant de savoir d'où vient l'initiation vers un processus d'intégration de la FA, est-ce que c'est une décision venant de la direction, est-ce que c'est une pression des concurrents ou des clients, est-ce que c'est une veille technologique permanente, est-ce que c'est une orientation vers un nouveau marché, etc.

La phase suivante consiste à présenter les raisons et les potentiels qu'apportent la technologie pour l'entreprise ; les intérêts au niveau du secteur peuvent être de nature technique, mais aussi logistique ou économique. La question d'entame pour cette phase est :

Quels sont les raisons et les potentiels qu'apportent la FA pour votre entreprise et pour votre secteur ?

L'objectif de cette partie est d'analyser si en fonction des raisons et des potentiels, le processus d'intégration va être le même ou diffère. Dans le cadre où il diffère, à quels niveaux diffère-t-il. Cette phase va nous permettre aussi de connaître les secteurs où les enjeux de l'intégration sont bien au niveau de la conception de produits.

La troisième phase de l'entretien porte sur les démarches que les entreprises effectuent pour intégrer la FA. La question d'entame de cette phase est :

Quelles sont les démarches qui ont été effectuées pour initier l'intégration de la technologie de FA ?

L'objectif de cette partie est d'observer le type de démarches effectuées en fonction des raisons présentées dans la phase précédente. Il est intéressant de savoir si l'entreprise a eu une réelle démarche d'intégration dans un but de concevoir des produits en FA, ou une démarche plus de découverte avec des projets spécifiques mais sans une réelle volonté d'intégrer totalement la technologie dans les activités. Il est aussi intéressant de savoir si l'intégration de la FA est au niveau des phases amonts de conception, et donc, dans les manières de concevoir, ou bien dans les phases aval de conception, et donc, plus dans le procédé de fabrication. L'intérêt pour nous est aussi de savoir si les processus d'intégration sont des démarches méthodologiques ou empiriques.

La dernière phase consiste à présenter les visions futures de l'entreprise vis-à-vis de la technologie. La question d'entame de cette phase est :

Quelles sont les visions futures sur l'utilisation de la FA dans votre entreprise ?

L'objectif de cette phase est d'avoir un retour sur les processus d'intégration afin de savoir si les entreprises s'orientent vers une réelle intégration de la technologie ou vers un appui de la technologie sur les technologies actuelles. Cette partie permet aussi de comprendre les attentes des entreprises sur la technologie, la FA est-elle mature pour son industrialisation, et sur les méthodologies, qu'est-ce qui a manqué aux entreprises pour permettre une bonne intégration et quels conseils ils donneraient à une autre entreprise qui souhaiterait initier un processus d'intégration de la FA.

Ces 4 phases nous permettent de comprendre tout le processus d'intégration de la FA dans les entreprises interviewées et d'avoir une meilleure connaissance des bonnes pratiques à avoir dans un tel processus. Ces entretiens nous permettront aussi de savoir si un unique processus d'intégration est faisable ou s'il devrait exister plusieurs processus en fonction des contextes et des raisons de l'intérêt pour cette technologie.

Annexe 2 : Résultats des entretiens

Les résultats des entretiens sont présentés par secteurs dans cette annexe.

Industrie automobile

Contexte : Dans les entreprises interviewées de l'industrie de l'automobile, les équipes de conception sont à l'écoute permanente de nouvelles technologies qui pourraient potentiellement apporter des innovations dans le secteur. Une veille permanente est donc assurée, et c'est dans ce contexte que ces entreprises de l'automobile s'intéressent le plus à la FA. Ce secteur fabrique majoritairement de la grande série, or la FA n'est pas encore mature pour une utilisation en grande série ; ainsi, ces entreprises de l'automobile s'intéressent à la FA pour certains marchés de niche comme le sport automobile ou le luxe. La simplification des processus de fabrication et de production est un enjeu important du secteur, et la FA peut apporter des éléments pour cet enjeu.

Raisons et potentiel : Dans un contexte de veille permanente, les entreprises interviewées de l'industrie de l'automobile sont dans une phase de recherche permanente et donc ils s'intéressent à tout le potentiel que pourrait leur apporter la FA : les nouveaux designs, la fabrication d'outillage, la maintenance, les pièces de prototypes et de premier de série, la rétro-conception.

