



HAL
open science

Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique

Floriane Laverne

► To cite this version:

Floriane Laverne. Concevoir avec la Fabrication Additive : Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une innovation technologique. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0042 . tel-01448311

HAL Id: tel-01448311

<https://pastel.hal.science/tel-01448311>

Submitted on 27 Jan 2017

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 n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie Industriel "

présentée et soutenue publiquement par

Floriane LAVERNE

le 15 Novembre 2016

Concevoir avec la Fabrication Additive :

**Une proposition d'intégration amont de connaissances relatives à une
innovation technologique.**

Directeur de thèse : **Marc LE COQ**

Co-encadrement de la thèse : **Frédéric SEGONDS**

Jury

M. Alain BERNARD, Professeur des Universités, IRCCYN, Ecole Centrale de Nantes
M. Jean François BOUJUT, Professeur des Universités, GSCOP, Université de Grenoble
M. Emmanuel CAILLAUD, Professeur des Universités, ICUBE, Université de Strasbourg
M. Paolo CHIABERT, Professeur, DIGEP, Politecnico di Torino
M. Marc LE COQ, Professeur des Universités, LCPI, Arts et Métiers ParisTech
M. Frédéric SEGONDS, Maître de Conférences, LCPI, Arts et Métiers ParisTech

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

**T
H
È
S
E**

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord aux membres de mon jury de thèse. Merci, à Messieurs Jean François BOUJUT et Emmanuel CAILLAUD d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ces travaux. Merci ensuite à Monsieur Alain BERNARD de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Enfin je remercie Monsieur Paolo CHIABERT d'avoir fait le déplacement depuis Turin afin d'être l'examineur de cette thèse.

Je tiens ensuite à remercier mon directeur de thèse Marc LE COQ pour ses conseils avisés et pour la confiance qu'il m'a accordée durant ces 3 années. Je n'oublie pas mon encadrant Frédéric SEGONDS. Merci à toi pour cette fructueuse collaboration mais aussi pour ton aide précieuse et ton coaching à toute épreuve. Enfin, je remercie Monsieur Ameziane AOUSSAT, directeur du Laboratoire Conception de Produits et Innovation, sans qui ce projet n'aurait pas pu voir le jour.

J'adresse également toute ma reconnaissance à l'Université Paris 13 pour les conditions de travail qu'elle m'a accordées durant ces 3 années. Je remercie aussi mes collègues de l'IUT pour les emplois du temps qu'ils m'ont aménagés et qui m'ont permis de mener à bien mes travaux.

Merci à tous les participants industriels et étudiants pour le temps qu'ils m'ont accordé lors des différentes expérimentations. Je n'oublie pas non plus les membres du LCPI avec qui les discussions ont été constructives et plus particulièrement Etienne et Camille qui lors de cette dernière ligne droite ont été fortement sollicités.

Pour terminer, merci à toute ma famille et en particulier à toi Florent pour ta logistique quotidienne sans faille mais surtout pour ta patience et ton soutien lors de mes passages à vide. Quant à toi Aubin, ça y est promis Maman va à nouveau avoir du temps pour jouer avec toi !

Sommaire

1	Introduction générale	5
1.1	Objectif des travaux	5
1.2	Originalité et apports	5
1.3	Structure du document	5
1.3.1	Introduction générale	5
1.3.2	Contexte, verrous et positionnement	6
1.3.3	Etat de l'art et hypothèses	6
1.3.4	Expérimentations	7
1.3.5	Conclusion générale et perspectives	7
2	Contexte, verrous et positionnement scientifique	9
2.1	Contexte général	9
2.1.1	L'innovation : un enjeu économique majeur	9
2.1.2	La fabrication additive : une innovation technologique de procédé	12
2.2	Contexte industriel de la FA : constats actuels	21
2.2.1	Modalités d'étude	21
2.2.2	Bilan	22
2.3	Question de recherche	25
2.4	Positionnement de la recherche	26
2.4.1	Positionnement dans le Génie Industriel	26
2.4.2	Positionnement dans le laboratoire Conception de Produit et Innovation	26
2.4.3	Positionnement dans la communauté française et internationale	27
3	Etat de l'art scientifique et hypothèses	29
3.1	Le processus de conception de produits	29
3.1.1	Théories et méthodologies de conception	29
3.1.2	Modélisation du processus de conception	31
3.1.3	Les phases amont du processus de conception	34
3.1.4	Importance des représentations intermédiaires.	36
3.1.5	Créativité en conception.	39
3.1.6	Synthèse et positionnement	41
3.2	La connaissance : une ressource clé du processus de conception	43
3.2.1	Définition de la connaissance	43
3.2.2	Evolution des besoins en connaissance dans le processus de conception	47
3.2.3	Déploiement des connaissances en conception	50
3.2.4	Le Knowledge Management : une nécessité pour capitaliser et redistribuer des connaissances	53
3.2.5	Synthèse et positionnement	57
3.3	Usage des connaissances FA dans le processus de conception	59
3.3.1	Principe du Design For Additive Manufacturing	59
3.3.2	Classification des methodologies de Design For Additive Manufacturing	60
3.3.3	Etude systémique des DFAM Globales et leur lien avec l'innovation produit	66
3.3.4	Synthèse et positionnement	74
4	Problématique, hypothèses et modèle préliminaire	77

4.1	Problématique	77
4.2	Hypothèses de résolution.	78
4.3	Proposition d'un modèle préliminaire de conception	80
5	Expérimentations	83
5.1	Expérimentation 1 : Validation de la forme explicite des connaissances	83
5.1.1	Introduction	83
5.1.2	Protocole expérimental	84
5.1.3	Résultats et analyse	90
5.1.4	Conclusion	95
5.2	Expérimentation 2 : Capitalisation des connaissances au juste besoin.	96
5.2.1	Expérimentation 2A : Repérage des connaissances FA nécessaires	97
5.2.2	Expérimentation 2B : Préservation des connaissances avec des supports adaptés	112
5.2.3	Expérimentation 2C : Valorisation des connaissances par avec une instanciation adaptée.	116
5.3	Expérimentation 3 : Formalisation et validation de la solution.	122
5.3.1	Formalisation du modèle enrichi par des connaissances FA au juste besoin.	122
5.3.2	Proposition d'un outil numérique	124
5.3.3	Evaluation de la solution	129
5.4	Synthèse des expérimentations	140
6	Conclusion générale et perspectives	143
6.1	Apports	143
6.2	Perspectives de recherche	144
6.2.1	Perspectives de développement	144
6.2.2	Perspectives de recherche	145
7	Production scientifique	146
8	Bibliographie	147
9	Index des figures	157
10	Index des tableaux	159
11	Annexes	160
11.1	Annexe 1 : Questionnaire expérimentation 1	160
11.2	Annexe 2 : Questionnaire expérimentation 2A	161
11.3	Annexe 3 : Questionnaire expérimentation 2C	162
11.4	Annexe 4 : Questionnaire expérimentation 3	164

1 Introduction générale

1.1 Objectif des travaux

La conception de produits nouveaux fait de nos jours l'objet d'une compétition féroce entre des entreprises sur lesquelles les marchés exercent une pression forte : réduction des temps de mise sur le marché, augmentation des services rendus par un même produit, personnalisation... Les entreprises n'ont alors d'autre choix que d'innover pour pouvoir survivre.

Dans le même temps, le management des connaissances est devenu un enjeu stratégique pour les entreprises. C'est pourquoi aujourd'hui les connaissances issues des innovations technologiques comme la Fabrication Additive (FA) suscitent un intérêt majeur. En effet, leur exploitation par les industriels du secteur en a révélé tout le potentiel pour l'innovation de produit.

Pourtant, du fait d'un accès encore parcellaire à ces connaissances, leur utilisation comme levier d'innovation demeure limité, les entreprises se contentant de faire avec la FA ce qu'elles savent déjà faire plutôt que de repenser entièrement leurs produits. C'est pourquoi ces travaux ont pour objectif d'améliorer la capacité d'innovation des entreprises en se focalisant sur les phases amont de conception au cours desquelles se joue l'innovation. Pour cela nous cherchons à repérer puis intégrer des connaissances relatives à la FA utiles au processus de conception dans le but de favoriser la recherche de solutions créatives.

1.2 Originalité et apports

Les apports de cette thèse sont triples. Tout d'abord, nous proposons une démarche permettant de repérer, capitaliser et valoriser parmi l'ensemble des connaissances relatives à la FA celles dites au juste besoin, c'est-à-dire nécessaires et suffisantes au déploiement d'une approche Design With Additive Manufacturing (DWAM). Ensuite nous proposons un modèle de conception dédié aux phases amonts et adapté à l'aspect pluridisciplinaire de la conception dans lequel sont intégrées ces connaissances au juste besoin. L'utilisation de ce modèle de conception enrichi doit permettre d'étendre l'espace dans lequel est recherchée la solution.

Enfin nous proposons un outil qui prend la forme d'un démonstrateur fonctionnel dont le rôle est de faciliter le repérage puis l'accès aux connaissances FA au juste besoin dans les projets d'innovation.

1.3 Structure du document

Ce manuscrit se décompose en cinq parties distinctes, complétées par des annexes.

1.3.1 Introduction générale

Ce chapitre présente succinctement l'objet de notre recherche, c'est-à-dire l'intégration de connaissances nouvelles dans le processus de conception amont.

1.3.2 Contexte, verrous et positionnement

Dans ce chapitre nous introduisons le contexte général. Nous montrons en quoi les enjeux de l'innovation et l'apparition d'une nouvelle technique de fabrication (la FA) justifient aujourd'hui l'intégration des connaissances FA comme une voie d'amélioration du processus de conception et d'innovation. Nous présentons également un état des lieux industriel de la FA en France. Ces différents éléments nous permettent d'énoncer notre question de recherche.

Enfin nous positionnons nos travaux au sein de la communauté scientifique du génie industriel, au sein de notre laboratoire d'accueil : le Laboratoire de Conception de Produits et Innovation mais également parmi les autres structures de recherche qui s'intéressent simultanément à la FA et à l'innovation.

1.3.3 Etat de l'art et hypothèses

L'état de l'art présenté dans ce chapitre est découpé en cinq parties distinctes.

La 1^{ère} partie nous permet de définir les éléments du processus de conception indispensables à l'innovation. Nous montrons tout d'abord l'importance des méthodologies de conception et de leur modélisation pour parvenir à un processus de conception en adéquation avec les besoins industriels. Puis nous introduisons la notion de conception amont et son rôle essentiel pour l'innovation. Nous présentons ensuite l'enjeu des représentations intermédiaires dans le processus de conception. Enfin nous terminons cette partie en soulignant la place centrale des activités de conception dans les phases amont et en particulier celle des activités créatives.

La 2^{ème} partie de notre état de l'art met l'accent sur la place fondamentale des connaissances dans le processus de conception. Nous commençons par présenter les éléments constitutifs de la connaissance (données, informations et contexte) puis nous montrons la difficulté qui existe à la définir de façon unique. Puis nous présentons les évolutions dans le processus de conception qui ont conduit à ce que les connaissances en deviennent une ressource clé. Nous étudions ensuite comment les méthodologies de conception DFX et DWX utilisent ces ressources indispensables. Enfin nous analysons le Knowledge Management afin d'identifier les démarches nécessaires à la capitalisation et à la gestion des connaissances.

La 3^{ème} partie s'intéresse aux travaux de recherche qui ont porté sur l'introduction de connaissances FA dans le processus de conception. Nous en présentons les particularités puis nous en étudions les avantages et les limites dans une perspective d'innovation produit.

Nous continuons ensuite ce chapitre avec une 4^{ème} partie présentant la synthèse de notre état de l'art et nos hypothèses de résolution. Nous formulons tout d'abord l'hypothèse qu'il est nécessaire que l'intégration des connaissances soit réalisée dans un modèle de conception adapté à la pluridisciplinarité de la conception amont et permette à la fois en premier lieu l'approche DWAM (Design With Additive Manufacturing) puis ensuite l'approche DFAM (Design For Additive Manufacturing). D'autre part, nous proposons que cette intégration soit réalisée au juste besoin. Par juste besoin nous entendons une intégration dans notre modèle des connaissances nécessaires et suffisantes à la conception et adoptant une représentation et une instanciation adaptées aux besoins des utilisateurs. Pour terminer cette partie, nous présentons la démarche que nous prévoyons de suivre pour répondre à notre question de recherche.

Enfin, nous présentons dans une dernière partie le modèle préliminaire de conception que nous retenons et que nous allons chercher à enrichir avec des connaissances relatives à la FA. Ce modèle divisé en trois phases dont les livrables sont trois RI clés (idées, concepts et architectures préliminaires) permet dans un 1^{er} temps d'exploiter les connaissances FA dans une approche DWAM puis dans un 2nd temps se concentre sur une démarche DFAM.

1.3.4 Expérimentations

Ce chapitre détaille les expérimentations que nous avons réalisées pour valider nos hypothèses de résolution et dont les résultats nous ont permis de construire notre modèle de conception enrichi ainsi que son outil numérique associé.

La 1^{ère} expérimentation consiste à valider l'usage de connaissances relatives à la FA sous une forme exclusivement explicite. Pour cela, nous organisons une séance de créativité l'objectif est de comparer les solutions créatives produites par des groupes de conception dont le niveau et la forme des connaissances FA varient.

La 2^{ème} étape de notre démarche de résolution a pour objectif de capitaliser les connaissances relatives à la FA selon le principe du juste besoin. Pour y parvenir, nous procédons en trois étapes successives adaptées du processus de capitalisation des connaissances de Grundstein [1] et supportées par trois expérimentations dont l'objectif est de valider chacune des caractéristiques de ce juste besoin : l'information, le support et l'instanciation. Nous commençons dans la 1^{ère} expérimentation par repérer les connaissances relatives à la FA nécessaires et suffisantes au processus de conception amont. Puis nous identifions dans la 2^{ème} les supports adaptés à la préservation des connaissances que nous venons de repérer. Enfin nous valorisons ces connaissances en déterminant par une dernière expérimentation une instanciation adaptée aux activités.

Dans la dernière expérimentation, nous testons le modèle de conception enrichi par les connaissances FA au juste besoin que nous avons formalisé à l'issue des expérimentations précédentes. Pour cela nous proposons un outil méthodologique destiné à faciliter le repérage puis l'utilisation des connaissances du modèle. La validation de notre solution grâce à une expérimentation impliquant des équipes de conception amont.

Cette partie se conclue par une synthèse des expérimentations réalisées.

1.3.5 Conclusion générale et perspectives

Ce chapitre est destiné à clore notre document. Il reprend les principaux résultats de cette recherche, puis il en détaille les principales contributions. Enfin il présente les perspectives de recherche consécutives à ce travail.

2 Contexte, verrous et positionnement scientifique

Ce chapitre est destiné à poser les bases de nos travaux de recherche tant sur le plan économique, que sur les plans industriel et scientifique. Pour cela nous allons tout d'abord définir le contexte général qui motive nos travaux, puis nous nous attacherons à présenter comment les entreprises se positionnent aujourd'hui dans ce contexte général.

2.1 Contexte général

Dans cette partie, nous nous intéressons tout d'abord à l'innovation. Nous cherchons à expliquer pourquoi elle est devenue aujourd'hui une préoccupation majeure pour les entreprises et quelles en sont les conséquences sur les choix d'organisation et de stratégie mises en place. Puis nous présenterons la FA, une technique de fabrication récente, dont nous expliquons les particularités, les bouleversements qu'elle engendre sur les habitudes ancrées dans les entreprises et les perspectives prometteuses qu'elle offre pour le développement de produits nouveaux.

2.1.1 L'innovation : un enjeu économique majeur

Dans une économie mondialisée, la concurrence entre les entreprises s'est accentuée et chacune d'elles cherche aujourd'hui à s'assurer un avantage compétitif sur les marchés internationaux. Pour conserver ou augmenter leur part de marché, les entreprises n'ont alors d'autre choix que de relever de nombreux défis : réduire le time to market et les coûts de production, accroître le niveau de qualité ou encore faire face au raccourcissement du cycle de vie des produits. Mais en plus de ces préoccupations majeures, les industriels doivent également veiller à se différencier de leurs concurrents par une réactivité accrue, une ouverture à de nouveaux marchés ou le développement de produits offrant de nouveaux services ou usages aux clients. Ainsi, ces dernières années, l'innovation est devenue la réponse à tous ces impératifs économiques et le levier indispensable aux entreprises pour permettre leur différenciation et garantir ainsi leur succès.

Mais de façon encore plus large, on observe également une volonté grandissante des institutions (nationales ou européennes) à encourager l'engagement dans de nouveaux projets de recherche et d'innovation afin de trouver des solutions aux défis de la société de demain (ex : programme Horizon 2020).

2.1.1.1 Définition de l'innovation

Si l'innovation est reconnue comme le moteur de progrès des entreprises elle demeure cependant une notion complexe à définir et que l'on confond fréquemment avec l'invention.

L'invention est définie par le dictionnaire Larousse comme « l'action d'imaginer, d'inventer, de créer quelque chose de nouveau » et qui peut éventuellement se traduire par un brevet. D'un point de vue économique, l'invention ne peut être considérée comme une finalité pour les entreprises mais plutôt comme une condition nécessaire mais non suffisante à leur réussite. En effet, l'invention permet, certes, la nouveauté mais n'a pas pour objectif de la confronter à un marché.

Il existe de nombreuses définitions de l'innovation. Nous retenons celle de Schumpeter [2] qui la définit comme le premier usage commercial d'un produit, procédé ou service qui n'a jamais été exploité auparavant. Kelly and Kranzberg [3] ont enrichi cette proposition en définissant l'innovation comme le processus qui conduit de l'invention à sa diffusion. L'innovation est donc non seulement liée au succès commercial d'une invention mais de façon plus large au cheminement qui permet d'y parvenir faisant ainsi d'une entreprise une entreprise innovante.

Mais l'innovation doit aussi être considérée à la lumière des résultats qu'elle offre aux entreprises pour leur garantir une réussite à long terme. Ainsi bien que les auteurs s'accordent sur le fait qu'il existe différents degrés d'innovation, le nombre de catégories permettant de les distinguer diffère : 2 selon Norman and Verganti [4] ou Gero [5] ; 3 pour Pahl and Beitz [6], Henderson and Clark [7] ou encore Wheelwright and Clark [8] et jusqu'à 8 pour Sternberg, et al. [9].

Par souci de synthèse et afin de permettre un classement aisé, nous retenons une classification qui scinde l'innovation en deux catégories : l'innovation radicale et l'innovation incrémentale.

- *L'innovation radicale*, également appelée innovation de rupture, est généralement de grande ampleur et individualisée. Elle « déplaç[e] la frontière des connaissances techniques ou élargi[t] la gamme des produits et des services offerts » [10]. Elle permet la résolution de problèmes nouveaux grâce à l'utilisation de combinaisons de principes de solutions nouveaux ou originaux. Elle correspond donc à la réalisation par les entreprises d'activités ou de produits que celles-ci ne faisaient pas avant car elles ne savaient ou ne pouvaient pas les faire. On pourra ici citer comme exemple l'apparition du train à vapeur ou plus récemment de la Twizy de Renault (véhicule électrique mi-voiture, mi-deux roues).
- *L'innovation incrémentale* (ou innovation de rattrapage) permet quant à elle l'amélioration progressive d'un produit. Elle est généralement issue d'améliorations successives qui prises de façon indépendantes pourraient être considérées comme mineures. En d'autres termes, l'innovation incrémentale vise à mieux faire ce que l'entreprise fait déjà. Le passage à une nouvelle version de véhicule (de la Clio 3 à la Clio 4 chez Renault par exemple) ou le développement de disques durs ayant des capacités de stockage doublées correspond à ce type d'innovation.

2.1.1.2 Capacité et stratégie d'innovation

Cependant quel que soit le degré d'innovation envisagé, il faut que l'entreprise soit en mesure d'y parvenir, c'est-à-dire qu'elle soit capable de mettre en œuvre le « glissement de l'innovation à la conception innovante » [11]. On parle alors de capacité d'innovation d'une entreprise et d'entreprises innovantes [12].

Innover c'est donc concevoir comme l'a précisé Perrin [12] ; mais c'est surtout s'assurer que cette conception est innovante. L'enjeu actuel n'est donc pas seulement l'innovation dans un projet unique mais bien la capacité à définir une « stratégie durable d'innovations successives introduisant des ruptures significatives dans l'identité des produits, des marchés, des technologies » [13].

La capacité d'innovation doit donc être considérée comme une faculté qu'il est possible de gérer car ses caractéristiques sont connues (performance, structure, personnes, management, technologie) tout comme les leviers permettant leur optimisation [14]. Ainsi, l'une des préoccupations principales des

entreprises pour augmenter leur capacité d'innovation se porte aujourd'hui sur la problématique des connaissances, considérées comme à la fois « l'input et l'output du progrès technique » [10] ayant donné naissance à « l'économie de la connaissance » [15].

En devenant une organisation apprenante, l'entreprise pourra apprendre tout à la fois de sa propre expérience mais aussi des connaissances issues des diverses avancées techniques, sociales ou structurelles. De cette façon elle peut augmenter cette capacité d'innovation qui lui fait tant besoin pour se développer et dont les premières actions se situent dans les phases de conception.

La Figure 1 ci-dessous, adaptée d'Amidon [15], illustre le lien qui existe entre les connaissances d'une entreprise et sa capacité d'innovation : la capacité d'innovation augmente lorsque les connaissances s'accroissent. Pour autant, le choix effectué par Amidon d'utiliser une spirale pour représenter cette croissance corrélée permet de souligner que ce processus est loin d'être simple et linéaire mais au contraire se révèle complexe et tumultueux, nécessitant de mettre en place une stratégie pour organiser ce processus.

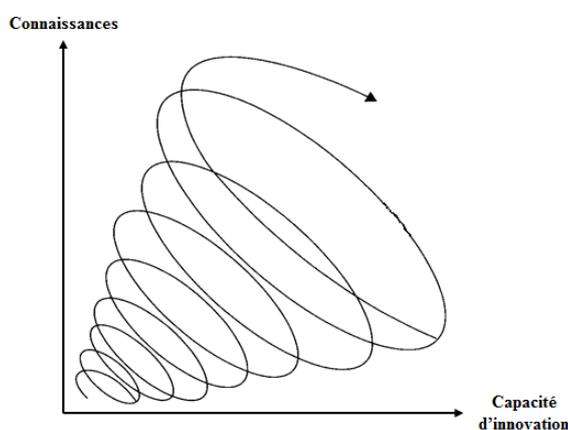


Figure 1 Relation entre connaissances et capacité d'innovation adapté d'Amidon [15]

Comme le précise Perrin [12], l'innovation est indispensable aux entreprises encore plus lorsque celle-ci est radicale. D'autre part il ne peut pas y avoir d'innovation sans conception, car l'innovation est avant tout un processus qui permet « la transformation d'une ou plusieurs idées en produits réels, impos[ant] impérativement d'avoir recours à la conception » [16]. Ce processus qui conduit de l'activité de conception à la mise sur le marché réussie d'un produit nouveau peut suivre différentes orientations stratégiques : techno-push, market-pull ou need-driven.

- La stratégie *techno-push* est la stratégie originelle du processus d'innovation. Elle est fondée sur le fait que les découvertes scientifiques facilitent le développement technologique dans les entreprises et conduisent au succès commercial de leurs nouveaux produits [17, 18]. De plus, c'est cette stratégie qui permet la valorisation d'une innovation technologique de procédé en encourageant l'innovation technologique de produit qui peut en découler.
- La stratégie *market-pull* permet quant à elle de pallier aux limites du techno-push qui néglige le marché en lien avec les produits nouveaux. Elle a comme point d'entrée les attentes et besoins du marché collectés à l'issue d'études de la concurrence et des clients [17]. Elle cherche avant tout à développer des produits destinés à satisfaire les attentes jusqu'ici non satisfaites des utilisateurs [19].

- La stratégie *need-driven* [14] est quant à elle émergente. Son objectif est d'impliquer les utilisateurs actuels et potentiels des produits de façon à en avoir une meilleure compréhension et donc de pouvoir imaginer avec eux les nouveaux produits et services.

Parmi les stratégies que nous venons de présenter, nous plaçons nos travaux au sein de l'approche techno-push dont l'enjeu correspond à l'utilisation efficace des innovations de procédés pour le développement de produits innovants. Nous montrerons dans la suite de notre document que les connaissances issues de cette stratégie trouveront toute leur place au sein de l'approche DWX.

2.1.1.3 Synthèse

Nous venons de voir que l'innovation, c'est-à-dire la mise sur le marché réussie d'un produit nouveau est une préoccupation économique majeure dans un marché mondial fortement concurrentiel. Qu'elle soit de faible ou de grande envergure (incrémentale ou radicale), elle implique de la part des entreprises de disposer d'une capacité d'innovation suffisante que ce soit en terme d'organisation mais également de ressources pour pouvoir développer une stratégie conduisant à la réussite.

Le prochain paragraphe sera consacré à la présentation d'une innovation technologique de procédé, la fabrication additive qui ouvre aujourd'hui une nouvelle voie dans la stratégie d'innovation techno-push.

2.1.2 La fabrication additive : une innovation technologique de procédé

La FA est apparue ces dernières années comme un centre d'intérêt majeur pour les entreprises cherchant à innover. Ce chapitre est destiné à présenter les fondements même de la FA ainsi que les utilisations qui en sont faites, puis nous expliquerons pourquoi elle suscite autant d'intérêt.

2.1.2.1 Principe

La FA est une technique de fabrication définie comme « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique » [20, 21]. Elle est considérée comme une innovation technologique de procédé qui déclenche depuis quelques années une révolution dans le domaine de la production.

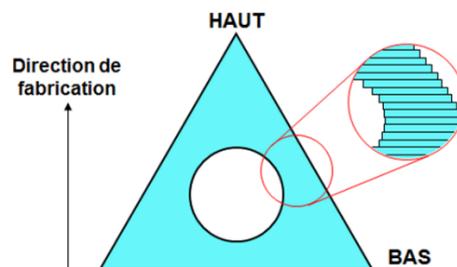


Figure 2 Principe de la FA et effet d'escalier

La FA consiste donc à réaliser un produit grâce à un empilement successif de strates selon un processus génératif constitué de deux étapes réitérées jusqu'à l'obtention du produit fini :

- Génération d'une couche de matière suivant un contour et une épaisseur fixés : la matière est déposée uniquement là où elle est nécessaire. Les caractéristiques de la strate ont été préalablement obtenues grâce au découpage de la maquette numérique selon des plans parallèles espacés d'une épaisseur de couche.
- Réalisation de la nouvelle couche par addition de matière au-dessus de la couche précédente. La fabrication peut se résumer à une fabrication dite en "escalier" (Figure 2).

Ce processus génératif dont est issue la FA bouleverse, comme l'illustre la Figure 3 ci-dessous, les techniques de fabrication dites traditionnelles que sont :

- les procédés par enlèvement de matière (tels que l'usinage) où le produit est réalisé à partir d'une ébauche brute sur laquelle la matière va être progressivement enlevée afin de lui conférer une forme finale.
- les procédés de formage (tels que la fonderie ou la forge à chaud) dans lesquels la matière est amenée dans un état liquide ou visqueux, puis est mise en forme par écoulement dans un moule ou par rapprochement de deux matrices.

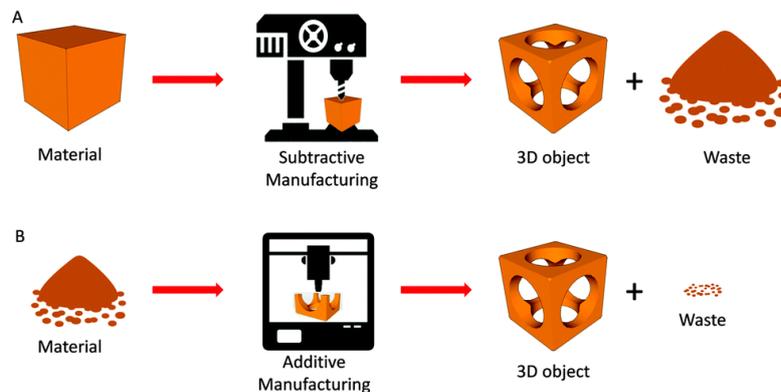


Figure 3 Différence entre fabrication traditionnelle (ici usinage) et FA issu de [22]

La FA est une technique de fabrication que l'on peut qualifier de « jeune ». On peut en effet la situer dans la phase de croissance du cycle en S des systèmes techniques [23]. Cela signifie donc qu'elle est en plein développement mais que son utilisation a permis de conquérir de nouveaux marchés pour lesquels elle assure un avantage concurrentiel fort.

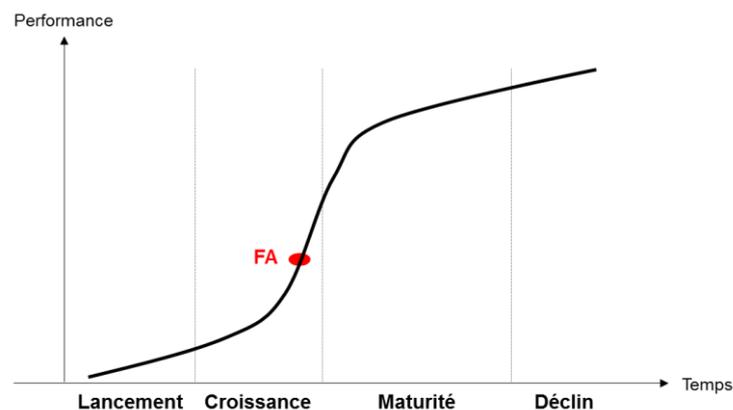


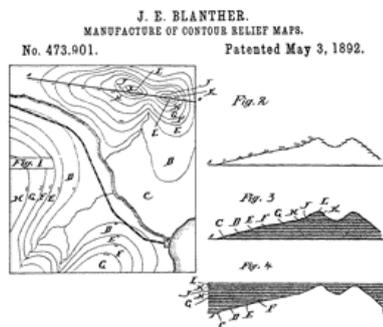
Figure 4 Place de la FA dans le cycle en S

Pour autant, le principe physique de la FA est lui beaucoup plus ancien (fin du 19^{ème} siècle) puisqu'il a été développé dans le cadre de deux applications distinctes considérées aujourd'hui comme les ancêtres de la FA : la photosculpture et de la topographie [24] :

- La photosculpture (Figure 5a) mise au point par Willème en 1860 permet de réaliser une réplique 3D d'un objet. Elle repose sur l'utilisation d'appareils photographiques, disposés circulairement autour du modèle et permettant d'obtenir des clichés suivant différents angles. La projection sur un écran de chacune des photos permet ensuite de reconstruire le profil du modèle dans l'argile à l'aide d'un pantographe.
- La topographie (Figure 5b) est le fruit de l'imagination de Blantner [25]. Elle s'appuie sur l'impression de courbes de niveau sur des plaques de cire qui sont ensuite découpées, empilées puis lissées afin d'obtenir des matrices permettant de fabriquer des cartes topographiques en relief.



Photosculpture (a)



Topographie (b)

Figure 5 Principes de la photosculpture et de la topographie

Depuis son entrée dans l'ère industrielle à la fin des années 1980 (Figure 6), la FA n'a eu de cesse d'évoluer et sa gamme de procédés et de machines s'est considérablement agrandie. Cet élargissement de la gamme a notamment été facilité par l'augmentation des capacités de traitement des ordinateurs. En effet c'est grâce à leur puissance de calcul accrue que s'est développée la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) permettant la représentation 3D d'objets numériques et suscitant l'envie de les fabriquer [26]. Aujourd'hui la diversité est telle que, l'ASTM et l'ISO [21, 27] ont proposé une classification de la FA en 7 catégories de procédés qui apporte ainsi une certaine clarification aux nombreuses « variations commerciales des technologies » [28].

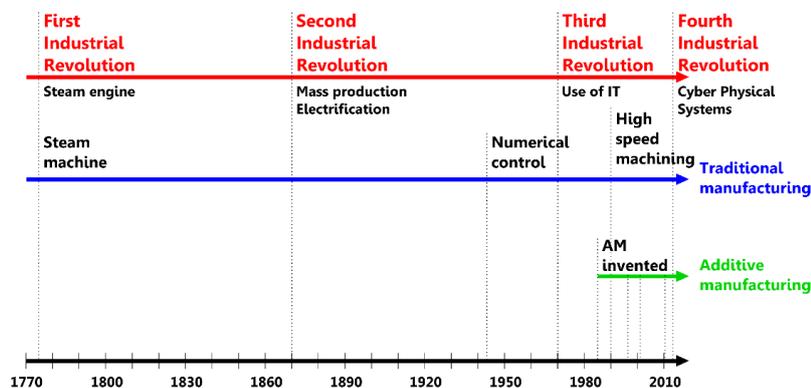


Figure 6 Echelle de temps des usages industriels de la fabrication traditionnelle et de la FA [29].

Nous faisons ici le choix de ne pas détailler les principes sur lesquels s'appuient chacune de ces catégories de procédé mais plutôt de nous intéresser à leurs points communs et en particulier au processus permettant de passer de l'objet numérique à l'objet réel.

Comme pour les autres procédés de fabrication, les différents procédés FA s'appuient sur la chaîne numérique c'est-à-dire « l'ensemble des étapes qui composent la réalisation d'un projet depuis la conception jusqu'à la fabrication du produit fini, dans un environnement numérique » [30, 31]. Celle-ci peut être décomposée en 4 étapes schématisées sur la Figure 7 ci-dessous :

- *Création d'un modèle numérique 3D du produit à fabriquer :*
Le modèle numérique est réalisé à l'aide d'un logiciel de CAO ou obtenu à la suite d'une retro conception (reconstruction des surfaces définissant la peau d'un objet physique à partir d'un nuage de points obtenu par numérisation).
- *Conversion et contrôle des données :*
Il s'agit là du passage d'un modèle volumique du produit à un modèle facettisé par des triangles dont le STL est le format le plus couramment utilisé en FA.
- *Préparation de la fabrication et fabrication :*
Cette étape correspond dans un 1^{er} temps au tranchage du modèle, puis au choix de la stratégie de fabrication et des paramètres fabrication.
- *Parachèvement du produit :*
Le parachèvement correspond aux différentes opérations qui doivent être effectuées pour obtenir le produit fini : enlèvement des supports, traitements thermiques, traitements de surface, ...

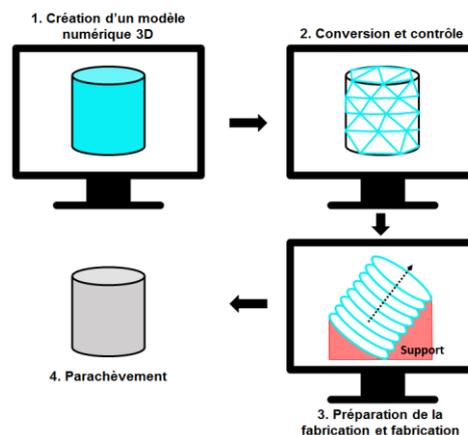


Figure 7 Chaîne numérique associée à la FA

Ayant introduit les fondements même de la FA, nous allons désormais présenter les différents usages qui se sont développés pour la FA ainsi que les perspectives offertes par cette innovation technologique de procédé.

2.1.2.2 Usages de la FA : prototypage vs fabrication directe

Durant ses premières années d'existence industrielle (1990-2000), la FA s'est limitée quasi exclusivement au Prototypage Rapide (PR). En effet, considéré jusqu'ici comme une étape complexe, fastidieuse et coûteuse [26] qui ralentissait le processus de conception, le PR devient avec la FA

beaucoup plus simple et rapide. Les itérations entre concepteurs et fabricants s'en trouvent facilitées car grâce à la FA, les représentations physiques du produit qui vont servir à la validation des étapes de conception ou de développement d'un produit (forme, aspect, ergonomie, ...) sont réalisées dans des délais plus courts. Quant aux deux approches du PR (modélisation de concepts et l'obtention de prototypes fonctionnels) elles vont essentiellement conditionner le choix des procédés et des matériaux FA permettant la réalisation du prototype :

- Procédés par extrusion de matière ou par projection de liant sont majoritairement utilisés dans le cadre de la modélisation de concepts, c'est-à-dire la représentation 3D d'un concept de base destiné à permettre de juger l'aspect général, les proportions ou encore la forme mais ne pouvant pas subir d'effort.
- Procédés de photopolymérisation en cuve, de projection de matière ou encore de fusion sur lit de poudres polymères seront utilisés pour l'obtention de prototypes fonctionnels, utilisés pour la validation d'une fonction spécifique du produit (tenue mécanique, propriétés thermiques, ...), d'un objectif de conception (fabrication, maintenance, sécurité...), voire l'utilisation ou le fonctionnement du concept (rôle d'aide à la décision).

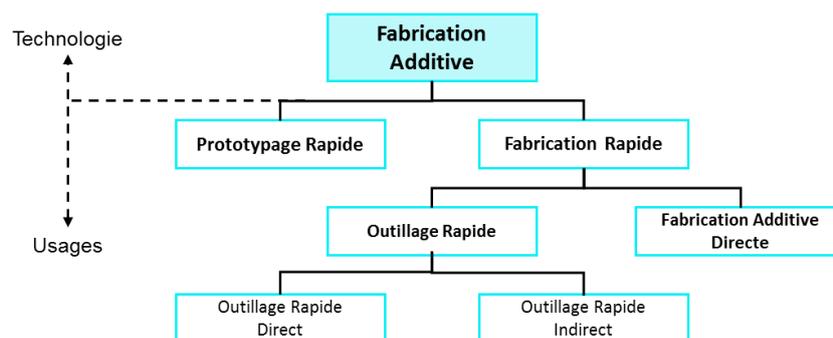


Figure 8 Les différents usages de la FA issu de [32]

Mais à partir du milieu des années 1990, l'usage exclusif de la FA pour le PR se diversifie au profit d'une nouvelle approche : la Fabrication Rapide (FR) (Figure 8). Cet intérêt pour la FR s'explique notamment par l'arrivée à maturité de certains procédés dont les améliorations techniques et technologiques successives [33] (vitesse de fabrication, précision dimensionnelle ou qualité des états de surface ont été significativement améliorés) permettent d'envisager la réalisation de produits à même de respecter l'ensemble des caractéristiques et des fonctions fixées par le cahier des charges. Toutefois parmi cette approche FR, il est nécessaire de distinguer l'Outillage Rapide (OR) et la Fabrication Additive Directe (FAD).

- l'OR a été à l'origine utilisé pour obtenir une empreinte servant à la validation des gammes de fabrication lors des tests de pré-industrialisation. Par la suite, son usage s'est étendu à la fabrication d'outillages fonctionnels de formes complexes (matrices, moules d'injection, ...) destinés à la production en grandes séries. L'OR correspond donc à une utilisation détournée de la FA puisque les produits finaux ne sont réalisés de façon additive. On parle d'ailleurs

d'OR direct lorsque les outillages sont obtenus en FA et d'OR indirect lorsque les moules destinés à la réalisation des outillages sont fabriqués en FA.

- la FAD correspond à l'élaboration de produits ou de composants denses (densité proche de 1) et résistants mécaniquement c'est-à-dire finis et fonctionnels. Elle permet d'envisager des coûts de production compétitifs par rapport aux technologies traditionnelles du fait de l'absence d'outillages dédiés ou de mise au point (Figure 9) mais aussi la réduction des pertes de matière (3% pour certaines pièces aéronautiques fabriquées en FA contre 80 à 90% de copeaux pour celles obtenues par usinage).

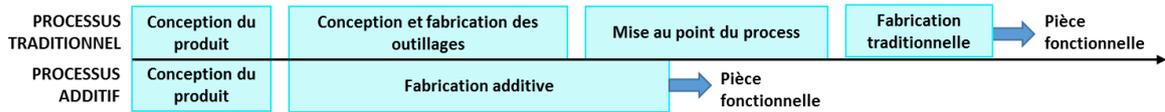


Figure 9 Impact du processus choisi sur les temps et étapes de développement et fabrication d'une pièce fonctionnelle issu de [32]

2.1.2.3 Atouts et perspectives offerts par la FA

Parmi les différents usages de la FA que nous venons de détailler, c'est la FAD qui intéresse aujourd'hui particulièrement les industriels. Sa part ne cesse d'ailleurs de croître, passant de 4% en 2001 à 28,3% des pièces produites en 2013 [28]. Cet engouement s'explique par les possibilités uniques de la FA qui laissent entrevoir de nouvelles opportunités pour la conception de produits et notamment pour ce qui concerne leur complexité : fonctionnelle, géométrique, hiérarchique et matériau [26, 31].

- *Complexité géométrique :*

Elle apparaît comme l'atout majeur de la FA par rapport aux procédés traditionnels puisqu'elle permet d'imaginer n'importe quelle géométrie et de la réaliser en une seule opération, permettant ainsi de repousser les limites des procédés traditionnels. Cette possibilité de produire des géométries complexes sans contrainte supplémentaire s'explique par le fait que la décomposition de la forme 3D en une série de problèmes 2D est plus facile à appréhender. Ainsi, puisque le produit est fabriqué couche par couche, il est possible d'obtenir des formes creuses sans avoir recours au noyautage ou aux dépouilles ou sans devoir prendre en compte l'accessibilité des outils. De plus, les formes complexes n'ont plus besoin d'être scindées sur différents composants qui seront assemblés ultérieurement, ce qui conduit à la diminution du nombre de pièces et à la réduction (voire la suppression) des opérations d'assemblage. De fait, fabriquer des géométries complexes internes ou externes en FA n'engendre alors pas de surcoût, ce qui présente un intérêt indéniable et d'autant plus considérable que c'est l'inverse qui se produit dans le cas des procédés traditionnels.

- *Complexité hiérarchique :*

Avec la FA, il est désormais possible de réaliser des produits à structures complexes de type treillis, alvéolaires ou bioniques (Figure 10) sans opération d'assemblage (boulonnage, soudage,

rivetage, ...) des différents éléments. La réalisation dans une même structure de motifs à différentes échelles) sur le modèle des fractales (du microscopique jusqu'au macroscopique) devient une possibilité. L'intérêt principal de cette complexité hiérarchique est l'allègement des produits : les structures pleines peuvent être remplacées par des structures beaucoup plus légères, mais présentant des propriétés mécaniques équivalentes.

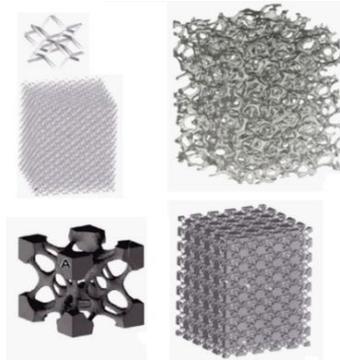


Figure 10 Exemples de structures complexes réalisables en FA selon Murr, et al. [34]

- *Complexité matériau :*

Une pièce peut être qualifiée de multi-matériaux lorsqu'elle est constituée d'au moins deux matériaux dont la distribution varie en fonction de l'épaisseur. La distribution continue (Figure 11 gauche) va permettre l'obtention d'un gradient fonctionnel de propriétés [35]. Les matériaux obtenus sont donc des composites dont la composition et la microstructure évoluent progressivement dans la pièce et conduisent à la variation des propriétés mécaniques. La performance globale du matériau est alors supérieure à celle des composants pris séparément. La distribution discontinue (Figure 11 droite) permet l'obtention de pièces constituées d'un empilement de zones mono-matériau. La complexité matériau obtenue dans ce cas-là est plus élémentaire, car les performances obtenues sont inférieures à celles des matériaux à gradient de propriétés. On perçoit donc tout le potentiel que peut offrir la FA dans la réalisation de ces pièces multi-matériaux : au sein d'une même couche, la matière étant déposée point par point ou simultanément, il est possible de réaliser n'importe quelle composition [31] apportant au produit des propriétés mécaniques, thermiques ou chimiques uniques.

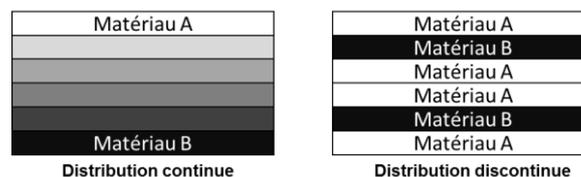


Figure 11 Illustration de la complexité matériau permise par la FA

- *Complexité fonctionnelle :*

Avec la FA, des ensembles complets de composants préassemblés et prêts à l'emploi peuvent être fabriqués. On peut ainsi inclure des corps étrangers en cours de fabrication ce qui permet

une augmentation de la richesse fonctionnelle des produits fabriqués. Par exemple, il est possible de prévoir dès la conception des cavités qui pourront accueillir pendant la fabrication des éléments rapportés tels que des écrous, de la fibre optique, des composants électroniques ou électriques. L'intégration de ces éléments permet alors de réduire le nombre de procédés nécessaires à la fabrication d'une pièce, d'éliminer l'assemblage a posteriori et de pallier la difficile maîtrise des matériaux à gradients.

Grâce aux atouts de la FA que nous venons de présenter, de nouvelles perspectives pour le développement de produits en FAD apparaissent particulièrement dans les domaines de la fabrication à la demande, de la fabrication de petites séries ou à forte valeur ajoutée et de la fabrication sur mesure.

- La fabrication à la demande (ou customisation) est le domaine d'application de la FA le plus ancien et le plus implanté. Il s'adresse essentiellement à un usage dit « grand public » de la FA.
- Les secteurs de l'aéronautique, de la défense et du spatial ont été des pionniers dans le domaine de la fabrication de petites séries ou à forte valeur ajoutée ; même si aujourd'hui d'autres secteurs tels que le sport automobile s'y intéressent également. L'enjeu majeur est de bénéficier des allègements de masse permis par l'utilisation des formes complexes, de simplifier les assemblages, voire de pallier les difficultés liées à l'usinage de certains métaux comme l'inconel. Mais une nouvelle piste de réflexion s'ouvre également pour ces secteurs dans le domaine de la maintenance et de la supply chain. En effet il est désormais possible d'envisager, à plus ou moins longue échéance, la fabrication de pièces détachées sur site évitant ainsi le stockage de pièces souvent couteuses.
- La fabrication sur mesure a également été largement adoptée par le secteur médical et représente en 2014 13,7% du marché de la FAD selon le rapport Wohlers. La FA offre la possibilité de réaliser des prothèses, des implants ou des orthèses parfaitement adaptés à la morphologie du patient et dans des matériaux biocompatibles. De plus, la possibilité d'utiliser des structures treillis favorisant la croissance des tissus et à propriétés égales, plus légères a été un 2nd déclencheur à l'adoption de la FAD. D'autres secteurs économiques, comme la bijouterie ou l'architecture, s'intéressent aussi au sur mesure, y voyant la possibilité de développer, dans des délais courts, des produits spécifiques à chacun de leurs clients.

2.1.2.4 Synthèse

Comme nous venons de le montrer, la FA a su en quelques années mettre en avant son potentiel. L'arrivée dans le domaine public des brevets protégeant les procédés FDM et SLS ont d'ailleurs contribué à accélérer ce mouvement en permettant le développement de machines beaucoup moins onéreuses et accessibles à un plus large public. Ainsi, en tant que jeune technologie, la FA suscite désormais de fortes attentes car « il n'y a aucun doute qu'elle est une technologie disruptive [...] qui peut conduire à de nouvelles perspectives [d'innovation] » [26].

Il paraît donc naturel, aux vues de l'histoire des procédés, que cette innovation technologique de procédé conduise à des innovations technologiques de produits. Wheelwright and Clark [8] ont d'ailleurs établi un lien entre le degré de nouveauté d'un procédé et le degré de changement d'un produit, en d'autres termes le degré d'innovation d'un produit. Selon eux, les innovations de procédé permettent d'escompter des innovations radicales de produit. Pour autant, malgré le fort engouement qu'elle suscite, on retiendra que la FA n'a pas vocation à supplanter les procédés de fabrication traditionnels, mais bien à apporter une réponse technologique à leurs limites.