Démarches : Toujours dans cette recherche du potentiel, les entreprises essayent de créer une culture de la FA avec l'idée que si les concepteurs ont des connaissances sur la technologie, ils arriveront facilement à l'utiliser lorsque le potentiel sera trouvé ou que la technologie sera mature vis-à-vis des grandes séries. Ainsi, nous observons la création de FabLabs dans ces entreprises, beaucoup de communication autour des projets en FA et des formations sur la technologie.

Visions futures : Les visions futures pour ces entreprises de l'automobiles sont triples. Premièrement, une réelle culture de la FA au sein des équipes de conception ; deuxièmement, une définition de toutes les activités faisables avec l'état actuel de la FA ; et troisièmement, une recherche poussée sur les procédés de FA adaptables à la grande série, en particulier la technologie de projection de liant (Binder jetting).

Objectif : L'objectif principale d'intégration de la FA dans ces entreprises de l'industrie automobile est de se familiariser avec cette technologie afin que les concepteurs soient prêts quand il existera des procédés de FA matures pour les activités principales du secteur.

Aéronautique et Spatial

Contexte : Dans les entreprises interviewées de l'aéronautique et du spatial, la technologie de la FA est mature au regard des caractéristiques des produits. Les produits sont fabriqués en petites séries et demande de l'innovation permanente. Ces entreprises de l'aéronautique et du spatial s'intéressent beaucoup à la FA car les premières entreprises ayant utilisé cette technologie ont eu une communication très importante sur les produits fabriqués en FA. Ainsi, en plus du contexte technologique, ces entreprises du secteur intègrent la FA pour ne pas se retrouver en retard par rapport à leurs concurrents. Le nombre de produits du secteur fabriqués en FA croit de manière exponentielle.

Raisons et potentiel : Les raisons principales de l'intérêt de la FA sont l'allègement de la matière et la diminution des coûts. Dans le cas du spatial, ces deux raisons sont très liées car le coût principal des produits est l'envoi de ces derniers dans l'espace (un kilogramme de satellite coûte plusieurs milliers d'euros pour être envoyé dans l'espace). L'aéronautique s'intéresse à la FA pour de nouvelles fonctions et de nouveaux designs permettant d'améliorer les performances des produits.

Démarches : Ces entreprises de ce secteur sont dans un processus d'intégration de la FA assez avancé étant donné que plusieurs produits sont aujourd'hui fabriqués en FA. Ainsi, les démarches effectuées par ces entreprises sont l'achat de parc de machines FA avec différents procédés de fabrication, la formation d'experts dans cette technologie pour aider les équipes de conception et la qualification et la normalisation de la technologie afin d'assurer la qualité des produits dans les conditions d'utilisation.

Visions futures : Dans le futur, ces entreprises du secteur veulent que l'ensemble de leurs concepteurs soient formés sur cette technologie ; en attendant ils cherchent à augmenter le nombre d'experts FA. Dans le domaine de la recherche, ces entreprises travaillent sur les processus de fabrication pour fiabiliser la technologie car elle n'est pas encore assez fiable pour certains produits en particulier pour les produits de classe 1 (si la pièce est défectueuse, l'avion est inutilisable).

Objectifs : L'objectif de l'intégration de la FA dans les entreprises interviewées de l'aéronautique et du spatial est donc de concevoir en augmentant la performance et en diminuant les coûts.

Machines industrielles

Contexte : Pour les entreprises du secteur des machines industrielles interviewées, les produits ont une espérance de vie assez longue, et les entreprises font face à une obsolescence des produits. Cette obsolescence est d'actualité aussi bien dans l'industrie ferroviaire, que dans la sidérurgie ou l'industrie de l'énergie, en particulier du nucléaire. De ce fait, les enjeux de maintenance sont très importants dans ces secteurs et la FA peut être une réponse à certains problèmes de maintenance. Par ailleurs, dans ces secteurs, les liens entre les entreprises et les clients sont importants car c'est souvent du B to B. La communication essentielle sur la FA entraîne une pression des clients sur des produits ou des solutions utilisant cette technologie.