Pourtant, malgré ce constat unanime qu'il existe bien grâce à l'avènement de la FA de nouvelles perspectives en terme d'innovation, les concepteurs se sentent parfois démunis face aux implications et aux répercussions que la FA peut avoir sur leur métier : de nombreuses règles issues des procédés traditionnels n'ont désormais plus lieu d'exister mais demeurent largement répandues quant aux nouvelles « bonnes pratiques » elles sont encore peu nombreuses.

Ce qui nous amène à penser que le potentiel de la FA demeure encore largement sous exploité et que de nombreuses pistes pour augmenter la capacité d'innovation demeurent encore inexploitées. Il apparaît donc nécessaire d'aider les concepteurs à se détacher de leur schéma de pensée usuel au profit d'une démarche les aidant à faire abstraction de leur automatisme et faisant la part belle aux connaissances nouvelles apportées par la FA.

2.2 Contexte industriel de la FA : constats actuels

Afin de renforcer l'étude croisée de l'innovation et de la FA, nous avons également mené un état des lieux du secteur industriel de la FA en France. En effet, ayant montré dans le paragraphe 2.1.1.2 que la capacité d'innovation est fonction de la capacité à innover pendant la conception mais également à exploiter des connaissances nouvelles, nous avons souhaité avoir une vision de terrain de la situation. Nous avons donc analysé la manière dont la FA affecte aujourd'hui l'organisation ou les activités des entreprises qui l'utilisent et comment s'opèrent ces changements.

Nous présenterons tout d'abord les modalités de cette étude puis nous dresserons un bilan des résultats obtenus.

2.2.1 Modalités d'étude

Pour cela nous avons contacté puis interrogé des entreprises qui utilisent la FA au quotidien pour mener à bien leurs activités. Afin de tirer des conclusions les plus exhaustives possibles sur ce contexte industriel, nous avons souhaité constituer un panel représentatif du tissu industriel. Pour cela nous avons :

- Recueilli le point de vue des grands groupes industriels et des TPE/PME.
- Couvert des secteurs d'activités différents pour lesquels la FA est 1) le cœur de métier, 2) une activité de sous-traitance ou 3) une activité dédiée au développement interne de prototypes.
- Ciblé les différents usages de la FA : prototypage rapide ou fabrication rapide.
- Couvert les différentes familles de matériaux concernées par la FA (polymères et métaux)

Le Tableau 1 résume les différentes caractéristiques des entreprises qui ont fait l'objet d'une étude. Du fait des relations de concurrence ou de donneur d'ordre / sous-traitant existant entre certains de nos interlocuteurs, l'ensemble des noms a été anonymé afin de garantir la confidentialité des données.

Entreprise	Typologie	Secteur d'activité	Usage de la FA
ENT 1	Grande Entreprise	Automobile	PR
ENT 2	TPE/PME	Multisecteur (sous traitance)	PR, FR
ENT 3	TPE/PME	Multisecteur (sous traitance)	PR, FR
ENT 4	TPE/PME	Multisecteur (sous traitance)	PR, FR
ENT 5	Grande Entreprise	Aéronautique	PR, FR
ENT 6	Grande Entreprise	Cosmétique	PR

Tableau 1 Synthèses des informations relatives aux entreprises étudiées

Chaque étude a été réalisée sur place chez l'industriel et a duré une demi-journée scindée en deux phases successives : d'abord une visite des installations suivie d'un entretien d'une durée d'environ 1h30 avec le responsable de l'entreprise (ou du service). Ces entretiens avaient pour but de collecter les éléments de réponse aux questions suivantes :

- Pour quelles activités l'entreprise a-t-elle développé une expertise FA spécifique ?

- Quelle est l'origine cette expertise ?
- Qui sont les détenteurs de cette expertise ?
- Comment est réutilisée cette expertise dans l'entreprise ?

A l'issue de ces entretiens, un état des lieux général a été dressé puis soumis à nos différents interlocuteurs pour validation.

2.2.2 Bilan

Le 1^{er} constat que nous faisons est que les activités pour lesquelles des changements ont été opérés suite à l'utilisation de la FA sont relativement semblables dans les différentes entreprises. Ces similitudes s'expliquent par l'importance qu'occupe la chaîne numérique dans la FA. En effet, celle-ci impose un processus séquentiel au cours duquel un certain nombre d'activités, pouvant nécessiter un savoir-faire basé sur des connaissances FA, doivent être réalisées.

Le Tableau 2 ci-dessous présente, en fonction des étapes de la chaîne numérique, une liste non exhaustive des activités citées par nos interlocuteurs pour lesquelles il a été nécessaire d'opérer des changements dans la façon de travailler afin de pouvoir utiliser la FA de façon adaptée.

Etapes de la chaîne numérique	Activités associées
1. Création du modèle numérique 3D	Adaptation des modèles créés aux spécificités de la FA (découpe des fichiers, tirage d'épaisseur, création d'évidements, ...)
2. Conversion et contrôle des données.	Contrôle de la conformité et de la qualité des maillages STL Correction des fichiers non conforme
3. Préparation de la fabrication et fabrication	Choix de la machine et du matériau Choix des paramètres de production (vitesse balayage, puissance laser, ...) Choix de la stratégie de fabrication (placement, orientation, épaisseur de couche, densité de production...) Choix du taux de pureté matière dans la fabrication
4. Parachèvement du produit	Choix des opérations de finition (traitement thermique, suppression des supports, imprégnation,...)

Tableau 2 Exemple d'activités pouvant nécessiter de l'expertise FA et place dans le processus

Notre 2^{ème} observation porte sur l'origine même de l'expertise FA qui a été développée dans ces différentes entreprises et que l'on peut classer dans de trois catégories distinctes : matériau, machine, produit. Ces différentes expertises sont utiles à chacune des étapes de la chaîne numérique. Notons ici que nous retrouvons les catégories qui ont été définies par Ashby [36], Lovatt and Shercliff [37] pour les procédés traditionnels :

- *L'expertise matériau* FA permet, à partir des propriétés (mécanique, chimique, thermique, ...) des matériaux de prévoir le comportement final du produit lors de sa fabrication ou de son post traitement. Mais elle apporte également des éléments de décision quant aux conditions d'utilisation du matériau avant sa mise en œuvre (ex : vieillissement, homologation, ...).

- *L'expertise procédé* est fortement liée à l'utilisation des machines. Cette expertise va permettre notamment d'adapter la conception aux capacités actuelles des machines (dimensions, précision, entretien), mais de choisir le procédé le plus adapté aux besoins de l'entreprise ou encore d'adapter la stratégie et les paramètres de fabrication aux caractéristiques des machines.
- *L'expertise produit*. Elle se déploie surtout autour de la modélisation même du produit. Elle implique d'être en mesure de contrôler, adapter ou modifier les maquettes numériques des produits conçus en fonction des spécificités requises pour les modèles numériques utilisés en FA.

Notre 3^{ème} constat porte sur la typologie des entreprises que nous avons interrogées. Ainsi nous avons observé que les entreprises 1, 5 et 6 (grands groupes industriels) utilisent l'expertise issue des connaissances FA de leur équipe essentiellement pour produire en interne les prototypes ou, lorsque la fabrication est sous traitée, pour fournir au sous-traitant un fichier numérique conforme aux spécificités de la FA. La connaissance experte détenue par ces personnels est suffisante pour qu'ils puissent intervenir sur l'ensemble des étapes du processus FA. Mais cette expertise demeure limitée à quelques technologies et à la fabrication de quelques typologies de pièces. Ainsi par exemple, le choix des paramètres de production ou de la stratégie de fabrication sont des activités réalisées par les opérateurs mais elles ne nécessitent pas de connaissances FA spécifiques : le réglage des paramètres standards suffit généralement à obtenir des caractéristiques conformes aux exigences de validation des prototypes mais ne conditionne en rien celles du produit final.

Le cas des entreprises 2, 3 et 4 est beaucoup plus emblématique de la place occupée par les connaissances FA dans les activités quotidiennes. En effet, du fait de leur longue expérience dans le domaine de la fabrication de produits FA (PR et FR) dont c'est le cœur de métier, elles possèdent des personnels qui, bien que n'étant impliqués que dans une partie du processus, ont développé un niveau d'expertise très poussé. L'explication fournie par ces entreprises portent à la fois sur la diversité des moyens de production FA dont elles disposent ; mais aussi sur la grande variété des clients avec qui elles travaillent. Ces deux éléments ont selon elles contribué à étendre leurs connaissances car pour satisfaire les exigences client, elles ont été amenées à réaliser de nombreuses études de R&D (pour caractériser par exemple les propriétés de matériaux en fonction des paramètres réglés sur leur parc machines ou pour mieux utiliser leurs outils numériques).

Le 4^{ème} constat découle directement du précédent. En effet, l'excellente maîtrise des contraintes techniques ou numériques de la FA par ces entreprises fait qu'elles sont aujourd'hui de plus en plus impliquées dans les activités de conception. Ainsi toutes les entreprises engagées que nous avons interrogées admettent qu'elles valorisent aujourd'hui leurs compétences en suivant l'une ou l'autre des stratégies suivantes :

- Développement d'un Bureau d'Etudes (BE) dédié à la FA dont l'activité porte essentiellement sur l'amélioration de la conception (optimisation topologique et/ ou développement de matériaux architecturés) en vue de trouver le meilleur compromis entre les possibilités de la FA et la performance du produit et qui se base sur le traitement des

fichiers numériques. Dans ce cas le processus de conception global demeure semblable à celui suivi pour les procédés traditionnels mais est enrichi avec ces activités supplémentaires. Le BE ne joue pas dans ce cas de rôle spécifique dans la recherche de nouveaux concepts avec la FA.

- Implication dans la co-conception. Il s'agit dans ce cas du passage du statut de simple sous-traitant à celui de partenaire dans des projets d'innovation. Le fabricant FA n'a plus seulement pour rôle d'assurer la faisabilité technique des produits conçus mais bien d'être partie prenante dès la phase de recherche d'idées. L'entreprise 2 reconnaît d'ailleurs être aujourd'hui impliquée dans plusieurs projets de ce type, l'un d'eux ayant récemment abouti à la mise sur le marché par une grande entreprise du luxe d'un produit proposant à la fois un usage et une forme innovante impossibles à obtenir sans l'usage de la FA

Pour finir, nous avons pu observer que dans les grands groupes industriels (entreprises 1 et 5), les organisations par projets et par métiers limitent la diffusion ou l'utilisation de ces savoirs et savoirs faire FA entre les services. Ainsi, selon notre interlocuteur de l'entreprise 1, responsable du service prototypage, « il est difficile de remettre en question des méthodes ou des processus qui ont fait leur preuve et d'y introduire des connaissances nouvelles sans validation de la hiérarchie ». L'inertie psychologique semble donc un obstacle majeur à la valorisation de la FA dans les différentes étapes du processus de conception. Pourtant, malgré des réticences fortes à adapter leur processus de conception, les entreprises 1 et 5 ont mis en place des fablabs dans lesquels la FA par le biais du PR occupe une place centrale. Elles reconnaissent d'ailleurs que ces fablabs sont conçus comme des structures de rencontre et d'échanges et leur servent à explorer des sujets émergents en dehors de tout processus ou cadre traditionnels, souvent perçus comme contraignants dans les projets « classiques ». L'approche essai / erreur portée par le courant Do It Yourself (DIY) [38] et l'absence de contraintes de résultats et de retour sur investissement immédiat permettent selon l'un de nos interlocuteurs d'identifier des pistes de travail prometteuses pour ces sujets émergents.

On le voit donc l'adaptation du processus de conception actuel illustrée ici avec le cas particulier du mouvement DIY semble être une piste insuffisamment étudiée par les entreprises.

2.3 Question de recherche

L'apparition de la FA implique aujourd'hui la remise en question des stratégies classiques et des processus de développement de produits. A cela s'ajoute l'émergence ces dernières années d'un vaste domaine de connaissances issu du savoir-faire technique et technologique dans les entreprises impliquées dans la FA. C'est d'ailleurs sur ces connaissances qu'elles s'appuient pour développer des produits innovants.

Pourtant ces connaissances FA, détenues par des experts, ne sont généralement peu ou pas disponibles en dehors des services/entreprises dans lesquelles elles sont apparues. Les démarches industrielles actuellement engagées ne cherchent d'ailleurs pas à permettre leur diffusion vers d'autres structures mais plutôt à les consolider par des rapprochements interentreprises selon deux stratégies distinctes :

- rachat d'un concurrent
- signature d'un partenariat entre des entreprises aux activités et connaissances complémentaires

De plus, au sein même des entreprises, les concepteurs chargés d'imaginer les produits de demain n'ont pas toujours accès aux connaissances FA existantes ce qui les conduit à conserver leurs méthodes de travail traditionnelles [39] ou à sous-estimer les perspectives que pourrait leur apporter la FA en terme d'espace solution potentiel pour résoudre les problèmes de conception qui leur sont posés.

Face à ces constats et alors même que la stratégie d'innovation techno push a jusqu'ici toujours démontré son intérêt lors de l'apparition d'une innovation technologique de procédé, nous pouvons légitimement nous interroger sur la portée des innovations qui seront développées au cours des prochaines années si les connaissances FA demeurent majoritairement entre les mains d'un petit nombre.

C'est pourquoi à l'issue de la présentation du contexte de nos travaux, nous formulons la question de recherche suivante :

Comment augmenter la capacité d'innovation des équipes projet en intégrant des connaissances relatives à la FA dans le processus de conception ?

2.4 Positionnement de la recherche

Dans cette partie, nous situons les travaux de recherche que nous avons menés afin de répondre à notre question de recherche.

Dans un 1^{er} temps, nous nous positionnons par rapport à la communauté scientifique du Génie Industriel, puis dans un 2^{ème} temps par rapport aux axes de recherche du Laboratoire de Conception de Produit et Innovation. Pour terminer, nous positionnons nos travaux par rapport aux laboratoires de recherche nationaux et internationaux travaillant sur les aspects conception innovante et fabrication additive.

2.4.1 Positionnement dans le Génie Industriel

Le Génie Industriel est lié au développement économique, social et technique qu'ont connus les pays lors de la révolution industrielle du 18^{ème} siècle. L'Institute of Industrial Engineers (I.I.E) le définit comme la discipline concernée par « la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés mettant en jeu des hommes, des matériaux, des équipements et de l'énergie ».

Le Génie Industriel a donc pour objectif de donner les moyens d'améliorer les compétences des individus et l'efficacité des processus utilisés afin d'augmenter la qualité et la productivité. Il s'appuie pour cela sur les « connaissances spécialisées et les aptitudes dans le domaine des mathématiques, de la physique et des sciences sociales ainsi que sur les principes et les méthodes des sciences de l'ingénieur, ceci pour spécifier, prédire et évaluer le résultat de ce type de système ». Le Génie Industriel se trouve donc à la « croisée des disciplines scientifiques classiques et des sciences humaines et sociales » [40].

Cette thèse s'inscrit bien dans le champ du Génie Industriel, et plus particulièrement dans le domaine des sciences de la conception dans la mesure où nous chercherons au cours de ces travaux à rapprocher les connaissances issues d'une innovation technologique de procédé, la fabrication additive, de la conception afin d'améliorer la capacité d'innovation des entreprises.

2.4.2 Positionnement dans le laboratoire Conception de Produit et Innovation

Nos travaux de recherche ont pour cadre académique le Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI) d'Arts et Métiers ParisTech. Ses axes de recherche s'inscrivent dans la discipline du Génie Industriel, et le thème central de sa recherche est la compréhension et la formalisation du processus de conception et d'innovation en vue de son optimisation. Pour cela, le LCPI développe deux axes de recherche complémentaires : métier et processus

- l'axe *métier* porte sur l'intégration des métiers en lien avec le cycle de vie d'un produit (design, écoconception, ergonomie, qualité, maintenance...). Il est destiné à extraire, formaliser et modéliser les spécificités (règles, connaissances, pratiques et outils) des différentes parties prenantes du développement de produits nouveaux. Son rôle est donc de proposer des évolutions dans le processus de conception en fonction des spécificités des métiers
- l'axe *processus* s'intéresse quant à lui à la formalisation des processus intervenant lors du développement d'un produit (gestion de projet, créativité, travail collaboratif,

entrepreneuriat...). Il vise donc à modéliser les processus individuels et collectifs, et à maîtriser les phases du processus transverse.

En outre, le LCPI déploie deux stratégies de recherche de modèles computationnels qui seront ensuite évalués dans un contexte opérationnel :

- *L'approche top-down* vise à développer des modèles génériques permettant d'optimiser le processus de conception et d'innovation. Ces modèles doivent être flexible et évolutif, et prendre en compte l'ensemble des phases du cycle de vie du produit ainsi que les différents métiers, outils et représentations associés.
- *L'approche bottom-up* se focalise elle sur développement de modèles métiers qui utilisent des formalismes spécifiques (modèles de connaissances et de règles expertes) et des formats différents (algorithmes, plateformes et supports numériques) et qui seront progressivement intégrés pour s'acheminer vers un modèle global.

Notre approche scientifique s'inscrit simultanément dans les deux thèmes du laboratoire puisque nous cherchons à la fois à extraire des connaissances métiers issues de la FA mais également à améliorer le processus de conception amont en formalisant les connaissances en fonction des spécificités des acteurs ciblés. De plus nous nous positionnons sur l'approche bottom-up déployée dans le laboratoire dans la mesure où nous cherchons à développer un modèle destiné à s'insérer dans un modèle global de processus de développement de produits nouveaux.

2.4.3 Positionnement dans la communauté française et internationale

De nombreux laboratoires s'intéressent aux thématiques de la FA ou de l'innovation mais un nombre plus restreint se concentre effectivement sur le rapprochement de ces deux thèmes. Parmi les travaux de recherche développés dans ces structures nous avons identifié quatre axes principaux :

- Recherche et développement de méthodes de conception spécifiques ou adaptées à la FA.
- Développement d'outils numériques (simulation, conception, ...) dédiés à la FA.
- Recherche et développement de nouveaux usages ou applications de la FA.
- Recherche et développement de nouveaux matériaux et procédés dédiés à la FA.

Les travaux présentés dans ce document se situent dans ce 1^{er} thème.

Nous venons successivement de présenter le contexte général et industriel de cette thèse ainsi que le verrou qui en découle. Puis nous avons situé nos travaux dans la communauté scientifique. Nous allons dans le prochain chapitre présenter notre état de l'art fondé sur l'étude d'ouvrages et de publications scientifiques.

3 Etat de l'art scientifique et hypothèses

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'état de l'art lié à la question de recherche que nous avons formulée : Comment intégrer des connaissances relatives à la FA dans le processus de conception afin d'augmenter la capacité d'innovation des équipes projet ?

Nous nous focalisons tout d'abord sur les travaux concernant la caractérisation du processus de conception afin d'identifier les éléments indispensables à la mise en place d'un modèle de processus de conception. Puis, nous montrons en quoi les connaissances jouent un rôle clé dans le processus de conception et quelles sont les démarches actuellement déployées pour les repérer puis les utiliser dans les méthodologies de conception. Ensuite nous étudions plus spécifiquement l'usage qui est fait des connaissances en FA dans les méthodologies de conception actuelles. Enfin, après avoir fait la synthèse de cet état de l'art et montré ses limites et nous présentons nos hypothèses de résolution et introduisons notre modèle préliminaire de conception.

3.1 Le processus de conception de produits

3.1.1 Théories et méthodologies de conception

Selon Tomiyama, et al. [41], les théories et méthodologies de conception (Design Theories and Methodologies – DTM) correspondent à l'ensemble des pratiques industrielles ou pédagogiques actuelles qui s'intéressent à la façon de concevoir des produits donc au processus de conception. Ces DTM peuvent être classées selon trois critères distincts :

- Le degré d'abstraction avec lequel elles abordent la démarche de conception. Tomiyama propose une distinction en 2 classes : concrètes ou abstraites.
- L'universalité c'est-à-dire la possibilité d'utiliser une DTM dans n'importe quel domaine de conception ou pour tout type produit. On parle alors de DTM générale ou individuelle.
- Le déploiement industriel ou pédagogique. Ce critère illustre avant tout la notion d'utilisation des DTM et ainsi leur portée auprès des concepteurs.

La Figure 12 ci-dessous replace les quatre grandes familles de DTM en fonction de ces trois critères :

- Les *théories de la conception* (ou design theories) appartiennent à la catégorie des DTM abstraites, générales. Elles sont peu utilisées ou enseignées; essentiellement du fait du haut niveau d'abstraction qui les caractérise. On y trouve ici la General Design Théorie [42], l'Universal Design Theory [43] ou encore la théorie C-K [44].
- Les *méthodes de conception basées sur une approche mathématique* (ou math design theories) sont abstraites et individuelles. Elles s'appuient sur la modélisation des systèmes pour des périmètres d'études ou des objectifs spécifiques et sont généralement déployées au sein d'outils informatiques qui rendent leur utilisation aisée. La méthode Taguchi [45] pour le Robust Design, l'Axiomatic Design [46] ou bien les méthodes d'optimisation entrent dans cette catégorie.

- Les *méthodes de conception* (ou design methods) ne sont applicables qu'à certains types de produit ou projets (ex : la construction navale) ce qui les place dans la catégorie abstrait et individuel. C'est avant tout leur diversité qui limite leur utilisation et leur enseignement.
- Les *méthodologies de conception* correspondent à une méta-méthode [47]. Elles permettent à la fois une utilisation universelle et industrielle mais aussi une application concrète. Elles ne prennent pas en compte de typologies spécifiques de produit. Wynn and Clarkson [48] les définissent comme des approches procédurales concrètes du processus de conception et selon Lahonde [47], il est nécessaire de différencier les méthodologies de gestion de projet de celles centrées sur la démarche de conception.

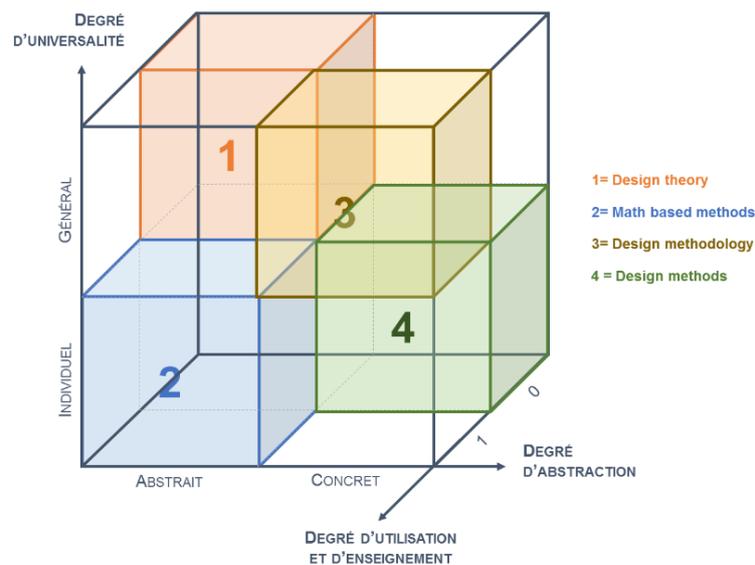


Figure 12 Position des familles de DTM selon les critères de Tomiyama [41]

Aux vues de ces différentes catégories, et afin d'apporter une réponse adaptée à notre question de recherche, nous avons choisi de réduire notre champ d'étude aux seules méthodologies de conception. En effet, nous pensons que leurs caractéristiques au sens de Tomiyama (approche concrète, générale et utilisée) correspondent aux pratiques des équipes projet de conception déployées dans les entreprises. D'autre part nous pensons que seules les méthodologies centrées sur la démarche de conception sont les plus à même de satisfaire nos besoins. Nous rejoignons en ce sens la définition de Pahl and Beitz [6] pour qui une méthodologie de conception est une « démarche adaptée aux systèmes techniques qui se fondent notamment sur la science de la conception ou sur l'expérience pratique dans des domaines variés ». Il comprend des plans d'action qui relient les étapes de travail et des phases de conception selon le contenu et l'organisation.

Ainsi, ayant défini les méthodologies de conception comme notre cadre de travail, nous allons maintenant chercher à analyser le processus de conception qui permet de transformer un problème abstrait (ou immatériel) en un produit réel (ou matériel).

3.1.2 Modélisation du processus de conception

Bien que les auteurs s'accordent sur le fait que le processus de conception est la colonne vertébrale du processus d'innovation [12, 49], il n'en existe cependant pas de description unique au sein de la communauté scientifique. Comme l'ont montré Wynn and Clarkson [48], de nombreux modèles ont été proposés pour décrire ce processus de conception, conduisant à de multiples classifications pour les distinguer. Notre analyse s'appuiera sur les travaux de Finger and Dixon [50] également repris par Cross [51] qui distinguent deux modèles de processus de conception : prescriptifs et descriptifs

- Les *modèles descriptifs* sont issus de l'analyse des activités de conception. Le modèle de Suh [46] est de loin le plus connu. L'activité de conception y est définie comme l'étude des interactions entre ce que l'on veut accomplir et la façon dont on veut l'accomplir. La conception permet alors le passage d'un espace fonctionnel issu de l'étude des attentes du consommateur à un espace physique listant des paramètres de conception et conduisant à l'identification des variables du procédé de fabrication. Ces modèles cherchent donc avant tout à décrire comment travaillent les concepteurs.
- Les *modèles prescriptifs* quant à eux ont pour objectif d'améliorer l'efficacité de la conception. Pour cela des procédures ou des bonnes pratiques sont spécifiées et sont généralement supportées par des outils afin d'aider une catégorie de concepteurs.

Le point commun entre ces deux catégories est l'enchaînement de phases décrivant une progression logique de la conception [52]. Howard, et al. [53] ont montré que nombre de modèles peuvent être définis comme un cycle segmenté en 4 à 6 phases décrites ci-dessous et qui permettent à partir d'un problème identifié d'aboutir à une solution (Figure 13).

- *Phase 1 : Définition du besoin.* Cette phase est destinée à mieux comprendre le problème posé et notamment les besoins des consommateurs ou du marché. Elle aboutit à la rédaction d'un cahier des charges à la suite du traitement des données collectées lors d'étude de marchés, d'analyse des tendances, de test utilisateurs, ...
- *Phase 2 : Planification des tâches.* Il s'agit dans cette phase de planifier les jalons du projet et de réfléchir aux ressources (économiques, humaines, ...) qu'il sera nécessaire de mobiliser. On peut donc la qualifier de phase essentiellement organisationnelle.
- *Phase 3 : Conception générale.* La conception générale consiste à explorer les pistes de solutions pouvant permettre de résoudre le problème de conception. Elle accorde donc une place importante à la génération des idées, des concepts et des principes de solution et s'appuie pour cela sur la créativité.
- *Phase 4 : Conception architecturale.* Au cours de cette phase, le concepteur commence à agencer les principes de solution retenus. Il s'agit donc d'une approche de niveau système du produit au sens de Savransky [54]. Selon Le Coq [55], la définition de l'architecture produit peut être réalisée en 3 étapes successives : la recherche des solutions d'architecture, leur définition puis leur sélection.
- *Phase 5 : Conception détaillée.* Cette phase est un retour à une vision composant du produit car, à partir de l'architecture qui a été retenue, il est nécessaire de définir précisément

l'ensemble des caractéristiques techniques de chaque élément (formes, dimensions, tolérances, matériau...) afin de permettre leur fabrication.

- *Phase 6 : Implémentation.* L'implémentation marque la fin de l'activité de conception et le début de celle de fabrication voire pour certains auteurs à la mise sur le marché du produit.

Models	Establishing a need phase	Analysis of task phase	Conceptual design phase		Embodiment design phase		Detailed design phase		Implementation phase
Booz et al. (1967)	X	New product strategy development	Idea generation	Screening & evaluation	Business analysis	Development	Testing	Commercialisation	
Archer (1968)	X	Programming ; data collection	Analysis	Synthesis	Development		Communication	X	
Svensson (1974)	Need	X	Concepts	Verification	Decisions	X		Manufacture	
Wilson (1980)	Societal need	Recognize & formalize ; FR's & constraints	Ideate and create		Analyze and/or test	Product, prototype, process		X	
Urban and Hauser (1980)	Opportunity identification	Design			Testing			Introduction ; Life cycle (launch) ; management	
VDI-2222 (1982)	X	Planning	Conceptual design		Embodiment design	Detail design		X	
Hubka and Eder (1982)	X	X	Conceptual design		Lay-out design	Detail design		X	
Crawford (1984)	X	Strategic planning	Concept generation	Pre-technical evaluation	Technical development		Commercialisation		
Pahl and Beitz (1984)	Task	Clarification of task	Conceptual design		Embodiment design	Detailed design		X	
French (1985)	Need	Analysis of problem	Conceptual design		Embodiment of schemes		Detailing	X	
Ray (1985)	Recognise problem	Exploration of problem ; Define problem	Search for alternative proposals		Predict outcome	Test for feasible alternatives	Judge feasible alternatives ; Specify solution	Implement	
Cooper (1986)	Ideation	Preliminary investigation	Detailed investigation		Development	Testing & Validation	X	Full production & market launch	
Andreasen and Hein (1987)	Recognition of need	Investigation of need	Product principle		Product design		Production preparation	Execution	
Pugh (1991)	Market	Specification	Concept design			Detail design		Manufacture ; Sell	
Hales (1993)	Idea, need, proposal, brief	Task clarification	Conceptual design		Embodiment design	Detail design		X	
Baxter (1995)	Assess innovation opportunity	Possible products	Possible concepts		Possible embodiments		Possible details	New product	
Ulrich and Eppinger (1995)	X	Strategic planning	Concept development		System-level design		Detail design	Testing & refinement ; Production ramp-up	
Ullman (1997)	Identify needs ; Plan for the design process	Develop engineering specifications	Develop concept		Develop product			X	
BS7000 (1997)	Concept	Feasibility	Implementation (or realisation)					Termination	
Black (1999)	Brief/concept	Review of 'state of the art'	Synthesis	Inspiration	Experimentation	Analysis / reflect	Synthesis ; Decisions to constraints	Output ; X	
Cross (2000)	X	Exploration	Generation		Evaluation	Communication		X	
Design Council (2006)	Discover	Define	Develop			Deliver		X	
Industrial Innovation Process 2006	Mission statement	Market research	Ideas phase		Concept phase	Feasibility Phase		Pre production	

Figure 13 Analyse comparative de différents modèles de processus de conception [53]

Nous décidons à ce stade de porter notre choix sur le modèle de processus proposé par Pahl and Beitz [6], repéré en rouge sur la Figure 13. Ce modèle est de loin le plus connu et le plus utilisé dans l'industrie [41] et il permet à la fois la conception de nouveaux produits et l'amélioration ou la reconception de produits existants.

Ce modèle décrit le processus de conception à travers une approche systématique, correspondant au sens de Finger and Dixon [50] à une approche prescriptive. Il part du constat qu'il existe un état initial d'insatisfaction créant le problème de conception. Son objectif est d'aider le concepteur à trouver une solution permettant de résoudre l'insatisfaction grâce à une démarche en 4 phases (Figure 14 et Figure 15). Chaque phase est elle-même décomposée en étapes au cours desquelles sont réalisées des activités et qui aboutissent à l'élaboration de livrables :

- La 1^{ère} phase du modèle correspond à la clarification de la tâche. Elle est scindée en 2 activités successives : la clarification de la tâche à proprement parler c'est-à-dire la collecte des informations relatives au besoin, suivie de la définition des caractéristiques attendues pour la solution (fonctions, performance, ...). Cette phase conduit à l'élaboration des spécifications.

- La 2^{ème} phase correspond à la conception générale (ou conceptual design). A ce stade, le travail est focalisé sur la recherche d'idées et l'élaboration de concepts. Cela implique tout d'abord de rechercher des principes de solutions puis des principes physiques appropriés pour la réalisation des fonctionnalités envisagées. Ensuite il est nécessaire de combiner ces différentes idées dans des variantes de concept qui devront être évaluées à la lumière de critères technico-économiques. A l'issue de cette phase, le concepteur dispose donc d'un ou plusieurs concepts matérialisés sous forme de fiches concept.
- La 3^{ème} phase est dédiée à la conception architecturale (ou embodiment design). Les concepts sont traduits en architecture produit et sont évalués selon des critères économiques, d'encombrement produit, d'agencement des composants, de formes ou de choix des matériaux.. Elle est découpée en deux étapes. La 1^{ère} étape va permettre par une succession d'activités d'obtenir le tracé préliminaire de l'architecture qui correspond à la 1^{ère} RI de cette phase. La 2nd étape cherche elle à affiner et optimiser le tracé préliminaire afin d'obtenir la représentation de l'architecture globale.
- La dernière phase du modèle de Pahl and Beitz correspond à la conception détaillée du produit (ou detailed design) et en particulier de ses composants. Elle permettra l'élaboration des dossiers techniques qui seront nécessaires pour la fabrication.

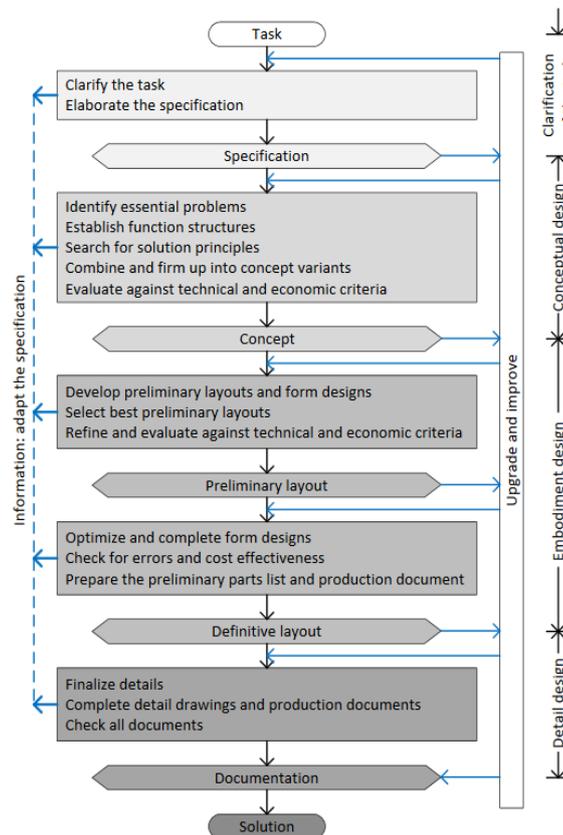


Figure 14 Processus de conception de Pahl and Beitz [6] (représentation détaillée)

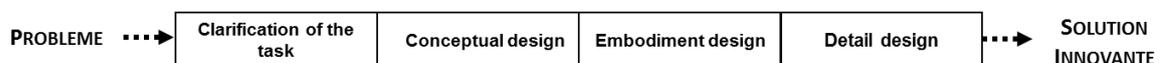


Figure 15 Processus de conception de Pahl and Beitz [6] (représentation simplifiée)

3.1.3 Les phases amont du processus de conception

Parmi toutes les phases du processus de conception avont décrites, les phases dites amonts doivent faire l'objet de toutes les attentions. Selon Ullman and Jones [56], c'est au cours de ces phases que le concepteur a la plus grande liberté de conception. En effet, à ce moment-là, les produits à développer sont encore définis de manière imprécise et floue et, dans le même temps, peu de décisions ont été prises car les connaissances sur le problème sont encore limitées.

De plus, bien que les phases amont ne représentent que 5% du montant total des coûts finaux, les décisions qui y sont prises seront à l'origine de 70 à 80% des coûts du produit [57]. La Figure 16 illustre ce que Ullman and Jones appellent le paradoxe de la conception [56] : plus les connaissances du concepteur sur le problème augmentent, moins il aura de liberté pour les utiliser et plus les coûts de modification de la conception seront importants. Ce sont donc en priorité sur ces phases que devra se porter notre attention si nous souhaitons parvenir à augmenter la capacité d'innovation dans les entreprises.

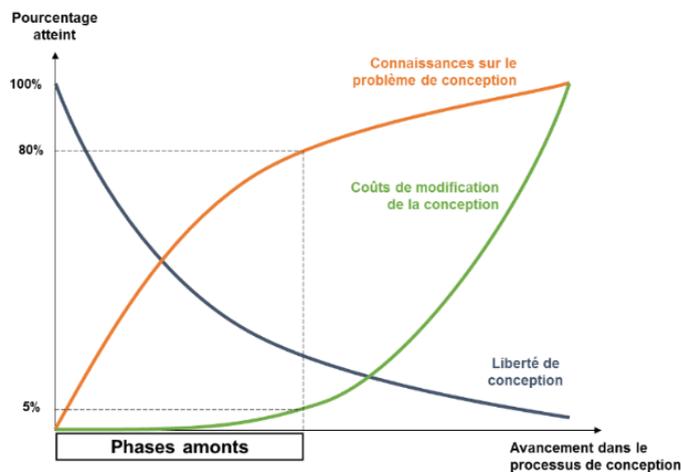


Figure 16 Illustration du paradoxe de la conception, adapté de [56] et [57]

Nous venons de souligner l'enjeu de ces phases de conception amont dédiées à ce que nous appellerons la conception préliminaire. Il nous reste désormais à les positionner dans le processus de conception.

Scaravetti [58] définit la conception préliminaire comme la conception « englob[ant] les phases de recherche de concept et de conception architecturale ». Selon Le Coq [55], elle a pour objectif le passage du fonctionnel au structurel. On retrouve une approche similaire dans la définition proposée par Fischer, et al. [59] pour qui les phases amont démarrent au moment de la recherche des concepts réalisables et se termine à la conception architecturale. Bien que ces propositions s'accordent sur la phase matérialisant la fin de la conception préliminaire, on voit que le début ne trouve pas de consensus dans la mesure où l'analyse du besoin est parfois considérée comme une phase antérieure à cette conception préliminaire. C'est pourquoi nous retiendrons la définition proposée par Segonds [60] pour qui les phases amont concernent les « phases de définition et planification du projet, la phase de recherche et validation du concept et les premières étapes de la conception architecturale, jusqu'à la génération d'un tracé préliminaire du produit ».

A partir de cette définition, nous pouvons repérer, sur le modèle de Pahl and Beitz que nous avons retenu, les phases de conception amont, sur lesquelles nous devons porter notre action (en rouge sur la Figure 17).



Figure 17 Place des phases amont dans le modèle de Pahl and Beitz [6]

Pour terminer notre analyse des phases amont dans le processus de conception, nous avons cherché à analyser la relation qui existe entre la place accordée à la conception préliminaire et les typologies d'innovation technologique de produit obtenues. Pour cela nous nous sommes appuyé sur les travaux de Culverhouse [61] et de Koen [62]. L'étude de ces travaux nous permet de retenir que :

- les projets basés sur la conception routinière ou à la reconception n'accordent pas ou peu de place aux phases amont. Les innovations qui en découlent seront donc incrémentales. Cela s'explique par le fait que ce type d'innovation correspond avant tout à volonté d'amélioration d'un produit existant. De ce fait le processus de conception associé n'a pas vocation à remettre pas en question l'ensemble des études préliminaires réalisées lors de la version précédente du produit mais plus à adapter.
- la conception amont, et plus particulièrement les phases d'analyse du besoin puis ensuite de conception générale occupent une place importante dans les projets inventifs ou innovants (Figure 18). Les innovations qui en découlent sont de type radical. Dans ce cas le problème de conception est alors entièrement remis à plat.

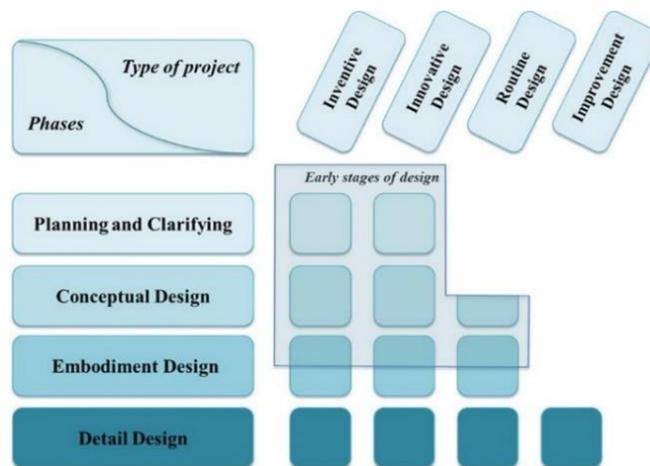


Figure 18 Impact des phases amont sur la typologie d'innovation extrait de [63]

C'est donc à la fois pour l'importance des coûts qu'elles conditionnent mais aussi pour leur importance pour le développement d'innovation radicale de produit que nous focalisons par la suite nos travaux sur ces phases de conception préliminaire.

3.1.4 Importance des représentations intermédiaires.

Les Objets Intermédiaires (OI) sont décrits par Vinck [64], comme « des traces de l'émergence du produit et de la construction progressive à la fois du problème et de la solution ». Ces OI vont permettre, pour chaque phase du processus de conception, « d'évaluer le futur produit, d'identifier les erreurs, de stimuler le dialogue entre les différents acteurs ou d'aider à la prise de décision » [65]. Cependant la notion d'OI peut être considérée comme ambiguë car le terme objet renvoie à une représentation physique d'un produit, alors même que pour Vinck, les OI portent « sur les processus en amont et sur les projections en aval du [produit] ». C'est pourquoi Bouchard, et al. [66] lui préfèrent le terme de Représentations Intermédiaires (RI) en s'appuyant sur le fait que les OI peuvent être non seulement physiques mais aussi numériques et permettent de matérialiser et échanger une représentation mentale du produit. C'est donc ce terme que nous choisissons de privilégier pour la suite de notre manuscrit.

Mer, et al. [67] associent aux RI « une perspective de développement d'outils permettant l'intégration des métiers dans la conception ». Pour Boujut and Blanco [68], les RI possèdent trois caractéristiques distinctes :

- La médiation, c'est-à-dire l'aptitude à permettre la communication entre deux acteurs du processus de conception.
- La transformation, c'est-à-dire la possibilité d'utiliser des connaissances afin de faire passer le produit d'une forme à une autre.
- La représentation. Qu'elle soit du produit ou du processus de conception, elle véhicule la dimension symbolique et cognitive de l'individu qui la crée.



Figure 19 Classification et fonction des RI dans le processus traditionnel selon Bouchard, et al. [66]

Mougenot [69] synthétise ces différents éléments en précisant que les RI sont directement liées aux processus cognitifs individuels et collectifs. Si le caractère changeant des RI, menant des 1^{ère} idées au produit fini, a fait l'objet de nombreux travaux, seuls quelques-uns ont cherché à les situer dans

le processus de conception. C'est pourquoi nous nous intéressons plus particulièrement aux travaux de Bouchard, et al. [66], Pei, et al. [70] qui divisent les RI produites en différentes familles :

- Sketches, dessins, modèles et prototypes pour Pei, et al.
- Brief, sketch, dessins, modèles et CAO pour Bouchard, et al.

Pour ces auteurs, chaque famille ou catégorie de RI, du fait d'un niveau d'abstraction plus ou moins élevé (Figure 19) ne peut être produite que lors de certaines phases du processus et ne sont donc porteuses que d'un nombre limité de caractéristiques du produit à concevoir. La Figure 20, extraite de l'outil ID Cards développé par Pei, et al. [70], illustre les informations (phase concerné, activité à l'origine de la RI, nature des informations disponibles, forme usuelle employée, ...) véhiculées par les RI, dans le cadre de la création d'un outil permettant la construction d'un langage commun entre les designers industriels et les ingénieurs.

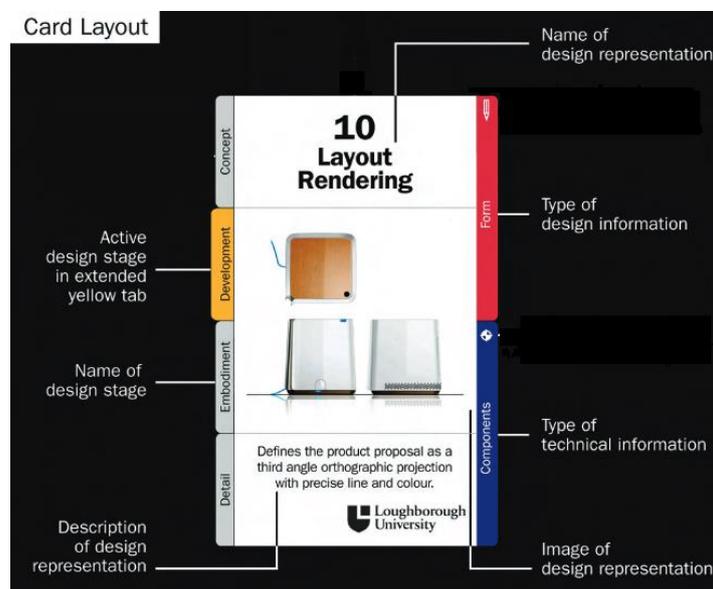


Figure 20 Typologies des informations véhiculées par une RI selon Pei, et al. [70]

Nous retenons que les RI ont pour rôle de donner une vision commune du produit pour à un stade donné du processus de conception. En cela nous rejoignons le point de vue de Mer, et al. [67] pour qui les RI « parlent de la conception [et] sont significatifs du processus de conception sans séparer son organisation de son contenu ».

A l'issue de l'analyse de ces différents travaux, nous proposons d'utiliser la notion de « RI clé » pour définir, parmi l'ensemble des RI produites lors d'une étape du processus de conception, celles qui marquent la fin d'une phase de conception et sur lesquelles sont prises les décisions. Cette notion de RI clé nous permet avant tout d'associer sous une appellation plus générique, sans avoir à en décliner les différentes catégories, des RI dont les se focalise sur un même niveau de concrétisation du produit. Dans le cas des phases amont du processus de Pahl and Beitz auquel nous nous intéressons, nous identifions trois RI clé différentes encadrées en vert dans la Figure 22 ci-dessus : le cahier des charges, le concept et l'architecture préliminaire.

- *Le cahier des charges* : il s'agit du livrable de la phase d'analyse du besoin. Il correspond avant tout à une représentation du produit en termes d'exigences à respecter.
- *Le concept* : il est produit à l'issue de la phase de conception générale et est destiné à donner une description générale du produit à la fois sous une forme visuelle à l'aide de schémas (forme, couleurs, ...) et mais aussi textuelle grâce à des descriptifs du principe de fonctionnement, un listing des avantages ou inconvénients, ... L'une de ses représentations les plus courantes est la fiche concept (Figure 21).

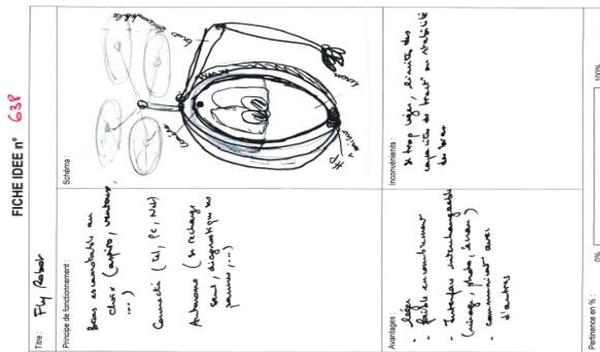


Figure 21 Exemple de fiche concept (produite au cours de l'expérimentation 1)

- *L'architecture préliminaire* : elle correspond au livrable attendu au terme de la conception préliminaire. Elle permet de traduire l'organisation des différentes entités constituant le concept et intègre les 1^{ères} notions de fabricabilité et de rendu réaliste. Toutefois des modifications sont encore possibles par la suite lors de la phase de conception architecturale à l'issue de laquelle l'architecture définitive devra être produite.

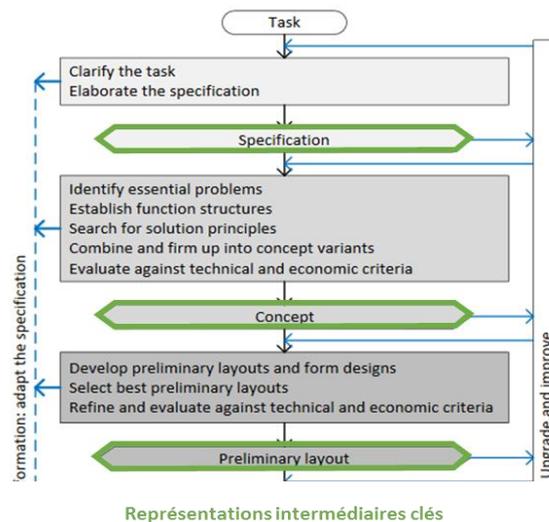


Figure 22 Place des RI clés des phases amonts du processus de conception de Pahl and Beitz [6]

Nous venons de décrire le rôle des RI et leur intérêt dans le jalonnement du processus de conception. Nous allons dans le prochain paragraphe nous intéresser à la créativité et à son impact sur les activités de conception.

3.1.5 Créativité en conception.

Les activités de conception peuvent être scindées en deux catégories : divergentes et convergentes [5, 40] et se répètent tout au long du processus de conception [71].

- Les activités divergentes permettent la conception au sens strict. Elles sont destinées à générer un grand nombre de solutions pour le problème posé dont le niveau de précision variera en fonction de l'avancement dans le projet (idées, concept ou architecture). On parle alors d'activités dédiées au « design making ».
- Les activités convergentes ont pour rôle la prise de décision par le concepteur. Elles permettent d'évaluer parmi les solutions générées celles qui respectent les critères objectifs fixés lors de la clarification du problème. On parle généralement de « decision taking ».

Un cycle d'activités divergentes et convergentes conduit ainsi à la création d'une RI (Figure 23).

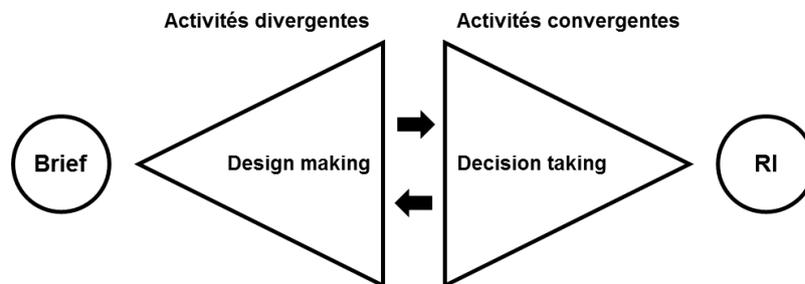


Figure 23 Cycle d'activités divergentes et convergentes adapté de [71]

Nous restreignons ici notre étude aux seules activités de design making dont le rôle essentiel est la production de solutions créatives ou « creative outputs » [53], c'est-à-dire de solutions considérées selon les auteurs comme des propositions nouvelles [5, 72, 73], originales [73, 74], appropriées [72], inattendues [5, 74] ou encore non évidentes [53]. On notera que les adjectifs employés ici pour caractériser une solution créative font écho au terme de nouveauté qui caractérise lui en partie l'innovation. Nous pouvons donc établir un lien entre innovation et créativité que Bonnardel [75] contribue à renforcer. En effet pour l'auteur, la créativité « joue un rôle crucial [lors du processus de conception], dans les étapes initiales ou conceptuelles, au cours desquelles le concepteur définit, dans les grandes lignes, les caractéristiques du produit qu'il doit élaborer ». Or nous l'avons vu, l'innovation se joue au cours des phases préliminaires sur lesquelles influe la créativité. Nous pouvons donc conclure qu'il n'y a donc pas de solutions créatives sans créativité et de façon plus large pas d'innovation sans créativité.

A partir de ce constat, il nous a semblé pertinent de nous intéresser aux facteurs qui peuvent influencer cette créativité. Pour trouver des éléments de réponse, nous nous sommes basés sur les travaux de Lubart, et al. [74], Amabile [73] et Li, et al. [76].

Selon Lubart, et al. [74], il existe quatre types de ressources distinctes qui sont nécessaires à l'émergence de la créativité lors de cette réflexion :

- les facteurs cognitifs tels que l'intelligence ou les connaissances

- les facteurs conatifs c'est-à-dire la personnalité de l'individu ou sa motivation,
- les facteurs émotionnels
- l'environnement

Pour Amabile [73], la créativité d'un concepteur est influencée par trois paramètres distincts :

- la motivation,
- les compétences liées au domaine, on retrouve ici la notion de facteurs cognitifs au sens de Lubart.
- les compétences liées à la créativité

Enfin, dans leur travaux, Li, et al. [76] proposent une mise en équation de la créativité C lors de la conception dans laquelle interviennent 6 variables différentes et telle que $C = f(K; I; TS; M; T; F)$ où :

- K est la connaissance. On retrouve ici le point de vue de Mumford, et al. [77] pour qui « les connaissances et les règles d'application de ces connaissances contribuent à augmenter la capacité créatrice ».
- I l'information
- TS la réflexion propre au concepteur (ou thinking style)
- M les méthodes de conception
- T les outils numériques supports de la conception
- F les facteurs non maîtrisés tels que les facteurs conatifs ou encore environnementaux évoqués par Lubart ou Amabile.

Ces différents travaux nous permettent ainsi de mettre en avant les différents leviers sur lesquels les concepteurs peuvent agir afin d'améliorer la créativité lors de leur activités de conception et donc à terme l'innovation.

Cependant, parmi les différents leviers que nous avons présentés, il apparaît que les bouleversements issus de l'apparition récente de la FA, vont avoir un impact avant tout sur les facteurs cognitifs propres à l'individu et dans une moindre mesure sur les facteurs conatifs. C'est pourquoi, il nous semble indispensable de nous focaliser plus spécifiquement, lors de la suite de nos travaux sur les variables « connaissance » et « information ». Le prochain chapitre sera d'ailleurs consacré à l'intégration des connaissances dans le processus de conception.

3.1.6 Synthèse et positionnement

A l'issue de notre état de l'art sur le processus de conception de produits, nous retenons les éléments suivants :

1. Parmi les Design Theories and Methodologies (DTM), les méthodologies de conception sont les seules qui décrivent le processus de conception sous un aspect concret et général, tout en étant industriellement utilisés.
2. Pour permettre son utilisation, une méthodologie doit être supportée par un modèle dont le rôle est de décomposer la démarche de conception en phases permettant de passer du problème à la solution, puis en étapes définissant les jalonnements nécessaires au sein des phases et enfin en activités qui permettent la réalisation des étapes.
3. Les phases amont de conception sont les phases les plus importantes du processus de conception car c'est à ce moment que les décisions les plus importantes pour le développement de la solution sont prises.
4. L'utilisation de Représentations Intermédiaires clés permet d'identifier la progression de la conception et donc le jalonnement dans le processus.
5. Les activités de conception sont de deux types : divergentes et convergentes. Elles jouent un rôle primordial dans la recherche et le développement des solutions et sont directement liées à la créativité du concepteur. Cette dernière est quant à elle influencées par différents facteurs : cognitifs, conatifs, émotionnels et environnementaux.

Ces différents éléments nous ont amenés à adopter le positionnement suivant :

Nous pensons que les méthodologies de conception et leur transcription sous forme de modèles sont à privilégier pour décrire le processus de conception car elles l'abordent comme une démarche organisée et jalonnée, aisée à comprendre par les concepteurs. Ainsi nous considérons que le modèle proposé par Pahl and Beitz satisfait à ces exigences et peut servir de support à nos travaux.

Les enjeux de l'innovation nous amènent à porter notre action en priorité sur les phases amont du processus de conception.

Il nous paraît intéressant d'utiliser des RI clés dont la signification est compréhensible par tous les profils de concepteurs pour matérialiser le jalonnement de la conception.

Enfin nous considérons que l'utilisation des connaissances nouvelles issues de la FA peut servir à améliorer la créativité dans la mesure où elles vont directement influencer les compétences du concepteur par le biais des facteurs cognitifs.

Dans cette partie, nous avons successivement présenté les éléments du processus de conception sur lesquels nous devons porter notre attention en vue de favoriser l'innovation en conception. Puis nous avons introduit La prochaine partie de notre état de l'art sera consacrée à la place occupée par les connaissances au sein même du processus de conception.

3.2 La connaissance : une ressource clé du processus de conception

Dans le chapitre précédent nous avons identifié la connaissance comme l'une des pistes possibles pour augmenter la créativité des concepteurs dans le processus de conception. Ce chapitre sera destiné à apporter un éclairage précis de l'impact actuel de la connaissance dans le processus de conception.

Nous cherchons pour cela dans un 1^{er} temps à proposer une définition de la connaissance tout en cherchant à souligner la relation étroite existant entre connaissance et information et en en présentant les différentes typologies. Puis nous montrons pourquoi la connaissance est devenue aujourd'hui une ressource indispensable à l'organisation de la conception. Ensuite, nous présentons les spécificités des méthodologies de conception destinées à utiliser de manière efficiente la connaissance dans la conception. Enfin, nous nous intéressons plus particulièrement au Knowledge Management afin d'identifier les démarches permettant de repérer puis mettre à disposition les connaissances utiles à la conception dans des méthodologies ou des outils. A l'issue de ce chapitre, nous dressons une synthèse et présentons le positionnement qui sera le nôtre pour la suite du document.

3.2.1 Définition de la connaissance

3.2.1.1 Le triplet donnée / information / connaissance

Avant de nous intéresser à la gestion des connaissances et à leur intégration, il nous semble indispensable de définir précisément ce qu'est la connaissance. Pour cela nous commençons par faire la distinction entre les 3 termes suivants : donnée, information et connaissance [78-80].

- La donnée est un élément brut (lettre, chiffre, symbole, mot, ...)
- L'information correspond à une (ou des) donnée(s) placée(s) dans un contexte particulier. Elle est donc organisée, structurée et porteuse d'un contenu plus riche que les données. Enfin, sa signification est liée au contexte.
- La connaissance résulte de la rencontre d'une information avec un individu. Il doit donc y avoir appropriation et interprétation de l'information par un individu pour pouvoir parler de connaissance.

En lien avec ces notions de donnée, information et connaissance, deux différents modèles hiérarchiques de la connaissance existent [81-84] : knowledge seeker et knowledge creator.

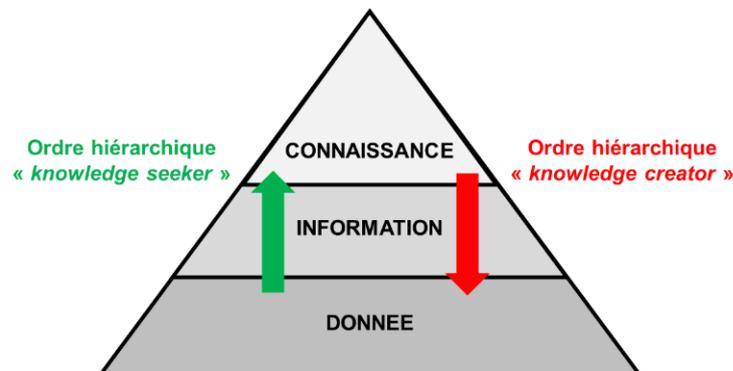


Figure 24 Modèles hiérarchiques de la connaissance

Le modèle *knowledge seeker* est le modèle hiérarchique traditionnel. Il s'appuie sur le postulat selon lequel la connaissance se construit. Il s'agit d'une approche ascendante de la connaissance (représentée en vert sur la Figure 24) dans laquelle il est donc d'abord nécessaire de disposer d'une donnée pour pouvoir obtenir une information. C'est seulement lorsque l'information existe que la connaissance peut apparaître. Cette approche peut être illustrée à l'aide de l'exemple suivant :

- « 6°C » est une donnée brute qui ne peut être interprétée en dehors de tout contexte. Il peut très bien s'agir de la température de l'océan comme de celle d'un frigo. « 6°C » n'a donc pas de sens en soi.
- « La température extérieure de l'air est aujourd'hui de 6°C » constitue une information : elle correspond à une contextualisation de notre donnée initiale. On sait ainsi où, quand ou encore comment la mesure de notre donnée a été réalisée.
- La connaissance ici correspond à l'interprétation de l'information par un individu : « une température extérieure de l'air de 6°C aujourd'hui est trop froide ». De là il en découle une action spécifique : « il est nécessaire de prendre un manteau pour sortir ».

A l'opposé de ce modèle ascendant de la connaissance, le modèle *knowledge creator* correspond à une approche descendante de la connaissance (représentée en rouge sur la Figure 24). Ainsi il traduit le fait qu'une connaissance utilisée pour réaliser une activité donnée peut elle-même générer de nouvelles informations qui pourront être retranscrites en données.

De ces deux modèles nous retenons que la connaissance s'inscrit dans un processus dynamique dans lequel elle est à la fois le résultat d'une interprétation situationnelle d'éléments formalisés mais est aussi à l'origine de la formalisation de nouveaux éléments.

Ce qui signifie que la connaissance n'est pas unique mais plutôt protéiforme puisque plusieurs formes de connaissances coexistent. C'est ce que nous allons détailler dans le prochain paragraphe.

3.2.1.2 Typologies de connaissances

Les travaux de Grundstein [1] ou Nonaka [85] permettent de distinguer différentes formes de connaissances et proposent une classification en 2 catégories : explicite ou tacite.

- La *connaissance explicite* (ou savoir) peut être exprimée de façon non ambiguë. Elle peut être formalisée de manière tangible dans un document ou un système informatique et est transférable. Elle peut être à base de règles (rule based) lorsque sa transcription se fait au travers de règles, routines ou procédures ou à base d'objet (object based) lorsqu'on utilise des mots, des chiffres ou des schémas pour la traduire.
- La *connaissance tacite* est subjective et implicite. Elle comporte d'une part une composante cognitive liée à la perception de l'environnement par l'individu et d'autre part une composante technique liée au développement d'un savoir-faire dans le cas de contextes spécifiques. Elle appartient aux représentations mentales ou au vécu, elle regroupe généralement les compétences innées et acquises d'un individu ainsi que son savoir-faire et son expérience. Sa principale particularité demeure d'être difficilement formalisable et sa transmission en est donc aléatoire.

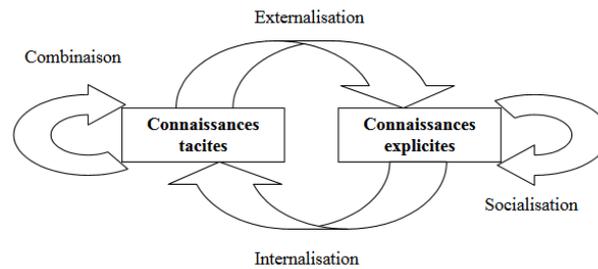


Figure 25 Modes de création des connaissances selon Nonaka [85]

Grundstein et Nonaka expliquent également que les connaissances de l'entreprise se construisent grâce à plusieurs modes de transfert entre les connaissances explicites et les connaissances tacites (Figure 25) :

- La socialisation permet la création d'une connaissance tacite à partir d'une connaissance tacite grâce au partage d'expériences. Elle nécessite donc une interaction entre des individus qui ne peuvent ou ne savent pas expliquer aisément leur savoir-faire.
- L'externalisation permet la transformation d'une connaissance tacite en une connaissance explicite. Pour y parvenir elle s'appuie sur l'utilisation de métaphores, d'analogies ou encore de modèles et nécessite le dialogue entre les individus.
- L'intériorisation peut s'assimiler à un processus d'apprentissage : c'est l'accumulation de connaissances explicites qui favorise l'apparition de connaissances tacites. Nous plaçons ici la notion d'expertise.
- La combinaison permet de réorganiser des connaissances explicites en de nouvelles connaissances explicites.

Parmi ses modes de transferts, l'externalisation et l'internalisation sont ceux qui retiennent notre attention. En effet, dans le cadre de nos travaux focalisés sur l'innovation techno-push ces deux modes vont permettre la mise à disposition à des concepteurs de connaissances nouvelles pouvant augmenter leur capacité d'innovation :

- Tout d'abord en permettant, par une approche knowledge creator, de transcrire les connaissances explicites détenues par les experts du domaine étudié en informations compréhensibles et exploitables par les concepteurs : c'est l'externalisation.
- Puis en veillant à l'accessibilité des informations issues de l'externalisation afin que les concepteurs puissent enrichir leurs connaissances par une approche knowledge seeker: c'est l'internalisation.

Toutefois cette distinction entre les typologies de connaissances et les modes de transfert qui y sont liés ne reflètent pas l'usage même de la connaissance dans le processus de conception de produits. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés aux travaux de Fu, et al. [86] qui proposent de distinguer quatre catégories de connaissances utiles à la fois aux activités de design making et de decision taking d'un processus de conception (Figure 26). Cette classification que nous allons détailler fait également écho à la notion de « process knowledge » proposée par Chandrasegaran, et al. [84] :

- La connaissance humaine correspond à la connaissance propre aux acteurs de la conception. Elle se traduit par exemple par des compétences, de l'expérience ou encore de la créativité. Elle est une composante fondamentale de la connaissance de l'entreprise car elle est à la fois la source de l'innovation et la source des nouvelles connaissances.
- La connaissance technologique fait référence à la connaissance portée par l'aspect pluridisciplinaire de la conception.
- La connaissance procédurale permet d'apporter les éléments organisationnels nécessaires à l'activité de conception tels que l'organisation ou la structuration du processus.
- La connaissance du marché représente la connaissance de l'environnement du projet de conception (clients, partenaires, fournisseurs, ...). Elle se compose de la connaissance des circuits de commercialisation, les relations clients et la force et la fidélité de ceux-ci. La connaissance du marché est indispensable au concepteur pour comprendre les enjeux exacts de la conception.

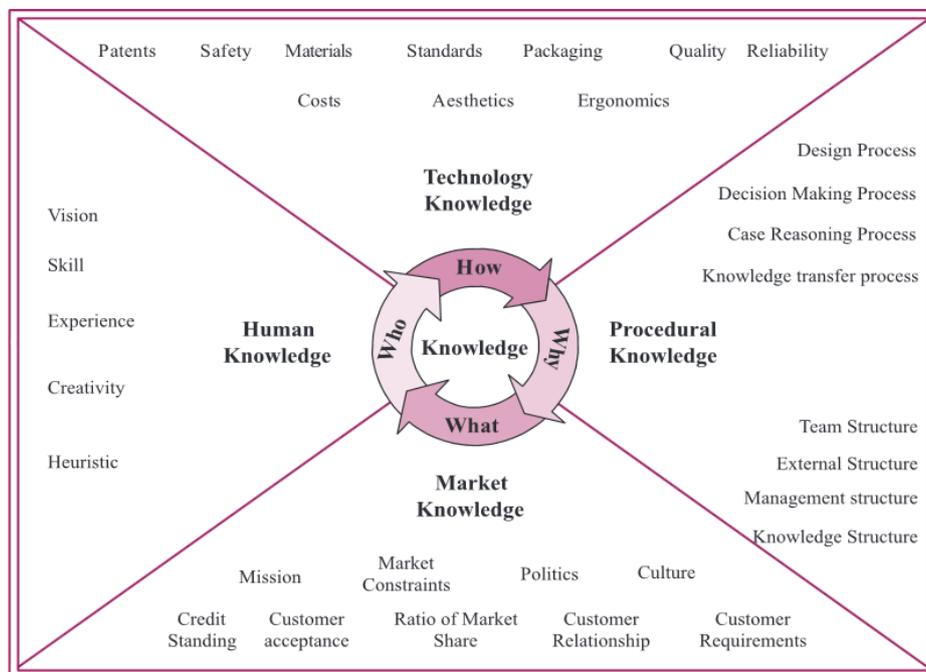


Figure 26 Typologies de connaissances selon Fu, et al. [86]

Parmi les catégories décrites par Fu, et al. [86], nous pensons que :

- les connaissances détenues par les experts d'une innovation technologique sont avant tout des connaissances procédurales et technologiques dont l'externalisation va permettre la mise à disposition d'informations à des non spécialistes (novices).
- l'internalisation des informations par ces mêmes novices aura avant tout une influence sur la connaissance humaine du concepteur et par voie de connaissance sur sa créativité.

Les différents points abordés dans ce paragraphe nous permettent de retenir qu'il n'existe pas une connaissance unique mais bien une connaissance protéiforme. Ayant défini ce que nous entendons par connaissance, nous allons maintenant nous intéresser aux raisons qui poussent à intégrer toujours plus de connaissances dans la conception.

3.2.2 Evolution des besoins en connaissance dans le processus de conception

3.2.2.1 De la conception séquentielle ...

Jusqu'au milieu du 20^{ème} siècle, une seule personne pouvait concevoir entièrement un produit en s'appuyant sur ses propres connaissances des différentes phases du cycle de vie et des exigences qui en découlent. Or la complexification des produits et les débuts de l'industrialisation de masse ont conduit à partager cette conception entre différents acteurs, donnant naissance à la conception (ou ingénierie) séquentielle et pluridisciplinaire. Chaque partie prenante dispose d'une partie de la connaissance nécessaire au développement du produit.

Comme le souligne Darses [87], en complément de la prise en compte des connaissances sur le cycle de vie [88], d'autres métiers sont nécessaires et apportent un éclairage nouveau à la conception. Ainsi l'ergonomie, le design industriel, la psychologie ou encore le marketing sont également devenues des parties prenantes indiscutables car elles apportent leurs connaissances sur « l'usage des ressources techniques, la prise en compte des contraintes organisationnelles, la démarche cognitive de résolution des problèmes, [ou encore] la conduite des relations sociales ».

Pahl and Beitz [6] soulignent quant à eux l'importance du travail pluridisciplinaire dès la conception préliminaire pour qui, selon Cross [51], l'ensemble des aspects du problème doivent être étudiés conjointement.

Nous retiendrons pour la suite de nos travaux les trois expertises clés du processus d'innovation définies par Broberg [89] : l'ingénierie, le design industriel et de l'ergonomie de produit.

La conception moderne nécessite certes l'intégration de métiers différents mais son déploiement de façon séquentielle implique un cloisonnement des connaissances qui conduit à travailler « throw over the wall » [90] :

- un acteur du processus ne peut travailler que si celui le précède a terminé son activité
- il n'existe pas de considération pour ceux qui interviennent après (flèches vertes Figure 27) ni de feed back vers les niveaux amont (flèches rouges Figure 27). Dès lors les décisions sont prises sans concertation et les problèmes de conception sont découverts tardivement et les modifications nécessaires pour les résoudre se révéleront coûteuses.

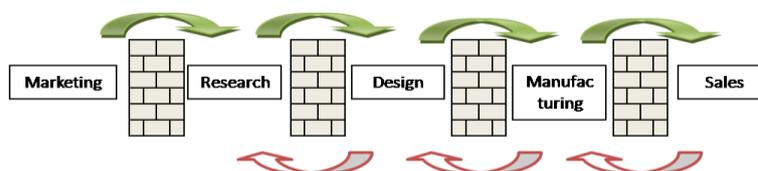


Figure 27 Limites de l'ingénierie séquentielle

On comprend alors aisément que, dans un contexte de mondialisation des marchés, de diminution des temps de cycle ou de la taille des séries, l'ingénierie séquentielle s'est rapidement révélée inadaptée à l'augmentation constante des connaissances mises en jeu en conception. Il convenait donc de parvenir à mobiliser de manière efficace des connaissances issues de disciplines variées, c'est le rôle de la conception collaborative.

3.2.2.2 ... A la conception collaborative

A la fin des années 1990, sous l'impulsion de Winner, et al. [91] et de Sohlenius [92], apparaît la conception concourante, également connue sous la dénomination d'ingénierie simultanée [93] ou d'ingénierie intégrée [94]. Son objectif est alors la réduction du temps de développement des produits grâce à la facilitation des interactions entre les acteurs (Figure 28).

Comme le souligne Lonchamp [95], ces interactions entre les parties prenantes sont possibles car :

- les différents acteurs se partagent une tâche globale, doivent coopérer ensemble et se coordonner afin de travailler en même temps. La réalisation des activités de conception se fait donc en parallèle.
- « tous les éléments du cycle de vie du produit, de sa conception à son retrait du marché, y compris la qualité, les coûts, la planification et les besoins des utilisateurs » [91] sont pris en compte simultanément et conjointement. Il s'agit donc de la notion d'intégration, c'est-à-dire l'association de différents points de vue et de différents types de connaissances dans les activités de conception.

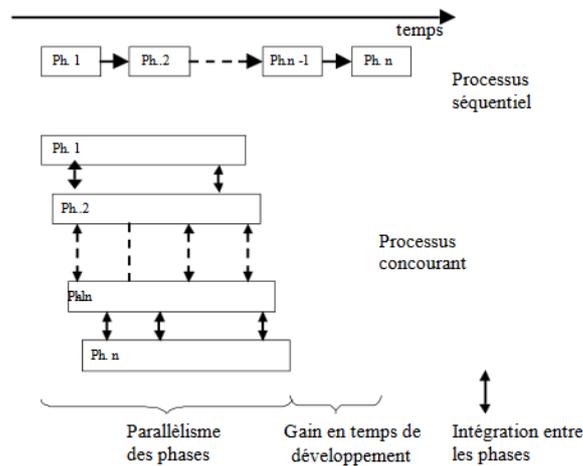


Figure 28 Principe de l'ingénierie concourante selon Lonchamp [95]

Pourtant, cette organisation de la conception a elle aussi montré ses limites car la coopération implique un partage des tâches à réaliser pour lesquelles la responsabilité de chacun se limitera aux seules tâches à accomplir et la coordination exclue quant à elle de se préoccuper des temps alloués au projet global pour se focaliser uniquement sur la réalisation de l'activité.

Aussi la conception collaborative a aujourd'hui supplanté la conception concourante car elle supprime la distribution des activités au profit de la co-conception où les interactions entre les acteurs sont permanentes et la responsabilité est collective. Il s'agit donc d'aller au-delà de coopération et de coordination au profit de la collaboration : chacun amène ses connaissances dans le but de réaliser conjointement la tâche et l'objectif fixé (Figure 29).

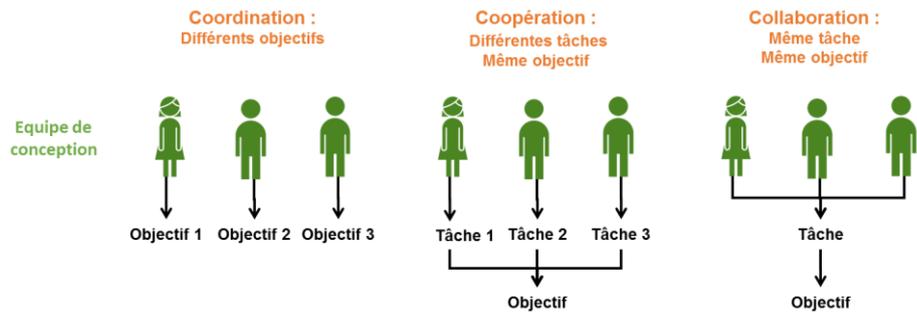


Figure 29 Différence entre coordination, coopération et collaboration

Au-delà donc de son impact sur la créativité des concepteurs, on voit donc que la connaissance quelle que soit sa typologie est devenue une ressource essentielle à la conception collaborative qui être mise à disposition de tous. Dans les processus de conception actuels, la gestion des données techniques et des flux de travail est généralement réalisée par des solutions PLM (Product Lifecycle Management) [56, 96].

3.2.3 Déploiement des connaissances en conception

Pour réussir à concevoir et produire des produits qui satisfont des besoins différents et répondent aux contraintes imposées par le cycle de vie du produit, les entreprises doivent utiliser de manière efficiente les connaissances disponibles dans l'environnement PLM.

Dans ce contexte, le Design For X (DFX) ou en français « conception en vue de X » et le Design With X (DWX) ou « conception avec X » ont émergés comme des approches prometteuses pour utiliser les connaissances au cours du processus de conception. Ce paragraphe cherchera à caractériser successivement ces deux approches.

3.2.3.1 Le Design For X

La stratégie Design For X (DFX ou DFX shell) est apparue au cours de la 2^{ème} guerre mondiale du fait de la nécessité de produire rapidement, en équipes interdisciplinaires, l'armement utile à la guerre [97] [98]. Cependant le DFX n'a réellement pris tout son sens que dans les années 1960. En effet, à cette époque, les entreprises constatent que les guidelines (ou règles de conception) peuvent être utilisées comme des aides à la conception et décident d'en mettre en place afin d'améliorer la fabrication des produits. Ces guidelines doivent alors être intégrées par les concepteurs dès le début du processus de conception. L'une des entreprises précurseurs dans ce domaine est General Electric avec la mise en place en interne de son Manufacturing Productivity Handbook [90].

Dès lors, des avancées significatives ont lieu avec l'apparition du Design for Assembly (DFA) dont les bases ont été posées avec l'Hitachi Assemblability Evaluation Model et le Boothroyd Dewhurst DFA [90]. Le DFA permet d'aborder la conception avec le point de vue de l'architecture produit. Il vise à intégrer les contraintes d'assemblage dès le choix des liaisons cinématiques entre organes et composants. Les succès du DFA sont tels qu'ils conditionnent l'émergence de nouvelles méthodes de conception orientées vers des objectifs spécifiques : conception pour la fabrication, conception pour l'environnement, ... et amenant à l'apparition d'un terme générique: le Design for X.

Selon Meerkamm and Koch [99], le DFX se compose de diverses approches dont le point commun est le bénéfice retiré à l'issue de son déploiement. En nous référant aux travaux de Huang [97] et Kuo, et al. [100], nous citerons parmi les avantages à déployer aujourd'hui une approche DFX :

- L'amélioration de la compétitivité (qualité, time to market, ...),
- L'aide à la rationalisation des décisions
- L'augmentation de l'efficacité opérationnelle du concepteur

Dès lors, on comprend l'intérêt considérable porté au DFX. Pourtant, malgré un consensus sur l'intérêt à l'utiliser, le DFX ne peut être caractérisé de façon unique. En effet, suivant les points de vue adoptés et présentés ici du plus particulier au plus général, le DFX peut être considéré comme [99] :

- une orientation spécifique de la conception vers l'objectif unique X. Une caractérisation de cet objectif X a été proposée par Huang [59] et Tichem and Storm [101] et correspond à :

- une phase du cycle de vie du produit (fabrication, assemblage, maintenance, recyclage, ...).
 - une propriété particulière du produit. X se définit alors comme la fonction $X = x + \text{ability}$ où « x » représente une phase du cycle de vie et « ability » caractérise la performance attendue pour le produit au cours de cette phase (fabricabilité, assemblabilité, maintenabilité, ...).
- une démarche méthodologique. Ce qui correspond à la définition du DFX proposée par Tomiyama, et al. [41] pour qui le DFX désigne l'ensemble des méthodologies ayant pour but d'améliorer le processus de conception en l'orientant vers un objectif particulier désigné par X. Le DFX en tant que démarche implique le déploiement d'un certain nombre d'actions par le concepteur afin de satisfaire l'objectif fixé. De plus le DFX pourra être déployé, suivant le niveau de détail ou de précision des données manipulées, dans n'importe quelle phase du processus de conception. Exemple : la démarche Design For Manufacturing traite aujourd'hui simultanément de plusieurs orientations telles que la qualité des produits fabriqués (orientation Design For Quality), le coût de fabrication des produits (orientation Design For Cost) ou encore la performance du système de fabrication (orientation Design For 6 Sigma).
 - un outil destiné à aider le concepteur dans le déploiement du DFX. Là encore on retiendra que pour un même objectif, différents outils peuvent être disponibles, suivant la phase de conception à laquelle ils sont destinés mais aussi suivant les indicateurs ou critères utilisés.

Les travaux de Huang and Mak [102] sur la stratégie DFX (sans distinction de l'approche considérée) révèlent l'importance de rendre explicites et disponibles l'ensemble des connaissances requises pour satisfaire les objectifs X fixés. En effet, les décisions ou les orientations prises par les concepteurs au cours d'un DFX sont étayées par les connaissances relatives à X dont ils disposent. Cela signifie donc que l'amélioration de la conception grâce à une approche DFX implique une gestion et une utilisation adaptée des connaissances manipulées.

En synthèse, nous retiendrons que la stratégie DFX vise à mobiliser puis utiliser au cours du processus de conception des connaissances permettant de focaliser les solutions de conception au sein d'un espace solution satisfaisant uniquement le problème considéré. Le DFX permet ainsi d'améliorer le processus cognitif des concepteurs grâce à une mise en avant des connaissances nécessaires mais ne s'applique que pour une considération particulière (Figure 30).

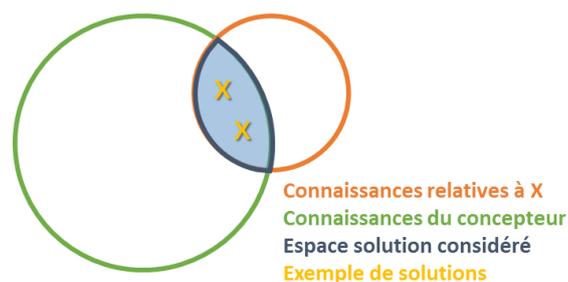


Figure 30 Champ d'action du DFX

3.2.3.2 Le Design With X

L'approche DWX, bien qu'assez peu employée dans le domaine académique, est destinée selon Langeveld [103] à concevoir une solution qui intègre les connaissances relatives à X afin d'élargir l'espace solution lors de la conception. Ainsi, par opposition au DFX, le DWX ne cherche pas à se concentrer sur un objectif spécifique, mais plutôt à exploiter des éléments issus de la considération X (ces considérations pouvant être par exemple des connaissances relatives à X ou encore des caractéristiques découlant de X).

La principale utilisation de l'approche DWX est aujourd'hui le Design With User (DWU) utilisé dans le cadre de la conception centrée sur l'utilisateur. Pour Kaulio [104] et Barre [105], le DWU permet une plus grande implication des utilisateurs finaux lors de la conception et augmente ainsi la probabilité d'acceptation du produit conçu lors de sa mise sur le marché. Ainsi en DWU, non seulement l'utilisateur est considéré comme l'objectif de conception principal (approche DF User) mais il est également associé aux décisions prises et peut ainsi réagir et influencer les choix.

Le DWX correspond donc à une approche dite cumulative des connaissances mises à disposition du concepteur. En effet, les connaissances relatives à X apportent une piste de réflexion supplémentaire et s'ajoutent aux autres connaissances du concepteur. Ainsi en DWX, la connaissance sur X est donc potentiellement utile à la recherche de solutions car elle amène à envisager des espaces solution plus vastes mais n'est pas nécessairement utilisée dans la solution qui sera retenue (Figure 31). Nous faisons ici un parallèle avec la théorie C-K d'Hatchuel and Weil [44] dans laquelle il est souligné l'importance de porter son raisonnement d'une part sur les connaissances (espace « K ») et d'autre part sur les concepts (espace « C ») afin de réussir une conception innovante. En effet, la transition du K vers C, appelé disjonction correspond parfaitement au principe du DWX dans lequel la génération de solutions alternatives est obtenue par l'extension de l'espace C avec des éléments venant de l'espace K.

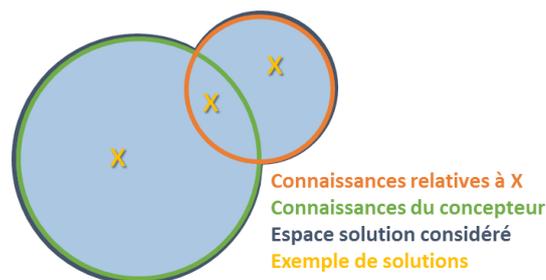


Figure 31 Champ d'action du DWX

En synthèse, nous retiendrons que le DWX vise à améliorer le processus cognitif des concepteurs en leur apportant des connaissances qui vont leur permettre d'élargir l'espace solution. La connaissance relative à X en DWX est donc extensible là où en DFX elle sera utilisée de façon exclusive.

Nous voyons ici toute la nécessité, dans ces deux approches, de gérer les connaissances touchant à des domaines X variés sous peine de submerger le concepteur d'informations au point que celles-ci ne seront pas prises en considération et seront donc inutiles. C'est pourquoi nous nous intéressons dans le prochain paragraphe au rôle du Knowledge Management.

3.2.4 Le Knowledge Management : une nécessité pour capitaliser et redistribuer des connaissances

3.2.4.1 Principe du Knowledge Management

Nous l'avons montré, les entreprises ont aujourd'hui bien intégré l'avantage compétitif que peut leur conférer une meilleure maîtrise des connaissances dans la conception collaborative de produit nouveaux. Elles s'orientent donc de plus en plus vers des approches de conception collaborative basées sur des méthodologies dans lesquelles la connaissance est une ressource clé. Pour autant il n'est encore pas rare que de nombreuses connaissances disponibles dans les entreprises soient sous utilisées ; voire inutilisées et se perdent au fil du temps lors du départ de personnels, lors de l'arrêt de projets ou encore lors de la mise en place d'une nouvelle stratégie.

Pour éviter cela, il est nécessaire que l'ensemble des connaissances qui existent soient organisées et mises à disposition des différents acteurs de la conception. Dans leurs travaux, Serrafro, et al. [106] établissent clairement la relation qui existe entre conception et connaissance et soulignent la nécessité:

- de partager les connaissances et les décisions utiles à la conception afin de permettre au groupe projet de travailler plus vite ou mieux.
- de préserver les connaissances comme élément différenciateur.

Ainsi, si la stratégie d'innovation d'une entreprise implique nécessairement de s'appuyer sur le processus de conception et la conception collaborative, elle s'inscrit dans le domaine de la gestion des connaissances ou en anglais Knowledge Management (KM), apparu dans les années 1980 aux Etats Unis. Pour Grundstein [107], le rôle du KM consiste « à orienter, organiser, coordonner et contrôler les activités et les processus destinés à amplifier l'utilisation et la création des connaissances au sein d'une organisation ».

Pour Chyi Lee and Yang [108], le KM correspond à un ensemble d'éléments opérationnels et organisationnels qui aide les individus à mieux mobiliser leurs connaissances afin d'améliorer leur créativité et leur capacité à proposer des idées créatrices de valeurs. Pour ces auteurs, il existe donc une corrélation entre la capacité à manager les connaissances et la capacité d'innovation dans une organisation. Ce lien peut aisément s'expliquer par le fait que, dans la société actuelle, chaque individu est submergé d'informations et n'est plus toujours en mesure de repérer les connaissances indispensables à la réalisation de sa tâche, réduisant de fait sa capacité à proposer des solutions créatives. Le KM a donc entre autres, vocation à faciliter l'utilisation des connaissances. Nous retiendrons en outre les différentes motivations établies par Michel [109] qui expliquent pourquoi les entreprises s'appuient sur le KM :

- mise en place d'une démarche managériale visant à ne pas laisser les choses se faire aléatoirement ou de façon non structurée ou non méthodique
- volonté de faire mieux qu'avant ou mieux que ses concurrents
- orientation vers une approche collective plutôt qu'individuelle de la connaissance
- mise en place d'une démarche de gestion pérenne des connaissances

- volonté d'utiliser la connaissance comme un vecteur d'amélioration ou de progrès dans l'entreprise.

Afin de mieux comprendre comment fonctionne une démarche de KM, nous nous sommes appuyé sur les travaux de Rasovska [110] portant sur les activités réalisées dans le KM et ceux de Kraaijenbrink and Wijnhoven [111] s'intéressant au KM en tant que processus.

L'étude comparative de 17 modèles de KM réalisée par Rasovska [110] (Figure 32) permet de souligner l'importance des activités réalisées dans le cadre du KM. Ces activités étant pour la plupart centrées autour du cycle de vie de la connaissance depuis son apparition jusqu'à son actualisation. Selon les modèles, le nombre d'activités requises pour le KM varie de 3 pour Van der Spek and Spijkervet [112] ou Choo à 8 pour le modèle de Lai and Chu [113] que nous présentons ci-dessous :

- *Activité 1 : Initiation.* Elle correspond aux motifs déclenchant la demande de capitalisation des connaissances
- *Activité 2 : Elaboration.* Elle permet d'identifier et de collecter les connaissances
- *Activité 3 : Modélisation.* Il s'agit de structurer la connaissance pour faciliter sa restitution.
- *Activité 4 : Préserver.* Il s'agit de prévoir le stockage et la conservation des connaissances.
- *Activité 5 : Distribution.* Elle consiste à décider de la façon dont l'utilisateur va accéder aux connaissances.
- *Activité 6 : Transfert.* L'enjeu est ici le partage des connaissances
- *Activité 7 : Utilisation.* Elle vise à valoriser les connaissances.
- *Activité 8 : Révision.* Elle porte sur le maintien à jour des connaissances.

	Activités						
Structure générale (Lai & Chu, 2000)	Initiation	Elaboration	Modélisation	Préservation Stockage	Distribution & transfert	Utilisation	Révision
Wiig (1993)	Création		Manifestation		Utilisation		Transfert
Leonard-Barton (1995)		Résolution des problèmes Import et adoption des technologies		Implémentation et intégration des nouvelles méthodologies et outils		Experiments et prototypes	
Noenaka & Takeuchi (1995)	Partage des connaissances tacites	Création des concepts	Justification des concepts		Mise à niveau des connaissances	Création des archetypes	
Andersen (1996)		Identifier Collecter Créer	Organiser		Partager	Appliquer	Adapter
Choo (1996)	Donner sens	Création des connaissances				Prise des décisions	
Szulanski (1996)	Initiation			Implémentation		Accélération	Intégration
Taylor (1996)	Développement des connaissances			Utilisation des connaissances (stockage, distribution, application, révision)			
Alavi (1997)		Acquisition	Indexation Filtrage Enchaînement		Distribution	Application	
Beckman (1997)		Identifier Créer	Capturer Sélectionner	Stocker	Partage	Appliquer Vendre	
Demarest (1997)		Construction			Dissemination Incorporation	Utilisation	
Van der Spek & Spijkervet (1997)	Conceptualisation Réflexion				Action		Rétrospection
Davenport & Prusak (1997)	Déterminer besoins	Capturer			Distribuer	Utiliser	
Tannebaum & Alliger (2000)				Partage	Accès	Assimilation	Application
Rastogi (2000)	Identification Trace	Caption	Acquisition	Stockage	Partage	Application	Création des nouvelles connaissances
Probst (2002)	Identification	Acquisition	Développement		Distribution	Utilisation	Préservation
McElroy (2002)	Production des connaissances				Intégration des connaissances		
Grundstein (2000)	Détecter : Identifier Localiser	Préserver : Modéliser Formaliser Stocker		Capitaliser: Accès Diffuser Utiliser Intégrer		Actualiser Mise à jour Enrichir	

Figure 32 Activités du KM extrait de Rasovska [110]

Les conclusions de Kraaijenbrink and Wijnhoven [111] à l'issue de l'étude comparative des travaux d'une quarantaine de publications diffèrent de celles de Rasovska quant à la manière de modéliser le KM. En effet, les auteurs proposent de décrire le KM comme un processus constitués de phases regroupant en leur sein des activités.

Les phases proposées dans cette modélisation (Figure 33) sont au nombre de trois :

- l'identification du problème.
- l'acquisition des connaissances
- l'utilisation des connaissances.

Ces deux dernières phases correspondent d'ailleurs aux éléments constitutifs du méta-modèle de KM pour l'innovation proposé par Xu, et al. [114].

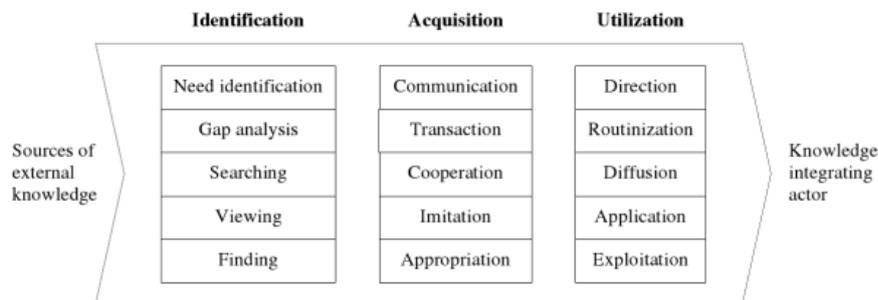


Figure 33 Modèle de KM par phases de Kraaijenbrink and Wijnhoven [115]

Ce modèle présente donc l'avantage de mettre en avant les champs disciplinaires qui vont supporter ces différentes phases et dans lesquels on retrouve :

- Le Knowledge Engineering qui couvre à la fois l'utilisation des connaissances et leur acquisition.
- Le Knowledge Base Engineering destiné exclusivement à la phase d'utilisation des connaissances et qui permet la mise à disposition (activité diffusion) des connaissances grâce au développement d'outils informatiques tels que les outils DFX de type CAX (X = O, E, ...) afin d'assister une tâche ou un travail intellectuel (activités application et exploitation).

On notera que le KM nécessite désormais le développement de KM Systems (KMS), c'est-à-dire d'outils d'information et de communication qui permettent d'améliorer l'accès et le partage des connaissances et facilitent aussi les échanges d'informations lors des activités collaboratives [116]. Notons ici le prototype KoSI (knowledge management system for innovation) proposé par Xu, et al. [117] dont l'objectif est d'aider les concepteurs à innover plus facilement et plus efficacement en mettant l'accent sur la création et l'utilisation des connaissances techniques.

3.2.4.2 La démarche de capitalisation des connaissances

Ainsi, en vue d'augmenter la capacité d'innovation des concepteurs du fait de l'apparition d'un nouveau champ de connaissances liées à la FA, il nous apparaît nécessaire de nous intéresser plus spécifiquement au processus d'acquisition des connaissances. En effet, afin d'être déployées dans les différentes méthodologies de conception, il est indispensable que celles-ci soient capitalisées.

Pour cela nous appuierons sur le modèle de Grundstein [1] qui détaille la démarche à suivre pour réussir cette capitalisation. Selon l'auteur, 5 étapes vont être nécessaires : repérer, valoriser, préserver, actualiser et manager

- Repérer consiste à identifier les connaissances tacites et explicites cruciales pour le projet. En effet, selon l'objectif visé, toutes les connaissances relatives à un thème ne sont pas utiles. Il faut être en mesure de n'identifier que celles qui sont utiles. Pour cela, il faut les localiser, c'est-à-dire identifier leurs détenteurs ou les supports sur lesquels elles ont été formalisées puis les caractériser et enfin les hiérarchiser. Selon Napoli [118] cette 1^{ère} étape est du ressort des experts et des cognitiens. L'expert est le spécialiste d'un domaine (ex : fabrication, maintenance, qualité, ...) et est en mesure de résoudre les problèmes de son domaine grâce à ses connaissances. Le cognitien quant à lui est en charge du recueil et de la modélisation des connaissances de l'expert.
- Préserver les connaissances est rendu possible en les formalisant ou en les modélisant puis en les archivant. Cette phase est réalisée par des cognitiens qui recueillent, analysent puis formalisent les connaissances qui ont été repérées par les experts.
- Valoriser les connaissances c'est les mettre à disposition et diffuser la connaissance auprès des utilisateurs potentiels c'est à dire des acteurs de la conception afin qu'ils puissent s'en servir. Cette étape sous-entend désormais de plus en plus le développement d'outils informatiques pour faciliter en faciliter l'accès.
- Actualiser la connaissance correspond à la mise à jour ou à l'enrichissement régulier de cette connaissance. Cela implique également son évaluation afin d'apporter les améliorations indispensables
- Manager la connaissance n'est pas une étape en tant que telle du cycle de capitalisation des connaissances. Elle en traduit plutôt la fin et la mise à disposition des utilisateurs des connaissances.

Nous venons de présenter les éléments fondamentaux du KM et de la capitalisation. Dans le prochain paragraphe nous présentons une synthèse de cette partie ainsi que le positionnement que nous adoptons.

3.2.5 Synthèse et positionnement

Lors de cette partie de notre état l'art centrée sur l'une des ressources clé du processus de conception qu'est la connaissance, nous nous sommes successivement attachés à en proposer une définition précise, puis nous avons justifié les raisons qui expliquent aujourd'hui l'intérêt porté à la connaissance. Nous avons ensuite expliqué l'usage qui en est fait dans les méthodologies de conception DFX et DWX. Enfin, nous avons analysé les conséquences en termes de gestion et d'organisation qu'implique l'usage de cette ressource clé.