Raisons et potentiel : Les potentiels de la FA qui intéressent ces entreprises sont donc très liés à la maintenance ; la retro-conception et la réparation d'outils en font parties. La flexibilité et l'agilité qu'offre la FA est une raison d'intérêt pour ces entreprises du secteur qui cherchent à diminuer les stocks et les contraintes de la lenteur de l'écosystème industriel. Pour certaines activités, des critères de design peuvent intéresser les entreprises qui d'une manière générale produisent de petites séries.

Démarches : Pour tout ce qui est réparation des outils et agilité, ces entreprises s'orientent vers l'achat de machines de FA pour les usines de fabrication et les ateliers de maintenance. En parallèle, des formations auprès de concepteurs sont effectuées. Certaines entreprises mettent en place des sites dédiés à la FA qui permettent d'assurer un suivi et une aide sur les problématiques liées à cette technologie.

Visions futures : Dans le futur, les entreprises interviewées des secteurs de machines industrielles souhaitent pouvoir utiliser la FA pour fabriquer rapidement des pièces obsolètes, le plus localement possible afin de diminuer les temps d'approvisionnement et les coûts associés. Par ailleurs, ces entreprises cherchent à proposer dans le futur des offres de service après-vente grâce à l'utilisation de la FA.

Objectifs : Les objectifs d'intégration de la FA pour les entreprises interviewées de machines industrielles sont d'accroître la flexibilité et l'agilité dans leurs activités et d'améliorer la maintenance.

Produits de consommation

Contexte : Les entreprises interrogées de produits de consommation font une veille des technologies innovantes en permanence afin de ne pas rater une technologie à fort potentiel. C'est dans ce contexte qu'ils s'intéressent à la FA. Etant fortement dépendant de la demande, si la FA entre dans les standards des produits, il est indispensable pour eux de maîtriser cette technologie. Leurs produits sont majoritairement de la grande série mais ils ont quand même des marchés à forte valeur ajoutée avec de petites séries. Sur ces petites séries, la FA peut apporter des avantages technologiques et concurrentiels.

Raisons et potentiel : Les raisons sont principalement la liberté de géométrie qui permet de fabriquer des produits personnalisables qui s'avèrent être en forte demande de la part des clients. La FA a aussi un potentiel pour la fabrication de pièces de rechange d'anciens produits. Certaines fonctions nouvelles intéressent aussi les entreprises pour des projets spécifiques (produits demandant une grande performance).

Démarches : La conception des produits étant très dépendante du marché, la démarche principale de ces entreprises est de développer une communication importante autour des produits fabriqués en FA. Par ailleurs, afin de former les concepteurs, ces entreprises entreprennent des partenariats avec des entreprises de l'industrie de la FA. Ces partenariats permettent aussi de tester la technologie sur des produits n'ayant pas cette technologie pour l'instant.

Visions futures : Dans le futur, la vision de ces entreprises est de proposer de nouveaux standards de design et d'esthétique grâce à la FA. L'intégration de service d'après-vente est aussi une vision future pour les entreprises de produits de consommation.

Objectifs : L'objectif d'intégrer la FA dans les entreprises de produits de consommation interrogées revient à proposer de nouveaux produits et services aux clients, et à préparer les concepteurs au cas où la FA deviendrait une technologie majeure de leur activité.

Médical

Contexte : Pour les entreprises de l'industrie médicale interviewées, la fabrication additive n'est plus réellement une nouvelle technologie, depuis plus de 15 ans des produits fabriqués en FA sont proposés à la vente. Les besoins dans le monde médical sont patients-spécifiques, et la FA semble être la technologie la mieux adapter pour cette problématique.

Raisons et potentiel : Les raisons principales sont les avantages au niveau du design avec la liberté géométrique, la possibilité d'intégrer dans la conception des formes scannées. Chaque produit étant différent, l'intégration de la FA permet de diminuer les coûts car l'outillage est indépendant de la forme. Par ailleurs, la FA permet de réduire les délais de fabrication.