Ces différentes analyses nous amènent donc à établir la synthèse suivante :

1. La connaissance n'existe pas de façon indépendante mais est liée au contexte d'utilisation d'une information donnée, à l'action et dépend d'une tâche à réaliser.
2. La connaissance est protéiforme. Elle peut être explicite ou tacite ; procédurale, technologique, humaine ou de marché.
3. La conception collaborative est construite sur l'échange, le partage et l'utilisation à bon escient des connaissances par le biais d'outils et de méthodes Design For X (DFX) ou Design With X (DWX).
4. La démarche générale de capitalisation des connaissances développée dans le Knowledge Management (KM) est un élément indispensable au déploiement et à l'utilisation des connaissances utiles dans les différentes approches DFX ou DWX.
5. Les innovations technologiques telles que la Fabrication Additive (FA) conduisent prioritairement à l'émergence de connaissances technologiques et procédurales détenues par des experts. Leur capitalisation et leur diffusion permettent l'enrichissement des connaissances de novices.

Ce qui nous amène à adopter le positionnement suivant :

Dans un contexte d'innovation, dont les enjeux majeurs sont essentiellement situés lors des phases préliminaires de conception, la connaissance tacite (technologique et procédurale) détenue par des experts de la FA doit être externalisée, c'est-à-dire mise sous forme explicite dans le but d'être valorisée et accessible sous forme d'informations. Cela implique la mise en place d'une démarche de capitalisation destinée à repérer les connaissances FA utiles à la conception amont et à les transcrire en informations compréhensibles et exploitables par les futurs utilisateurs.

Nous retenons également que la mise à disposition des connaissances nouvelles doit s'appuyer sur le développement d'outils numériques supports aux méthodologies DFX et DWX assurant leur déploiement.

Enfin, nous considérons que lors de la conception amont, les méthodologies DWX sont à privilégier puisqu'elles permettent d'élargir l'espace dans lequel est recherchée la solution au problème posé. C'est seulement une fois que les solutions créatives seront identifiées que l'approche DFX se révélera la plus adaptée pour assister le processus de conception (Figure 34).

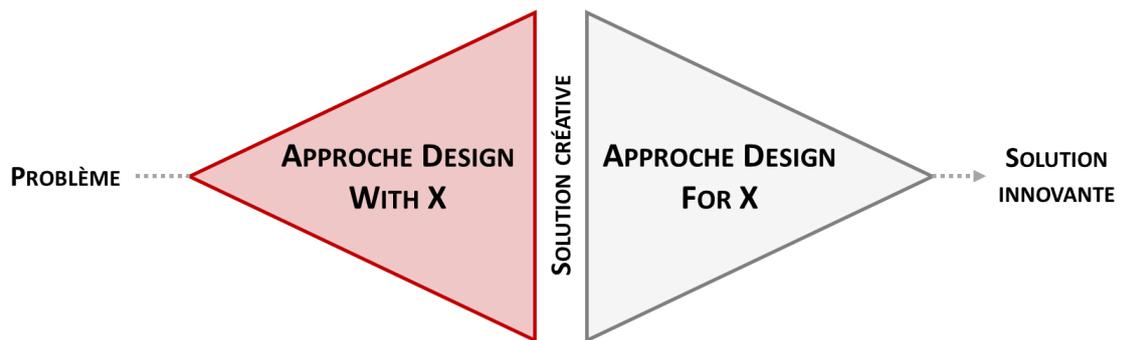


Figure 34 Ordre d'utilisation envisagé d'utilisation des approches DWX et DFX dans le processus de conception

3.3 Usage des connaissances FA dans le processus de conception

Dans cette partie de notre état de l'art nous allons dans un 1^{er} temps nous attacher à définir le concept de Design For Additive Manufacturing (DFAM). Puis nous classerons les différents DFAM en fonction des activités de conception impactées. Ensuite nous en effectuerons une étude systémique en lien avec l'innovation. Enfin nous dresserons un bilan de l'usage des connaissances FA dans le processus de conception.

3.3.1 Principe du Design For Additive Manufacturing

Du fait de la relative jeunesse du procédé FA et de sa récente utilisation à l'échelle industrielle, peu d'études ont été faites pour repenser la conception des pièces devant être fabriquées avec les techniques de fabrication par couches [39]. Face à ce constat et en s'appuyant sur les perspectives offertes par la stratégie DFM, Rosen [119] ou Bourell, et al. [24] préconisent le développement d'une nouvelle stratégie DFX dédiée au paradigme de la fabrication additive : c'est le Design For Additive Manufacturing (DFAM) ou conception pour la FA.

Selon Rosen [119], cette stratégie permet de travailler dans les zones jusqu'ici inexplorées de l'espace de conception. Le DFAM permet de « réfléchir à l'ensemble des formes, des dimensions, des géométries mésostructurées, des compositions de matériaux ou des microstructures [possibles] permettant [au concepteur] d'utiliser au mieux les capacités de la fabrication additive pour atteindre les performances souhaitées au cours du cycle de vie ». Comme nous avons pu le montrer dans le paragraphe 3.2.3.1 sur le DFX, la stratégie DFAM peut donc s'appuyer tout autant sur des outils DFAM que des méthodologies DFAM.

Selon Pahl and Beitz [6], chaque étape du processus de conception doit être évaluée et l'évaluation sert de contrôle de la progression vers l'objectif global. Face à cette affirmation, et en s'appuyant sur les travaux de Huang [97] dans le cadre du DFX, nous pouvons scinder le DFAM en deux approches (Figure 35) :

- Une approche destinée à orienter le concepteur dans sa recherche lors de sa recherche de solutions que nous appelons l'orientation conception.
- Une approche permettant l'évaluation des solutions conçues

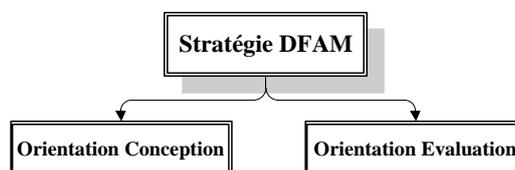


Figure 35 Classification des approches développées dans la stratégie DFAM

Ces deux orientations vont être successivement présentées puis analysées dans les deux prochains paragraphes.

3.3.2 Classification des methodologies de Design For Additive Manufacturing

3.3.2.1 Les DFAM orientées évaluation

Ces DFAM sont destinées à aider l'équipe de conception à sélectionner les solutions de conception qui devront être conservées pour la poursuite du projet. Pour cela elles sont fondées sur l'utilisation de critères d'acceptabilité tels que le coût de développement, les familles de procédé utilisables ou encore la facilité de fabrication du concept.

Là encore il est possible de faire une analogie avec les études réalisées dans un contexte de DFM [120] et de distinguer les DFAM en fonction du type d'évaluation utilisée : qualitative ou quantitative.

Les DFAM utilisant une évaluation qualitative des critères sont généralement proposées lors des phases amont de conception. En effet, à ce moment-là, les données relatives à la solution de conception sont encore peu précises et des approximations ou des estimations sont faites par le concepteur. De ce fait, il n'est pas envisageable d'utiliser des grandeurs numériques pour évaluer des critères tels que le coût, la vitesse de fabrication, les caractéristiques attendues pour les machines (état de surface, épaisseur minimale de couche) etc. car les erreurs seraient trop importantes. On leur préfère donc des évaluations de type binaire (1 ou 0) ou verbale (poor, average, good, ...) auxquelles sont associées des pondérations selon l'importance accordée à chaque critère. L'utilisation des techniques d'aide à la décision tels que l'Analytic Hierarchic Process, le Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution [121] ou encore le Decision Support Problem permettent alors d'établir un classement des solutions.

Les DFAM proposées par Lokesh and Jain [122], Byun and Lee [121] ou encore Williams, et al. [123] s'appuient sur la démarche qui vient d'être présentée et permettent ainsi d'identifier les procédés FA envisageables pour la fabrication des solutions proposées.

Les DFAM supportées par des méthodes quantitatives permettent quant à elles d'obtenir un classement plus objectif des solutions. Elles supposent alors de connaître plus précisément les différents concepts envisagés en terme de géométrie, de dimensions, de tolérances, ... Elles ne peuvent donc être déployées qu'au cours des phases avales de conception car c'est à ce moment que le concepteur définit de façon précise les caractéristiques géométriques et techniques qui serviront de données chiffrées lors des études comparatives des différents critères retenus.

Alexander, et al. [124], Ruffo and Hague [125], Hopkinson and Dickens [126] ou encore Atzeni and Salmi [127] proposent chacun des DFAM permettant de calculer puis de classer différents procédés (additif ou traditionnel) à partir des coûts de fabrication du produit. La méthode de Yim and Rosen [128] s'oriente elle vers un classement des solutions à partir des temps de production.

Pour conclure cette partie, nous retenons que quelle que soit le type d'évaluation utilisée (quantitative ou qualitative), le concepteur n'a pas vocation avec ces DFAM à remettre en question les solutions proposées. En cela, les DFAM se rapprochent donc fortement des considérations développées dans le cadre du DFM car leur objectif est uniquement l'évaluation technico-économique des solutions (généralement la fabricabilité) centrée autour des procédés FA.

3.3.2.2 Les DFAM orientées conception

Ces DFAM sont destinées à faciliter la démarche du concepteur. Quelle que soit la phase de conception à laquelle elles sont destinées, ces DFAM sont des aides pour la recherche de solutions ou l'élaboration d'une RI (numérique ou physique). Elles prennent généralement la forme de guidelines, de procédures ou d'outils à base de règles et de cas.

Il est possible d'établir une distinction parmi les approches visées par ces DFAM : approches opportuniste ou restrictive (Figure 36). Ainsi nous utiliserons les notions de DFAM Opportunité et de DFAM Contrainte proposées par Laverne, et al. [129] que nous allons détailler dans les prochains paragraphes.

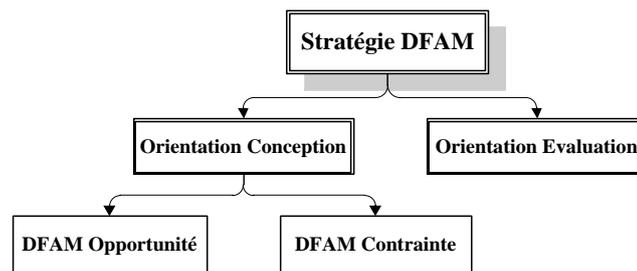


Figure 36 Place des DFAM Contrainte et Opportunité dans la stratégie DFAM

1.1.1.1.1 Les DFAM Opportunité

Les DFAM s'appuyant sur une approche opportuniste permettent au concepteur de générer les RI en s'intéressant uniquement à l'utilisation du potentiel de la FA. Leur objectif est donc d'aider le concepteur à explorer de nouveaux espaces solutions en favorisant sa créativité. Pour cela elles s'appuient sur deux principes majeurs énoncés par Hague, et al. [130] et Doubrovski, et al. [131] :

- il n'existe aucune limitation de forme ou de répartition du ou des matériaux
- le coût de fabrication d'un produit est décorrélié de sa complexité géométrique.

Par le biais de ces DFAM, le concepteur est donc amené à faire table rase de ses connaissances basées sur une approche traditionnelle de la conception et de la fabrication et à utiliser les différentes complexités (géométrique, hiérarchique, matériau) et permises par l'utilisation de la FA et que nous avons évoquées dans le paragraphe 2.1.2.3.

Parmi ces DFAM opportuniste, nous classons les DFAM permettant d'aider le concepteur à déterminer une géométrie optimisée pour la FA ou celles exploitant la mise en place de structures élémentaires de type treillis [132], cellulaires [123] ou bioniques [133] dans les produits.

Focus sur les DFAM dédiées à la recherche d'une géométrie optimisée pour la FA :

Ces DFAM sont de plus en plus utilisées aujourd'hui et sont supportées par des outils utilisant l'optimisation paramétrique [39] ou topologique [134], [119]. Leur utilisation suppose une démarche en 4 étapes synthétisées dans le Tableau 3 ci-dessus :

- Tout d'abord, le concepteur doit définir, à partir de l'analyse des spécifications et caractéristiques attendues du produit, le volume de travail.

- La 2^{ème} étape consiste à fixer les chargements ou efforts appliqués.
- L'étape suivante est la plus importante puisqu'elle consiste à rechercher la répartition de la matière satisfaisant les contraintes fixées aux deux premières étapes mais également les critères que l'on souhaite optimiser (masse, propriétés mécaniques, ...). En optimisation paramétrique, la variété des formes possibles est réduite par le nombre de paramètres retenus. Dans le cas de l'optimisation topologique, aucune restriction de forme n'existe mais le résultat obtenu imposera d'accepter une modification totale de la topologie finale de la pièce : on retrouve ici la finalité même de ces DFAM.
- La dernière étape correspond à la validation de la géométrie obtenue précédemment vis-à-vis des contraintes externes ; celle-ci pouvant utiliser des techniques de validation par calcul en éléments finis (cas des DFAM proposées par Rosen [119], Fey, et al. [134] ou Rodrigue and Rivette [135]), Boyard, et al. [136] utilisent eux des outils de prévention des défaillances.

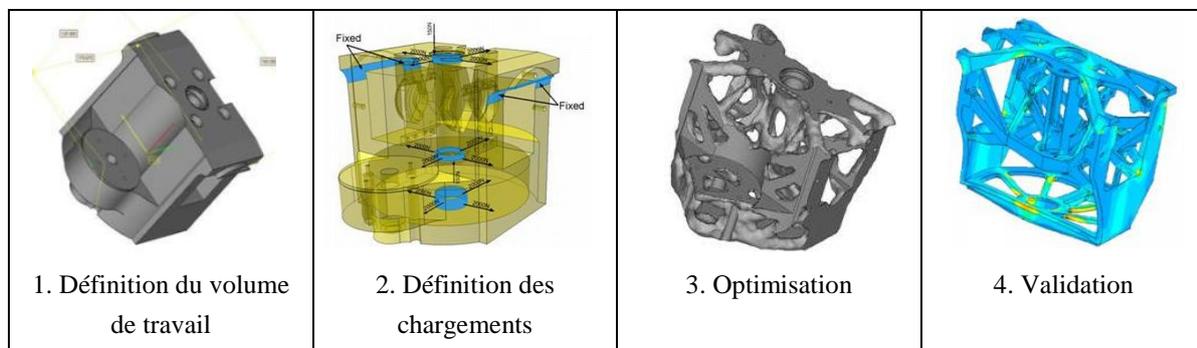


Tableau 3 Démarche des DFAM dédiées à la recherche d'une géométrie optimisée pour la FA : Application au projet Compolight. Courtesy of SIRRIS.be

Le Tableau 4 quant à lui illustre la valeur ajoutée des DFAM dédiées à la recherche d'une géométrie optimisée. Le produit conçu a été, dans le cas du projet Compolight, allégé de 26% tout en assurant le même comportement mécanique. Dans le même temps, la géométrie créée et réalisée en FA ne laisse plus en rien supposer des formes initiales ainsi que de la technologie de fabrication précédemment utilisée.



Tableau 4 Comparaison des géométries obtenues avec et sans utilisation du DFAM: Application au projet Compolight.

1.1.1.1.2 Les DFAM Contrainte

Ces DFAM s'appuient sur une approche restrictive de la FA. Leur objectif n'est donc pas, comme dans les DFAM Opportunité, d'amener le concepteur à imaginer de nouvelles solutions créatives mais plutôt de s'assurer que celles-ci sont réalistes et réalisables. Pour cela elles cherchent à apporter au concepteur des connaissances spécifiques qui vont lui permettre de tenir compte des limites de la FA. Ces restrictions portent sur des domaines variés tels que :

- Les performances et les caractéristiques des machines FA (ex : résolutions ou dimensions maximales possibles) [137]
- Les contraintes matériaux (ex : gamme disponible, compatibilité avec la technologie envisagée ou propriétés mécaniques obtenues à l'issue d'une stratégie de fabrication) [138-141]
- Contrainte processus (ex : minimisation des supports) [142].

Les DFAM Contrainte cherche donc à garantir la convergence entre le modèle géométrique nominal de la solution envisagée correspondant à une représentation idéale (sans défaut) de la RI et le skin model [143] intégrant les variations géométriques attendues ou prévues lors des processus de fabrication et correspondant donc à une représentation réaliste de la RI.

3.3.2.3 Bilan sur les méthodologies DFAM

Comme nous venons de le montrer, l'objectif des DFAM actuelles est de permettre au concepteur d'utiliser des connaissances FA pour mener à bien ses activités de conception. Pourtant, l'emploi des connaissances FA et donc la finalité de ces DFAM diffèrent selon que les activités concernées servent à la conception (activités divergentes) ou à l'évaluation (activités convergentes). Ainsi, les DFAM orientées conception sont seulement destinées à faciliter la recherche de solutions au problème posé alors que les DFAM orientées évaluation permettent de confronter les solutions envisagées aux différents critères établis lors de la définition du problème.



Figure 37 Espaces solution considérés dans les DFAM opportunité et contrainte

De plus, au sein même de l'approche DFAM conception, nous avons montré que deux orientations distinctes existent, permettant ainsi d'explorer des espaces solutions différents comme le montre la Figure 37 ci-dessus :

- Les DFAM opportunités qui aident le concepteur à développer de nouvelles solutions grâce à la FA et permettent d'investiguer l'ensemble de l'espace solution offert par la FA
- Les DFAM contraintes dont le rôle est d'utiliser les connaissances FA afin de s'assurer que la solution proposée est réaliste, et qui proposent un espace solution restreint en raison de la prise en compte de connaissances relatives à d'autres domaines que la FA.

Nous retenons enfin que les connaissances manipulées dans ces DFAM correspondent bien à des connaissances de type technologiques et procédurales, ainsi que nous l'avons souligné dans le paragraphe 3.2.1.2. Pourtant, c'est la distinction des connaissances entre les opportunités et les contraintes qui est généralement privilégiée car en lien plus étroit pour les concepteurs avec l'activité de créer.

Le Tableau 5 ci-dessous présente quelques-unes des utilisations qui sont faites de ces connaissances FA dans les différentes méthodologies DFAM que nous avons pu étudier.

Typologie de connaissance FA	Exemple de déploiement dans les DFAM
Technologique orientée matériau	Intégrer le retrait matière dans les modèles numériques Limiter l'oxydation, la reprise en eau ou le vieillissement du matériau lors du stockage Minimiser l'impact de l'anisotropie sur le comportement pièce avec une orientation de fabrication adaptée Minimiser l'impact de la position dans la chambre de fabrication sur le cycle thermique de la pièce et donc sur ses caractéristiques mécaniques et cristallines Identifier les équivalences matières entre prototype et pièce série Réduire les contraintes internes et les porosités créées lors du choix de la stratégie et des paramètres de fabrication Connaître les matières « homologuées » par leur fournisseur pour un périmètre « machines » donné Supprimer les géométries pouvant conduire à des déformations
Technologique orientée procédé	Adapter les géométries aux caractéristiques de la machine retenue (épaisseurs mini, hauteurs mini, dimensions maxi, ...) Réaliser les évidements permettant le dépoufrage Placer les pièces en fonction de la précision des axes Limiter la dispersion entre les lots en attribuant la même machine à une série Réduire l'effet marche d'escalier en choisissant une épaisseur de couche en adéquation avec la résolution maximale de la machine Choisir l'orientation de la pièce minimisant la quantité de support
Technologique orientée produit	Garantir le fonctionnement des assemblages en ajoutant le jeu fonctionnel dans les modèles numériques Fusionner les fichiers multisolides Transformer le fichier client en un fichier facettisé conforme Garantir le meilleur compromis masse / performance grâce à l'optimisation topologique

Procédurale	Simplifier les changements de série en dédiant une machine à un matériau Evider les formes pleines dans les prototypes de forme Optimiser de la densité de production en mélangeant plusieurs produits pour une même production Effectuer les arbitrages qualité / temps de fabrication en fixant les jeux de paramètres Réduire les coûts matière en modulant le taux de pureté des matériaux Garantir le respect des normes ISO 9001 et ISO EN9100
--------------------	---

Tableau 5 Exemple d'utilisation des expertises FA dans les méthodologies DFAM

Nous pensons que ces deux catégories de DFAM bien que présentant des intérêts indéniables pour la conception, se révèlent pourtant inadaptées si l'on s'intéresse au processus de conception dans son ensemble. En effet, dans le contexte de conception actuel, la tendance est à l'intégration de l'ensemble des connaissances dans le processus plutôt qu'à leur traitement de façon cloisonné. C'est pourquoi, dans la suite du document, nous allons nous intéresser aux DFAM qui proposent de combiner ces deux approches au sein d'une démarche unique : les DFAM Globales [144].

3.3.3 Etude systémique des DFAM Globales et leur lien avec l'innovation produit

Les DFAM Globales sont encore assez peu développées aujourd'hui et représentent selon Laverne, et al. [87] seulement 30% des DFAM conception existantes. Cependant leur intérêt nous apparaît très grand dans la mesure où les DFAM Globales vont permettre de structurer tout ou partie du processus de conception autour de méthodologies s'appuyant sur les connaissances antagonistes (restrictives et opportunistes) issues du domaine de la FA.

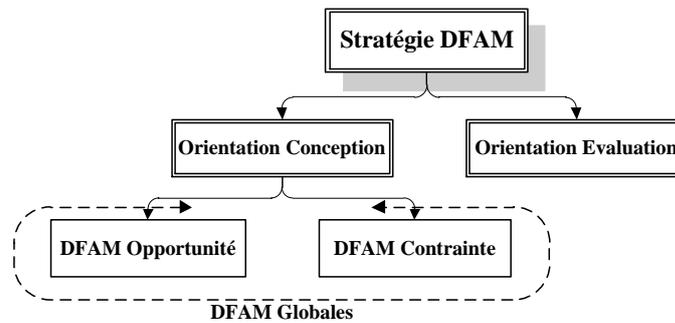


Figure 38 Place des DFAM Globales

Nous montrerons, après avoir proposé une définition systémique du produit, que ces DFAM Globales s'adressent à des niveaux systémiques de produits différents. Ce qui nous amènera à présenter puis à analyser ces différentes DFAM appelés DFAM Composant et DFAM Assemblage. Enfin nous en présenterons les limites en termes de solutions créatives développées.

3.3.3.1 Niveau systémique des produits et des catégories de DFAM associées

Un produit se définit comme un artefact technique, tangible et dénombrable, dont la propriété peut être transférée et possédant différents niveaux de complexité [6, 145]. Selon Savransky [54], un produit participe aux processus technologiques afin de satisfaire les besoins des êtres humains ou d'un autre système technique. La notion de produit est donc assez vaste. Il nous apparaît nécessaire de la définir plus précisément dans le cadre de nos travaux. Pour cela, nous retenons la classification proposée par Henderson et Clark [61] qui établissent une distinction entre le produit dans son ensemble, appelé système, et le produit en tant qu'élément constitutif, appelé composant.

Ainsi pour la suite de nos travaux, selon le niveau systémique considéré, nous définissons le produit comme :

- Un composant, appelé aussi pièce. Il correspond dans ce cas à l'élément de base d'un système et contribue à lui donner sa forme globale [61].
- Un assemblage, c'est-à-dire un ensemble de composants. Dans ce cas il possède des comportements et des propriétés qui ne peuvent pas être réduites aux seuls comportements et propriétés de ses sous-systèmes (composants) pris de façon séparée [60].

En se basant sur cette définition, nous proposons, selon le niveau systémique visé, de séparer les DFAM Globales en deux familles :

- les DFAM destinées à la conception de composant que nous nommons DFAM Composant (C-DFAM)
- les DFAM Assemblage (A-DFAM) ayant pour objectif la conception d'un produit dans son ensemble ou assemblage.

Comme l'illustre la Figure 39 extraite de Laverne, et al. [144] parmi ces deux familles, les A-DFAM sont bien moins développées que les C-DFAM (respectivement 12% et 88% des publications étudiées par les auteurs).

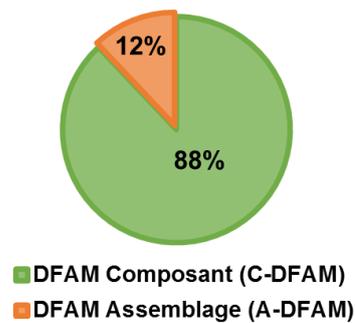


Figure 39 Répartition des DFAM globales suivant le niveau systémique du produit [144]

Dans les prochains paragraphes nous présenterons ces DFAM Globale de niveau composant et de niveau assemblage puis nous analyserons leurs implications sur l'innovation produit.

3.3.3.2 Les DFAM Composant

Ces DFAM ont pour finalité une conception adaptée et optimisée pour la FA d'un produit pris ici au sens de composant. Les méthodologies déployées pour répondre à cette finalité sont de 2 types qui se distinguent par les données d'entrées sur lesquelles elles s'appuient.

La 1^{ère} catégorie de C-DFAM correspond aux DFAM proposées par Ponche, et al. [146] (Figure 40) ou par Vayre, et al. [39] pour le procédé Electron Beam Melting (Figure 41).

Elles ont pour point de départ l'ensemble des entités géométriques fonctionnelles du composant à concevoir. Ces entités fonctionnelles ont été obtenues à l'issue de la rédaction préalable du cahier des charges du composant et servent à définir le domaine de conception.

Ces deux méthodes cherchent dans un premier temps à aider le concepteur à surmonter les freins psychologiques issus d'un mode de raisonnement s'appuyant exclusivement sur les procédés traditionnels. Pour créer une forme initiale, les auteurs proposent d'employer l'optimisation topologique ou une modélisation géométrique par entités de type peau/squelette [80]. Une direction de fabrication est à ce moment-là fixée en fonction des caractéristiques de la machine choisie. Vayre préconise d'ailleurs de travailler sur des formes sans dimension. Cela signifie que cette forme initiale ne sert qu'à fournir une topologie préliminaire pour la RI.

Ensuite une approche de type DFAM Opportunité est mise en place dans le but de faire évoluer la forme préliminaire. Cela passe par principalement une optimisation topologique, parfois par une optimisation paramétrique et conduit à une l'obtention d'une forme optimisée qui est désormais dimensionnée et respecte les contraintes produit et procédé qui ont été fixées.

L'étape suivante s'appuie sur l'approche Contrainte. Elle va alors permettre de transformer la forme optimisée en une forme finale fabricable. Elle implique des modifications géométriques liées à la prise en compte de la stratégie de fabrication et est réalisée à l'aide d'une modélisation multi-physique du procédé [146] ou de l'intégration des contraintes de finition (suppression des supports, état de surface) et des coûts de fabrication [39].

La dernière étape consiste alors en une évaluation finale de la géométrie quant au respect des performances spécifiées par le cahier des charges.

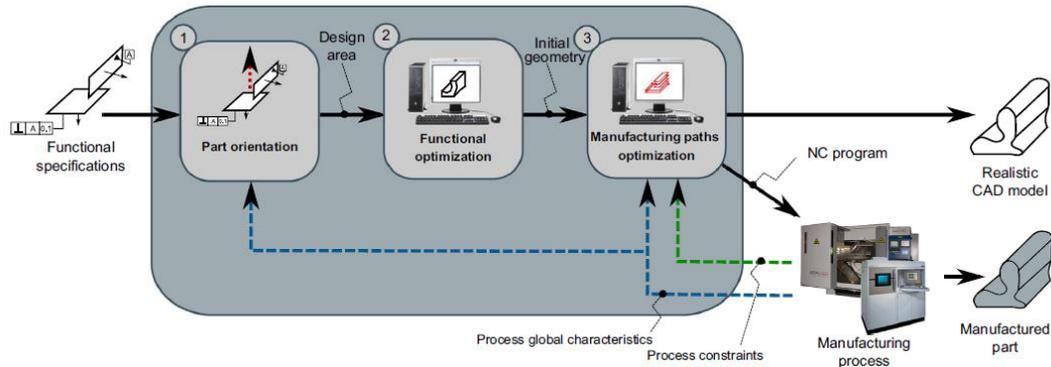


Figure 40 C-DFAM proposée par Ponche, et al. [146]

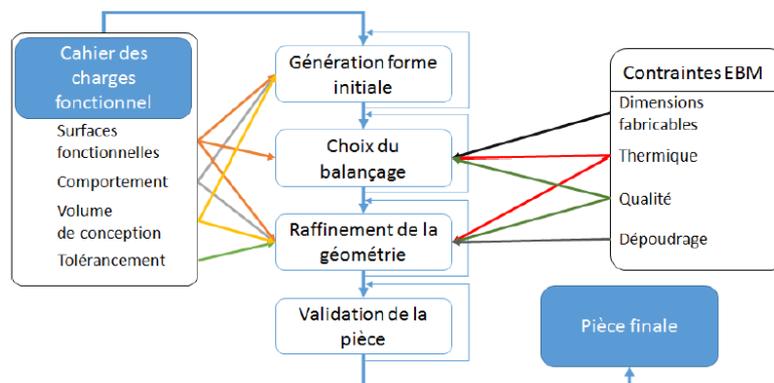


Figure 41 C-DFAM proposée par Vayre, et al. [39]

La 2nd catégorie de C-DFAM correspond aux DFAM développées par Rosen [119], Chu, et al. [147] ou encore Maheshwaraa, et al. [148] et dont la démarche globale en 4 étapes est présentée dans la Figure 42. La différenciation avec la catégorie précédente de C-DFAM se fait ici au niveau des données d'entrée manipulées.

Le point de départ des C-DFAM est ici une modélisation géométrique (modèle CAO) du composant et plus seulement un modèle par entité. L'approche Opportunité utilisée pour la création de la forme initiale s'appuie sur le choix d'une structure treillis élémentaire paramétrable qui sera déployée dans l'ensemble de la CAO.

La forme initiale est alors optimisée paramétriquement et topologiquement dans le but de déterminer la taille et la répartition des structures élémentaires qui garantissent le respect des contraintes produit. Puis la RI obtenue est validée par simulation par éléments finis

Ensuite, la forme optimisée est confrontée aux contraintes de fabrication du procédé FA retenu. Les dimensions des structures élémentaires sont comparées aux dimensions minimales fabricables et permettent l'adaptation de la forme pour la rendre réaliste. Enfin, la RI est validée en fonction des exigences initiales.

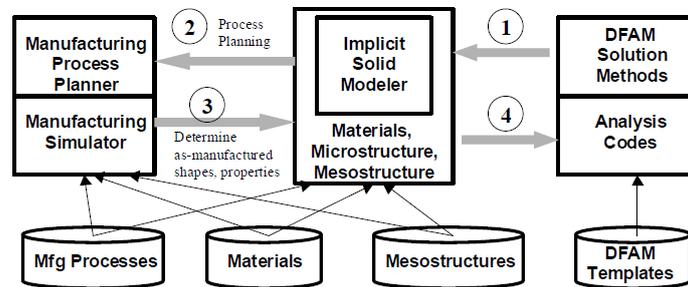


Figure 42 Démarche C-DFAM selon Rosen [119]

En résumé, la différence majeure entre ces deux approches de C-DFAM repose essentiellement sur la typologie des éléments manipulés pour la génération de la forme initiale du composant. Ensuite, comme l'illustre la Figure 43 ci-dessous, la progression permettant d'aboutir à la géométrie finale (optimisée et adaptée à la FA) sera la même.

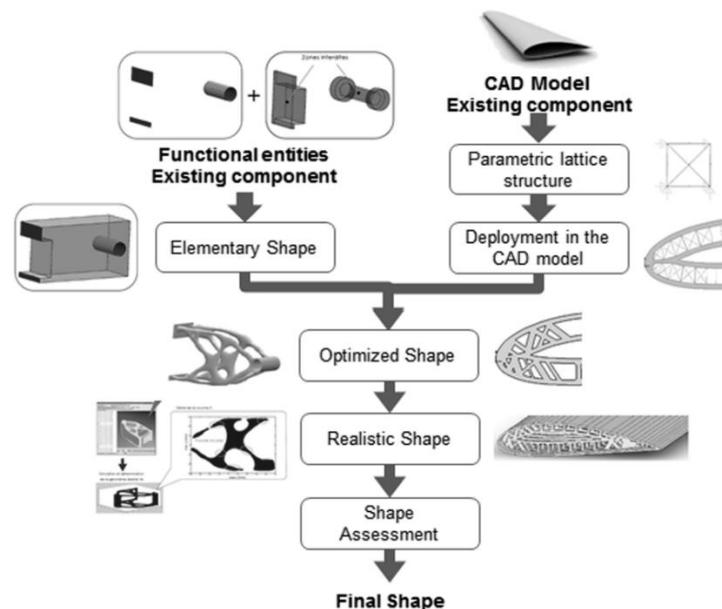


Figure 43 Workflow des DFAM Composant (extrait de Laverne, et al. [144])

3.3.3.3 Les DFAM Assemblage

Ces méthodologies sont dédiées à la conception de produit pris ici au sens de l'assemblage. Il s'agit donc de méthodologies visant un niveau systémique plus élevé que les C-DFAM. Pour autant comme précédemment, deux approches différentes ont été développées.

La première famille de A-DFAM peut être illustrée par les propositions de Rodrigue and Rivette [135] ou de Vitse, et al. [149]. Elles ont pour objectif la consolidation d'un assemblage existant,

c'est-à-dire la réduction du nombre de composants constituant l'assemblage, et peuvent se décomposer en 5 étapes.

La 1^{ère} étape consiste à élaborer un nouveau cahier des charges produit à partir des fonctions actuelles assurées par le produit et des fonctions supplémentaires souhaitées.

Une fois le cahier des charges établi, les fonctions sont regroupées au sein de sets fonctionnels. Les groupements possibles sont identifiés à l'aide d'outils tels que le Force-Flow Diagram ou l'AMDEC [135] ou par des études d'incompatibilité entre les matériaux choisis et les chargements appliqués sur le produit [149]. Cette étape sert donc à définir une architecture produit et à fixer le cahier des charges de chaque composant associé à un set géométrique.

La phase de conception de chaque composant peut alors démarrer. Comme pour les C-DFAM, une forme initiale est tout d'abord définie pour chacun des sets fonctionnels puis elle est ensuite adaptée à l'aide de méthodes d'optimisation topologique ou de prévention des défaillances. Pour finir la forme finale est validée en fonction de critères économiques ou mécaniques.

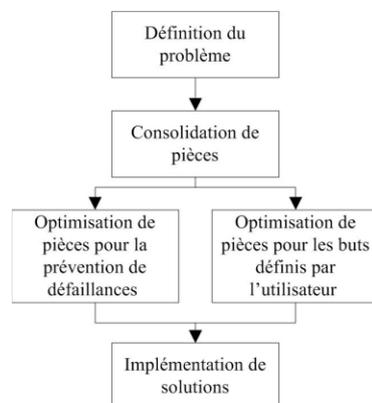


Figure 44 Méthodologie A-DFAM proposée par Rodrigue and Rivette [135]

La démarche développée par Boyard, et al. [136] illustrée dans la Figure 45, est une alternative aux A-DFAM que nous venons de décrire. Elle se distingue par le fait qu'elle est destinée à la fois à la conception de produits nouveaux mais aussi à la reconception de produits existants ; dans la mesure où son unique donnée d'entrée est le besoin client.

Les 2 premières étapes reposent sur une analyse fonctionnelle du produit puis une recherche de regroupements des fonctions au sein de sets. La représentation 3D des sets dont la disposition spatiale peut être modifiée en fonction des besoins du concepteur conduit alors à proposer des architectures de produit.

Afin de définir une géométrie pour chacun des sets fonctionnels, Boyard propose d'exploiter une approche de conception par analogie et d'identifier, dans une base de connaissances à base d'objets, des sets similaires à celui considéré. Le travail du concepteur consiste alors à réutiliser ou adapter, suivant les contraintes propres au projet, les différents modèles CAO des sets de façon à créer une forme initiale.

La configuration globale de l'assemblage s'effectue par concaténation des différentes CAO qui ont été créées. L'optimisation de l'assemblage et de ses composants est réalisée en fonction des contraintes de procédé, d'assemblage ou de fabrication et peut conduire à des itérations avant

d'obtenir le modèle numérique final qui sera validé au niveau de sa fabricabilité en FA et de l'assemblabilité des composants.

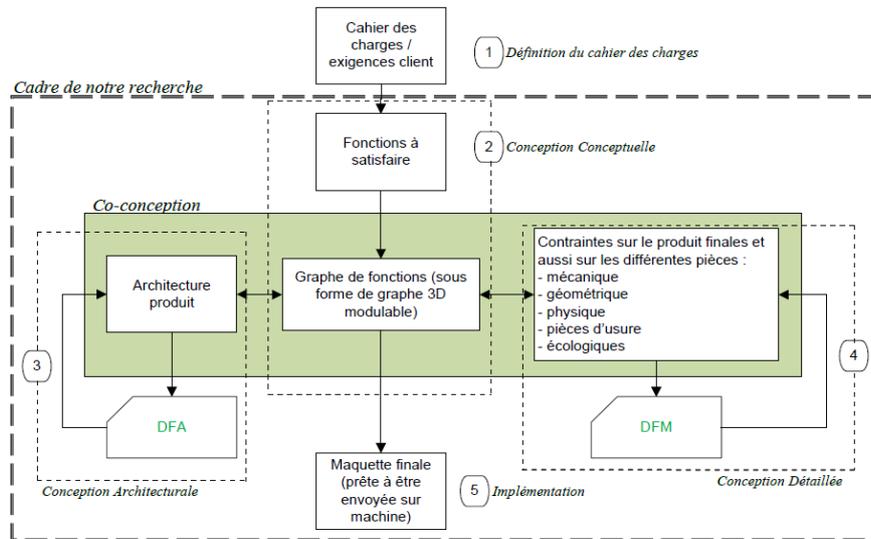


Figure 45 Méthodologie A-DFAM proposée par Boyard, et al. [136]

Ces deux catégories de A-DFAM, comme l'illustre la Figure 46 ci-dessous, se différencient donc à la fois dans le type de conception visée (reconception ou conception nouvelle) et par les moyens mis en œuvre pour identifier des géométries initiales et optimisées des assemblages. Mais nous noterons que leur point de départ est toutefois identique et dépendant des besoins identifiés à la suite de l'analyse du problème de conception.

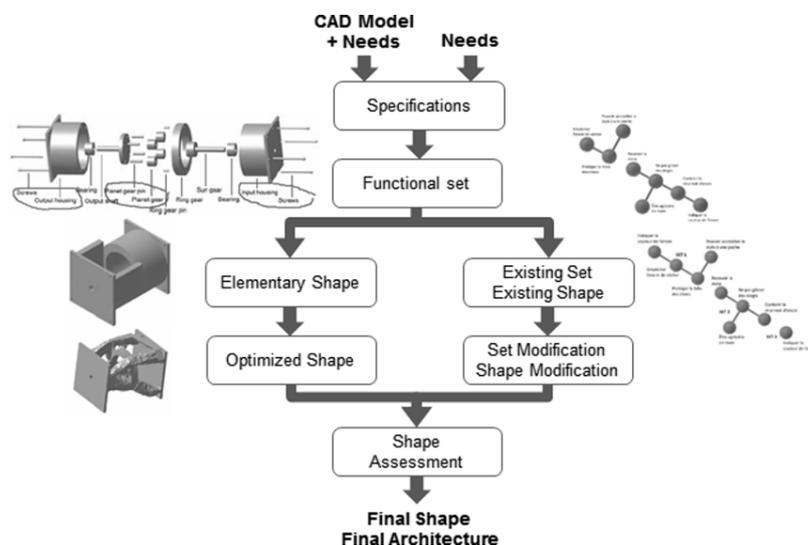


Figure 46 Workflow des DFAM Assemblage (extrait de Laverne, et al. [144])

3.3.3.4 Bilan sur les DFAM Globales

L'élément principal qui ressort de cette étude des DFAM Globales est que la place accordée aux phases amont est conditionnée par le niveau systémique de produit visé.

Les C-DFAM existantes proposent une démarche dans laquelle les composants sont conçus grâce à une approche DFX restreinte exclusivement à la FA, permettant ainsi d'obtenir des formes inenvisageables avec un procédé traditionnel et exclusivement fabricables en FA.

Il n'y a donc pas de remise en question du cahier des charges du produit dans son ensemble (c'est-à-dire l'assemblage). Cela suppose donc que les analyses fonctionnelles et structurelles qui ont été préalablement réalisées pour rédiger le cahier des charges initial de l'assemblage sont « fiables ». En d'autres termes, avec C-DFAM la recherche d'architecture se base sur une approche DWX dont il n'existe aucune garantie qu'elle intègre le paradigme de la FA (Figure 47).

Ce qui nous amène donc à conclure que bien que les C-DFAM garantissent une innovation au niveau du composant, elles ne garantissent pas une l'obtention de solutions créatives (l'architecture) à un niveau systémique plus élevé.

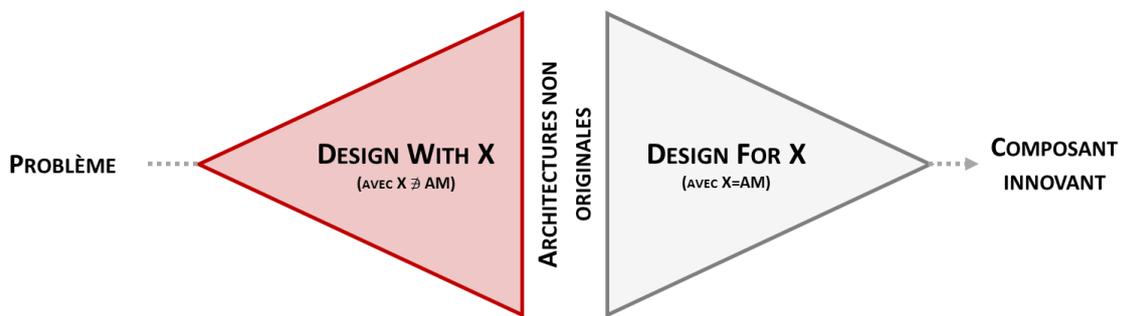


Figure 47 Approche DWX et DFX et signification du X dans les méthodologies C-DFAM

Les A-DFAM actuelles accordent quant à elles une place importante à la remise en question de la conception préliminaire du produit en tant qu'assemblage. Pourtant malgré l'objectif, pour ces méthodologies de travailler au niveau de l'architecture du produit avant de se focaliser sur les composants, les solutions proposées ne sont pas nécessairement originales dans la mesure la prise en compte des connaissances FA dans l'approche DWX est :

- Soit limitée à une partie seulement du cahier des charges produit dans le cas des A-DFAM cherchant la consolidation d'un produit. Dans ce cas seuls quelques regroupements fonctionnels sont remis en question.
- Soit restreinte exclusivement au seul paradigme de la FA lorsque les A-DFAM cherchent à utiliser des solutions existantes pour réfléchir à de nouvelles architectures

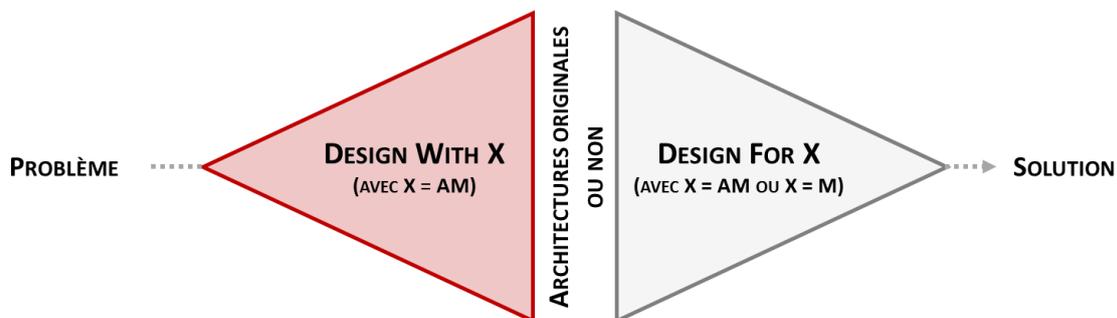


Figure 48 Approche DWX et DFX et signification du X dans les méthodologies A-DFAM

Quant à la conception des composants implique pour chacun d'entre eux de sélectionner A cela nous ajoutons que la prise en compte de la fabricabilité des composants conçus à l'issue de cette analyse préliminaire n'est pas aussi développée que celle proposée dans les C-DFAM : les capacités des procédés sont par exemple partiellement prises en compte. Quelle est alors la garantie de mener à bien et sans modification le développement du produit ?

Enfin, les A-DFAM ne considèrent que l'aspect statique du produit, c'est-à-dire sans prendre en compte les mobilités des composants. Or l'un des atouts majeurs de la FA est de permettre la fabrication de pièces déjà assemblées, prêtes à l'usage et au fonctionnement. L'étude des aspects cinématique et dynamique des produits peut donc permettre d'explorer de nouveaux regroupements fonctionnels donc de nouvelles architectures produit et ainsi favoriser davantage l'innovation.

Ensuite, nous retenons que la validation des DFAM Globales (sans distinction du niveau systémique) s'effectue toujours, au niveau du composant et non de l'architecture. Cela sous-entend donc qu'il faut avoir conçu chaque composant pour valider l'assemblage. On peut alors imaginer les conséquences en termes de coûts et de délais lorsque la conception n'est pas validée.

Enfin, nous soulignons l'absence de prise en compte du travail pluridisciplinaire dans les différentes démarches que nous avons étudié. Les connaissances FA manipulées dans ces méthodologies sont-elles indépendantes des utilisateurs ou doivent-elles être adaptées selon les profils ?

3.3.4 Synthèse et positionnement

Nous avons décrit dans les paragraphes précédents comment les connaissances FA sont aujourd'hui intégrées dans des méthodologies de conception pour la FA ou DFAM. Nous avons ensuite classé ces différentes méthodologies en fonction de leur usage dans les activités de conception, puis nous avons étudié plus spécifiquement l'une de ces catégories en fonction du niveau systémique du produit visé et des solutions créatives produites.

Ces différentes analyses nous amènent donc à établir la synthèse suivante :

1. Il existe différentes typologies de DFAM :
 - DFAM Conception vs DFAM Evaluation se basant sur des connaissances technologiques et procédurales
 - DFAM Opportunité vs DFAM Contrainte axant l'utilisation des connaissances autour des contraintes et opportunités offertes par la FA pour la conception
2. Il est préférable de traiter conjointement les DFAM Contraintes et les DFAM Opportunité au sein d'une famille de DFAM dite Globales
3. Les DFAM Globales actuellement disponibles se déclinent à deux niveaux systémiques distincts du produit : composant ou assemblage donnant naissance aux catégories de méthodologies suivantes : DFAM Assemblage (A-DFAM) vs DFAM Composant (C-DFAM)
4. Dans les méthodologies A-DFAM et C-DFAM, il ressort que la créativité et la fabricabilité des solutions proposées concernent majoritairement le niveau du composant, du fait d'une approche DWX n'intégrant pas ou mal le paradigme de la FA et servant rarement à rechercher des architectures originales.
5. L'innovation produit permise par les DFAM Globale ne peut pas se limiter à une simple innovation sur les composants.

Ce qui nous amène à adopter le positionnement suivant :

La recherche des architectures produit est nécessairement impactée par les possibilités de la FA notamment lorsque les contraintes du cahier des charges seront nombreuses et restrictives.

Il nous paraît dès lors indispensable de remettre en question et de repenser l'architecture du produit dans son ensemble avant de se focaliser sur les composants qui constituent le produit. C'est pourquoi, afin de proposer une solution innovante à un problème de conception, nous pensons que :

- les phases amont, consacrées au niveau systémique de l'assemblage, doivent tirer profit des connaissances FA afin de développer des solutions de conception originales. Cela implique selon nous de travailler dans une approche DWX intégrant le contexte de la FA et que nous nommons DWAM (Design With Additive Manufacturing). Cette approche DWAM va permettre d'informer le concepteur sur les possibilités de la FA et donc étendre l'espace solution dans lequel il travaille sans pour autant imposer la FA comme la seule piste de réflexion envisageable.
- les phases suivantes sont dédiées au niveau systémique du composant. Elles doivent servir à la validation de la fabricabilité des solutions proposées. C'est donc à ce stade, que l'approche DFX trouve tout son sens. Au sein d'une même architecture nous trouverons donc à la fois l'approche DFAM si le composant ne peut être réalisé qu'en FA ou celle DFM si un autre procédé de mise en œuvre a été sélectionné pour réaliser le composant.