Démarches : Les démarches en court pour l'intégration de la FA dans le secteur est principalement la normalisation des matériaux et des machines aux spécificités du secteur. Par ailleurs, en particulier dans le dentaire, les utilisateurs de machines sont des personnels médicaux qui doivent être formés ; ces formations sont primordiales dans l'intégration de la technologie.

Visions futures : Aujourd'hui, la FA est largement utilisée pour certains produits de l'industrie médicale, en particulier les prothèses, mais les entreprises cherchent d'autres applications où la FA aurait un fort potentiel.

Objectifs : L'objectif de l'intégration de la FA des entreprises interrogées de l'industrie médicale est de proposer des produits sur-mesure afin de proposer des solutions le plus patient-spécifique possible.

Industrie de la défense

Contexte : L'entreprise interviewée de l'industrie de la défense conçoit des produits en très petites séries, donc la FA est adaptée aux tailles de production. Par ailleurs, le monde de la défense s'intéresse à toutes les technologies permettant d'assurer la performance opérationnelle ; c'est-à-dire la capacité d'avoir des produits toujours fonctionnels. La fabrication additive intéresse la défense dans le cadre de cette recherche de la performance opérationnelle. L'intérêt pour la FA est aussi influencé par la communication politique de certains pays mettant en avant cette technologie comme une future technologie majeure dans l'armement.

Raisons et potentiel : Le potentiel technique et de design sont les éléments majeurs de l'intérêt de cette technologie. La diminution des coûts est aussi une raison qui entraîne un intérêt pour la FA. Pour la performance opérationnelle, l'aspect d'agilité de la technologie, la diminution des procédés d'assemblages sont des caractéristiques qui intéressent les entreprises de la défense.

Démarches : Les démarches de cette entreprise de la défense passent, au début, par l'achat de machines de FA, ainsi que dans la formation et l'embauche d'experts sur la technologie. Pour familiariser les concepteurs mais aussi les utilisateurs finaux, de nombreuses entreprises et organismes publics de défense ont créé des FabLabs comprenant des machines de FA plastique.

Visions futures : La vision future de l'entreprise de ce secteur est de pouvoir intégrer la technologie au plus proche du terrain afin d'assurer l'opérationnel. La mise en place de standard et d'exigences de performance doit être définie pour le futur.

Objectifs : Les objectifs pour l'entreprise interviewée de la défense d'intégrer la FA sont d'augmenter les performances de produits en diminuant les coûts et d'assurer un maintien opérationnel.

Institutions académiques

Contexte : Pour les institutions académiques interrogées l'intérêt d'intégrer la FA au sein de leurs activités vient de l'intérêt des entreprises industrielles pour cette technologie qui attendent des institutions académiques de former les futurs concepteurs et chercheurs sur la FA. Les besoins de recherche pour améliorer la technologie et l'adapter aux différents secteurs industriels est aussi une raison d'intérêt de la FA pour les institutions de recherche.

Raisons et potentiel : Les raisons et les potentiels sont très vastes car l'intérêt est pour la formation et la recherche, ce qui oblige les institutions à s'intéresser à toutes les caractéristiques de la technologie.

Démarches : La priorité de ces institutions académiques est de former les futurs concepteurs, donc des démarches ont été effectuées pour la mise en place de formations sur la FA, ainsi que la création de FabLabs afin de créer une culture de la FA chez les concepteurs.

Visions futures : Les visions futures au niveau de ces institutions académiques sont la consolidation de la culture de la FA au niveau de la pédagogie, et la montée en compétence au niveau de la recherche afin d'améliorer la technologie.

Objectifs : L'objectif d'intégrer la FA dans ces institutions académiques est de former les concepteurs à la FA et d'améliorer le potentiel de la technologie.

Avec les entretiens du « groupe autre », nous avons remarqué que les spécificités de l'entreprise du Oil and Gas interviewée se rapprochent des spécificités des industries de machines industrielles, et les spécificités de la startup de musique se rapprochent de celles des industries de produits de consommation. Les données issues des entretiens des industries de la FA présentent des données sur l'ensemble industrie ; ainsi, nous les avons intégrées dans les résultats des différentes industries.

Annexe 3 : Opportunités de la Fabrication Additive

Les opportunités de la FA associées au 4 complexités de Gibson sont présentées dans cette annexe.