Ce positionnement que nous venons de décrire est schématisé dans la Figure 49 ci-dessous.

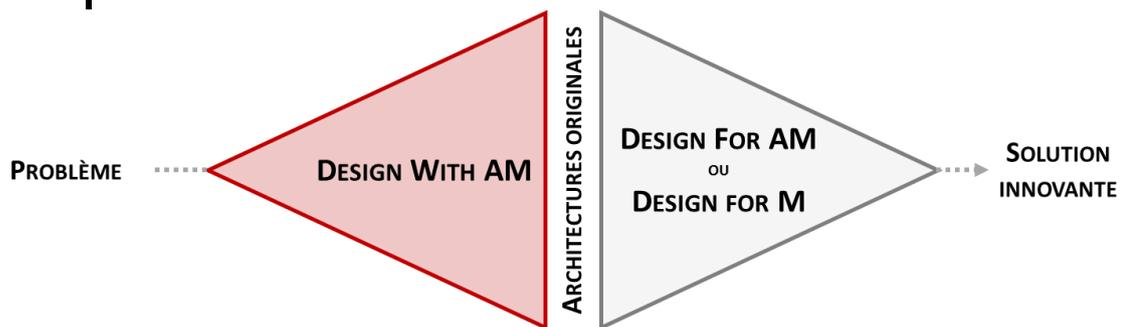


Figure 49 Place du DWAM et DFAM dans une démarche de conception innovante

Nous avons présenté dans ce chapitre le dernier volet de notre état de l'art et avons cherché à décrire les méthodologies existantes permettant l'intégration de connaissances relatives à la FA. Puis nous avons montré leurs limites face à une perspective d'innovation.

Le prochain chapitre est destiné à dresser le bilan de notre état de l'art et à présenter nos hypothèses de résolution.

4 Problématique, hypothèses et modèle préliminaire

Ce chapitre est tout d'abord consacré à rappeler notre positionnement à l'issue de notre état de l'art et à énoncer notre problématique. Nous formulons ensuite les hypothèses de résolution sur lesquelles nous allons nous appuyer pour répondre à cette problématique. Enfin nous terminons par la présentation du modèle préliminaire à partir duquel sera construite notre réponse.

4.1 Problématique

Afin de répondre à la question de recherche que nous avons énoncée au début de ce manuscrit : comment augmenter la capacité d'innovation des équipes projet en intégrant des connaissances relatives à la FA dans le processus de conception, nous avons réalisé une étude bibliographique en 3 parties :

- La 1^{ère} partie était destinée à repérer et caractériser un processus de conception dans lequel il est possible d'intégrer des connaissances.
A l'issue de cette partie, nous avons mis en évidence l'intérêt des méthodologies de conception prescriptives et la nécessité de se concentrer sur les phases amont.
Nous avons également souligné l'importance des RI à la fois dans un but de communication entre les individus mais aussi en tant que marqueurs de la progression de la conception.
Enfin nous avons mis en avant le rôle de la créativité dans le développement de solutions originales et nous avons montré que celle-ci peut être améliorée par le biais du facteur cognitif.
- La 2^{ème} partie de notre état de l'art nous a permis de mettre en évidence les différentes typologies de connaissances et les démarches mises en place pour leur intégration dans le processus de conception.
Nous avons ainsi pu montrer que la connaissance est protéiforme et que son intégration s'effectue dans les approches stratégique DWX et DFX.
Nous avons également souligné l'importance des connaissances pluridisciplinaires. Dans une perspective d'innovation, nous avons proposé, de privilégier l'approche DWX lors des phases amont puis une fois les solutions créatives identifiées de s'appuyer sur l'approche DFX.
Enfin, nous avons souligné l'importance du Knowledge Management et en particulier de la capitalisation des connaissances afin de n'utiliser dans les approches DWX ou DFX que les connaissances utiles à la conception.
- La dernière partie de notre état de l'art était consacrée à l'étude de l'usage actuel des connaissances FA en conception et ses limites en termes d'innovation produit.
Nous avons montré que l'intégration des connaissances relatives à la FA dans les méthodologies DFAM Globales ne permettait pas la recherche de solutions créatives au

niveau systémique de l'assemblage mais uniquement au niveau des composants ce qui nous paraît peu satisfaisant pour favoriser l'innovation produit.

Nous avons donc proposé de nous appuyer sur une approche Design With Additive Manufacturing ou DWAM, c'est-à-dire sur une approche DWX étendu au paradigme de la FA pour améliorer les phases de conception amont au cours desquelles les architectures originales vont être recherchées.

Nous avons ensuite proposé de consacrer la 2^{ème} partie du processus de conception, à une approche DFX (avec X=Additive Manufacturing ou X=Traditional Manufacturing) pour pouvoir concevoir les composants tout en garantissant leur fabricabilité.

Ces différents éléments nous amènent désormais à formuler notre problématique de recherche de la façon suivante :

Comment exploiter les connaissances FA dans la stratégie DWAM afin de favoriser la recherche d'architectures créatives ?

4.2 Hypothèses de résolution.

Notre état de l'art nous a permis de montrer la diversité des typologies de connaissances. Or nous avons souligné que les acteurs de la conception amont sont déjà submergés d'informations qu'ils doivent prendre en considération au cours de leurs activités. Nous postulons donc, que parmi l'ensemble des connaissances relatives à la FA existantes et détenues par les experts du domaine, seul un petit nombre d'entre elles est vraiment utile pour le déploiement de la stratégie DWAM et nécessite alors d'être mis à disposition des concepteurs.

Ces différents éléments nous amènent à énoncer notre 1^{ère} hypothèse de résolution de la façon suivante (Figure 50) :

L'intégration des connaissances dans la stratégie DWAM doit être réalisée au juste besoin.

Cette hypothèse implique donc que le déploiement de la stratégie DWAM ne doit pas apparaître pour les concepteurs comme une contrainte mais plutôt comme une opportunité d'augmenter leur efficacité opérationnelle, ici en termes de créativité. Il s'agit donc de s'inspirer du Lean management de façon à ce que les concepteurs ne perdent pas de temps à rechercher des connaissances FA potentiellement utiles mais plutôt que celles qui vont avoir une incidence sur leur travail soient repérées et mises à leur disposition afin qu'ils les utilisent de façon efficiente [150]

Cela signifie donc qu'une connaissance FA au juste besoin devant être intégrée dans la stratégie DWAM correspond à une connaissance FA dont la forme (explicite), le contenu (information disponible), la représentation (support utilisé) et l'instanciation (timing d'introduction) seront adaptés aux besoins et aux particularités de l'équipe pluridisciplinaire de conception.

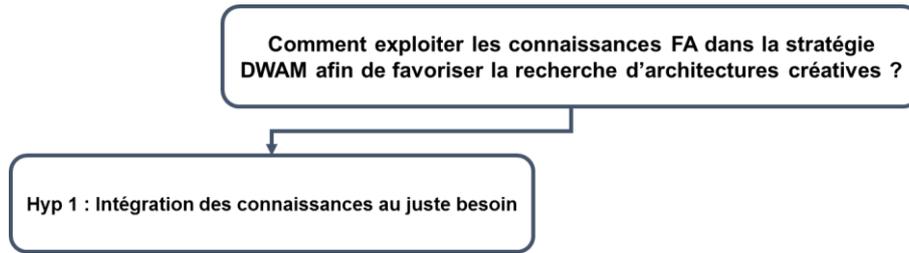


Figure 50 Hypothèse de résolution n°1

Nous avons montré également que l’approche DWAM est adaptée aux enjeux de la conception amont puisque c’est à ce stade que sont recherchées les architectures créatives. De plus, nous avons souligné l’intérêt des méthodologies prescriptives et de leur jalonnement par des RI clés afin de pourvoir les concepteurs amonts d’une description du processus de conception aisément compréhensible et utilisable.

C’est pourquoi nous proposons donc la 2^{ème} hypothèse de résolution suivante (Figure 51) :

L’intégration des connaissances doit être réalisée dans un modèle de conception dédié à l’approche DWAM.

Avec cette hypothèse, nous postulons que les connaissances FA au juste besoin qui auront été capitalisées pourront être plus facilement repérées et utilisées par les concepteurs dans la mesure où elles vont s’intégrer dans un modèle spécifiquement dédié à la recherche d’architecture créatives.

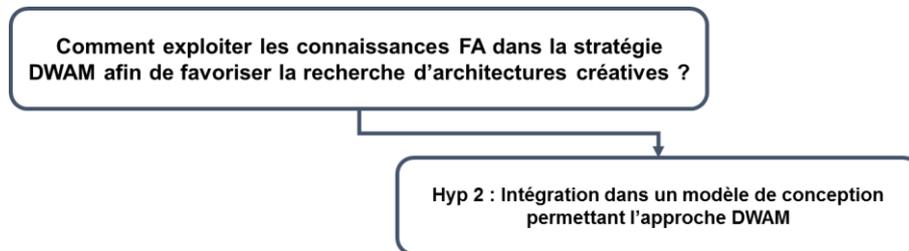


Figure 51 Hypothèse de résolution n°2

En nous appuyant sur les hypothèses que nous venons de présenter, nous proposons de décliner la réponse à notre question de recherche à la fois au niveau méthodologique et au niveau outil :

- Le niveau méthodologique de notre réponse se traduira par la proposition d’une démarche à suivre permettant d’aboutir à un modèle prescriptif de conception amont adapté au contexte de la conception pluridisciplinaire et enrichi par des connaissances FA au juste besoin.
- Le niveau outil s’inscrit dans l’optique d’une application opérationnelle sur le terrain de notre modèle et visera à proposer un outil dédié à l’identification et l’exploitation des connaissances FA au juste besoin.

La démarche que nous proposons de suivre, synthétisée dans la Figure 52, ci-dessous, est inspirée de l'approche Knowledge Management et est constituée de 3 étapes :

- La 1^{ère} étape vise à s'assurer que des connaissances FA capitalisées sous forme explicite sont adaptées au déploiement de l'approche DWAM. Elle fait l'objet de notre 1^{ère} expérimentation.
- La 2^{ème} étape cherche à capitaliser les connaissances FA sous forme explicite selon le principe du « juste besoin » en vue de les intégrer dans le processus de conception amont. Cette étape est elle-même scindée en 3 phases successives destinées à caractériser le juste besoin. Nous commençons dans un 1^{er} temps par repérer les connaissances FA nécessaires, puis nous identifions les supports adaptés pour les préserver, enfin nous proposons une instanciation permettant de les valoriser.
- La 3^{ème} étape quant à elle est destinée à formaliser et valider l'intégration des connaissances FA au juste besoin dans le processus de conception amont.

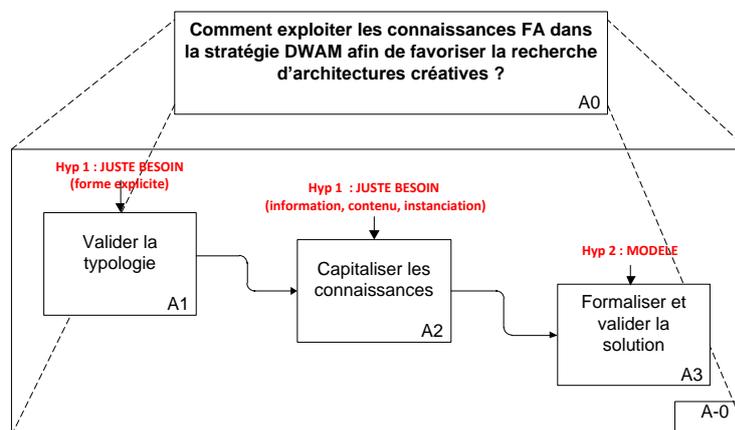


Figure 52 Démarche mise en place pour répondre à la question de recherche et place des hypothèses

Nous venons de présenter les hypothèses que nous faisons pour répondre à la question de recherche ainsi que la démarche que nous proposons de suivre.

Le prochain paragraphe est destiné à décrire le modèle préliminaire de conception que nous proposons d'utiliser comme réponse a priori et que nous chercherons ensuite à enrichir avec des connaissances FA.

4.3 Proposition d'un modèle préliminaire de conception

Notre étude du processus de conception nous a amené à sélectionner un modèle de processus de conception adapté à nos besoins : le modèle de Pahl and Beitz dont nous avons limité l'étude aux seules phases amont qui nous le rappelons sont les plus importantes pour l'innovation (paragraphe 3.1.3).

Cependant, notre objectif étant d'aider à l'intégration des connaissances relatives à la FA, nous ne jugeons nécessaire pas de prendre en compte, dans notre périmètre d'étude, la phase d'analyse du

besoin du modèle de Pahl and Beitz. En effet, selon nous, celle-ci ne peut être que légèrement impactée dans son déroulement par l'introduction de connaissances FA. Nous justifions ce choix par le fait que les bouleversements issus du développement de la FA n'ont pas vocation à influencer l'analyse ou l'interprétation des besoins, des exigences ou des contraintes liées au problème de conception mais plutôt à stimuler la façon dont les concepteurs vont chercher à trouver une réponse au problème posé.

Ainsi, nous délimitons le périmètre d'étude dans lequel s'inscrit notre modèle préliminaire à la phase de conception générale et à la partie de la phase de conception architecturale incluse dans la conception amont (périmètre encadré en bleu Figure 53).

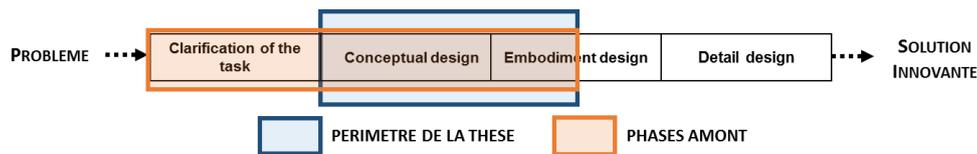


Figure 53 Périmètre de la thèse dans les phases amont du modèle de Pahl and Beitz

Nous avons conclu à l'issue du paragraphe 3.3.4 que l'approche DWAM devait en priorité se porter sur les phases de conception permettant la recherche d'architecture originales alors que l'approche DFX, pouvant être de type DFAM ou DFM concernera les phases de conception architecturale et détaillée destinées à définir chacun des composants du produit. Cela nous amène à proposer le périmètre d'utilisation de ces approches sur ce modèle de Pahl and Beitz :

- triangle rouge sur la Figure 54 pour l'approche DWAM
- triangle vert sur la Figure 54 pour l'approche DFX qui nous le rappelons, suivant les cas pourra être de type DFAM ou DFM

Nous rappelons qu'il existe une continuité d'utilisation entre ces 2 approches : les livrables du DWAM étant des entrées pour le DFX. Cette frontière correspond dans notre cas à la fin des phases amont de conception.

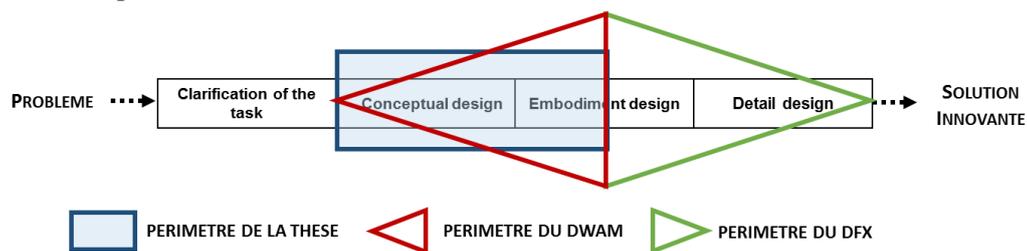


Figure 54 Place des approches DWAM et DFX sur le modèle de Pahl and Beitz

Ayant fixé les différents périmètres de notre modèle préliminaire, nous allons maintenant nous attacher à le décrire plus en détail le jalonnement qui le constitue.

Nous rappelons que nous avons défini une RI clé comme une représentation du produit commune à tous les participants et destinée à marquer la fin d'une étape et à l'issue de laquelle une sélection des est effectuée. Dans notre modèle, ces RI clés vont également avoir pour rôle de servir de déclencheurs

à l'introduction des connaissances relatives à la FA (KFA) dites au juste besoin que nous aurons au préalable capitalisées.

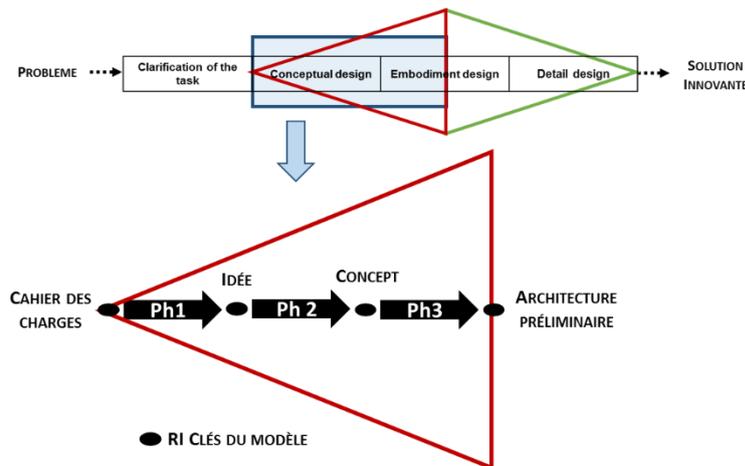


Figure 55 Modèle initial proposé

Notre modèle préliminaire est constitué de trois étapes et quatre RI clés (Figure 55).

Trois de ces RI clés (cahier des charge, concept et architecture) correspondent aux RI clés que nous avons repérées dans le modèle de Pahl and Beitz. La dernière RI clé que nous utilisons correspond à l'idée. Bien que n'apparaissant pas de manière explicite dans le modèle de Pahl and Beitz, elle correspond au livrable des activités « establish function structures » et « search for solution principles » dont le rôle selon les auteurs, est de stimuler la « recherche de nouvelles solutions dans diverses directions ». On la trouvera fréquemment sous la forme de carte mentale, de liste de mots ou encore de principes physiques. Elle correspond donc à une représentation du produit fortement abstraite, à la différence du concept qui propose première une description visuelle et fonctionnelle du produit. Ainsi les trois phases de notre modèle sont :

- phase 1 : la recherche et sélection d'idées
- phase 2 : le développement des concepts et leur tri, au cours de laquelle les concepteurs chercheront à donner forme à leurs idées
- phase 3 : la recherche des architectures préliminaires au cours de laquelle les concepteurs commencent à réfléchir à la façon d'agencer les différentes entités constituant leurs concepts sans avoir à trancher sur les procédés qui permettront de fabriquer la solution.

Nous venons de présenter le modèle préliminaire sur lequel nous allons chercher à introduire des connaissances FA en vue de favoriser d'amélioration le développement de solutions créatives. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les différentes expérimentations qui nous ont permis de repérer, préserver et valoriser les connaissances FA afin de n'introduire dans notre modèle celles dites au juste besoin.

5 Expérimentations

La démarche nous avons mise en place afin de valider nos hypothèses est scindée en trois étapes (Figure 56).

La 1^{ère} étape est destinée à s'assurer que l'emploi de connaissances sous forme exclusivement explicite est adapté à la conception préliminaire. Pour cela nous nous appuyons sur une expérimentation (expérimentation 1) dont l'objectif est de d'étudier la créativité et la fabricabilité des solutions proposées par des équipes projet possédant des connaissances sous des formes différentes.

Ensuite, nous cherchons dans une 2^{ème} étape à capitaliser les connaissances FA au juste besoin afin de les intégrer dans le processus de conception. Nous nous appuyons sur une série de trois expérimentations (expérimentations 2A, 2B et 2C) qui nous permettent de capitaliser les différentes caractéristiques constitutives d'une connaissance au juste besoin (information, représentation et instanciation).

Enfin, dans une dernière étape, nous formalisons notre modèle de conception enrichi par des connaissances au juste besoin ainsi que son outil associé puis nous validons la solution en réalisant un test en conditions réelles d'utilisation (expérimentation 3).

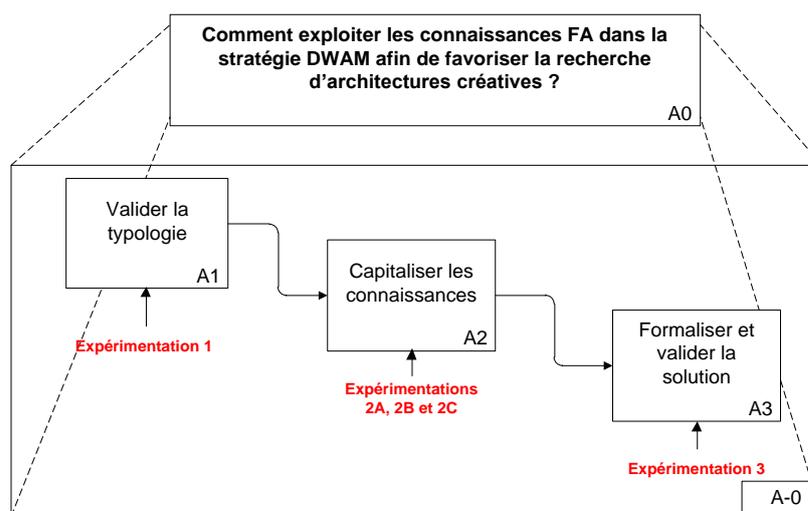


Figure 56 Démarche proposée et place des expérimentations

5.1 Expérimentation 1 : Validation de la forme explicite des connaissances

5.1.1 Introduction

L'expérimentation 1 présentée ici a pour objectif d'identifier si parmi les deux typologies de connaissances que nous avons identifiées au cours de notre état de l'art (explicite ou tacite), la forme explicite est adaptée à l'approche DWAM lors de la conception amont (Figure 57).

En effet, l'un des points de blocage qui ressort de notre étude du contexte industriel est un nombre d'experts trop restreint et un savoir est trop protégé pour permettre une mise à disposition leurs

connaissances au plus grand nombre. Aussi nous souhaitons vérifier que des connaissances FA explicites, c'est-à-dire par essence formalisables et diffusables, peuvent être employées.

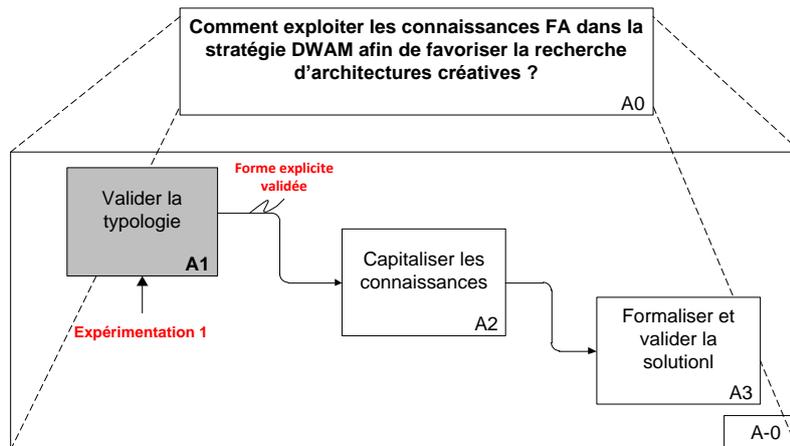


Figure 57 Place de l'expérimentation 1 et résultat attendu

Notre expérimentation se concentre exclusivement sur les deux 1^{ères} phases de notre modèle (en bleu Figure 58). Nous cherchons à déterminer par une étude de cas s'il existe une différence de production de solutions créatives lorsque les connaissances FA dans un groupe de conception sont détenues par des experts (connaissances tacites) ou par des novices disposant de connaissances FA explicites. Pour cela nous procédons à l'aide d'une étude comparative des représentations intermédiaires produites au cours d'une séance de créativité par des groupes dont la connaissance FA diffère.

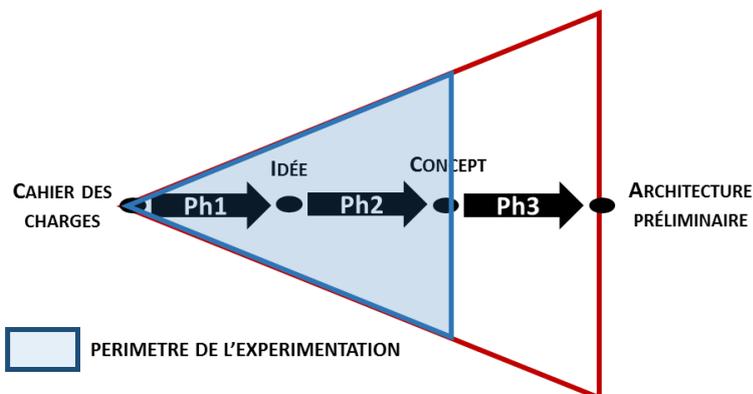


Figure 58 Place de la zone d'intérêt de l'expérimentation 1 dans le modèle

5.1.2 Protocole expérimental

5.1.2.1 Introduction

L'expérimentation, qui prend la forme d'une séance de créativité, a pour objectif le développement d'un robot pédagogique. Les participants à la séance sont invités à réfléchir à la conception d'un nouveau robot plus ludique et plus motivant pour les élèves que ceux actuellement sur le marché.

Afin de s'assurer de la compréhension du brief, une petite vidéo permet de présenter aux participants le robot humanoïde programmable DARwIn actuellement utilisés comme support pédagogique (Figure 59).



Figure 59 Robot DARwIn

Nous justifions le choix d'un tel support par le fait que ce produit correspond à un produit de type assemblage mais dont le nombre de composants est suffisant pour éviter une simple reconception sans pour autant être considéré comme un système complexe. De plus, nous pensons qu'il laisse une large place à la créativité des participants à l'étude.

Le protocole que nous allons décrire est schématisé à l'aide de la Figure 60 ci-dessous.

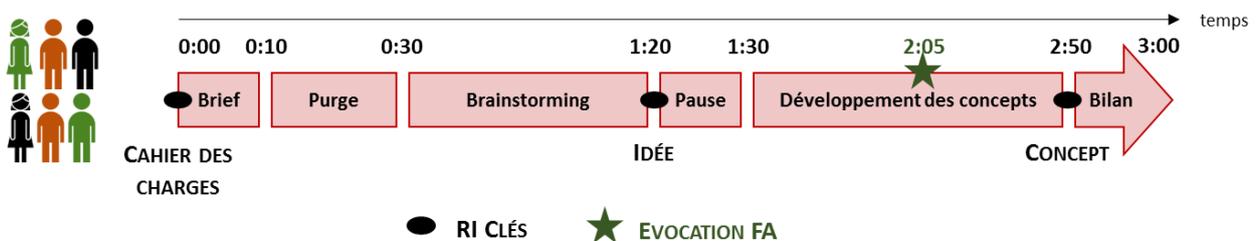


Figure 60 Protocole expérimental de l'expérimentation 1

5.1.2.2 Constitution des groupes et choix des participants

La créativité étant une activité de conception collective, nous avons choisi de constituer des groupes de 6 participants. Cet effectif a été fixé afin de respecter les préconisations de Curral, et al. [151] dont les travaux ont montré que les petits groupes de conception perçoivent plus positivement le travail d'équipe que les gros groupes, en particulier lorsqu'il existe une forte exigence d'innovation. D'autre part cet effectif nous permet de suivre les recommandations de Moreland, et al. [152] qui définissent la taille idéale des groupes entre quatre et huit participants.

La constitution des groupes a été réalisée de telle sorte que l'unique variable intergroupe au cours de l'expérimentation corresponde à la typologie des connaissances FA (KFA). Les 3 groupes que nous souhaitons étudier sont les suivants :

- *Groupe 1.* Il s'agit d'un groupe témoin, uniquement constitué de participants n'ayant aucune connaissance en FA.
- *Groupe 2.* Ce groupe est constitué, comme le groupe 1, de participants novice en FA mais auxquels des connaissances FA vont être mises à disposition au cours de l'expérimentation. Les connaissances FA sont des connaissances explicites se présentant sous la forme de fiches techniques au format A4 (Figure 61) dans lesquelles sont présentées de façon synthétique les

notions fondamentales de la FA : principe de la FA, notion de complexité, restrictions actuelles (dimensions, matériaux, ...). Afin d'améliorer la compréhension, elles sont associées à des objets techniques servant de représentation physique illustrant les différents éléments décrits.

- *Groupe 3.* Ce groupe possède des connaissances avancées en FA mais sous forme tacite en raison de la présence de participants dont les activités quotidiennes impliquent l'utilisation de la FA depuis plus de 2 ans.



Figure 61 Exemple de fiches techniques fournies au groupe 2

En outre, pour éviter que des facteurs supplémentaires viennent influencer le déroulement de notre étude, nous avons cherché à constituer des groupes de travail identiques en tout point. Ainsi, pour satisfaire l'exigence de travail pluridisciplinaire indispensable à la conception en général et à la conception préliminaire en particulier, les participants ont été sélectionnés de manière à être représentatifs des métiers clés intervenant lors des phases amont. Ainsi, tous appartiennent à des spécialités reconnues comme clés pour le processus d'innovation [89] :

- l'ingénierie,
- le design industriel
- l'ergonomie de produit.

Enfin, afin de ne pas privilégier une spécialité au dépend des autres, nous avons choisi de retenir 2 participants dans chacune d'elles.

Nous avons également cherché à constituer des équipes homogènes quant au niveau d'expertise des différents participants. C'est pourquoi chaque groupe est composé de 2 participants juniors (ancienneté dans le métier inférieure à 3 ans) et de 4 participants senior (ancienneté entre 3 ans et 10

ans) ou expert (ancienneté supérieure à 10 ans). Les participants juniors étant pour chaque groupe un designer et un ingénieur.

Pour satisfaire à l'ensemble des exigences citées ci-dessus, nous avons contacté par courriel ou par téléphone 48 ergonomes produit, 21 designers industriels et 17 ingénieurs pour n'en retenir que 6 dans chaque spécialité.

Le Tableau 6 et le Tableau 7 ci-dessous synthétisent les profils des 18 participants qui ont été retenus pour constituer notre panel et participer à notre expérimentation ainsi que les différentes caractéristiques des groupes qui ont été créés.

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Niveau de connaissance FA	6 novices	6 novices + connaissances explicites	5 avancés 1 novice
Age moyen	26 ans	28 ans	32 ans
Spécialité	2 designers industriels, 2 ingénieurs, 2 ergonomes		
Expertise métier	4 seniors, 2 juniors		
Genre	4 hommes, 2 femmes		

Tableau 6 Caractéristiques des groupes

Participant	Niveau de connaissances en FA	Métier	Niveau d'expertise métier	Genre
1	Novice	Designer	Junior	Femme
2	Novice	Designer	Sénior	Femme
3	Novice	Designer	Sénior	Homme
4	Novice	Designer	Junior	Homme
5	Novice	Ingénieur	Sénior	Homme
6	Novice	Ingénieur	Junior	Homme
7	Novice	Ingénieur	Junior	Homme
8	Novice	Ingénieur	Sénior	Homme
9	Novice	Ergonome	Junior	Homme
10	Novice	Ergonome	Sénior	Homme
11	Novice	Ergonome	Sénior	Femme
12	Novice	Ergonome	Sénior	Femme
13	Novice	Ergonome	Expert	Femme
14	Avancé	Designer	Junior	Femme
15	Avancé	Designer	Sénior	Homme
16	Avancé	Ingénieur	Expert	Homme
17	Avancé	Ingénieur	Junior	Homme
18	Avancé	Ergonome	Sénior	Homme

Tableau 7 Profil des participants

5.1.2.3 Procédure

L'expérimentation dure 3 heures. Elle se déroule pour chacun des groupes dans une salle de réunion aménagée spécialement pour l'occasion. Des post-it, des stylos de couleur, des feutres, des crayons de papier ainsi que des feuilles de papier blanc, du scotch et un paperboard sont mis à la disposition des participants qui, en outre, ont la possibilité d'afficher si nécessaire leurs productions sur les murs.

L'expérimentation dont le déroulement a été schématisé dans la Figure 60, commence par une présentation orale de 10 minutes au cours de laquelle les objectifs de la séance et le contexte de l'étude sont présentés. Les règles à suivre pendant le workshop (correspondant aux règles énoncées par Osborn [153]) ainsi que les résultats attendus en termes de livrables (réalisation de fiches concepts) sont définis.

Au terme du brief, le groupe démarre par une purge d'une durée de 20 minutes au cours de laquelle les participants doivent répondre aux questions suivantes : quels sont les robots que vous connaissez ? Pouvez-vous regrouper vos propositions au sein de catégories ? Cet exercice va permettre de libérer le groupe de ses idées préconçues mais surtout de produire une 1^{ère} liste d'idées sur le sujet. La purge a aussi un rôle d'échauffement pour les participants qui ne se connaissent pas et doivent apprendre à collaborer ensemble.

Après la purge, le groupe démarre une session de 40 minutes de brainstorming basée sur un raisonnement bio-inspiré ; c'est-à-dire un raisonnement analogique destiné à permettre aux participants de proposer de nombreuses idées. Tous doivent justifier chacune de leur proposition en associant une caractéristique, une fonction, une forme ou une utilisation à un principe solution intéressant pour leur robot. Le brainstorming se termine par un travail de sélection des idées prometteuses d'une durée de 10 minutes suivi d'une pose de 10 minutes.

La dernière étape de l'expérimentation dure une heure et demie et est destinée au développement des solutions de conception (RI clés visée : concept) sous forme de Fiches Concept (FC). Avant le début de cette phase de convergence, il est précisé au groupe de s'assurer de la fabricabilité de leurs concepts. Pour faciliter la recherche de concepts, une liste de mots stimulus est distribuée car, au vue des travaux de Kent and Rosanoff [154] et de Bonnardel and Bouchard [155], les mots inducteurs ont montré leur utilité sur l'inspiration de participants ayant plus ou moins d'expertise dans la conception. De plus l'utilisation de la FA comme piste éventuelle pour la recherche de solutions est spécifiée oralement ; les fiches et objets techniques sont distribués à cette occasion au groupe 2. Enfin il est rappelé aux participants que leurs propositions doivent être décrites dans des FC suivant le template suivant :

- Un ou des dessins à main levé (sketch) qui illustrent le concept et l'arrangement spatial des différents éléments. Ces dessins sont les éléments centraux de la FC et correspondent, comme nous l'avons montré dans le paragraphe 0, à l'une RI clé de l'activité de conception amont. Et ils permettent enfin, selon Schon [156], une conversation réflexive basée sur un cycle de génération et visualisation.

- Un court texte expliquant le principe de fonctionnement de la solution et décrivant les différentes fonctionnalités, matériaux, formes et textures nécessaires.
- Une liste des avantages et inconvénients de la solution proposée.

Au terme de l'expérimentation, les participants sont invités à remplir pendant 10 minutes un questionnaire dans lequel ils évaluent leur performance individuelle lors du workshop et à faire part de leurs éventuelles remarques.

5.1.2.4 Evaluation

Le protocole d'évaluation des RI produites pendant le workshop s'est déroulé en plusieurs phases. Tout d'abord, nous avons mesuré la fluidité [157] (nombre d'idée proposées) et la flexibilité [157] (nombre de catégories de réponses différentes) de chaque groupe pendant le brainstorming. Nous avons ensuite quantifié l'originalité des idées et des familles d'idées.

Enfin nous avons procédé à l'évaluation quantitative puis qualitative des FC créées au terme de la phase de développement des concepts. Cette évaluation qualitative a été réalisée par 6 évaluateurs n'ayant pas pris part à l'expérimentation. 3 des évaluateurs retenus travaillent en conception amont de produits nouveaux, 2 autres ont des connaissances avancées en fabrication (traditionnelle et additive) et le dernier a une expertise dans les deux thématiques. Tous ont plus de 7 ans d'expérience dans leur métier.

Le Tableau 8 ci-dessous synthétise le profil de chacun de ces juges.

Juge	Expertise conception de produits nouveaux	Expertise procédés de fabrication	Expérience dans le métier	Genre
1	OUI	NON	7 ans	Homme
2	OUI	NON	13 ans	Homme
3	OUI	NON	7 ans	Homme
4	OUI	OUI	25 ans	Homme
5	NON	OUI	10 ans	Homme
6	NON	OUI	10 ans	Homme

Tableau 8 Profil des juges

Pour procéder à l'évaluation des FC, celles-ci sont préalablement anonymées et un numéro d'identification aléatoire leur est attribué de sorte qu'aucun élément extérieur ne permette d'identifier le groupe qui est à l'origine de la FC.

Chaque évaluateur, selon son expertise, est amené à se prononcer selon 3 critères distincts : le 1^{er} porte sur l'adéquation entre la fiche proposée et le problème de conception posé, les deux autres correspondent à des critères que nous avons déjà introduits lors de l'analyse des DFAM Globales, à savoir l'originalité et la fabricabilité.

- *Adéquation avec le problème posé.* Elle est mesurée sur une échelle binaire. 1 signifie que le concept satisfait les exigences et répond bien au brief ; 0 que ce n'est pas le cas.
- *Originalité.* Elle est mesurée avec une échelle de Likert à 5 niveaux. L'évaluateur doit répondre à la question suivante : La solution proposée est-elle originale ? Une note de 1

signifie que la fiche n'est pas du tout originale, à l'opposé une note de 5 signifie que la fiche est considérée comme très originale.

- *Fabricabilité*. Son évaluation doit permettre de répondre à la question : La solution proposée est-elle techniquement réaliste et dans des délais raisonnables ? Là encore une échelle de Likert à 5 niveaux est employée avec une interprétation identique à celle utilisée pour l'originalité.

Les résultats de l'évaluation de chaque FC sont saisis directement par les juges dans un fichier informatique dont la trame est présentée dans la Figure 62.

CODE	Respect CDC =		Originalité					Fabricabilité				
	OUI	NON	Pas du tout	Pas très	Moyennement	Un peu	Très	Pas du tout	Pas très	Moyennement	Un peu	Très
	1	0	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
40												
89												

Figure 62 Trame d'évaluation des FC

5.1.3 Résultats et analyse

5.1.3.1 Résultats et analyse de l'étape de recherche des idées

A l'issue du brainstorming, 317 idées ont été proposées, regroupées au sein de 29 familles différentes. Une étude quantitative des idées produites lors du workshop nous permet de conclure que les groupes 1 et 2 qui sont des groupes novices en FA à ce stade de l'expérimentation ont proposé plus d'idées. On retrouve également cette tendance en ce qui concerne l'originalité des idées puisque les groupes 1 et 2 ont respectivement proposé 40% et 42% d'idées originales contre 32% pour le groupe 3 (voir Tableau 9 et Figure 63). Nous précisons que l'originalité a été définie ici à l'aide du critère de rareté statistique (unicité de la proposition). En effet, une idée ne peut être originale (donc créative) que si elle n'est émise qu'une seule fois.

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Nombre d'idées proposées (fluidité)	113	122	82
Nombre d'idées originales	47 (42%)	49 (40%)	26 (32%)

Tableau 9 Résultats de l'analyse quantitative des idées.

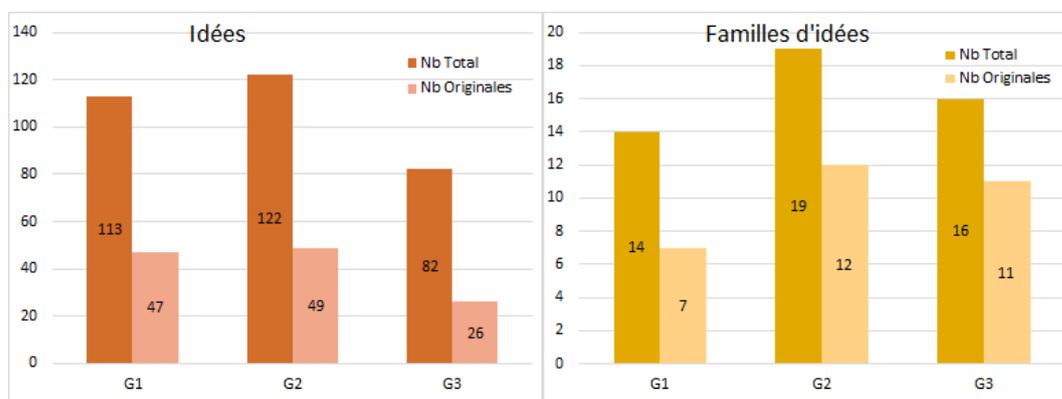


Figure 63 Total et unicité des idées et familles d'idées obtenues à l'issue du brainstorming

Lorsque nous étudions les idées qui ont ensuite été regroupées au sein de familles suite au brainstorming, nous constatons que c'est le groupe 3 (groupe avec des experts en FA) qui, malgré un plus faible nombre d'idées, a proposé le plus de familles originales avec 69% des regroupements proposés, contre 50% et 58% pour les groupes 1 et 2 (voir Tableau 10 et Figure 63).

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Nombre de familles d'idées (flexibilité)	14	19	16
Nombre de familles originales	7 (50%)	12 (63%)	11 (69%)

Tableau 10 Résultats de l'analyse quantitative des catégories d'idées.

Nous avons ensuite analysé ces différentes familles d'idées et avons identifié 3 thématiques distinctes (Figure 64) :

- Les fonctions techniques attendues pour le produit telles que « être modulaire » ou « être transportable » citées lors du workshop. Il s'agit de la catégorie la plus représentée avec 66% des items cités. Ces propositions sont faites par les 3 groupes.
- Les fonctions d'usage traduisant des interactions possibles avec l'utilisateur ou l'environnement (ex : « pouvoir s'adapter à l'environnement », « pouvoir communiquer avec l'homme », ...). Elles correspondent à 24% des propositions et concernent également les 3 groupes.
- La forme du produit qui ne concerne que 10% des réponses et n'a pas été évoquée par le groupe de novices.

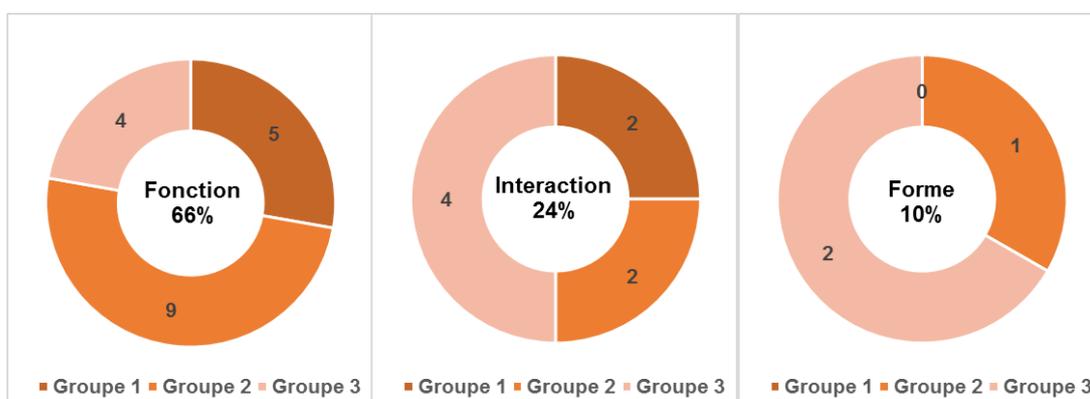


Figure 64 Répartition des catégories d'idées proposées par les groupes

Nous retenons de cette analyse des familles d'idées que non seulement celles-ci sont plus originales lorsqu'elles sont proposées par les groupes possédant des KFA mais qu'en plus elles apportent des pistes de réflexions aux concepteurs dans les différentes catégories : fonction, interaction et forme. Cette dernière catégorie est d'ailleurs la plus intéressante car elle n'est pas envisagée par le groupe sans KFA.

5.1.3.2 Résultats et analyse de l'étape de développement des concepts

Les différentes catégories d'idées ont ensuite été retravaillées par les différents groupes dans la 2nd partie du workshop et ont permis de formaliser au total 36 FC avec la répartition suivante :

- Groupe 1 : 9 FC
- Groupe 2 : 21 FC
- Groupe 3 : 6 FC

Le 1^{er} élément que nous avons cherché à étudier est le nombre de FC produites par les 3 groupes qui étaient en adéquation avec le problème posé, originales ou fabricable. Pour cela nous avons considéré qu'un critère était satisfait lorsque la note moyenne obtenue à l'issue de l'évaluation des juges était :

- Supérieure ou égale à 3 sur une échelle de 5 pour l'originalité et la faisabilité technique.
- Supérieure à 0,5 sur une échelle de 5 pour l'adéquation avec le problème posé.

Le Tableau 11 ci-dessous synthétise les résultats obtenus.

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Nombre de FC	9	21	6
FC satisfaisant le problème posé	8 (89%)	12 (57%)	4 (67%)
FC originales	3 (33%)	9 (43%)	3 (50%)
FC fabricables	4 (44%)	8 (38%)	1 (17%)

Tableau 11 Résultats de l'évaluation qualitative et quantitative des FC

Il semble que, dans nos conditions expérimentales, les groupes possédant des connaissances en FA proposent plus de FC originales (respectivement 43% pour le groupe 2 et 50% pour le groupe 3 contre 33% pour le groupe 1) lorsque la FA est identifiée comme une piste possible pour la recherche de solutions.

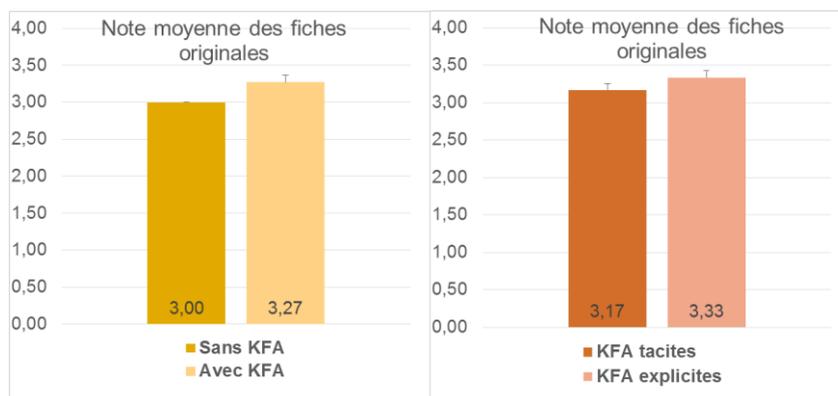


Figure 65 Note moyenne et erreur type des FC originales avec ou sans KFA (gauche) et selon le type de KFA (droite)

Nous avons souhaité approfondir cette analyse quantitative (traitement des données effectué avec SPSS) et comprendre si la présence de connaissances FA ou leur typologie (explicite ou tacite)

avaient une influence sur la note moyenne obtenue pour le critère d'originalité des FC. Pour cela, nous avons extrait de notre corpus les FC évaluées comme originales dans chaque groupe.

Tout d'abord, nous observons que la note moyenne obtenue dans les groupes disposant de KFA (groupes 2 et 3 réunis) est supérieure à celle du groupe témoin (groupe 1) – 3,27 contre 3,00 ; voir Figure 65 gauche – et qu'il en est de même entre le groupe disposant de connaissances explicites et le groupe d'expert – 3,33 contre 3,17 ; voir Figure 65 droite –.

Cette 1^{ère} observation est ensuite complétée par un test de Shapiro-Wilk W ($\alpha=5\%$) adapté pour les échantillons de petite taille ($N < 50$) et nous permettant de déterminer si la distribution des résultats obtenus dans chacun des échantillons testés suit une loi normale. Les résultats du test nous amènent à rejeter l'hypothèse de normalité et à employer un test non paramétrique de Kruskal Wallis H pour réaliser une analyse de la variance entre les groupes.

Ce test nous permet de conclure que pour un seuil de 5% il n'y a pas de différence significative entre les groupes disposant de KFA sous forme explicite ou tacite ($H^* = 0,805$; $p = 0,370$).

En revanche il existe une différence significative pour un seuil de 10% entre les résultats obtenus dans les groupes avec ou sans KFA ($H^* = 3,478$; $p = 0,062$). Ces résultats corroborent d'ailleurs les conclusions de Bin Maidin, et al. [158]. Ces derniers ont en effet, démontré que des connaissances FA mises à disposition du concepteur au sein d'une base de données portant sur des caractéristiques produits étaient une source d'inspiration pertinente et utile pour améliorer la conception de pièces et de produits.

Une étude détaillée des FC nous permet en outre de mettre en évidence cette différence d'originalité. Dans les groupes avec KFA, les concepts représentés tirent leur originalité des possibilités de de la FA en terme de complexité ce qui n'est pas le cas du groupe novice. La Figure 66 illustre ce constat en présentant le sketch associé des FC ayant été jugés originales :

- le sketch de gauche proposé par le groupe novice s'appuie sur des formes et un fonctionnement recourant à des procédés traditionnels.
- le sketch de droite proposé par le groupe expert tire en partie son originalité de l'utilisation de la complexité matériau offerte par la FA et qui permet d'obtenir les surfaces décrites comme souples et leur articulation les unes par rapport aux autres.

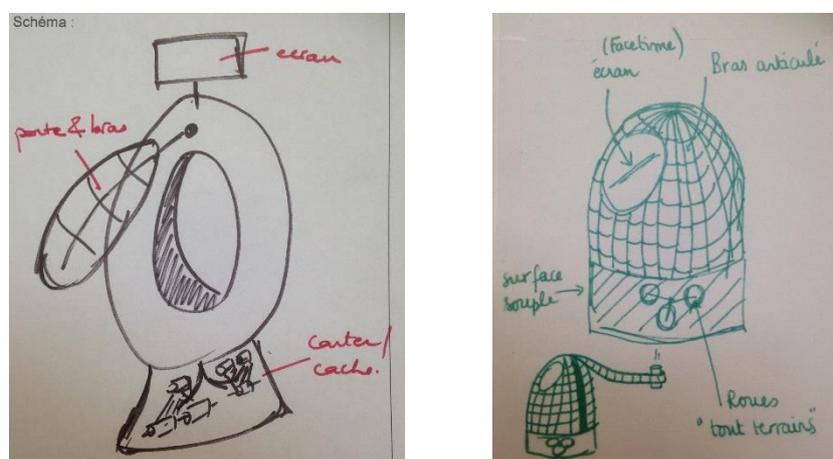


Figure 66 Illustration de la différence de complexité dans les concepts

Nous avons ensuite procédé à la même démarche mais cette fois pour étudier la fabricabilité des FC. Il ressort que les groupes possédant des KFA ont proposé moins de FC fabricables (respectivement 38% pour le groupe 2 et 17% pour le groupe 3 contre 44% pour le groupe 1).

Nous observons également que les notes moyennes des FC fabricables semblent proches entre les groupes avec ou sans KFA – 3,69 contre 3,55 – voir Figure 67 gauche –. Quant aux groupes avec KFA, on observe une moyenne du groupe 2 (KFA explicites) supérieure à celle obtenue par le groupe 3 (KFA tacites) – 3,59 contre 3,25; voir Figure 67 droite –.

Là encore cette 1^{ère} tendance a été approfondie par l'utilisation d'un test de Kruskal Wallis (seuil de 5%) pour lequel les conclusions sont les suivantes :

- Pas de différence significative entre les résultats obtenus dans des groupes disposant ou non de KFA ($H^* = 0,313$; $p = 0,576$)
- Pas de différence significative entre les résultats obtenus dans des groupes disposant de typologies de KFA différentes ($H^* = 2,315$; $p = 0,128$)



Figure 67 Note moyenne et erreur type des FC fabricables avec ou sans KFA (gauche) et selon le type de KFA (droite)

Ces résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La possession par les groupes de créativité de KFA ne permet pas de proposer des concepts plus fabricables.
- La forme sous laquelle est véhiculée la KFA n'améliore pas non plus la fabricabilité des concepts développés par les groupes de créativité.

Il semble donc qu'à ce stade de la conception, la possession de KFA n'est pas un facteur différenciant pour la fabricabilité des concepts proposés. Nous pouvons expliquer justifier cela par le fait que l'approche DWAM qui est ici développée n'a pas pour préoccupation majeure la recherche de solutions de conception fabricables mais bien de solutions originales.

Un élément nous permet de nuancer en partie ces résultats et vient de l'analyse des questionnaires distribués à la fin du workshop (voir annexe 1 page 160), en particulier de la question « facilité à trouver des idées » et des remarques émises. En effet, 10 des 18 participants, répartis dans les 3 groupes, répondent qu'ils ne sont pas tellement d'accord avec l'affirmation « il était facile de trouver des idées » (note sur l'échelle de Likert comprise entre 1 et 5). Il semble en effet que l'évocation de

la fabricabilité pendant la phase de convergence a pu déstabiliser les participants. Un participant du groupe 3 écrit d'ailleurs que « le mot fabricable a fortement réduit [s]a production d'idées innovantes », un autre du groupe 2 évoque quant à lui le fait que « la confrontation avec la FA était perçue plus comme un obstacle plutôt qu'une opportunité, ce qui m'a demandé beaucoup d'efforts pour trouver des idées ». Ceci nous permet de dire que les participants n'ont pas aisément réussi à proposer des solutions originales et à penser en même temps à la faisabilité technique de leurs concepts. Il pourrait donc être intéressant de réitérer cette expérimentation afin de valider la corrélation éventuelle entre KFA et fabricabilité. Pour cela il faudrait envisager de supprimer l'évocation explicite de la FA qui est faite lors du développement des concepts.

5.1.4 Conclusion

Nous cherchions au cours de cette expérimentation à nous assurer que la typologie des connaissances en FA (explicite ou tacite) n'avait pas d'incidence sur la recherche de solutions créatives en conception amont.

Pour cela nous avons organisé une séance de créativité au cours de laquelle nous nous sommes intéressés aux solutions proposées par des groupes de créativité ayant des niveaux et des formes de connaissances différents.

Nous avons pu démontrer avec cette expérimentation que le recours à des connaissances explicites dans un groupe de conception permet d'obtenir des résultats similaires à ceux obtenus par des experts en FA lors du développement des concepts : l'originalité ou la fabricabilité des solutions proposées étant semblables dans les deux cas.

De plus nous avons mis en avant le fait que la possession de KFA:

- n'améliorait pas la quantité ou l'originalité des idées proposées
- permettait d'obtenir des résultats supérieurs à ceux obtenus par un groupe novice concernant l'originalité des concepts développés.
- n'avait pas d'incidence sur la fabricabilité des solutions.

Nous en concluons qu'il existe bien une corrélation entre KFA et créativité des groupes de conception, ce qui nous permet de retenir les points suivants :

- Notre modèle de conception préliminaire, destiné être enrichi par des connaissances FA, peut s'appuyer exclusivement sur des connaissances de type explicite. Nous validons la partie de notre hypothèse 1 relative à la forme explicite des connaissances,
- L'intégration de connaissances relatives à la FA favorise l'approche DWAM, en particulier lors de la phase de recherche de concepts. Nous validons donc notre hypothèse 2.

Nous précisons que ces conclusions sont valables dans la limite du périmètre de modèle que nous avons étudié lors de cette expérimentation (phases 1 et 2) et pour les profils pluridisciplinaires qui ont été considérés.

Nous présentons dans la section suivante les expérimentations réalisées afin de capitaliser les connaissances FA au juste besoin qui seront intégrées dans notre modèle initial de conception.

5.2 Expérimentation 2 : Capitalisation des connaissances au juste besoin.

A ce stade, notre objectif est de capitaliser sous forme explicite les connaissances FA nécessaires et suffisantes, que nous appelons connaissances FA au juste besoin en vue de les intégrer dans notre modèle préliminaire et ainsi augmenter le potentiel créatif des concepteurs (Figure 68).

En effet, nous pensons que du fait du nombre important de connaissances que les concepteurs doivent aujourd'hui manipuler, il est indispensable que seules les connaissances FA utiles à leurs activités soient mises à leur disposition afin de mener une approche DWAM.

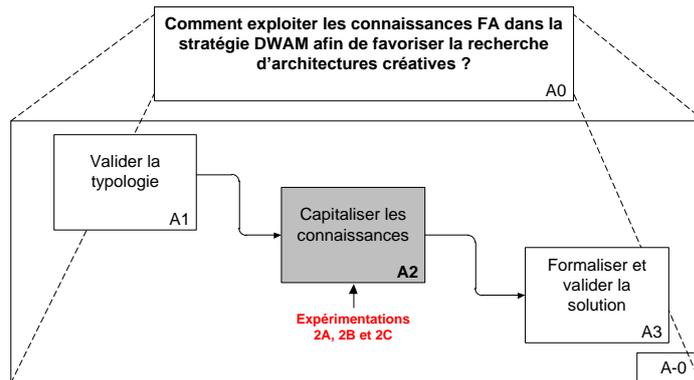


Figure 68 Place des expérimentations 2A à 2C dans la démarche globale

Pour capitaliser ces connaissances au juste besoin, nous nous appuyons sur la démarche de proposée par Grundstein que nous avons décrite au paragraphe 3.2.4.2. Cette démarche va nous aider, par le biais de trois expérimentations successives (Figure 69), à capitaliser les trois attributs caractéristiques de ce juste besoin : le contenu (information disponible), la représentation (support utilisé) et l'instanciation (timing d'introduction).

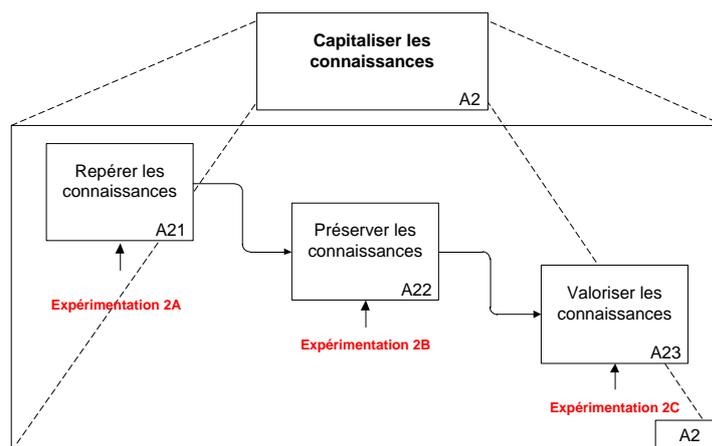


Figure 69 Place des expérimentations 2A à 2C dans la phase de capitalisation des connaissances

La 1^{ère} expérimentation vise à repérer les connaissances FA nécessaires aux phases amont, c'est-à-dire à caractériser le juste besoin en termes d'informations disponibles.

La 2^{ème} est destinée à identifier les supports les plus à même de préserver et de véhiculer les connaissances dans une perspective de pluridisciplinarité Il s'agit donc de caractériser le juste besoin en termes de représentation des connaissances.

Enfin la 3^{ème} porte sur la valorisation des connaissances par une identification du moment le plus adapté pour leur introduction (ou juste à temps). Ce qui correspond à une caractérisation du juste besoin en termes d'instanciation des connaissances.

Afin de mener à bien ces 3 expérimentations, nous nous appuyons sur le modèle préliminaire de conception que nous avons décrit dans le paragraphe 0 et que nous allons chercher à enrichir progressivement.

5.2.1 Expérimentation 2A : Repérage des connaissances FA nécessaires

5.2.1.1 Introduction

Cette expérimentation est dédiée à l'identification des contenus de KFA (informations disponibles) qui peuvent favoriser la production de solutions créatives. En effet, nous avons montré précédemment que les KFA utilisées dans les DFAM Globales touchent de nombreux thèmes (matériau, procédé, produit et méthodes) et peuvent être de type opportuniste ou restrictif. Pourtant parmi toutes ces connaissances, seules quelques-unes sont utiles au développement d'une approche DWAM.

Pour cela, nous utilisons la 1^{ère} étape de la démarche de capitalisation des connaissances de Grundstein afin de repérer les connaissances FA correspondant à un juste besoin informationnel (Figure 70).

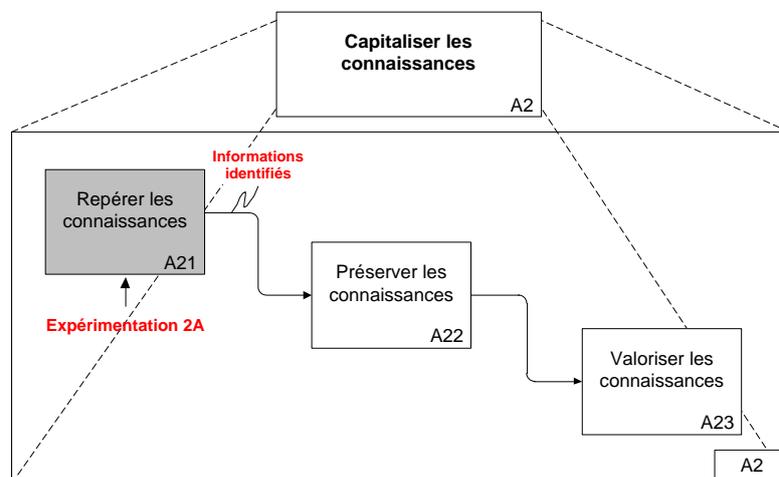


Figure 70 Place de l'expérimentation 2A et résultat attendu

Pour réaliser ce repérage, nous nous appuyons sur une étude du processus de conception suivi par des concepteurs impliqués dans des projets d'innovation. Cette étude est divisée en deux volets. Tout d'abord, l'expérimentation vise à recueillir auprès de concepteurs des informations caractéristiques de la démarche et des décisions prises lors des phases amont. Puis dans un second temps nous quantifions, à l'aide d'une série de questions, l'impact réel ou potentiel des KFA sur le processus d'innovation décrit par chacun de nos interlocuteurs (Figure 71).

A l'issue de cette expérimentation, nous souhaitons connaître :

- Les contenus de KFA (opportunité et contrainte) susceptibles d'améliorer les activités (divergentes et convergentes) des concepteurs. Les obstacles éventuels à l'utilisation de KFA lorsque des connaissances fabrication traditionnelles sont déjà employées
- Les critères de sélection des RI pour lesquels des KFA sont utilisées ou pourraient l'être.

5.2.1.2 Protocole expérimental

Le protocole de cette expérimentation est illustré à l'aide de la Figure 71 ci-dessous.

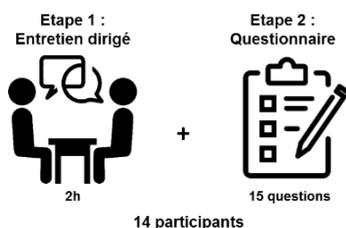


Figure 71 Protocole expérimental de l'expérimentation 2A

5.2.1.2.1 Participants

14 participants, âgés de 24 à 49 ans (28 ans en moyenne) ont pris part à notre expérimentation. Tous ont une activité en lien avec les phases préliminaires de conception. Leur expérience professionnelle varie de 2 ans à 20 ans. La répartition dans les disciplines professionnelles est la suivante : 8 ingénieurs, 2 ergonomes et 4 designers. Tous les participants sont des utilisateurs avertis de la FA et en connaissent les principales caractéristiques sans pour autant être considérés comme des experts du domaine.

Le Tableau 12 ci-dessous synthétise les caractéristiques des participants à cette expérimentation.

Participant	Métier	Age	Genre
1	Designer	27	Homme
2	Designer	24	Homme
3	Designer	26	Homme
4	Designer	26	Femme
5	Ingénieur	49	Homme
6	Ingénieur	26	Homme
7	Ingénieur	52	Homme
8	Ingénieur	25	Homme
9	Ingénieur	28	Homme
10	Ingénieur	30	Homme
11	Ingénieur	27	Femme
12	Ingénieur	33	Homme
13	Ergonome	29	Homme
14	Ergonome	27	Femme

Tableau 12 Caractéristiques des participants

5.2.1.2.2 Réunion préliminaire

Afin de s'assurer d'une terminologie commune à tous les participants, nous avons fait le choix d'organiser avec chacun d'eux une réunion préliminaire au cours de laquelle nous présentons les éléments sur lesquels vont s'appuyer l'expérimentation :

- le modèle préliminaire qui servira de support à la description des activités et dans lequel nous cherchons à situer les connaissances utilisées.
- les cartes de Pei, et al. [70] (ID Cards) qui permettent de définir succinctement et sans ambiguïtés les RI et de les situer dans le processus de conception (voir paragraphe 3.1.4).

Par ce biais, nous souhaitons éviter que la spécialité ou les habitudes professionnelles du participant ne jouent un rôle dans la description des activités.

Cette réunion préliminaire, d'une durée maximale de 1h, nous permet donc de sensibiliser les participants au contexte de notre recherche et au vocabulaire employé, mais aussi de les préparer à la prochaine entrevue au cours de laquelle ils seront interrogés.

La réunion préliminaire se termine par une invitation du participant à sélectionner pour le rendez-vous suivant, planifié une semaine plus tard, un projet d'innovation récent, représentatif de son activité et qui pourrait servir d'étude de cas au cours de l'entretien qui sera réalisé.

5.2.1.2.3 Procédure

L'étude en tant que telle est constituée de 2 phases : un entretien semi-dirigé d'une durée approximative de 2 heures suivi d'un questionnaire présenté dans l'annexe 2 page 161.

Durant l'entretien, réalisé en face à face, chaque participant est amené à décrire la démarche de conception qui a été suivie et en particulier à détailler les points suivants :

- RI produites et activités permettant leur production
- Critères influençant la création ou la sélection des RI
- Place des connaissances relatives aux matériaux ou à leur mise en œuvre dans la démarche

Au cours des échanges, l'expérimentateur reformule les réponses fournies par le participant afin de s'assurer de sa compréhension. L'entretien se conclut par une dernière question portant sur l'intérêt perçu pour un outil d'aide à l'identification et à la mise à disposition de connaissances FA jugée utiles à leur travail.

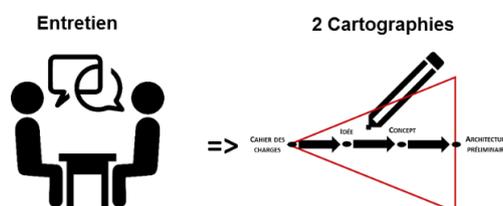


Figure 72 Réalisation des cartographies à l'issue des entretiens

A l'issue des entretiens, les informations collectées relatives aux RI et aux critères sont replacées sur notre modèle (Figure 72). Puis ces modèles annotés, que nous appelons par la suite cartographies,

sont soumis aux participants afin qu'ils en valident l'exactitude des contenus et qu'ils indiquent les éventuelles modifications à réaliser en cas d'erreur ou d'inexactitude des informations.

Pour chaque entretien nous disposons donc de 2 cartographies (RI, critères).

Le participant est ensuite invité à remplir un questionnaire (voir annexe p160) dans lequel les questions sont sous la forme de questions fermées à réponse unique binaire (OUI / NON).

Les questions Q1 et Q2 permettent de mesurer l'impact des connaissances FA de chaque participant sur les solutions de conception développées en termes d'opportunités et de contraintes.

La 2^{ème} partie des questions (Q3 à Q15) permet d'identifier, parmi les caractéristiques des produits innovants définies par Saunders, et al. [159], celles pour lesquelles le participant fait appel à ses propres KFA, et plus spécifiquement celles relatives à la complexité en FA.

Le Tableau 13 présente les différentes caractéristiques décrites par Saunders et leur regroupement en 5 familles distinctes.

Famille de caractéristiques	Caractéristiques
Fonctionnalité	Ajout de fonction
	Modification / Adaptation des fonctions
Architecture	Modification des dimensions
	Modification de l'agencement des composants
	Extension des cas d'utilisation
Interaction avec son environnement	Modification de la disposition de la matière
	Modification du flux d'énergie
	Modification du flux d'information
Interactions avec les utilisateurs	Amélioration de l'ergonomie
	Amélioration sensorielle
	Amélioration cognitive
Coût	Modification du coût d'achat
	Modification du coût de fonctionnement ou de maintenance

Tableau 13 Caractéristiques des produits innovants selon [159]

5.2.1.3 Résultats et analyse des entretiens

Les projets présentés lors des entretiens nous ont permis d'aborder des domaines très variés, comme l'illustre le Tableau 14 ci-dessous, ce qui nous permet de garantir la représentativité de nos résultats.

Projet	Degré d'innovation	Marché	Secteur d'activité	Contraintes projet
1	Incrémental	Grand public	Electroménager	Coût
2	Radical	Niche	Génie civil	Coût
3	Radical	Grand public	Distribution spécialisée	Coût
4	Incrémental	Grand public	Puériculture	Normes
5	Radical	Niche	Aéronautique	Délais
6	Incrémental	Grand public	Services	Coût
7	Incrémental	Niche	Packaging	Coût
8	Radical	Niche	Aéronautique	Normes
9	Radical	Grand public	Médical	Normes

10	Radical	Niche	Transport et énergie	Délais
11	Incrémental	Niche	Packaging	Coût
12	Incrémental	Niche	Médical	Normes
13	Radical	Grand public	Sport	Coût
14	Incrémental	Grand public	Tout secteur	Coût

Tableau 14 Caractéristiques des études de cas présentées

Nous détaillons dans un 1^{er} temps, l'un des projets qui nous a été présenté afin d'introduire les 2 types de cartographies (RI et critères) que nous avons créées et qui, dans les 13 autres cas d'études, sont structurées de manière identique. Puis dans un 2^{ème} temps, nous présentons nos conclusions basées sur l'analyse comparative des différentes familles de cartographie et sur une synthèse des échanges avec les participants.

5.2.1.3.1 Focus sur le projet 1 :

Ce projet d'une durée de 2 mois a été réalisé dans l'entreprise CSI, spécialisée dans la fabrication de petit électroménager. Il avait pour objectif la conception d'une centrale vapeur low-cost (aujourd'hui vendue sous la dénomination Astoria Steam Rc335a) et s'est déroulé en deux phases : conception de la base puis conception du fer à repasser. L'équipe en charge du projet était constituée d'un designer (notre interlocuteur), de deux ingénieurs, d'un ergonomiste et d'une personne du marketing.

L'entretien s'est exclusivement porté sur la 1^{ère} phase du projet après que notre interlocuteur a précisé que le déroulement des deux phases était similaire.

Avant de procéder à la recherche d'idées, le 1^{er} travail effectué par le designer portait sur une étude approfondie des codes de la marque, du marché cible, des prix pratiqués pour les produits similaires ainsi que sur les problèmes d'ergonomie généralement rencontrés par les utilisateurs de centrale vapeur. Ces différentes recherches ont permis de montrer que :

- ces produits sont généralement assez peu pratiques (ex : longueur de fil insuffisante, faible stabilité du fer sur le socle)
- certaines fonctions sont inutiles (niveau d'eau restant) ou trop compliquées à utiliser (réglage des débits de vapeur en fonction du type de linge)

Sur la base de ces résultats, le designer a commencé à réfléchir à des idées pouvant satisfaire son cahier des charges notamment en s'inspirant de la nature pour trouver une ligne en accord avec les codes de la marque et se différenciant de la concurrence. L'idée retenue est de créer un produit dont la forme générale évoquerait une vague et la vapeur sortant du fer l'écume (Figure 73).

La phase de génération de concepts dure 20 jours au cours desquels de nombreux dessins à main levée (sketch) sont créés. Selon notre interlocuteur, ces concepts ont été fortement conditionnés par des critères de style et d'affordabilité (c'est-à-dire l'aptitude d'un produit à suggérer son utilisation) ainsi que par la volonté de pouvoir les réaliser avec les moyens de productions habituellement utilisés par l'entreprise et considérés comme les moins onéreux. Le procédé traditionnellement employé étant l'injection plastique, les formes ont donc été adaptées à cette exigence.

La phase de conception architecturale a d'abord démarré par une réflexion avec des dessins à main levée pour enchaîner ensuite sur une modélisation 3D sous Solidworks et Alias et la réalisation de maquettes, essentiellement pour la partie fer à repasser (Figure 73). Lors de cette phase, notre interlocuteur nous précise que les critères qui conditionnaient ses décisions étaient l'ergonomie du produit, l'emplacement des composants électroniques et les dimensions (Figure 74). Pour le tracé de l'architecture, l'interlocuteur reconnaît avoir dû se faire aider des experts fabrication car la tenue mécanique des composants lors de l'assemblage était dépendante de la nuance et de la pigmentation des polymères envisagés. Ceci l'a obligé à adapter les épaisseurs et les géométries des clips.

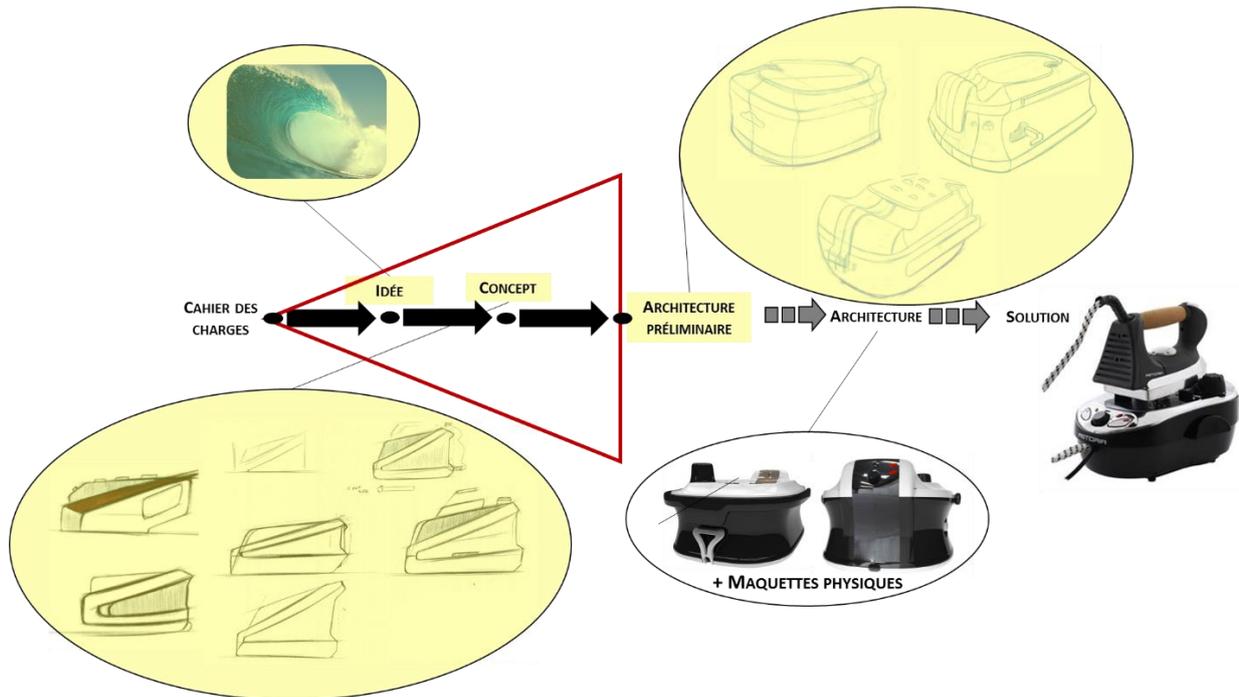


Figure 73 Cartographie des RI issu de l'entretien avec le participant 1

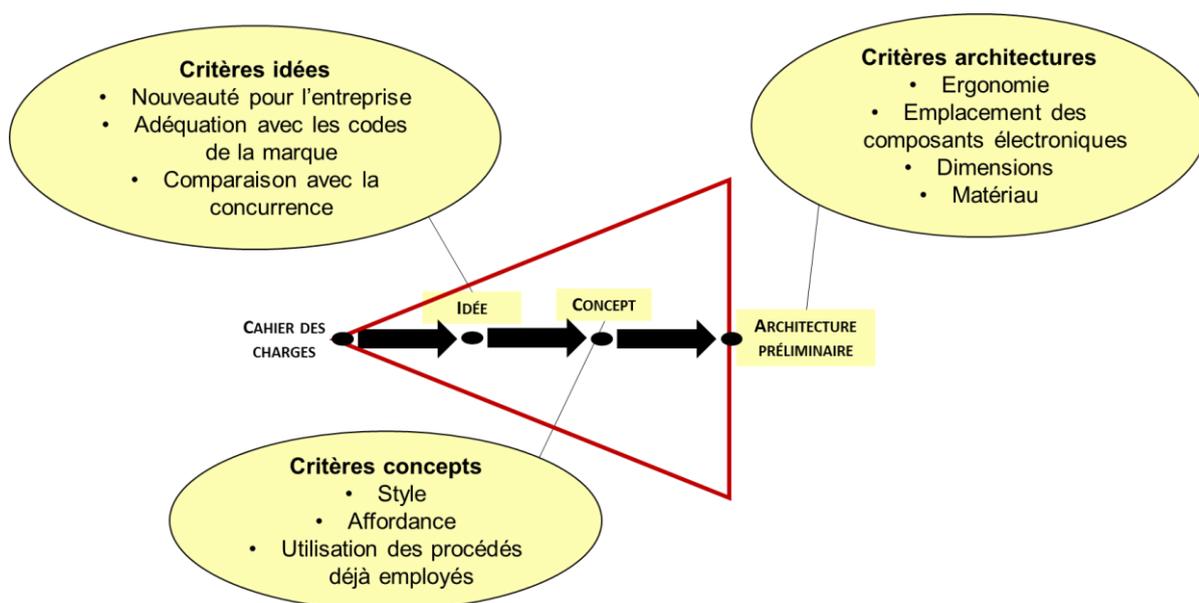


Figure 74 Cartographie des critères de sélection de l'entretien avec le participant 1

La Figure 73 et la Figure 74 présentent les deux cartographies qui ont été produites à l'issue de la mise en place sur notre modèle des RI créées et critères employés au cours du projet. Les prochains paragraphes sont destinés à présenter les analyses que nous avons pu effectuer.

5.2.1.3.2 Résultats et analyse des cartographies de critères

Nous nous intéressons tout d'abord à l'étude des cartographies présentant les critères influençant la génération ou la sélection des RI clés de notre modèle (illustrées par la Figure 74). Pour nous permettre d'en avoir une meilleure compréhension, nous avons classés les critères qui ont été cités au cours des entretiens dans l'une des trois catégories suivantes : Nouveauté – Attractivité – Faisabilité.

- *La Nouveauté* correspond à la considération principale des projets qui nous ont été présentés. Suivant les projets, elle se décline en termes de nouveauté pour le client ou pour l'entreprise. Nous avons pu relever que la nouveauté était généralement associée dans le cas des projets d'innovation radicale à la notion de brevetabilité. Elle est prise en compte à chaque stade de la démarche.
- *L'Attractivité* des solutions regroupe des critères tels que l'esthétique, la facilité d'utilisation, ou encore l'affordance cités par nos interlocuteurs. Elle aussi est prise en compte dans les différentes phases de notre modèle.
- *La Faisabilité* est essentiellement associée à des critères évaluant la faisabilité technique (coût, délai, investissement initial, ...). Dans les projets impactés par des exigences réglementaires fortes (projets 4, 8, 9 12), elle porte également sur la faisabilité « normative », c'est-à-dire permise par les normes en vigueur. Elle est généralement étudiée lorsque les concepts ont été développés.

Parmi ces 3 familles de critères, c'est sur la faisabilité technique que nous avons identifié un besoin en connaissances en FA. En effet, il ressort que pour une majorité de nos interlocuteurs, la faisabilité technique est évaluée dans un 1^{er} temps de façon subjective (phase concept) puis dans un 2nd temps de manière objective (phase architecture) car la solution est suffisamment détaillée pour permettre un chiffrage des coûts et des délais de réalisation.

Or l'évaluation subjective, correspondant de fait à une estimation de l'effort nécessaire à fournir pour permettre le développement et la commercialisation du futur produit n'est pas sans poser de problème. En effet, pour 7 des 14 projets présentés, il nous a été précisé que les décideurs en charge de mesurer cet effort ne disposaient pas de connaissances FA suffisantes pour estimer de façon précise le budget nécessaire ou pour quantifier le temps de développement lié à la nouveauté.

Ainsi, dans le cas du projet 1, notre interlocuteur a reconnu que les décideurs étaient des ingénieurs spécialisés dans les procédés de mise en œuvre des polymères et que ceux-ci souhaitaient conserver les solutions les plus proches de ce que l'entreprise avait généralement l'habitude de faire : « It was very important to design one product without changing the main mold because this is the most expensive part of production ». En d'autres termes toute solution qui ne fait pas appel à des procédés connus et maîtrisés était rejetée, limitant d'autant le potentiel innovant du produit final.

Pour les projets 10 et 12, selon nos interlocuteurs, malgré des avantages indéniables en termes de nouveauté, les concepts dépendant de la FA ont été laissés de côté car ils impliquaient l'utilisation d'un procédé de fabrication pour lequel l'effort à fournir pour permettre leur développement était perçu comme « trop important ». Les entreprises n'avaient, en effet, pas le savoir-faire technique pour développer en interne ces solutions prometteuses ; ce qui impliquait nécessairement de faire appel à de la sous-traitance à court terme, et à long terme de développer en interne les compétences. Or ces stratégies ont été considérées comme trop compliquées et trop coûteuses à déployer.

A l'opposé, avec une situation identique à celle des projets 10 et 12, le projet 8 (aéronautique) n'a pas rejeté les solutions reposant sur la FA. Dans ce projet, les décideurs possédant des connaissances en FA ont certes estimé que l'effort à fournir à court terme (traduit par une montée en compétence dans les procédés FA métal) était important pour l'entreprise ; mais qu'à long terme celui-ci serait contre balancé par la perspective d'une augmentation du nombre de clients intéressés par leurs produits dont les pièces sont allégées mais les performances inchangées.

Suite aux constats que nous venons de faire, nous pensons que des connaissances portant sur la valeur ajoutée potentielle de l'utilisation de la FA peuvent aider au développement de solutions créatives. En effet, nous avons constaté que des interrogations existent sur les conséquences économiques de l'utilisation de la FA pour développer le produit.

Afin que l'estimation de l'effort à fournir soit la plus objective possible, les concepteurs (et parmi eux les décideurs) doivent donc disposer de KFA fiables sur ce domaine. Nous pensons en particulier à l'introduction de connaissances portant sur le seuil de rentabilité de la FA qui permettra par exemple de comprendre que malgré des investissements machines élevés, les coûts unitaires peuvent être réduits pour les petites séries ou les pièces complexes du fait de l'absence d'outillage. Ces KFA devront être accompagnées de cas industriels permettant d'illustrer ces possibilités.

5.2.1.3.3 Résultat et analyse des cartographies de RI

L'étude des différentes cartographies de RI, illustrée par la Figure 73, nous a permis de valider que les RI clés pour notre modèle correspondent bien à des RI produites par les différents concepteurs interrogés et ce quels que soient les objectifs des projets présentés.

Nous avons également pu corroborer les conclusions de Pei [70] quant aux types de supports employés pour matérialiser ces différentes RI clés :

- majoritairement textuelles pour les RI clés idées.
- essentiellement sous formes graphiques pour les RI clés de type concept et architecture.

Mais cela nous amène à nous interroger sur le point suivant : la communication autour du produit se faisant avec ce type de représentation, les connaissances que nous voulons fournir aux équipes projet doivent-elles également adopter ces mêmes représentations ? Cela sera l'objet de l'expérimentation 2B.

Ensuite, nous avons constaté que même si nos interlocuteurs connaissent tous le potentiel de la FA et en particulier les 4 différentes familles de complexités établies par Gibson, et al. [26]

(fonctionnelle, matériau, hiérarchique et géométrique), les concepts retenus utilisent partiellement ces possibilités. Plusieurs raisons viennent expliquer cette observation :

- Le choix délibéré de restreindre la recherche de solutions créatives à un procédé de fabrication spécifique (projet 1 ou 4 par exemple)
- La difficulté à utiliser et valoriser complètement ce potentiel de la FA dans les solutions proposées. Le projet 13 portant sur le développement d'une nouvelle chaussure de running pour un grand groupe est d'ailleurs emblématique de ce constat. L'un des enjeux du projet portait sur le développement d'une semelle permettant un amorti variable en fonction de la zone d'appui. Un concept, réalisable avec la FA, basé sur la réalisation d'une semelle multi-matériaux dont les propriétés seraient propres à chaque zone a été envisagé. Pourtant face aux difficultés rencontrées par l'équipe projet à expliquer en détail les atouts d'une telle solution, le concept a été délaissé au profit d'une solution plus complexe basée sur le déplacement d'un gel dans la semelle (Figure 75).



Figure 75 Preuve de concept illustrant l'amortissement par gel (projet 13)

Nous concluons ce paragraphe en précisant que disposer d'un socle théorique de KFA ne suffit pas pour que celles-ci soient utiles aux choix faits lors de la conception préliminaire. Ainsi il faut aussi que ces KFA soit inscrites dans un contexte pratique / expérimental : le concepteur doit avoir accès à des exemples ou des applications industrielles afin de mieux saisir la portée et le potentiel de ses connaissances théoriques.

5.2.1.3.4 Synthèse

Ces entretiens nous ont permis de mettre en évidence un décalage entre les KFA dont disposaient nos interlocuteurs et l'emploi qu'ils en ont effectivement fait.

L'explication principale que nous fournissons est une « censure » basée sur des critères fortement subjectifs. On retrouve ici dans une certaine mesure les conclusions de Laroche and Nioche [160] pour qui les décideurs « dans des situations d'environnement turbulent et de changement rapide sont victimes de biais cognitifs » ce qui les conduit à ne voir que « les avantages de la solution [...] préférée [et] les inconvénients des autres solutions » et à rejeter des « solutions incomplètement décrites ».

En effet, nous avons observé que les contraintes imposées dans certains projets conduisaient les concepteurs à mettre de côté ses KFA au bénéfice des seules connaissances sur les procédés traditionnels. Il en résultait alors que les avantages potentiels offerts par le FA ont été mis de côté du

fait de l'appréhension d'un processus plus compliqué ou plus long dont on imagine qu'il aurait pour conséquence d'allonger les délais de mise sur le marché et de conduire éventuellement à un échec commercial si des concurrents proposaient entre temps un produit concurrent.

Ce qui nous amène à retenir les thématiques suivantes comme des informations relatives à la FA pouvant être utiles aux concepteurs :

- Valeur ajoutée des produits (selon les secteurs d'activité).
- Certification / Qualification des produits
- Possibilités et disponibilité des matériaux FA
- Caractéristiques économiques de la FA et seuil de rentabilité

Les trois premiers thèmes ont pour objectif d'éviter que des solutions viables avec l'usage de la FA ne soient délaissées. Quant au dernier, il doit permettre d'évaluer objectivement le seuil de rentabilité d'une solution FA.

Enfin, à la question portant sur l'intérêt d'un outil dédié à l'identification et la mise à disposition de connaissances FA utiles à la conception amont, 11 participants sur 14 ont répondu favorablement, un ne s'est pas exprimé et les 2 autres ont estimé que leurs connaissances personnelles en FA et leur expérience dans leur métier étaient suffisantes pour ne pas avoir besoin d'un tel outil.

Les participants 1 et 13 nous ont également fait part de la nécessité selon eux d'avoir accès rapidement aux contenus afin que l'outil ne soit considéré pas comme d'usage fastidieux et par voie de conséquence délaissé.

Ces résultats permettent donc de valider le besoin de mettre à disposition des concepteurs possédant déjà des connaissances en FA, un outil qui les aide dans l'identification des connaissances à mobiliser afin d'être plus efficace et créatifs durant leurs activités de conception amont.

5.2.1.4 Résultats et analyse du questionnaire

5.2.1.4.1 Modalités d'analyse du questionnaire

L'analyse du questionnaire a été réalisée en plusieurs phases synthétisées (Figure 76).

Nous avons tout d'abord traité les réponses aux questions Q1 et Q2, puis nous nous sommes attachés à dépouiller la 2^{ème} partie du questionnaire (Q3 à Q15). Cette étude s'est déroulée en 2 temps.

Nous avons étudié les réponses aux questions Q3 à Q15 afin d'obtenir des données relatives uniquement aux familles de caractéristiques innovantes. Pour cela, nous avons considéré qu'une famille de caractéristiques innovantes était impactée par des KFA lorsque le participant avait répondu positivement à l'une au moins des caractéristiques constitutives de cette famille.

Exemple :

- si Q3 (Ajout de fonction) = OUI
- et/ou Q4 (Modification / Adaptation des fonctions) = OUI
- alors Impact Fonctionnalité = OUI.

Dans un 2nd temps, nous avons cherché à affiner nos conclusions en étudiant de façon individuelle les réponses aux questions Q3 à Q15.

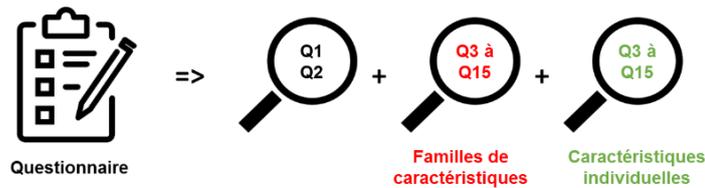


Figure 76 Démarche d'analyse du questionnaire

5.2.1.4.2 Résultats et analyse des questions Q1 et Q2

Le dépouillement de ces deux questions nous permet d'obtenir un éclairage intéressant sur l'emploi des KFA par les participants.

Ainsi, comme l'illustre la Figure 77, 86% d'entre eux répondent que leurs connaissances en FA sont utiles pour trouver de nouvelles opportunités de conception mais dans le même temps, 57% estiment qu'elles n'entraînent pas de contraintes sur la solution qui est développée. Ces résultats soulignent donc la facilité qu'ont les concepteurs à mobiliser les KFA de type opportunité dont ils disposent et leur méconnaissance quant à l'utilité de celles de type contrainte ; celles-ci étant majoritairement jugées inutiles.

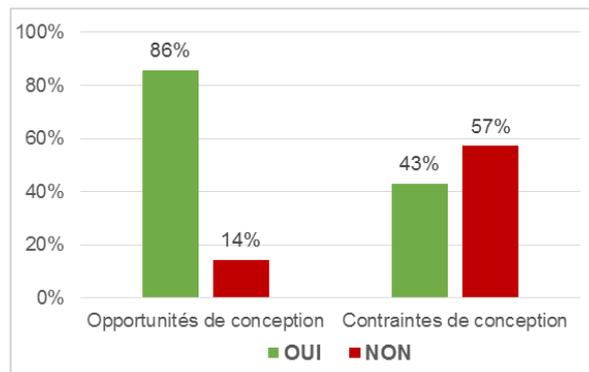


Figure 77 Utilité perçue des KFA en conception amont

Pourtant on peut s'interroger sur le peu d'intérêt porté pour les KFA contraintes, en effet nous pensons que connaître les limites de la FA peut :

- lors des activités divergentes, avoir une incidence directe sur la solution développée. Citons par exemple le rôle des connaissances relatives aux dimensions maximales fabricables avec un procédé FA qui influencera directement l'architecture produit. En effet, le choix de l'agencement des composants impliquera selon les capacités du procédé envisagé une adaptation de leur géométrie (réalisation de « découpes ») ou de leur dimension afin de permettre leur fabrication.
- lors des activités convergentes, améliorer la sélection des RI face à des critères tels que la faisabilité technique et ainsi conditionner le choix d'une solution de conception au dépend d'une autre. Citons ici le rôle des connaissances relatives à la vitesse de fabrication des procédés FA et de nécessité de post traitement qui pour des pièces devant être développées rapidement pourront amener à retenir une technologie plus rapide comme l'usinage.

Ces résultats nous permettent donc de conclure qu'il est certes nécessaire de prévoir l'introduction de KFA opportunité dans notre modèle, mais que les KFA contraintes sont encore plus indispensables et devront nécessiter lors de leur introduction d'une « certaine dose de pédagogie » afin que les concepteurs comprennent en quoi elles pourront leur être utiles.

5.2.1.4.3 Résultats et analyse des questions Q3 à Q15 : Familles de caractéristiques

Nous rappelons qu'à ce stade nous nous intéressons uniquement aux familles de caractéristiques innovantes pour lesquelles les concepteurs ont reconnu avoir utilisé leurs KFA.

Après avoir conclu avec un test de Shapiro Wilk que les résultats obtenus dans chacun des échantillons testés ne suivaient pas une loi normale, nous avons vérifié à l'aide d'un test de Kruskal Wallis si la distribution des réponses pour chaque famille était identique selon les profils de concepteurs constituant nos échantillons (ingénieur, designer ou ergonomiste).

Les résultats du test (voir Tableau 15 ci-dessous) nous permettent de conclure qu'il n'existe pas de différence significative entre les réponses fournies par les différents profils de participants. Ce qui nous permet d'effectuer une interprétation globale de l'emploi des KFA.

Famille de caractéristiques	Test KW ($\alpha=5\%$)
Fonctionnalité	$H^*= 0,744 ; p = 0,689$
Architecture	$H^*= 0,744 ; p = 0,689$
Interaction avec son environnement	$H^*= 0,614 ; p = 0,736$
Interactions avec les utilisateurs	$H^*= 1,316 ; p = 0,518$
Coût	$H^*= 3,095 ; p = 0,213$

Tableau 15 Récapitulatif des valeurs du test de Kruskal Wallis pour chaque variable.

Les résultats du questionnaire montrent (Figure 78) que l'innovation fonctionnelle et l'innovation architecturale sont les familles de caractéristiques innovantes pour lesquelles l'emploi de connaissances FA sont les plus évidents avec 79% de réponses positives.

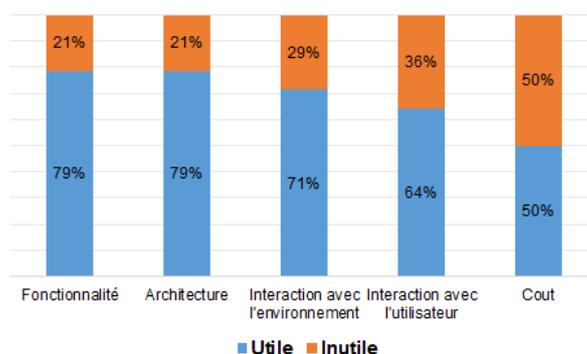


Figure 78 Utilité des KFA dans le développement des familles de caractéristiques innovantes

Les interactions avec l'environnement et l'utilisateur recueillent elles aussi des avis majoritairement positifs mais avec des scores légèrement plus faibles (71% et 64%). Il semble donc que les

concepteurs ont plus de difficulté à voir en quoi la FA pourrait avoir un impact sur de telles caractéristiques, alors même les possibilités de la FA comme la texturation des surfaces ou la combinaison de matériaux durs et souples pourraient améliorer l'ergonomie d'un produit.

L'impact des KFA sur le coût amène quant à lui des avis très partagés. Cela recoupe en partie les constats que nous avons pu faire à l'issue des entretiens et de la notion de quantité d'effort à fournir pour parvenir au développement du produit. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que pour une moitié des personnes interrogées, le développement d'un produit innovant par son coût (ex : diminution du coût de X%) n'est pas possible avec FA. Pourtant si une telle affirmation est justifiée pour des produits fabriqués en très grandes séries, elle est pour autant erronée pour des applications de niches (aéronautique ou médical) qui concernent de faibles volumes produits aux coûts unitaires généralement élevés. Ce qui une nouvelle fois nous permet de souligner l'importance de mettre à disposition des concepteurs des connaissances relatives au seuil de rentabilité d'une solution FA.