Opportunités associées à la complexité géométrique

- *Liberté de géométrie :*

La fabrication additive est un procédé par ajout de matière couche par couche. Cette particularité permet de penser la pièce comme une addition d'éléments en 2 dimensions pour donner un ensemble en 3 dimensions (Huang et al., 2015). Une complexité d'un élément 2D est beaucoup plus simple à résoudre qu'une complexité géométrique en 3D (Laverne et al., 2017). Ainsi, la FA permet une plus grande liberté de géométrie par rapport aux procédés de type fonderie ou usinage. Par ailleurs, durant la phase de fabrication, l'interaction entre le produit et les outils est moins restrictive d'un point de vue géométrique en FA. Comme nous pouvons le voir sur la figure 89, il est possible de construire presque toutes les formes (Thompson et al., 2016), et cette liberté de géométrie a un réel impact sur les décisions de conception (Moroni et al., 2017) (Yang & Zhao, 2015).



Figure 89 Œuvre d'art en FA de Joshua Harker¹⁰

¹⁰ <https://www.joshharker.com/>

- *Objets issus de scans 3D :*

En associant les techniques de numérisation 3D et de fabrication additive, la conception des produits est personnalisable (Fan et al., 2015) (Petrovic et al., 2011). Il est ainsi possible de fabriquer des pièces correspondantes à des objets scannés, ou d'intégrer dans la conception une géométrie existante scannée. Cette opportunité met en avant la possibilité de concevoir en partant d'une géométrie existante pour améliorer les propriétés d'un produit (Livesu et al., 2017), comme par exemple sur la figure 90 avec ces embouts d'écouteurs adaptés à la structure interne des oreilles des clients.



Figure 90 Embouts d'écouteurs adaptés aux structures internes des oreilles¹¹

Opportunités associées à la complexité hiérarchique

- *Variation de microstructure :*

En fabrication additive, il est possible de faire varier la structure de la matière à un niveau microscopique (Hirt et al., 2017). Cette variation peut être effectuée à travers une adaptation de la porosité (Sing et al., 2016), ou des géométries (figure 91), qui permet ensuite d'avoir une influence sur les propriétés mécaniques, physiques et techniques (densité, poids, déformation, dureté, ...) (Plank et al., 2020). Cette variation de microstructure peut être continue ou discontinue ; la microstructure peut être adaptée en chaque point du produit (Hirt et al., 2017).

¹¹ <https://myfit-solutions.com/embouts-sur-mesure/>

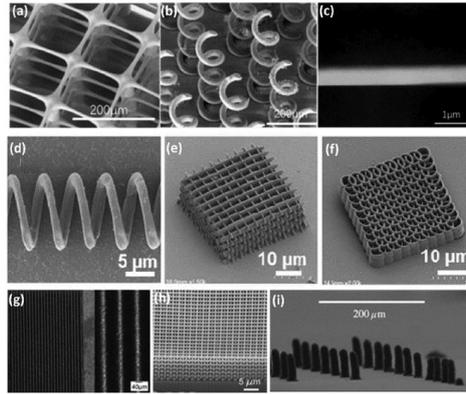


Figure 91 Microstructure en impression 3D (Garciamendez-Mijares et al., 2021)

- *Texture* :

En fonction des propriétés de fabrication (procédés, matériaux, ...) et du positionnement de la pièce durant la fabrication, il est possible de faire varier la rugosité de la surface (Townsend et al., 2016) (Yu et al., 2019) (Fox et al., 2016) et donc la texture (figure 92). La texture peut entraîner des propriétés mécaniques de surface (frottement, adhérence, ...) ou des propriétés mécaniques de structure (déformation, ...) (Tiner et al., 2019). Par ailleurs, la texture d'un produit peut avoir une influence forte sur l'utilisation d'un produit, il est ainsi important de prendre en compte la texture lors de la conception d'un produit (Van Rompay et al., 2018).