5.2.1.4.4 Résultats et analyse des questions Q3 à Q15 : Caractéristiques individuelles

Nous avons retraité les questions Q3 à Q15 en nous intéressant à chaque réponse de façon individuelle. En effet, nous avons voulu savoir si dans une même famille, certaines caractéristiques étaient préférentiellement employées ou si toutes étaient impactées de la même façon par les KFA. Là encore nous avons voulu étudier si le profil des participants avait une incidence sur les résultats du questionnaire. Nous avons donc utilisé de nouveau un test de Kruskal Wallis dont les résultats présentés dans le Tableau 16, permettent de conclure qu'il n'existe pas de différence significative dans les réponses données par des concepteurs ayant des expertises différentes.

Caractéristiques	Désignation	Test KW ($\alpha=5\%$)
Ajout de fonction	V1	$H^*= 5,417 ; p = 0,067$
Modification / Adaptation des fonctions	V2	$H^*= 0,867 ; p = 0,648$
Modification des dimensions	V3	$H^*= 2,889 ; p = 0,236$
Modification de l'agencement des composants	V4	$H^*= 0,867 ; p = 0,648$
Extension des cas d'utilisation	V5	$H^*= 1,625 ; p = 0,444$
Modification de la disposition de la matière	V6	$H^*= 0,614 ; p = 0,736$
Modification du flux d'énergie	V7	$H^*= 0,556 ; p = 0,757$
Modification du flux d'information	V8	$H^*= 0,744 ; p = 0,689$
Amélioration de l'ergonomie	V9	$H^*= 1,316 ; p = 0,518$
Amélioration sensorielle	V10	$H^*= 2,046 ; p = 0,359$
Amélioration cognitive (= affordance)	V11	$H^*= 4,012 ; p = 0,135$
Modification du coût d'achat	V12	$H^*= 2,046 ; p = 0,359$
Modification du coût de fonctionnement ou de maintenance	V13	$H^*= 3,095 ; p = 0,213$

Tableau 16 Récapitulatif des valeurs du test de Kruskal Wallis pour chaque variable.

Nous observons que, bien que chaque famille de caractéristiques des produits innovants utilise des KFA, ces résultats pris dans leur globalité ne reflètent pas la forte disparité qui existe quant à l'emploi de ces KFA pour chacune des caractéristiques constituant ces familles (Figure 79).

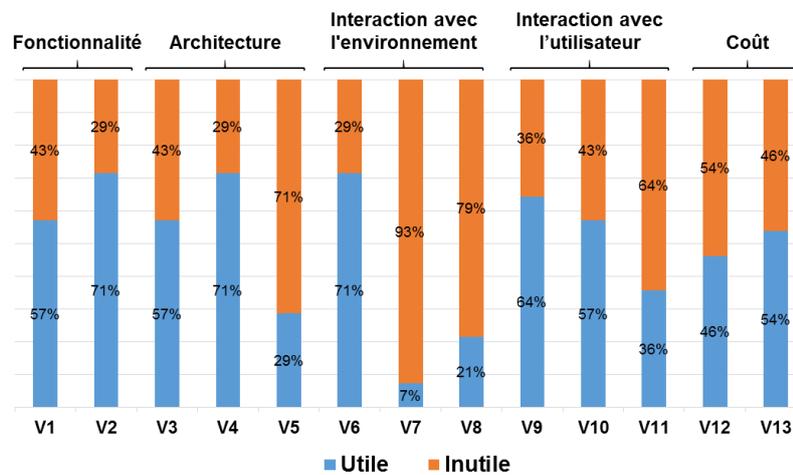


Figure 79 Utilité des KFA suivant le type de caractéristiques innovantes

Ainsi, l'innovation fonctionnelle qui, d'après notre analyse précédente mobilise des KFA pour 79% de participants, correspond plus particulièrement à une optimisation des fonctions existantes du produit (avec 71% de réponses positives) qu'à l'intégration de fonctions supplémentaires (57% de réponses positives). Ce qui signifie que le potentiel d'innovation fonctionnelle offert pas la FA n'est pas encore bien assimilé par des professionnels pourtant sensibilisés à la FA et que des informations supplémentaires sur ce point mériteraient d'être apportées aux concepteurs.

En innovation architecturale les KFA sont quant à elles majoritairement employées pour la recherche de nouveaux agencements des composants (71% de réponses positives), c'est-à-dire dans un but de consolidation des solutions existantes. Seuls 57% des participants reconnaissent se servir de leurs connaissances pour remettre en question les dimensions du produit et dans 21% des cas pour étendre les possibilités d'utilisation du produit. Nous considérons que ces deux derniers points ne sont pas satisfaisant et méritent donc de fournir de manière explicite des connaissances sur ces possibilités.

L'analyse des caractéristiques économiques des produits innovants prises de façon individuelles reflètent les conclusions que nous avons déjà pu faire précédemment. Il en est globalement de même pour les interactions avec l'utilisateur à l'exception de la caractéristique d'amélioration cognitive (c'est-à-dire l'affordance) pour laquelle les connaissances FA ne semblent pas avoir d'utilité pour nos participants. Or si l'on considère la définition même de l'affordance, c'est-à-dire l'aptitude d'un produit à suggérer son usage, nous relevons ici tout le potentiel inexploité offert pas la FA (notamment la complexité géométrique) que les participants ne jugent pas utile d'utiliser.

Pour terminer nous relevons que les contrastes les plus flagrants sont observés pour l'utilisation des connaissances FA en vue de la modification des interactions avec l'environnement pour lesquelles les concepteurs n'envisagent pas de lien de relation entre les KFA dont ils disposent et les usages qu'ils pourraient en faire pour améliorer les produits.

Ces résultats révèlent la difficulté des participants à mobiliser de façon adaptée l'ensemble de leurs KFA pour explorer toutes les pistes d'innovation et ce alors même que la littérature a montré que la FA permet l'intégration dans les produits des caractéristiques innovantes établies par Saunders.

5.2.1.5 Conclusion

La 1^{ère} partie de notre expérimentation, basée sur des entretiens réalisés auprès de professionnels, nous a permis d'identifier des thématiques dans lesquelles le besoin en informations relatives à la FA permettraient d'améliorer la création ou la sélection des RI. Ces thématiques sont :

- La valeur ajoutée des produits FA.
- La certification / qualification des produits FA.
- La disponibilité des matériaux FA.
- Les caractéristiques économiques des procédés FA (seuil de rentabilité).

L'analyse des questionnaires complétés par ces mêmes professionnels à l'issue de l'entretien constitue la 2^{ème} partie de notre expérimentation. Elle nous a aidés à identifier deux nouvelles thématiques pour lesquelles des informations supplémentaires permettraient d'assister les concepteurs dans le développement de caractéristiques innovantes des produits :

- Les différents types de complexité FA
- Les caractéristiques techniques et dimensionnelles des procédés FA

Les résultats de cette expérimentation nous permettent ainsi de valider partiellement notre hypothèse 1 (l'intégration des connaissances doit être effectuée au juste besoin).

En effet, nous avons pu montrer que parmi les multiples KFA découlant des expertises matériaux, produit, procédé développées par les industriels, seules quelques-unes sont effectivement nécessaires aux concepteurs pour rechercher des solutions créatives lors de la conception préliminaire et donc aider à déployer une approche DWAM.

Toutefois cette identification des KFA n'est pas suffisante pour garantir leur utilisation et donc valider entièrement notre hypothèse 1. C'est pourquoi nous devons poursuivre la capitalisation des connaissances en tenant compte des supports qui seront utilisés pour véhiculer les connaissances et des instanciations adéquates pour les valoriser. Ces sujets sont développés dans les deux prochaines expérimentations.

5.2.2 Expérimentation 2B : Préservation des connaissances avec des supports adaptés

5.2.2.1 Introduction

Nous avons montré dans l'expérimentation 1 que les connaissances sous formes explicites permettaient d'obtenir des résultats similaires à ceux obtenus avec des connaissances tacites. Toutefois ces conclusions ne sont pas suffisantes car la connaissance peut être représentée sous diverses formes. Ainsi selon Owen and Horváth [161], il existe 5 types différents de représentation (ou support) de la connaissance :

- Pictural dont font parties les photos, images ou encore les vidéos
- Symbolique
- Linguistique c'est-à-dire à base de textes
- Virtuel dans lequel s'inscrivent les représentations numériques
- Algorithmique, essentiellement à base d'opérateurs mathématiques

Dans cette expérimentation, nous souhaitons identifier, parmi ces familles, celles qu'il est possible d'utiliser pour préserver les KFA dans notre modèle car étant adaptées aux pratiques et à la diversité des profils de concepteurs amont (Figure 80).

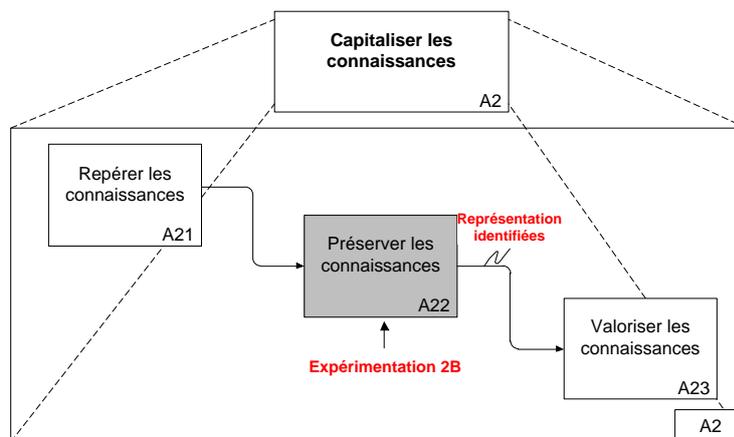


Figure 80 Place de l'expérimentation 2B et résultat attendu

Toutefois le nombre de représentation des connaissances étant vaste, il nous paraît nécessaire au préalable de le réduire. Pour cela nous nous appuyons sur les conclusions de Chandrasegaran, et al. [84] et de Mougenot [162].

D'après Chandrasegaran, et al. [84], les représentations utilisées lors des phases amont sont majoritairement linguistiques et picturales. Nous avons d'ailleurs pu tirer les mêmes conclusions lors de notre étude des RI dans l'expérimentation précédente.

Quant à Mougenot [69], elle souligne que pour les designers industriels, « la phase d'exploration est aujourd'hui une phase de traitement d'informations, d'images ». Ces images, selon l'auteur pouvant être numérisées ou papier.

Nous choisissons donc de restreindre notre étude aux deux familles de représentations que nous venons d'évoquer auxquelles nous ajoutons la représentation sous forme d'objets (physique ou numérique) qui bien que non citée par les différents auteurs nous semble également intéressante. Celles-ci se sont en effet largement démocratisées ces dernières années suite au développement de la CAO et du prototypage rapide en conception amont.

5.2.2.2 Protocole expérimental

L'étude a été réalisée auprès de 42 concepteurs : 21 ingénieurs, 13 designers et 8 ergonomes. 28 d'entre eux sont des étudiants en Master Recherche Innovation Conception Ingénierie au laboratoire CPI, les 14 autres sont des anciens élèves du Master aujourd'hui en activités et contactés par e-mails. Tous sont âgés de 20 à 27 ans.

Chaque participant est amené à exprimer son appréciation et sa facilité à comprendre une même connaissance retranscrite sur 4 supports différents. Parmi ces supports, deux appartiennent aux représentations picturales (vidéo, image), un à la représentation linguistique (texte), et le dernier à une représentation physique (objet). L'évaluation de chaque média est réalisée à l'aide d'une échelle de Likert à 5 niveaux pour laquelle 1 signifie que l'évaluateur n'apprécie pas le support et 5 qu'il l'apprécie beaucoup.

5.2.2.3 Résultats et analyse

La comparaison des notes moyennes obtenues par les 4 supports de connaissance (Figure 81) nous permet de constater que le texte est un support qui recueille un avis mitigé ($\bar{M}_{\text{texte}} = 3.26$) alors que les trois autres supports de connaissance (objet, vidéo et image) semblent bien appréciés des évaluateurs ($\bar{M}_{i, i=\text{objet, image, vidéo}} > 4$).

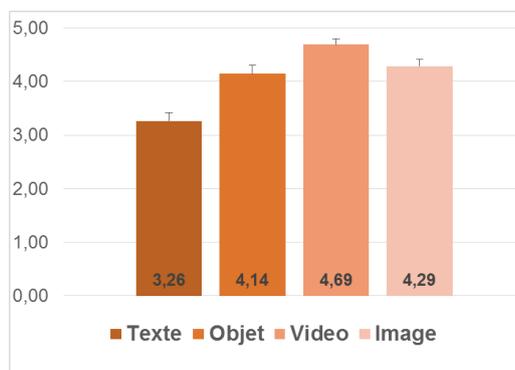


Figure 81 Moyenne et erreur type de l'appréciation des supports de connaissance

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'impact des profils des concepteurs sur l'appréciation des différents supports (Figure 82). Pour cela, un test de Shapiro-Wilk W a été effectué, montrant des distributions non normales à l'intérieur des trois groupes ($W_{\text{texte}} = 0,897$; $W_{\text{objet}} = 0,784$; $W_{\text{vidéo}} = 0,465$; $W_{\text{image}} = 0,772$ et $p_i < 0,05$). Ces résultats justifient l'utilisation d'un test non paramétrique de Kruskal-Wallis ($\alpha=5\%$) pour mesurer l'impact de ces différentes spécialités sur l'appréciation de ces supports de connaissances.

Les résultats obtenus à l'issue du test indiquent qu'il existe une différence significative entre les médianes des 3 échantillons lorsque le support de la connaissance est un texte. L'hypothèse nulle (il n'existe pas de différence de réponse entre les trois échantillons de population observés p) est donc rejetée au seuil significatif $\alpha=5\%$ ($H^*_{\text{texte}}= 12.00$; $p = 2.47.10^{-3}$). Le texte soulève donc des opinions divergentes au sein des catégories de concepteurs : les ergonomes (ER) semblent être les plus réceptifs à ce média qui obtient une évaluation moyenne supérieure à celles des ingénieurs (EN) ou des designers industriels (ID) ($\bar{M}_{ER} = 4.25$, $\bar{M}_{EN} = 3$, $\bar{M}_{ID} = 3.08$).

Pour les trois autres supports de connaissance (objet, vidéo et image), nous concluons qu'il n'existe pas de différence significative entre les groupes pour un seuil de 5% ($H^*_{\text{objet}}= 4.50$; $p = 0.105$ – $H^*_{\text{vidéo}}= 4.58$; $p = 0.101$ – $H^*_{\text{image}}= 5.31$; $p = 0.07$).

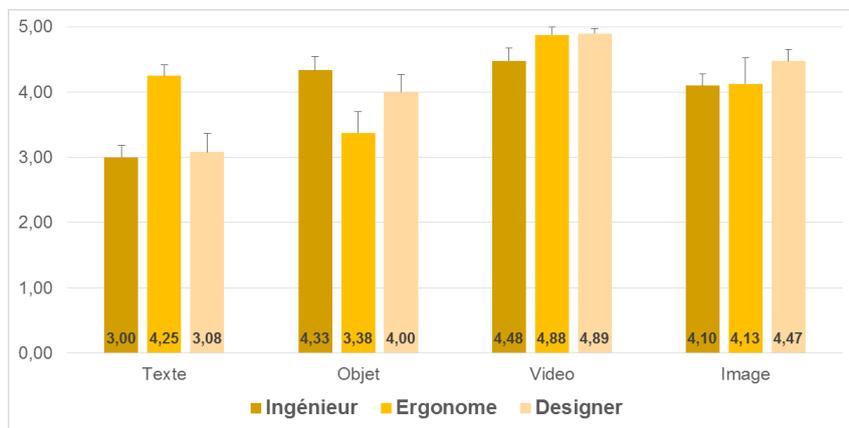


Figure 82 Moyenne et erreur type de l'appréciation des supports selon le profil des concepteurs

Afin de satisfaire la dimension pluridisciplinaire de l'utilisation des connaissances au juste besoin dans notre approche DWAM, nous souhaitons privilégier des supports de connaissance véhiculaires, c'est à dire compréhensibles par les différents profils de concepteurs impliqués dans la conception amont. C'est pourquoi nous faisons le choix de ne conserver que les supports permettant une représentation visuelle 2D ou 3D de nos KFA pour lesquels les avis recueillis sont identiques et positifs : les objets, les vidéos et les images.

Parmi ces représentations, nous envisageons d'utiliser :

- Les images comme format de représentation principal. En effet, nous pensons qu'une grande partie des KFA peuvent être expliquées à l'aide d'une base de données visuelle construite à partir de photos de produits réalisés en FA. En cela nous reprenons donc la proposition de Mougenot d'utiliser les bases d'images comme source de connaissances mais nous étendons son usage à l'ensemble des profils de l'équipe de conception amont.
- Les objets et vidéos pour introduire les connaissances à fort niveau d'abstraction. En effet pour de telles connaissances, une représentation exclusivement sous forme d'images ne suffirait pas à rendre explicite rapidement l'information sauf en y ajoutant un long descriptif sous forme de texte, peu apprécié des concepteurs.

Le Tableau 17 ci-dessous propose une liste non exhaustive d'applications industrielles issues d'une veille dont les illustrations sous forme d'images permettraient de faire comprendre rapidement les notions de complexité permises par la FA.

Type de complexité	Exemple d'applications FA
Complexité fonctionnelle	Electronique embarquée Intégration de capteurs Intégration d'échangeurs de chaleur Intégration de systèmes de refroidissement
Complexité géométrique	Formes imbriquées, Formes de bio-inspirés, Formes à épaisseurs variables Formes ajourées
Complexité matériau	Multi matériau Matériau à gradient de propriétés
Complexité hiérarchique	Structures treillis / lattices Structures stochastiques / cellulaires Structures multi-échelles (fractales)

Tableau 17 Propositions d'exemples industriels permettant d'illustrer les KFA sur la complexité

5.2.2.4 Conclusion

Nous avons souhaité, lors de cette expérimentation, identifier les types de représentations des connaissances qui satisfont l'approche pluridisciplinaire souhaitée dans notre modèle. Pour cela nous avons interrogés 42 concepteurs afin qu'ils nous précisent les supports auxquels ils sont le plus réceptifs.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure que, même si d'après Chandrasegaran, et al. [84], les connaissances sous forme linguistique sont très employées en conception préliminaire, elles ne correspondent pas de façon unanime aux attentes des concepteurs. C'est pourquoi, pour la suite de nos travaux, nous les excluons des formes de représentations utilisables dans notre modèle au profit des représentations 2D et 3D.

Nous validons donc à l'issue de cette expérimentation la partie de notre hypothèse 1 relative au support utilisé puisque nous avons pu montrer que la représentation des connaissances à une incidence directe sur la compréhension, par les utilisateurs, des informations véhiculées et que, par conséquent, seuls les supports auxquels des utilisateurs sont réceptifs doivent être utilisés. Le support employé pour représenter une connaissance correspond donc bien à l'une des caractéristiques constitutives du juste besoin.

Nous tenons cependant à préciser que les conclusions de cette expérimentation ne prennent pas en compte la corrélation possible entre l'information véhiculée et le support.

Dans la prochaine section, nous allons rechercher la dernière caractéristique d'une connaissance au juste besoin : l'instanciation temporellement adaptée à la valorisation d'une connaissance dans le processus de conception.

5.2.3 Expérimentation 2C : Valorisation des connaissances par avec une instantiation adaptée.

5.2.3.1 Introduction

L'expérimentation précédente a permis de mettre en évidence les supports de connaissance qui convenaient aux différents profils de concepteur amont.

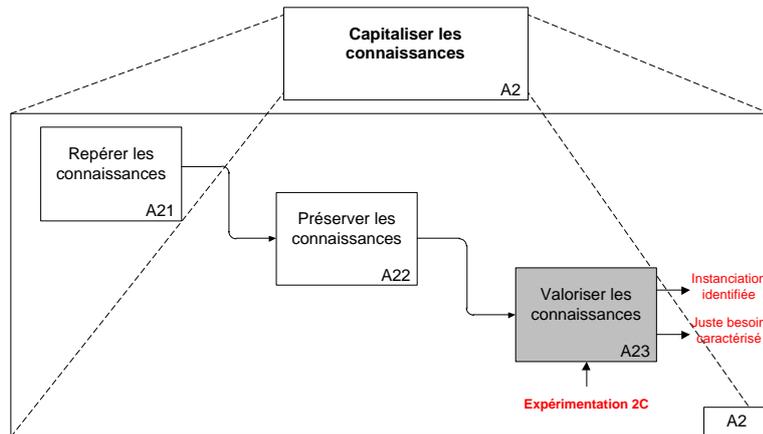


Figure 83 Place de l'expérimentation 2C et résultats attendus

Cette nouvelle expérimentation se concentre sur la dernière étape de la démarche capitalisation des connaissances : la valorisation. Cette valorisation correspond dans notre cas à l'identification d'une instantiation adaptée pour l'introduction des KFA dans le processus de conception amont (Figure 84). La connaissance de cette instantiation « juste à temps » va ainsi permettre de connaître à quel moment une KFA doit être mise à disposition du concepteur pour que son utilisation soit propice à l'amélioration ou la facilitation des activités qui seront par la suite réalisées.

Nous considérons en effet que l'introduction prématurée d'une KFA peut être hasardeuse car les concepteurs risquent de la laisser de côté tant qu'ils n'en auront pas besoin puis par la suite l'oublier. Quant à une instantiation tardive, elle peut avoir pour conséquence de passer à côté d'une potentielle contribution de la KFA pour l'activité de conception.

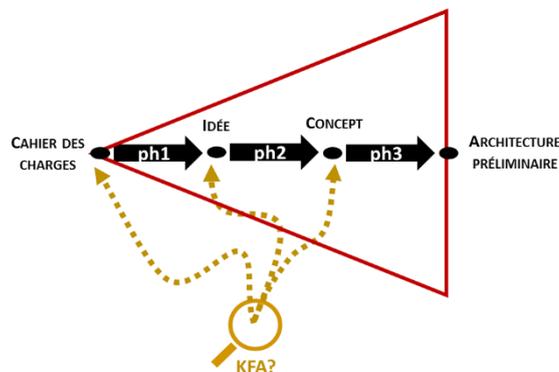


Figure 84 Objectif de l'expérimentation 2C : Valorisation des KFA par une instantiation adaptée

5.2.3.2 Protocole expérimental

Cette étude a été réalisée auprès des 18 étudiants du Master Recherche Innovation Conception Ingénierie - parcours Innovation Conception ayant participé à l'expérimentation précédente. Elle a eu lieu à l'issue du module d'enseignement portant sur la FA au cours duquel les étudiants sont amenés à la fois à manipuler des machines FA (Makerbot, Stratasys Dimension BST et Stratasys Objet Connex 260) mais également à appliquer, en groupe, les méthodes DFAM dans des études de cas.

L'expérimentation démarre par la présentation du modèle initial de conception que nous avons élaboré. Les étudiants étant formés, dans le cadre du Master, aux processus de conception et d'innovation, cette présentation a essentiellement pour objectif de leur permettre de faire le rapprochement entre les éléments que nous utilisons dans notre modèle préliminaire et ceux intervenant dans les modèles qu'ils ont étudié au cours de leur formation. Chacune des RI clés et des étapes de conception sont détaillées.

Dans un 2^{ème} temps, une série de KFA leur est présentée au travers d'exemples dans un diaporama. La plupart de ces KFA correspondent aux connaissances que nous avons identifiées lors de l'expérimentation 2A. Cependant nous avons également ajouté à cette série deux KFA supplémentaires (précision géométrique des pièces réalisées en FA et précaution d'utilisation des matériaux FA, typologie des machines FA) employées généralement dans les DFAM lors de la phase de conception détaillée, voire lors de la fabrication de produits. Ces ajouts sont destinés à jouer le rôle de données de contrôle permettant de s'assurer que les phases préliminaires ciblées par notre modèle ont bien été comprises par les participants.

Toutes ces KFA ont été regroupées au sein de quatre familles différentes :

- Complexité FA
- Valeur ajoutée des produits FA
- Matériaux FA
- Caractéristiques des produits et des procédés FA

A l'issue de la présentation, les étudiants sont amenés à remplir un questionnaire (voir annexe p164) dans lequel ils doivent désigner les activités de recherche ou de sélection d'une RI clé du modèle pendant lesquelles la prise en compte des KFA présentées pourra, selon eux, être utile.

Pour cela, il leur est demandé de fonder leurs choix sur les différents projets de conception qu'ils ont menés dans le cadre du master ou de leur cursus antérieur. Il leur est également précisé qu'une même connaissance peut être utilisée au cours de plusieurs étapes du modèle.

Le Tableau 18 ci-dessous donne la correspondance entre les connaissances présentées aux participants et l'acronyme qui sera utilisé lors du traitement des données. Les KFA marquées d'un astérisque correspondent aux KFA de contrôle.

Complexité FA	KFA1	Complexité géométrique
	KFA2	Complexité hiérarchique
	KFA3	Complexité matériau
	KFA4	Complexité fonctionnelle
Valeur ajoutée FA	KFA5	VA conception
	KFA6	VA fabrication
	KFA7	VA cycle de vie
Matériaux FA	KFA8	Disponibilité des matériaux
	KFA9*	Précautions d'utilisation
Caractéristiques des produits et machines FA	KFA10	Certification / Qualification
	KFA11	Dimensions
	KFA12*	Précision géométrique
	KFA13*	Typologies des machines
	KFA14	Seuil de rentabilité

Tableau 18 Familles et libellés des KFA testées

5.2.3.3 Résultats et analyse.

Dans un 1^{er} temps, nous avons souhaité contrôler la validité des données. Pour cela nous sommes intéressés à l'instanciation proposée par les participants pour les connaissances de contrôle (KFA9, KFA12 et KFA13). Nous avons étudié la 1^{ère} occurrence d'utilisation de chacune des KFA dans le modèle (Figure 85).

Nous observons que les connaissances de contrôle ont bien joué leur rôle puisque les participants considèrent qu'ils n'en auront l'utilité pour leurs activités de conception qu'après avoir utilisé les autres KFA. Ceci contribue donc à valider la compréhension du modèle et des contenus des KFA par les participants.

Nous notons toutefois que leur 1^{ère} occurrence, bien que postérieure à celles des autres KFA, correspond à la phase de sélection des concepts (étape 4) et non comme nous nous y attendions au début de l'approche DFAM.

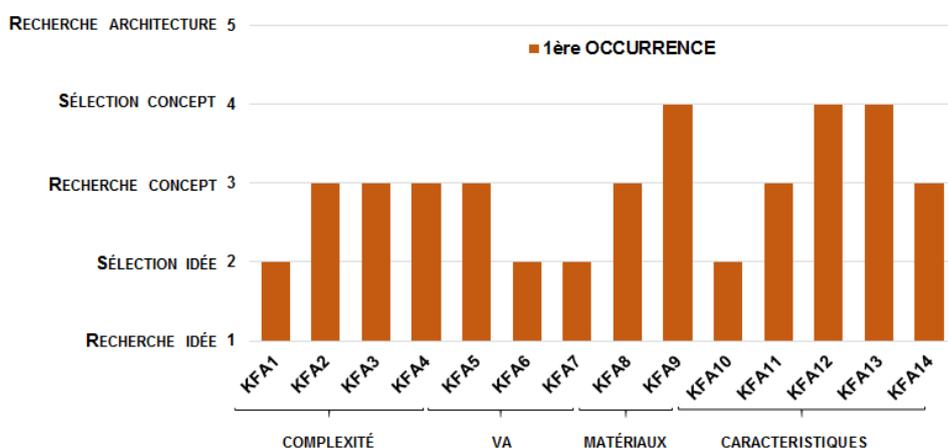


Figure 85 1^{ère} occurrence d'utilisation des KFA

Puis dans un 2^{ème} temps, nous avons cherché à identifier le type d'activité principalement impacté par les contenus de nos catégories de KFA. Nous avons exclu de notre étude les KFA de contrôle qui ne correspondent pas à des connaissances utilisables dans notre approche DWAM.

Nous avons donc étudié la répartition des réponses entre les activités convergentes et divergentes. Comme l'illustre la Figure 86, l'utilisation des catégories de KFA varie en fonction des thèmes qu'elles abordent :

- Les connaissances portant sur la complexité FA sont majoritairement requises pour les activités divergentes (58% des réponses). L'instanciation proposée pour ce type d'activité se justifie assez aisément dans la mesure où ces KFA correspondent à des connaissances de type opportunité et vont ainsi faciliter la recherche de solution.
- A l'opposé, les connaissances sur les caractéristiques des produits et des machines FA sont majoritairement considérées comme utiles aux phases convergentes (58% des réponses). Là encore nous pouvons expliquer cette instanciation par le fait que les contenus de ces connaissances sont majoritairement de type contrainte. Leur but est donc d'apporter des informations destinées à déterminer plus objectivement certains critères de sélection, tels que l'effort à fournir présenté lors de l'expérimentation 2A.
- Les connaissances relatives aux matériaux et à la valeur ajoutée des produits recueillent des opinions partagées quant à leur emploi pour un type particulier d'activités. Il semble donc que ces connaissances puissent être utiles à la fois pour la recherche de solution et leur sélection.

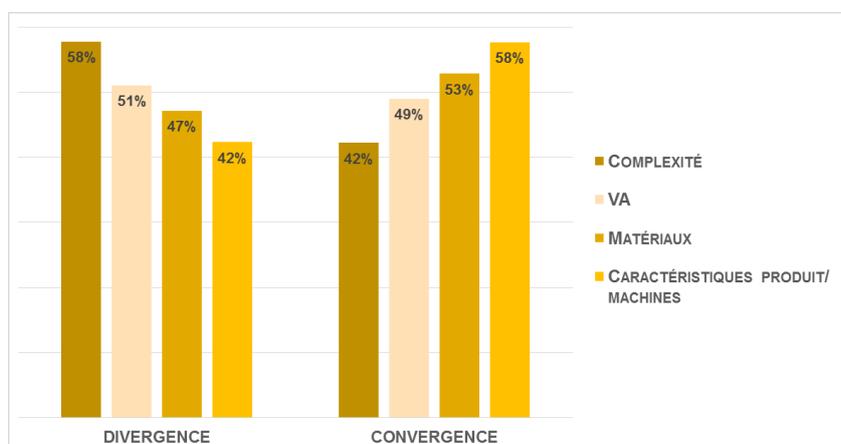


Figure 86 Répartition de l'utilisation des catégories de KFA entre activités divergentes et convergentes.

Pour finaliser la caractérisation du timing d'introduction des KFA dans notre modèle, nous nous sommes intéressés à la répartition des réponses dans les différentes phases du modèle : idée, concept et architecture.

Les résultats obtenus, représentés dans la Figure 87 ci-dessous, nous apportent les éléments suivants :

- Les connaissances portant sur les caractéristiques des produits et des machines sont majoritairement souhaitées pour le développement des architectures préliminaires (48% des réponses).

- Les connaissances portant sur la complexité et la valeur ajoutée sont prioritairement requises pour la phase concept (39% des réponses) mais semblent également être utiles lors de la phase architecture
- Les connaissances matériaux sont requises de façon quasi identique pour les phases concept et architecture.

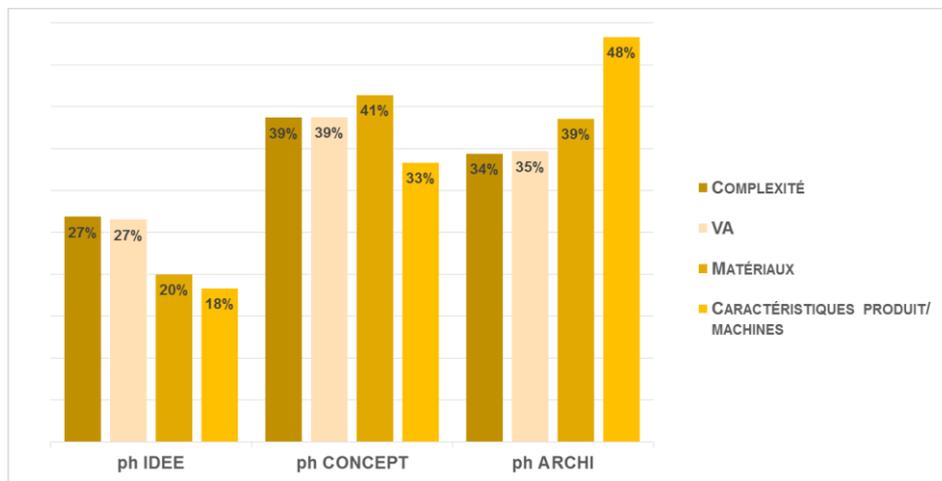


Figure 87 Répartition de l'utilisation des catégories de KFA dans les phases du modèle.

5.2.3.1 Conclusion

Ces différents éléments nous permettent donc de dresser le bilan suivant quant à l'instanciation adaptée de nos connaissances FA :

- Les connaissances portant sur la complexité en FA (KFA1 à KFA4) doivent être introduites dans notre modèle avant le démarrage des activités divergentes de la phase concept. A ce stade, les concepteurs viennent de sélectionner les idées prometteuses. De plus, il nous semble intéressant d'introduire dans un 1^{er} temps KFA1 qui amènera les concepteurs à rechercher de nouvelles combinaisons d'idées puis ensuite ,dans un 2nd temps, d'apporter KFA2 à KFA4 qui amèneront des éléments utiles à la représentation du concept (formes, structures et textures).
- Les connaissances relatives à la valeur ajoutée de la FA (KFA5 à KFA7) sont également à introduire dès le début des activités divergentes de la phase concept afin d'apporter des pistes de réflexion supplémentaires en permettant aux concepteurs de s'inspirer des produits déjà réalisés.
- L'instanciation adaptée des connaissances matériaux correspond à une introduction lors du démarrage des activités convergentes de la phase concept. Son rôle sera de s'assurer de l'adéquation entre la disponibilité du matériau et les procédés envisageables pour développer un concept.
- KFA11 portant sur les caractéristiques dimensionnelles des produits et machines sera introduite pour les activités divergentes en phase architecture. Ce timing correspond en effet à la prise en compte des premières contraintes de fabrication lors du développement de l'architecture préliminaire de leur concept (début de l'approche DFAM dans notre modèle).

- KFA10 et KFA14, apportant aux concepteurs des éléments sur les processus de certification et qualification ainsi que sur la notion de seuil de rentabilité seront nécessaires dès la sélection des concepts afin d'éviter le phénomène de « censure » dû à une mauvaise évaluation des délais de l'effort à fournir.

Nous retenons également que l'introduction de connaissances FA lors de la phase 1 de notre modèle (recherche et sélection des idées) ne semble pas nécessaire. Ce constat est également conforté par la conclusion que nous avons tirée à l'issue de l'expérimentation 1. En effet, nous avons conclu que la possession de KFA n'améliorait pas la quantité ou l'originalité des idées proposées.

Dès lors, il n'est pas nécessaire, à ce stade du processus de conception, d'apporter aux concepteurs des KFA car celles-ci n'auraient pas d'incidence sur les activités menées et pourraient être ultérieurement oubliées pour les activités pour lesquelles elles seraient réellement utiles.

Cette expérimentation nous a permis de d'identifier la dernière caractéristique constitutive d'une connaissance FA au juste besoin : son instanciation. Nous avons montré que cette instanciation est à la fois dépendante la RI clé que le concepteur souhaite obtenir, mais aussi du type d'activité mise en œuvre : divergente ou convergente. Pour les profils de concepteurs que nous avons étudiés, nous validons donc la dernière partie de notre hypothèse 1 portant sur l'instanciation, puisque venons de montrer qu'il existe une instanciation propre à chaque connaissance FA mise à disposition des concepteurs.

La prochaine expérimentation que nous allons présenter a pour objectif de valider l'intégration des connaissances au juste besoin dans l'approche DWAM

5.3 Expérimentation 3 : Formalisation et validation de la solution.

Nous avons dans un 1^{er} temps validé l'usage de la forme explicite pour l'intégration des connaissances FA dans notre approche DWAM. Puis en suivant la démarche proposée par Grundstein nous avons pu, grâce à 3 expérimentations distinctes, capitaliser les connaissances FA dites au juste besoin nécessaire à la conception amont. Nous avons pour cela :

- Repéré les informations utiles
- Identifié les supports permettant de les préserver tout en les rendant compréhensibles de l'ensemble des acteurs de la conception amont
- Proposé une instantiation adaptée à leur valorisation dans notre modèle

Notre objectif désormais est de valider l'intégration des connaissances FA au juste besoin un modèle de conception permettant l'approche DWAM. Pour cela nous allons, dans un 1^{er} temps, présenter le modèle de conception enrichi par les connaissances FA au juste besoin qui découle de la capitalisation des connaissances. Dans un 2^{ème} temps, nous présentons une maquette fonctionnelle d'outil destinée à faciliter l'emploi de ces connaissances lors de la conception amont. Enfin nous validons notre solution à l'aide de tests utilisateurs.

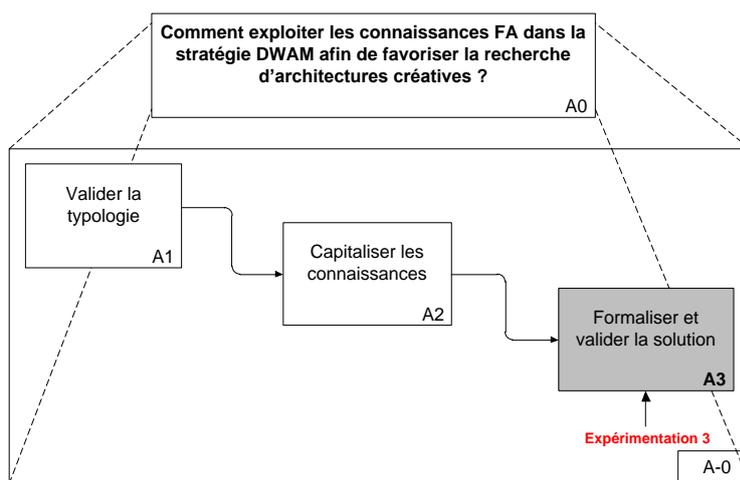


Figure 88 Place de la phase de formalisation et de test dans la démarche

5.3.1 Formalisation du modèle enrichi par des connaissances FA au juste besoin.

Notre démarche de capitalisation des connaissances nous a permis de repérer, préserver et valoriser les KFA au juste besoin qu'il est utile d'apporter aux équipes projet afin de favoriser leur recherche de solutions créatives en conception amont.

A l'issue de cette démarche, nous proposons donc un modèle enrichi dans lequel nous préconisons la mise à disposition de 9 connaissances FA explicites au juste besoin par le biais de quatre apports successifs (JBi) résumés dans le Tableau 19 ci-dessous :

- Les apports JB1 à JB3 sont effectués au cours de l'étape au cours de laquelle sont produites les RI clés de type concept alors que JB4 le sera dans celle destinée à obtenir une architecture préliminaire.
- Les apports JB1, JB2 et JB4 sont effectués avant le démarrage des activités divergentes ; JB3 avant le début des activités convergentes.

Apport	Information (KFAi)	Support	Instanciation	
			RI clé	Activités
JB1	Complexité fonctionnelle (KFA1)	Images Vidéos Objets	Concept	Divergentes
JB2	Complexité hiérarchique, géométrique et matériau (KFA2 à KFA4) Valeur ajoutée des produits (KFA5 à KFA7)		Concept	Divergentes
JB3	Disponibilité des matériaux (KFA8) Certification / Qualification (KFA10) Seuil de rentabilité (KFA14)		Concept	Convergentes
JB4	Caractéristiques dimensionnelles des produits et des machines (KFA11)		Architecture	Divergentes

Tableau 19 Caractéristiques (contenu, support, instanciation) des apports de connaissances au juste besoin

Du fait de l'importance des activités à réaliser pour l'instanciation des connaissances au juste besoin, nous avons choisi faire apparaître de façon explicite, à l'aide du formalisme double diamant propre aux processus créatifs, le cycle d'activités divergentes / convergentes qui conduit à l'obtention de chacune des RI clé présentées dans notre modèle préliminaire.

Signalons que nous avons choisi de scinder les connaissances relatives à la complexité en FA (KFA1 à KFA4) dans deux apports différents (JB1 et JB2) afin de dissocier la recherche de fonction de la recherche de formes lors des activités divergentes destinées à produire des concepts.

La Figure 89 ci-dessous présente notre modèle enrichi par ces apports ainsi que les caractéristiques des connaissances au juste besoin mises à disposition des concepteurs dans ces apports.

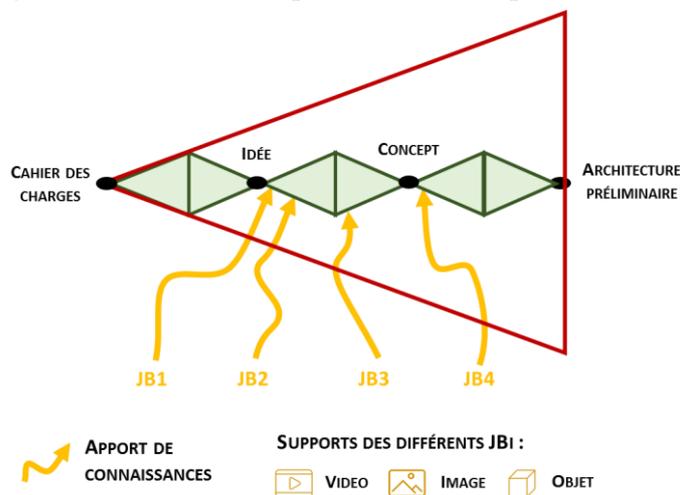


Figure 89 Modèle de conception enrichi

Nous disposons à ce stade d'un modèle de conception enrichi par des connaissances FA au juste besoin qu'il va être possible d'implémenter dans un outil destiné aux équipes pluridisciplinaires.

5.3.2 Proposition d'un outil numérique

Nous avons montré dans notre état de l'art la nécessité de proposer des outils numériques afin d'assister le déploiement du DWX/ DFX lors de la conception. De plus, l'expérimentation 2A nous a permis de souligner l'intérêt porté par les concepteurs amont pour un outil permettant d'identifier et mettre à disposition les connaissances FA utiles.

Ce paragraphe est destiné à présenter la solution qui a été développée. Nous précisons que cette solution correspond à un prototype fonctionnel d'outil mais dont le fonctionnement est représentatif d'un outil réel.

5.3.2.1.1 Fonctionnalités de l'outil

La fonction principale de notre outil est de permettre à l'équipe projet d'identifier puis d'utiliser les connaissances FA utiles à ses activités de conception amont.

Les différentes fonctions contraintes que va devoir remplir cet outil sont quant à elles les suivantes :

- Le concepteur doit pouvoir situer l'avancement de son projet dans le modèle afin d'être en mesure de repérer la ou les KFA qui lui seront utiles.
- Le concepteur doit pouvoir vérifier si l'une des connaissances FA qu'il souhaite employer est pertinente pour l'activité qu'il va réaliser.

Afin de répondre à ces différentes fonctions, nous avons de choisi de créer trois menus : « FA », « Modèle » et « Connaissances ».

- *Menu « FA »*

Ce menu s'adresse surtout à des utilisateurs novices. Son rôle de mettre à leur disposition des connaissances de base relatives à la FA : principe et différences avec les procédés traditionnels.

Ces connaissances ne sont donc pas utiles à la conception amont mais permettent à un utilisateur novice de mieux comprendre en quoi la FA impacte la conception amont.

Pour des raisons de temps, nous avons fait le choix de ne pas le développer en détail. En effet, bien que ce menu soit indispensable à notre outil, nous avons souhaité privilégier le développement de la partie d'outil (menu modèle et Connaissances) permettant d'aider le concepteur à bien utiliser les connaissances FA lors de la conception afin d'augmenter sa capacité d'innovation plutôt que celle visant à expliquer pourquoi ces connaissances peuvent impacter la conception.

- *Menu « Modèle »*

Il permet l'exploration du modèle de conception que les concepteurs sont invités à utiliser pour identifier et utiliser les connaissances FA utiles aux activités de conception amont.

Dans ce menu, l'utilisateur peut obtenir les caractéristiques des RI clés en le sélectionnant directement sur le modèle. Les contenus qui sont affichés sont exclusivement sous forme picturale.

- *Menu « Connaissances »*

Ce menu permet à la fois d'identifier les connaissances FA au juste besoin utiles à chaque activité du modèle mais aussi d'avoir accès à chacune d'entre elles.

Pour identifier des connaissances, l'utilisateur dispose d'un mode « Recherche ». Ce mode lui permet de repérer sur le modèle l'activité qui correspond celle qui souhaite mener dans le cadre de son projet. Une fois le mode ouvert, il doit l'avancement en sélectionnant dans un 1^{er} temps la phase qui l'intéresse puis dans un 2nd temps le type d'activité. Une liste des connaissances FA utile est alors affichée sur le modèle.

L'accès à la fiche d'identité descriptive des connaissances est quant à elle possible en basculant dans le mode « description ». L'utilisateur sélectionne dans la liste de connaissances FA au juste besoin (JBi) que l'on souhaite étudier. Dans chacune de ces fiches, l'utilisateur dispose des éléments suivants :

- Un descriptif succinct du contenu que l'utilisateur peut choisir d'approfondir
- L'instanciation adéquate. La connaissance est alors localisée dans le modèle
- Un résumé de l'apport de la connaissance

Le Tableau 20 synthétise l'ensemble des menus ainsi que les modes que l'utilisateur peut sélectionner dans l'outil.

Type	Intitulé	Description	Icône
Menus	FA	Introduction des connaissances fondamentales	
	Modèle	Exploration des RI clés du modèle	
	Connaissances	Identification et description des connaissances FA	
Modes	Recherche	Identification des connaissances au juste besoin dans le modèle	
	Description	Description des connaissances	

Tableau 20 Menus de l'outil

5.3.2.1.2 Interface de l'outil

Afin de réaliser et de faire évoluer notre outil et son interface dans des délais de développement courts, nous avons d'utiliser le logiciel MS PowerPoint. Le choix de ce logiciel a été motivé par :

- sa simplicité d'utilisation : aucune connaissance en développement informatique ou codage n'est requise
- la possibilité de créer un rendu stylistique et ergonomique relativement proche de celui d'un outil informatique industriel. Ce point est important car les considérations de formes de notre prototype ne doivent pas prendre le pas sur celles de fond lors de la phase de test.
- la facilité de modifier rapidement les contenus, dans un contexte de développement agile ou les itérations peuvent être fréquentes

Il est bien entendu que cet outil devra, dans sa version industrielle, être développé grâce à d'autres solutions plus robustes.

La navigation entre les menus et la sélection des modes est réalisée grâce à l'emploi de liens hypertextes et de macros. Quant à l'interface même de l'outil, elle a été conçue en 4 zones distinctes présentées ci-dessous (Figure 90) :

- La zone en haut à gauche permet de sélectionner le menu (FA, Modèle ou Connaissance) dans lequel l'utilisateur souhaite travailler. Le basculement d'un menu à un autre s'effectue par un simple clic.
- La zone en haut au milieu permet de sélectionner les modes d'explorations des contenus (Recherche, Description et niveau de détail). La sélection s'effectue par simple clic.
- La zone en haut à droite permet un suivi des sélections lorsque l'utilisateur effectue une recherche
- La zone principale est quant à elle destinée à l'affichage des contenus.

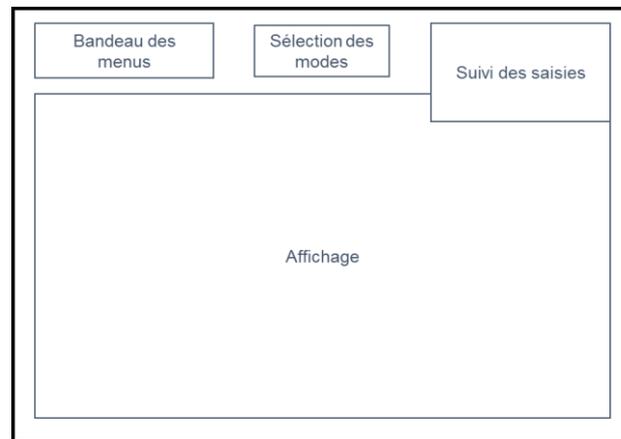


Figure 90 Organisation de l'interface de l'outil

5.3.2.1.3 Fonctionnement de l'outil

Nous allons par le biais de deux scénarii, décrire le fonctionnement de l'outil lorsque l'utilisateur est dans le menu « Modèle » et dans le menu « Connaissances ».