Figure 92 Echantillon présentant plusieurs niveaux de rugosité¹²

¹² <https://www.basf.com/ma/fr/Live/Live/2019/05/p-19-214.html>

Opportunités associées à la complexité fonctionnelle

- *Monobloc* :

La fabrication additive permet de réduire le nombre de composants d'un ensemble, en intégrant plusieurs parties à assembler en une unique pièce (figure 93). Cela permet d'éliminer les étapes d'assemblage (soudure, collage, vis, ...). Cet avantage permet de limiter les risques de fuites et de faiblesses au niveau des jointures, de limiter le besoin en maintenance, ainsi que de diminuer le poids des produits. Certaines pièces en monobloc sont beaucoup plus durables dans le temps (Durakovic, 2018). Une conception monobloc impose de penser dès les phases amont de conception, l'absence de procédés d'assemblage (Yang et al., 2015) (Schmelzle et al., 2015).

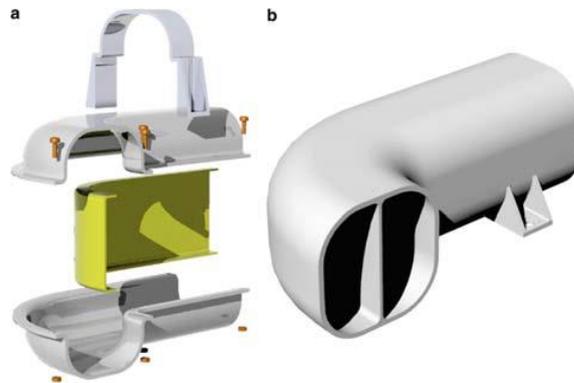


Figure 93 Conduit d'avion en 16 composants initialement, comprenant plus qu'une pièce en FA (Gibson et al., 2015)

- *Optimisation topologique* :

Avec l'analyse d'éléments finis, il est possible d'optimiser la matière dans les volumes soumis à des contraintes, cela permet une diminution de la masse des produits. La fabrication additive permet de pousser l'optimisation topologique grâce à des géométries organiques infaisables avec d'autres procédés de fabrication (figure 94). Cette opportunité a des influences sur les propriétés mécaniques, physiques et techniques du produit (Li et al., 2018) (Langelaar, 2017) (Zegard & Paulino, 2016).



Figure 94 Pédale conçue par optimisation topologique¹³

- *Mécanisme non-assemblé :*

En fabrication additive, il est possible de faire des joints cinématiques, c'est-à-dire de faire des liaisons mécaniques lors de la fabrication (pivot, glissière, rotule, ...). Cette opportunité permet de supprimer les procédés d'assemblage, donc d'avoir un gain de temps et un gain de solidité. La prise en compte d'un mécanisme dans la phase de fabrication implique de nouvelles réflexions pour les concepteurs (Calignano et al., 2014) (Cuellar et al., 2018) ; le produit doit être étudié comme un système de composants (Orquera et al., 2017) (Sossou et al., 2018). La figure 95 présente un produit comprenant plusieurs liaisons complexes fabriqué en FA en une fois, sans assemblage.



Figure 95 Pièce avec des liaisons fabriquée en une fois (Cuellar et al., 2018)

¹³ <https://www.prodways-group.com/>

- *Segmentation* :

Il est possible de fabriquer les pièces d'un ensemble séparément pour créer un kit (figure 96). Cette opportunité répond à la contrainte des tailles des imprimantes qui obligent les concepteurs à décomposer un produit en plusieurs parties (Ramírez et al., 2019) (Song et al., 2015). Cette conception sous forme de kit permet de fabriquer à nouveau seulement les pièces défectueuses et non l'ensemble quand une partie n'est plus fonctionnelle (Oh et al., 2018). Cela entraîne des améliorations économiques et mécaniques.



Figure 96 Chaise en kit à assembler (Luo et al., 2012)

- *Inclusion* :

En fabrication additive, lors de la fabrication, il est possible d'encapsuler un élément dans une pièce pendant la construction (figure 97). Cette inclusion d'éléments ne présente pas de ligne de joint d'assemblage comme dans les procédés d'inclusion traditionnels. Il est ainsi possible d'intégrer des éléments électroniques dans la pièce (Panesar et al., 2017), ou d'augmenter les propriétés mécaniques en y intégrant des fibres (Cuellar et al., 2018).



Figure 97 Moule en acier avec un conduit de refroidissement en cuivre encapsulé (Thompson et al., 2016)

- *Réseau interne :*

La fabrication additive permet de concevoir un réseau interne durant la fabrication (Chekurov & Lantela, 2017). Les performances d'un produit peuvent être améliorées grâce à des échangeurs de chaleur, comme sur la figure 98 (Saltzman et al., 2018) (Gibbons & Hansell, 2005). Le fait d'intégrer dans la fabrication les canaux internes permet de limiter les risques de fuites et de diminuer le poids de la pièce (Schmelzle et al., 2015).



Figure 98 Echangeur de chaleur imprimé en FA¹⁴

- *Structure interne :*

La FA permet de définir des motifs internes de remplissage (figure 99). Ainsi, les formes à l'intérieur de la structure peuvent être ajustées en fonction du besoin (Syam et al., 2018) (Mao et al., 2018). Cette opportunité influe sur les propriétés mécaniques, physiques et techniques des objets (Egan et al., 2017), mais aussi sur les coûts (Liseli Baich, 2015).

¹⁴ <https://www.3dnatives.com/ge-research-echangeur-3d-170420193/>



Figure 99 Pièce avec structure interne complexe inspirée par la nature¹⁵

- *Structure auxétique :*

La technologie de fabrication additive permet de modifier le module de Poisson et d'avoir un module négatif en agissant sur la structure interne. Cette opportunité permet de transmettre des efforts dans la structure par déformation (Ion et al., 2016), voire d'absorber les efforts par déformation et compression (Mohsenizadeh et al., 2018). La figure 100 présente par exemple un mécanisme complet d'une poignée de porte en structure auxétique composé de cellules plus ou moins rigides ou flexibles selon les besoins du mécanisme. Cette opportunité est souvent nommée dans les travaux par le terme de « métamatériaux » en FA.

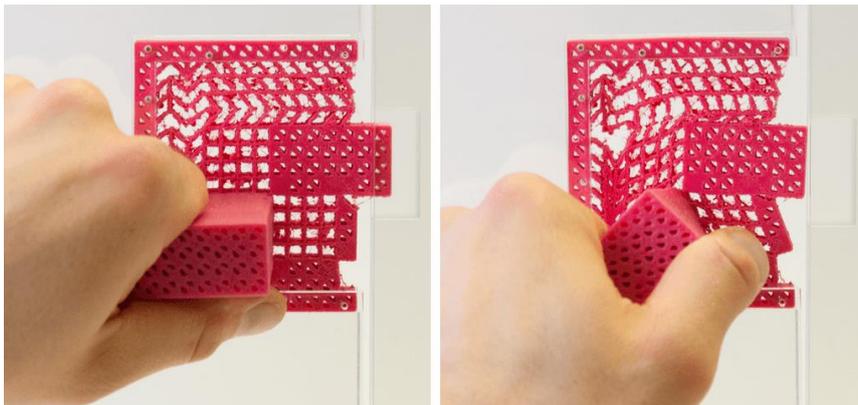


Figure 100 Poignée de porte conçue grâce à des structures auxétiques (Ion et al., 2016)

Opportunités associées à la complexité matériau

¹⁵ <https://www.3dnatives.com/hyperganic-design-25062019/>

- *Choix matériaux :*

La fabrication additive permet de travailler avec un assez grand choix de matériaux (figure 101) : du plastique, des résines, du métal, de la céramique, de la cire, du sable, du composite, ... Ces différents matériaux possèdent des propriétés économiques, physiques, mécaniques, optiques et électriques différentes (Bourell et al., 2017). Ces différentes propriétés permettent d'adapter le choix du matériau aux enjeux du domaine d'application, en particulier dans un but médical (Singh et al., 2017). La couleur du matériau utilisée pour la fabrication entraîne elle aussi des écarts sur les propriétés mécaniques du produit fini (Wittbrodt & Pearce, 2015).



Figure 101 Vases imprimés à partir du même fichier CAO mais avec des matériaux différents¹⁶

- *Multi-matériaux :*

Certaines machines de FA permettent de concevoir des pièces multi-matériaux (figure 102). Il est ainsi possible de fabriquer des matériaux composites avec plusieurs plastiques (Guttag & Boyce, 2015), de mélanger des métaux différents (Onuike & Bandyopadhyay, 2018) et même d'associer des matériaux de natures différentes (exemple : du métal avec de la céramique) (Bandyopadhyay & Heer, 2018). Par ailleurs, il est possible de mélanger les matériaux avec des gradients de matière.

¹⁶ <http://www.primante3d.com/materiaux/>



Figure 102 Corps d'un moteur électrique imprimé à partir de fer, de cuivre et de céramique¹⁷

¹⁷ <https://www.tu-chemnitz.de/etit/ema/AMMM/index.php>

Méthodologie d'intégration de la Fabrication Additive comme source de créativité pour l'industrie manufacturière

Résumé : La fabrication additive (FA) est une technologie qui aujourd'hui est mature pour la fabrication directe de certaines pièces fonctionnelles, ce qui entraîne un intérêt fort des entreprises pour la FA. Mais les connaissances associées à cette technologie diffèrent de celles des procédés de fabrications traditionnelles, ce qui oblige les concepteurs à prendre des décisions de conception différentes. Un certain nombre de difficultés fait que ces décisions ne sont pas encore prises par les concepteurs, ce qui freine l'intégration de la FA.

Ainsi, l'objectif de nos travaux de thèse est d'aider les entreprises à dépasser et atténuer ces difficultés lors de l'intégration de la FA dans les processus de conception de produits.

Cette objectif nécessite une approche méthodologique afin d'assurer la bonne intégration de la technologie au regard du contexte industriel. En effet, l'intégration de la FA impose de transmettre et de former les concepteurs au potentiel de la FA, de stimuler la créativité des concepteurs afin de dépasser les biais cognitifs imposés par la fabrication traditionnelle et d'orienter la stratégie de cette intégration en accord avec le contexte de l'entreprise.

Cette thèse a donc pour finalité de répondre à la problématique suivante : dans une entreprise de l'industrie manufacturière, comment intégrer la fabrication additive en phase amont de conception comme source de créativité dans une stratégie d'innovation ?

Les apports de ce travail de thèse sont la formalisation, sous forme de méthodologie, de l'intégration de la FA : la méthode ADAM² (Augmented Design with Additive Manufacturing Methodology). Cette méthode se structure en 3 phases : une phase d'adoption de la FA, une phase de planification de la FA et une phase de créativité et d'innovation avec la FA. La méthode ADAM² est structurée autour d'un processus d'intégration de la FA et d'un processus de conception associé. Les apports sont démontrés à travers un ensemble d'expérimentations.

Mots clés : Fabrication Additive, Créativité, Innovation, Intégration organisationnelle, Conception de produits

Abstract: Additive manufacturing (AM) is a mature technology for the direct manufacture of certain functional parts, resulting in strong industrial interest in additive manufacturing. But the knowledge associated with this technology differs from traditional manufacturing processes, forcing designers to make different design decisions. A number of challenges mean that designers are not yet taking these decisions, which is holding back the integration of AM.

Therefore, the objective of our PhD work is to help companies to overcome and mitigate these difficulties during the integration of AM into product design processes.

This objective requires a methodological approach to ensure the proper integration of the technology in the industrial context. Indeed, the integration of AM requires transmitting and training the designers to the potential of AM, stimulating the creativity of the designers in order to overcome the cognitive biases imposed by the traditional manufacturing and directing the strategy of this integration in accordance with the context of the company.

The goal of this PhD is to answer the following question: in a manufacturing company, how to integrate additive manufacturing in the early stages of design as a source of creativity in an innovation strategy?

The contributions of this PhD work are the formalization, in the form of methodology, of the integration of AM: the ADAM² methodology (Augmented Design with Additive Manufacturing Methodology). This methodology is structured in 3 phases: a phase of adoption of AM, a phase of planning of AM and a phase of creativity and innovation with AM. The ADAM² methodology is structured around an additive manufacturing integration process and an associated design process. The contributions are demonstrated through a set of experiments.

Keywords: Additive Manufacturing, Creativity, Innovation, Organisational integration, Product design