Scénario 1 : L'utilisateur souhaite visualiser les différentes formes et caractéristiques que peuvent prendre les RI clés produites à l'issue de la 1^{ère} étape du modèle, c'est-à-dire les idées.

1. L'utilisateur ouvre l'outil puis sélectionne le menu Modèle, correspondant au 2^{ème} icône du bandeau des menus.
2. Le modèle s'affiche. L'utilisateur sélectionne la RI clé pour laquelle il souhaite obtenir des informations, ici l'idée, en cliquant dessus.
3. Il accède à un ensemble de représentations du type de RI sélectionné. Le contenu de sa recherche est rappelé dans la fenêtre de saisie.

Les affichages successifs obtenus dans l'outil à l'issue des manipulations que nous venons de décrire ci-dessus sont illustrés avec la Figure 91.

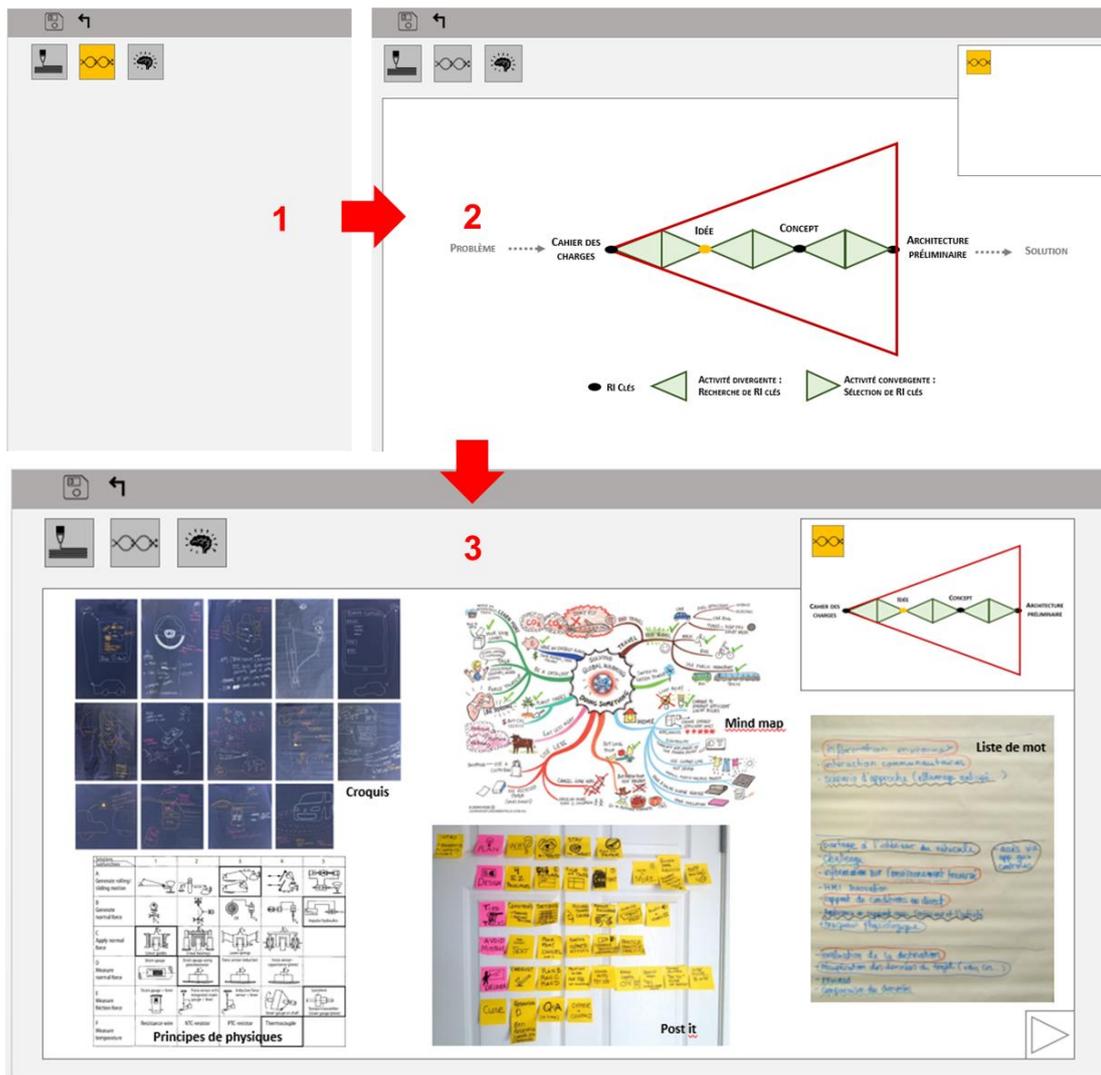


Figure 91 Capture d'écran des affichages pour le scénario 1

Scénario 2 : L'utilisateur souhaite identifier les connaissances FA utiles pour les activités divergentes destinées à rechercher des concepts, puis le cas échéant souhaite avoir accès à chacune d'entre elles de façon détaillée (Figure 92).

1. L'utilisateur ouvre l'outil puis sélectionne le menu Connaissances, correspondant au 3^{ème} icône du bandeau des menus.
2. Le modèle s'affiche. L'utilisateur sélectionne (1 clic) le mode Description (1^{er} icône de la barre des modes) puis sélectionne sur le modèle l'activité pour laquelle il souhaite savoir si des connaissances en FA spécifiques peuvent lui être utiles.
3. Les connaissances utiles s'affichent sur le modèle. Dans l'exemple présenté dans la Figure 92, deux utilisations successives de connaissances vont être utiles au bon déroulement de l'activité sélectionnée (génération de concepts) : tout d'abord l'apport JB1 puis ensuite l'apport JB2. L'utilisateur sélectionne alors (1 clic) l'apport de connaissances pour lequel il souhaite obtenir plus de détails.
4. La liste des connaissances relatives à l'apport sélectionné apparaît. Pour avoir accès aux informations détaillées relatives à l'une d'elles, l'utilisateur se place dans le mode Description

puis sélectionne la connaissance concernée dans la liste affichée à l'écran (ici les connaissances relatives à la complexité hiérarchique).

- Il accède alors à la fiche d'identité de la connaissance. Le défilement des informations s'obtient avec le bouton « Suivant ».

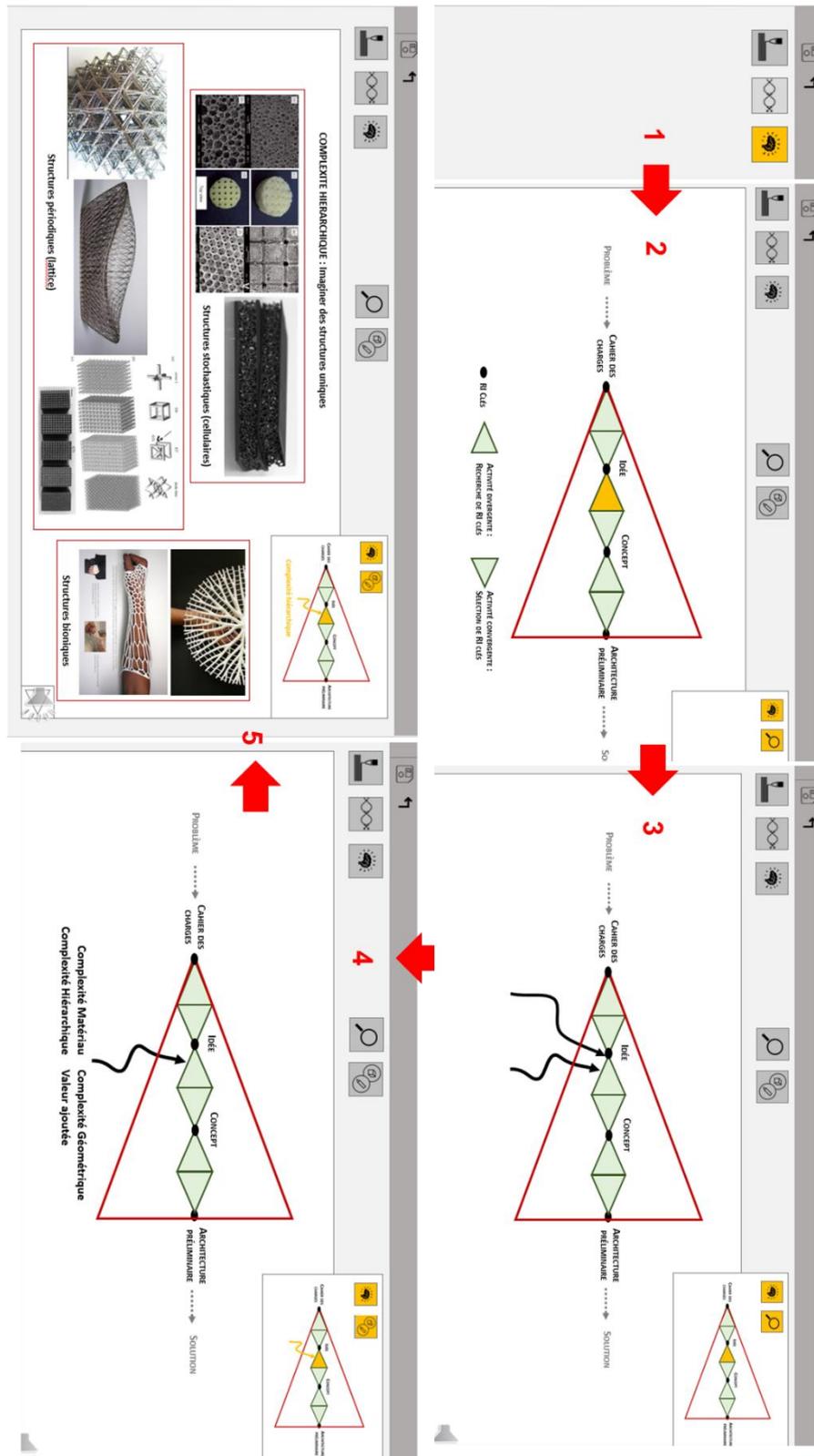


Figure 92 Capture d'écran des affichages pour le scénario 2

Nous venons de présenter le prototype fonctionnel d’outil que nous avons développé dans le but de faciliter l’identification et l’utilisation des connaissances relatives à la FA utiles à la recherche de solutions créatives lors de la conception amont.

Dans le prochain paragraphe nous présenterons une évaluation de la solution que nous venons de formaliser.

5.3.3 Evaluation de la solution

Cette expérimentation a pour objectif d’évaluer le modèle enrichi que nous avons formalisé pour lequel nous avons développé un outil puis d’en proposer des pistes d’amélioration.

5.3.3.1 Protocole expérimental

Pour cette expérimentation, nous nous sommes appuyés sur 4 projets industriels pendant une durée moyenne de 6 semaines aux cours desquelles les équipes de conception ont testé les différents apports de connaissances FA que nous proposons dans notre modèle.

Nous précisons que l’outil qui a été utilisé comme support de l’expérimentation ne proposait que des représentations picturales de type image pour détailler les connaissances.

Le protocole que nous allons décrire par la suite est schématisé sur la Figure 93 ci-dessous.

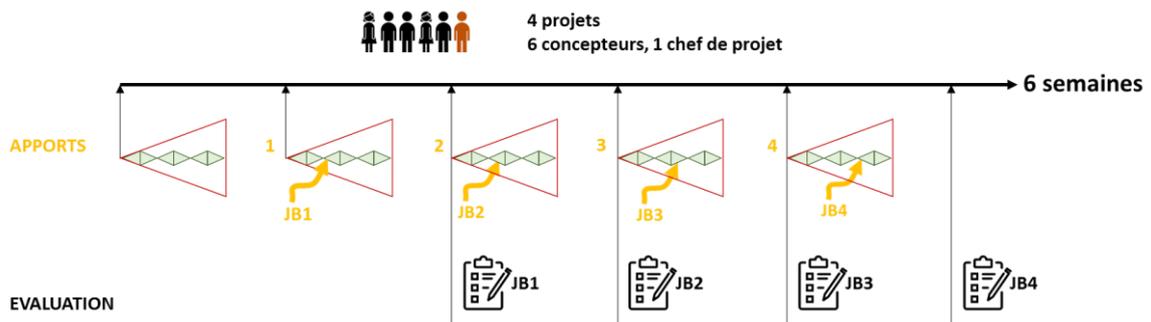


Figure 93 Protocole de l’expérimentation 3

5.3.3.1.1 Description des projets :

Chaque projet est réalisé par une équipe pluridisciplinaire de 6 concepteurs mélangeant ingénieurs, ergonomes et designers industriels. Le nombre de membres dans chaque spécialité varie suivant les projets.

Nous allons présenter les cahiers des charges de chacun des projets. Nous précisons cependant que du fait de la confidentialité qui entoure ces projets, nous ne citerons pas les entreprises concernées.

- *Projet 1 :*

L’entreprise W conçoit, fabrique et commercialise des simulateurs de signaux se présentant sous la forme typique d’un équipement de laboratoire électronique.

Les objectifs du projet sont d’imaginer de nouveaux usages ou de nouvelles façons d’utiliser un simulateur et de concevoir le produit répondant à ces nouveaux usages en veillant à lui donner une identité visuelle forte en accord avec les valeurs de l’entreprise X.

- *Projet 2 :*

L'entreprise X souhaite développer un emballage de repas à emporter convivial. Le produit doit à la fois servir au transport mais aussi à la dégustation des aliments, notamment dans le cadre de pique-nique improvisés.

L'objectif du projet est de concevoir une solution originale, simple et pratique et pouvant convenir à différentes situations de dégustation accompagnée d'un prototype fonctionnel pouvant servir à la présentation du concept à des chaînes de restauration rapide.

- *Projet 3 :*

L'entreprise Y est une société d'ingénierie. Elle veut rendre accessibles à ses collaborateurs ses différents métiers et sites. Pour cela, un premier concept a été développé mais il s'est révélé insuffisant pour l'accès à des chantiers par des personnes à mobilités réduites. Elle travaille donc sur un 2^{ème} produit plus adapté aux différents handicaps.

L'enjeu du projet est de travailler uniquement sur la partie non motrice de ce nouveau concept avec pour objectif d'introduire de nouvelles fonctionnalités dont un espace de travail permettant à l'utilisateur d'être plus efficace lors de ses activités sur chantier. La contrainte principale est de proposer une solution présentant une masse supplémentaire minimale.

- *Projet 4 :*

L'entreprise Z est une entreprise de la grande distribution qui cherche à développer le concept de collaborateur « augmenté ». Son objectif est de diminuer les tâches sans valeur ajoutée afin de libérer du temps de travail au collaborateur.

L'objectif du projet est dans un 1^{er} temps, d'identifier ces tâches quotidiennes chronophages puis dans un 2nd temps, de proposer des solutions qui pourraient assister le collaborateur en se focalisant sur une approche technologique mais sans automatisation lourde. Les périmètres d'études ciblés sont :

- les hypermarchés,
- la catégorie des produits de grande consommation
- la zone de travail délimitée par l'arrivée des produits dans les camions de livraison jusqu'au déballage des produits.

5.3.3.1.2 Procédure

Chaque équipe est rencontrée avant que le démarrage du projet. Cette réunion préliminaire a pour but de présenter succinctement les enjeux de notre expérimentation et de leur préciser les modalités suivantes :

- L'expérimentation n'a aucune incidence sur les objectifs et les livrables du projet,
- L'expérimentation a pour but d'apporter à l'équipe des connaissances.

Afin de perturber le moins possible le déroulement du projet, il est convenu que la communication avec l'équipe se fait par le biais d'un interlocuteur privilégié : le chef de projet dont la spécialité suivant les projets est donnée dans le Tableau 21.

Projet 1	Ingénieur
Projet 2	Designer
Projet 3	Designer
Projet 4	Ingénieur

Tableau 21 Profils des chefs de projet

Dès que le chef de projet est désigné et que le planning prévisionnel est défini, une 1^{ère} réunion est organisée. Elle a pour objectif de présenter le modèle de conception utilisé ainsi que l'organisation de l'expérimentation.

Le modèle de conception support de l'expérimentation est présenté à l'équipe. Les RI clés qui jalonnent le modèle et servent de repères pour l'introduction ultérieure des connaissances lui sont présentées. L'accent est mis sur l'importance de prévenir l'animateur lorsque le groupe a atteint l'un de ces jalons. L'équipe est donc libre d'adopter sa propre démarche mais doit toutefois respecter les livrables clés du modèle.

Lorsqu'un jalon du modèle est atteint, les connaissances au juste besoin JBi à tester sont mises à disposition du chef de projet à l'aide du démonstrateur. Le chef de projet prend alors connaissance des JBi et peut manipuler l'outil à sa guise. Pendant tout ce temps, l'animateur ne fait aucun commentaire.

Lorsque le chef de projet a terminé, il lui est demandé de reformuler avec ses propres mots les connaissances qui lui ont été fournies afin de s'assurer que celles-ci ont bien été comprises. En cas d'incompréhension, la connaissance concernée est expliquée par l'animateur.

Le chef de projet transmet les connaissances à son équipe. Pour cela l'outil lui est laissé à disposition. Lorsque le jalon suivant est atteint on procède à l'évaluation des connaissances apportées précédemment et on introduit les nouvelles connaissances selon la procédure qui vient d'être décrite. Au cours des 6 semaines que dure notre étude, nous mettons successivement à disposition du chef de projets les différentes connaissances par le biais des apports JB1 à JB4.

Nous précisons qu'un suivi quotidien de l'avancement des projets est effectué afin de s'assurer que l'équipe projet n'a pas atteint un jalon sans en avertir l'animateur. En parallèle, le chef de projet tient son propre cahier de manipulations dans lequel il note les tâches réalisées par le groupe.

5.3.3.1.3 Evaluation

L'évaluation des apports de connaissances est réalisée à l'aide d'un questionnaire et est complété par le chef de projet. Au terme de l'expérimentation, chaque chef de projet devra donc compléter 4 questionnaires correspondant aux 4 apports de connaissances effectués au cours du projet (JB1 à JB4).

Le questionnaire est constitué de 9 questions abordant 4 thèmes distincts (voir annexe p164) : ressenti, compréhension des contenus, instanciation et utilité des connaissances et enfin adéquation de la représentation.

- *Ressenti*

Il est évalué qualitativement par les questions ouvertes Q1 et Q2. Ces 2 questions permettent de recueillir un avis général sur l'apport de connaissances qui a été effectué. La 1^{ère} question recueille le point de vue exclusif du chef de projet, la 2^{ème} permet de contrôler que l'avis exprimé par le chef de projet est représentatif du groupe de projet.

- *Compréhension des contenus*

Elle sera étudiée à l'aide des questions Q3 à Q5. Ces trois questions sont des questions fermées à échelle : le participant est amené à se prononcer sur l'affirmation proposée avec une gradation allant de « Pas du tout d'accord » à « Tout à fait d'accord ».

Q3 et Q4 permettent d'évaluer la facilité avec laquelle le chef de projet puis le groupe ont appréhendé les connaissances. Q5 permet de contrôler la complétude des connaissances fournies, c'est-à-dire l'exhaustivité des contenus mis à disposition.

Lorsque le participant donne une réponse à orientation négative (« moyennement d'accord » à « Pas du tout d'accord »), une question ouverte supplémentaire est posée afin de connaître précisément les raisons motivent la réponse.

- *Instanciation et utilité des connaissances*

Elle est étudiée à l'aide des questions Q6 et Q7. La 1^{ère} permet de valider le moment d'introduction de la connaissance, la 2nd l'utilité de la connaissance pour les activités réalisées. L'évaluation s'effectue à nouveau avec une gradation de la réponse variant de « Pas du tout d'accord » à « Tout à fait d'accord ». Là encore, en cas de réponse négative, des questions ouvertes sont posées pour connaître précisément les raisons.

- *Représentation utilisée*

Elle est mesurée avec les questions fermées à échelle Q8 et Q9 (même gradation que pour les questions précédentes). La 1^{ère} question sert à valider le type de représentation choisi pour véhiculer la connaissance alors que la 2nd sert plutôt à valider la façon dont le contenu est présenté dans le support. Une fois de plus, en cas de réponse négative, des questions ouvertes sont utilisées pour approfondir le jugement exprimé par l'évaluateur.

Pour terminer nous précisons que pour procéder au traitement des données des questions fermées, nous affectons une note à chacune des réponses selon l'échelle suivante : 1 pour la réponse « Pas du tout d'accord » à 5 pour la réponse « Tout à fait d'accord ».

5.3.3.2 Résultats et analyse

Nous précisons qu'aucun des apports de connaissances effectué auprès des chefs de projets n'a nécessité que l'animateur reformule les connaissances.

Nous signalons également que le déroulement du projet 4 ne nous a pas permis de tester l'apport JB4. En effet, la phase d'analyse a duré pour ce projet 3 semaines contre une semaine environ pour les autres projets. Ceci s'explique par la nécessité de réaliser des études de terrain dans des hypermarchés afin d'identifier l'ensemble des tâches sans valeur ajoutée effectuées quotidiennement. De plus, parmi les solutions proposées au terme de l'étape de recherche et de sélection des concepts,

L'équipe projet a choisi de privilégier, parmi les solutions proposées pour obtenir un collaborateur « augmenté », le développement solutions de type service (applications pour tablette) plutôt celles de type produit permettant d'aider à la mise en rayon. Aussi, nous avons considéré que les connaissances apportées dans l'apport JB4 n'étaient dès lors pas adaptées. C'est pourquoi, contrairement à ce que nous avons envisagé, nous ne disposons à l'issue de l'expérimentation que de 15 questionnaires.

5.3.3.2.1 Résultats et analyse des questions ouvertes Q1 et Q2

Le constat que nous faisons de l'étude des questions Q1 et Q2 portant sur le ressenti est que l'avis exprimé par le chef de projet et celui du groupe sont identiques dans tous les questionnaires complétés à l'issue d'un apport de connaissances JBi. La réponse à la question Q2 a d'ailleurs été formulée avec le terme « idem » dans 9 questionnaires sur 15.



Figure 94 Nuages de mots extraits du questionnaire

La Figure 94 ci-dessus illustre les termes employés par les chefs de projets dans les questions ouvertes pour exprimer leur ressenti sur les différents apports de connaissances qui ont été fait. La taille des mots est directement proportionnelle à leur fréquence d'apparition dans les questionnaires. Par exemple, le mot « compréhensible » a été utilisé 4 fois. Nous observons que les avis exprimés portent essentiellement autour de la compréhension (compréhensible, compliqué, intéressant, ...) et l'utilité (pertinent, inutile, utile, ...) des connaissances. Ceci conforte le rôle des questions ultérieures de notre questionnaire.

5.3.3.2.2 Résultats des questions fermées Q3 à Q9

Tout d'abord, nous observons que la moyenne et l'écart type des résultats issus des évaluations réalisées par le chef de projet et par l'équipe pour les questions Q3 et Q4 sont très proches (Tableau 22). On notera même une moyenne légèrement supérieure pour la compréhension du groupe. La mise à disposition des connaissances auprès des chefs de projets qui se chargent ensuite de les transmettre au groupe n'a donc pas d'incidence sur la compréhension. L'outil numérique se suffit à lui-même pour véhiculer les connaissances.

	Avis Chef de projet	Avis Groupe
Moyenne	3,7	3,9
Ecart-type	1,1	1,1

Tableau 22 Moyenne et écart type des réponses fournies par les chefs de projet et le groupe

D'autre part, un test non paramétrique de Kruskal Wallis (distribution non normale dans les échantillons) nous permet quant à lui de conclure que, pour un seuil de 5%, il n'y a pas de différence significative entre les distributions des réponses fournies par des chefs de projets dont les spécialités (designer ou ingénieur) sont différentes. (Tableau 23).

Par conséquent, le profil de l'évaluateur n'a pas d'incidence sur l'évaluation des caractéristiques constitutives des connaissances au juste besoin (contenu, représentation et instanciation).

Question	Test KW ($\alpha=5\%$)
Q3 Compréhension	$H^*= 2,49 ; p = 0,115$
Q5 Complétude	$H^*= 0,267 ; p = 0,605$
Q6 Timing	$H^*= 0,037 ; p = 0,848$
Q7 Utilité	$H^*= 0,882 ; p = 0,358$
Q8 Forme	$H^*= 1,602 ; p = 0,206$
Q9 Contenu	$H^*= 2,788 ; p = 0,095$

Tableau 23 Récapitulatif des valeurs du test de Kruskal Wallis pour la variable « spécialité »

Les résultats des évaluations n'étant pas impactés par notre choix d'apporter les connaissances aux seuls chefs de projet et par la spécialité de ces derniers, nous pouvons donc valider l'aspect véhiculaire de notre outil de mise à disposition des connaissances FA au juste besoin dans notre modèle enrichi.

Nous allons maintenant nous présenter en détails les résultats quantitatifs obtenus au cours de cette expérimentation.

- *Apports JB1 et JB2*

Le traitement des données recueillies montre que les connaissances mises à disposition dans les apports JB1 et JB2 ont été globalement bien perçues (Figure 95).

Les avis exprimés permettent de conclure que les connaissances ont été bien comprises ($\bar{M}_{JB1} = \bar{M}_{JB2} = 4,5$; questions Q3-Q4) et que leur contenu est jugé complet ($\bar{M}_{JB1} = 4$; $\bar{M}_{JB2} = 4,25$; question Q5). On note que les représentations adoptées pour véhiculer les connaissances (Q8) ainsi que la présentation des contenus dans l'outil (Q9) sont également bien appréciées. Pour ces deux questions, les notes moyennes sont supérieures à 4, ce qui montre que les évaluateurs approuvent les affirmations proposées dans les questions.

Nous observons également que les remarques faites par les évaluateurs sont essentiellement axées sur le choix des visuels, leur disposition dans la fenêtre et leur exhaustivité. Exemples :

- Projet 4, JB2 : « la lisibilité pourrait être améliorée avec une meilleure répartition visuelle des images et plus de légendes »
- Projet 2, JB2 : « diversifier les visuels et éviter ceux redondants »
- Projet 1, JB1 : « mettre des mots clés à côté des images »

Les avis concernant le timing des apports (Q6) sont eux aussi positifs mais recueillent des notes moyennes légèrement inférieures à celles des autres évaluations ($\bar{M}_{JB1} = 4$; $\bar{M}_{JB2} = 3,75$).

Cependant malgré une instanciation qui semble adaptée, nous observons que les équipes ont du mal à évaluer l'impact que les connaissances apportées par JB1 et JB2 ont pu avoir sur leur travail (notes inférieures ou égales à 3 et erreur type élevée à la question Q7 (les connaissances fournies vous ont-elles été utiles).

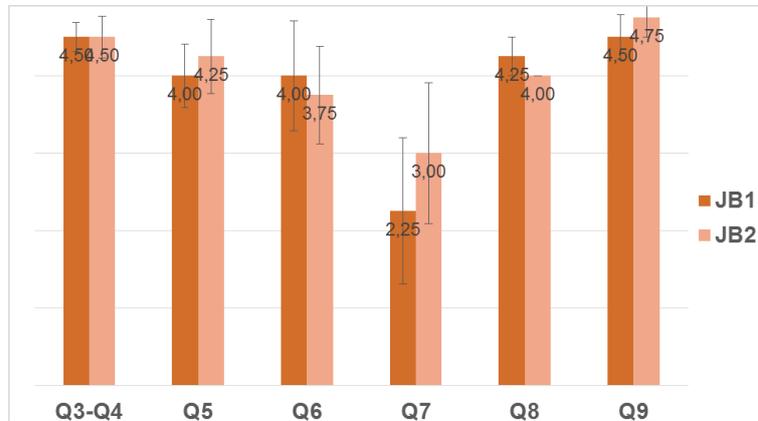


Figure 95 Moyenne et erreur type des évaluations pour les apports JB1 et JB2

- *Apports JB3 et JB4*

Les avis recueillis sur les connaissances mises à disposition dans les apports JB3 et JB4 sont globalement moins bons que ceux exprimés pour JB1 et JB2 (Figure 96).

La compréhension, la complétude des connaissances ainsi que leur support et leur présentation dans l'outil des connaissances sont considérées comme moyennement satisfaisantes (notes moyennes proches de 3).

Le timing d'introduction des connaissances semble être très adapté dans le cas de l'apport JB4 ($\bar{M}_{JB4}=4,33$) mais plus mitigé pour JB3 ($\bar{M}_{JB3}=3,57$).

Quant à l'évaluation de l'utilité des connaissances dans le cadre des projets, nous observons là encore que les avis exprimés sont très négatifs ($\bar{M}_{JB3}=1,29$; $\bar{M}_{JB4}=1,33$).

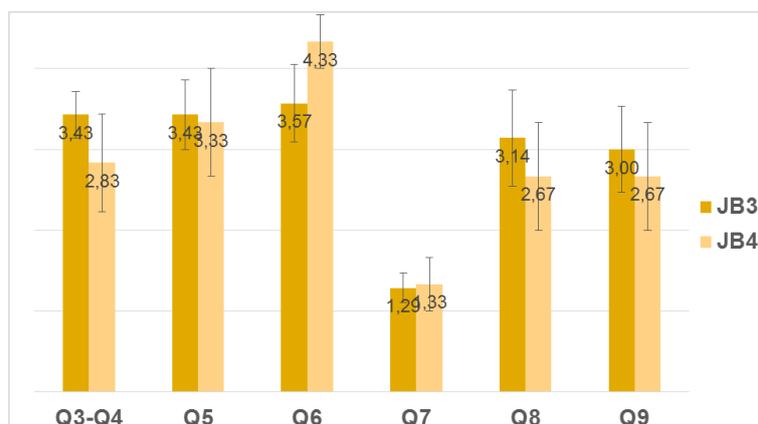


Figure 96 Moyenne et erreur type des évaluations pour les apports JB3 et JB4

5.3.3.2.3 Analyse

Les résultats que nous venons de présenter nous permettent de faire ressortir les points positifs et les limites de notre solution face à nos utilisateurs cibles.

Nous retenons tout d'abord que le timing d'introduction des différentes connaissances dans le processus de conception semble en adéquation avec les contenus véhiculés.

Le 2^{ème} point qui ressort est que nous ne pouvons dissocier le support utilisé de l'information qui est véhiculée car ce couple support / information joue un rôle primordial sur la compréhension des connaissances par les utilisateurs. Ainsi, les connaissances introduites dans notre modèle lors des apports JB1 et JB2, qui traitent exclusivement de la complexité en FA et de sa valeur ajoutée, c'est-à-dire des connaissances de type opportunité, ne posent pas de difficulté de compréhension sous leur forme actuelle. La représentation de cette catégorie de connaissance sous la forme d'images suffit donc à leur compréhension.

Pourtant, lorsque les connaissances sont plutôt restrictives comme c'est essentiellement le cas pour les connaissances mises à disposition dans les apports JB3 et JB4 (contenus traitant des matériaux disponibles en FA ainsi que des caractéristiques des machines et produits), on voit que la compréhension avec un support uniquement pictural devient plus difficile.

L'exemple le plus révélateur de ces difficultés est la connaissance KFA14, portant sur le concept de seuil de rentabilité, et introduite au cours de JB3. Notre choix pour la représenter s'est porté sur une utilisation de plusieurs graphiques cherchant à mettre en avant les caractéristiques objectives à prendre en compte pour estimer la viabilité des concepts en cas d'utilisation de la FA. Cette représentation graphique a, semble-t-il, dérouté une partie des équipes projet (en priorité les ergonomes et designers) peu habituée à trouver des informations sous cette forme. Dans la question ouverte associée aux questions Q8-Q9, le chef de projet 3 a suggéré, pour pallier ces difficultés, d'ajouter « des pavés de texte séparés des schémas », quant au chef de projet 2 il proposait d'employer des vidéos dans lesquelles les graphes seraient commentés.

Ces retours nous ont donc confortés dans l'idée que nous ne pouvons pas intégrer dans notre modèle des connaissances FA sous une forme exclusivement picturale mais qu'il est au contraire nécessaire d'adapter les supports en fonction des typologies de connaissances (opportunistes, restrictives, ...). Ainsi celles dont le but est la sélection de solutions et dont le contenu peut être parfois très abstrait devront privilégier être complétés par des vidéos voir des objets.

Le dernier point qui ressort de l'analyse des résultats obtenus dans les questionnaires est qu'il n'est pas possible de conclure quant à l'utilisation des connaissances par les équipes projets et à leur incidence sur les solutions développées, si nous ne prenons pas en considération chaque projet de façon indépendante.

Une des raisons qui pourrait expliquer la difficulté à mesurer l'utilité des connaissances est le fait que la mise à disposition de connaissances explicites amènent les utilisateurs dans un processus d'internalisation [85], c'est-à-dire d'interprétation, d'assimilation et d'appropriation des connaissances. Or comme l'a souligné Grimand [163], les « acteurs disposent d'une autonomie interprétative et [par] conséquent les outils ne déterminent pas leurs formes d'action [mais les aident] à coordonner leurs actions ». Ainsi, si la mise à disposition de connaissances FA au juste

besoin contribue à augmenter le potentiel cognitif des concepteurs, leur utilisation va dépendre de facteurs supplémentaires comme le contexte.

Dès lors, on comprend que la simple prise en compte de la réponse quantitative fournie à la question Q7 (utilité des connaissances) doit s'accompagner d'une analyse des réponses fournies par les évaluateurs dans la question ouverte.

Or il ressort que la principale explication fournie par les participants pour justifier leur évaluation négative est l'intérêt limité de l'utilisation de telles connaissances dans leurs projets. Le chef de projet 1 a par exemple écrit que le « projet ne se prêt[ait] pas vraiment » à l'utilisation des connaissances fournies dans JB3 alors que le chef de projet 4 notait pour JB2 : « Compréhensible même si pas utile pour nous ».

A l'opposé, lorsque l'évaluation est positive (plutôt ou moyennement d'accord avec l'affirmation) le chef de projet est en mesure d'expliquer comment les connaissances ont été utilisées. Ainsi, la réponse positive du projet 3 dans le questionnaire relatif à l'apport JB2 (complexités et VA de la FA) a été justifiée par le fait que les informations fournies ont aidé l'équipe à « réfléchir à comment faire pour transformer certaines [de leurs] idées en concepts ». Le concept présenté dans la Figure 97 ci-dessous correspond à l'un de ceux proposés après introduction des connaissances FA. Ces dernières ont servi ici à proposer un concept de tablette monobloc repliable dans laquelle les zones de pli utilisent la complexité matériau de la FA, évitant ainsi les ajours entre les différentes parties et diminuant le risque de coincement.

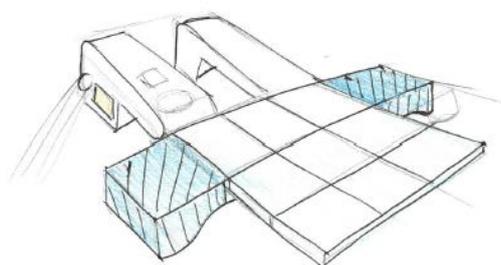


Figure 97 Concept utilisant des connaissances FA issues de l'apport de connaissances

Nous retenons donc que les objectifs mêmes d'un projet d'innovation sont une condition clé pour que les équipes de conception soient amenés à rechercher des solutions dans l'ensemble de l'espace solution offert par l'approche DWAM permise par l'utilisation de notre modèle de conception enrichi.

Cependant le panel étudié dans notre expérimentation constitue l'une limite des limites de notre expérimentation. En effet, nous pouvons certes constater que le contexte du projet d'innovation et ces objectifs conditionnent l'utilisation des connaissances, nous ne pouvons en l'état proposer des critères caractérisant les projets pour lesquels l'emploi de notre modèle enrichi va augmenter la probabilité que des solutions originales soient trouvées dans la zone de connaissance FA de notre approche DWAM.

5.3.3.3 Conclusion

Cette dernière expérimentation a été réalisée auprès de 4 équipes projet qui devaient prendre en compte dans leur travail, les connaissances au juste besoin que nous avons caractérisées et capitalisées lors des expérimentations précédentes.

Nous avons montré que les connaissances proposées pour enrichir notre modèle de conception étaient compréhensibles par les concepteurs et introduites au bon moment même si des modifications doivent être apportées à notre modèle et à son outil.

Nous avons également établi que ces connaissances étaient utiles donc permettaient de favoriser l'approche DWAM mais que la typologie des projets était un facteur important. Nous validons donc notre 2^{ème} hypothèse (Intégration dans un modèle de conception amont permettant l'approche DWAM)

Les différentes modifications à effectuer, synthétisées dans le Tableau 24 ci-dessous, portent principalement sur les supports à utiliser pour véhiculer les connaissances où sur la manière de les rendre accessible dans l'outil (forme, disposition, exhaustivité, ...).

Apport	Niveau	Modifications à effectuer
JB1 JB2	Outil	Prévoir une disposition verticale des images pour faciliter une lecture de bas en haut Ajouter des légendes Prévoir des liens internet pour que les utilisateurs puissent avoir accès aux projets dont sont issus les représentations Enrichir la base d'images Supprimer les visuels redondants
JB3	Modèle	Seuil de rentabilité trop abstrait, utiliser des vidéos pour faciliter la compréhension
	Outil	Prévoir des filtres pour identifier rapidement les matériaux disponibles
JB4	Modèle	Prévoir des représentations de type objet pour illustrer les contenus

Tableau 24 Modifications à effectuer sur le prototype et le modèle

Ces différentes modifications nous amènent à procéder à des changements sur notre modèle enrichi par des connaissances au juste besoin dédié à l'approche DWAM. Dans le nouveau modèle que nous proposons (Figure 98), seules les représentations sous forme d'images ont été conservées pour les deux 1^{ers} apports de connaissances. Quant aux 3^{ème} et 4^{ème} apports, ils reposeront sur l'utilisation de connaissances représentées respectivement sous forme d'images et de vidéos puis d'images et d'objets. Pour ce qui concerne les informations introduites et les timings d'introduction, ceux-ci demeurent identiques à ceux proposés dans le modèle enrichi précédent.

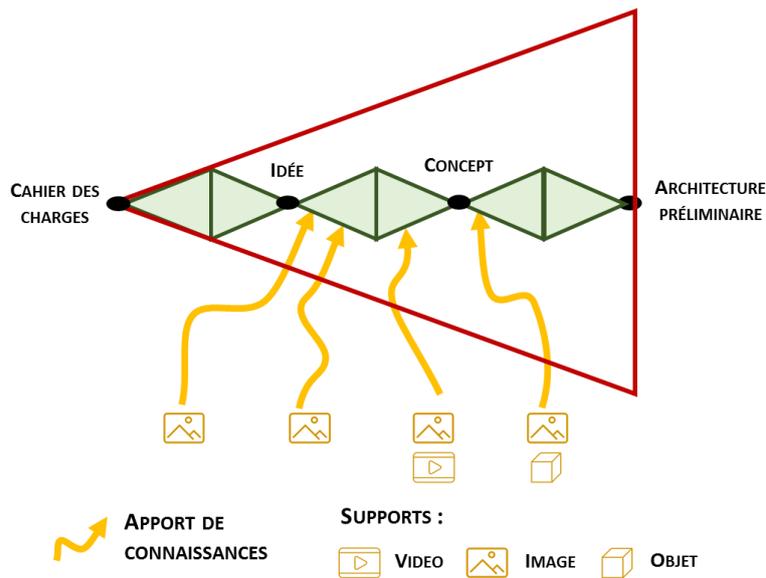


Figure 98 Nouveau modèle de conception enrichi proposé après les tests utilisateurs

A l'issue de cette expérimentation, nous avons souhaité démarrer des travaux sur la réalisation d'objets techniques destinés à véhiculer rapidement des connaissances FA tout en s'assurant d'une compréhension rapide. C'est pourquoi nous avons démarré un projet impliquant deux élèves ingénieurs d'Arts et Métiers ParisTech, centré sur les connaissances apportées lors l'apport JB4 et limité au seul procédé FDM, dont les objectifs sont :

- De développer, sous la forme d'une défautèque, un ensemble de représentations physiques permettant d'illustrer les géométries réalisables ou non en fonction des caractéristiques techniques de la machine
- De tester leur valeur ajoutée en termes de quantité et qualité des solutions créatives proposées par rapport à la seule représentation picturale des connaissances.

Ces travaux sont actuellement toujours en cours car seule la base d'objet a été à ce jour terminée.

Nous retenons également que les résultats de cette expérimentation soulèvent de façon plus large la question de la confrontation des concepteurs à l'objet réel ; c'est-à-dire la confrontation entre la relation intime avec l'objet et le domaine du possible en FA.

Nous venons de terminer la présentation et l'analyse des résultats obtenus lors de notre 3^{ème} expérimentation. Le prochain paragraphe sera consacré à la synthèse des différentes expérimentations réalisées aux cours de cette thèse.

5.4 Synthèse des expérimentations

Les expérimentations que nous avons réalisées s'articulaient autour d'une démarche en 3 étapes permettant de construire une réponse à notre problématique (comment exploiter les connaissances FA dans la stratégie DWAM afin de favoriser la recherche d'architectures créatives) et pour laquelle nous avons formulé les 2 hypothèses suivantes :

- H1 : L'intégration des connaissances doit être réalisée au juste besoin, cette 1^{ère} hypothèse se déclinant en 4 points :
 - o H1A : Forme explicite
 - o H1B : Information adaptée
 - o H1C : Support adapté
 - o H1D : instanciation adaptée
- H2 : L'intégration des connaissances doit être réalisée dans un modèle de conception amont permettant l'approche DWAM.

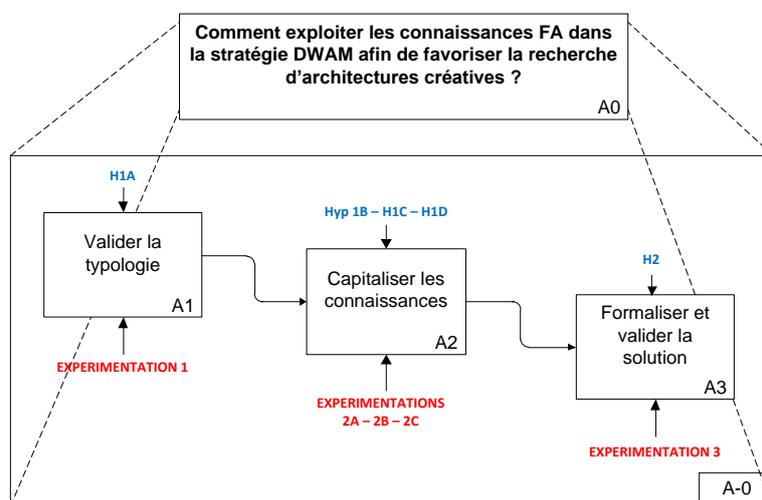


Figure 99 Rappel des hypothèses et expérimentations dans la démarche suivie

Le Tableau 25 ci-dessous présente un récapitulatif du travail effectué pour valider nos différentes hypothèses.

Hypothèses		Validation
H1 : Intégration des connaissances au juste besoin	H1A : Forme explicite	Expérimentation 1
	H1B : Information	Expérimentation 2A
	H1C : Support	Expérimentation 2B
	H1D : Instanciation	Expérimentation 2C
H2 : Intégration dans un modèle de conception dédié à l'approche DWAM		Expérimentation 1 Expérimentation 3

Tableau 25 Synthèse des expérimentations et des hypothèses validées

Notre 1^{ère} expérimentation, focalisée sur les deux 1^{ères} étapes de notre modèle préliminaire, correspondait à une étude comparative des solutions produites par des groupes de créativité disposant ou non de connaissances FA, et sous des typologies différentes (explicites et tacites). Les résultats que nous avons obtenus sont doubles puisque nous avons montré que :

- l'emploi de connaissances FA sous une forme exclusivement explicite permet d'obtenir des solutions de conception dont les évaluations qualitatives sont similaires à celles obtenues par des groupes disposant de connaissances tacites (présence d'experts). Ce résultat nous a permis de valider la partie usage de la forme explicite des connaissances de notre hypothèse 1 relative au juste besoin.
- l'utilisation de connaissances relatives à la FA augmente le potentiel créatif des concepteurs lors de la phase DWAM de notre modèle. Ce qui nous a permis de valider notre hypothèse 2 pour les deux 1^{ères} étapes de notre modèle.

La validation des trois autres caractéristiques du juste besoin en connaissance FA (H1B à H1D) a été possible grâce à trois expérimentations successives (notées 2A à 2C Figure 99) portant chacune sur une caractéristique spécifique de notre juste besoin : l'information, le support et l'instanciation.

L'expérimentation 2A était basée sur une série d'entretiens semi-dirigés réalisés auprès de notre population cible (concepteurs impliqués dans la conception amont, de différentes spécialités) et sur l'analyse de questionnaire relatifs à l'usage des connaissances FA dans la recherche de caractéristiques innovantes des produits. Nous avons montré qu'il existe des informations dont la mise à disposition permettrait :

- de faciliter la recherche de solution de conception en amenant de nouvelles pistes de réflexion.
- d'aider à la sélection des solutions en introduisant des éléments supplémentaires permettant de mieux évaluer les critères employés.

L'expérimentation 2B cherchait à démontrer que, parmi les supports de représentation des connaissances fréquemment utilisés en conception amont [84], tous étaient adaptés pour véhiculer des connaissances à des concepteurs de spécialités différentes, et donc habitués à communiquer et à s'informer sous des formes différentes. Nous avons montré qu'il existe des supports à privilégier pour transmettre des connaissances dans les équipes pluridisciplinaires car certains recueillent un avis unanime alors que d'autres ne font pas consensus.

L'expérimentation 2C relative à la capitalisation des connaissances portait sur la recherche d'une instanciation adéquate permettant de valoriser les connaissances. Nous avons pu mettre en avant le fait que suivant le type d'information véhiculée, il existait des activités (divergentes ou convergentes) et des étapes conduisant à des RI clés (idée, concept ou produit) privilégiées.

Les conclusions de ces 3 expérimentations nous ont donc amenés à valider entièrement notre hypothèse 1 portant sur l'intégration de connaissances au juste besoin.

Enfin, la dernière étape de notre démarche nous a conduit tout d'abord à la formalisation de notre modèle de conception enrichi par des connaissances relatives à la FA puis ensuite à la proposition

d'un prototype d'outil informatique destiné à faciliter l'identification puis l'utilisation de ces connaissances par les concepteurs. Ce prototype a enfin été testé et nous a permis d'identifier des pistes d'amélioration quant à l'intégration au juste besoin des connaissances FA dans notre modèle.

6 Conclusion générale et perspectives

L'objectif de nos travaux était d'augmenter la capacité d'innovation des équipes projets en intégrant des connaissances relatives à la FA dans le processus de conception. Dans les précédents chapitres nous avons défini le contexte de nos travaux ainsi que les verrous associés. Notre état de l'art nous a permis d'identifier des éléments de réponse à notre question de recherche et de formuler la problématique suivante : comment exploiter les connaissances FA dans la stratégie DWAM afin de favoriser la recherche d'architectures créatives. Nos expérimentations nous ont servi à la fois à valider nos hypothèses de résolution mais aussi à construire la réponse à notre problématique.

Ce chapitre est destiné à dresser le bilan de nos apports mais également à présenter les perspectives de recherches qui découlent de nos travaux.

6.1 Apports

Les apports de cette recherche sont multiples puisque à l'issue de ces travaux, nous proposons une démarche, un modèle et un outil.

La démarche que nous avons développée, permet d'enrichir un modèle de conception amont avec des connaissances FA. Cette démarche, que nous avons appliquée au contexte de la fabrication additive, se veut générique. Cela signifie qu'elle peut parfaitement être appliquée à tout champ de connaissance X de la stratégie DWX où X correspondrait :

- A une innovation technologique
- A de nouveaux enjeux pour la conception amont (écoconception, ...)

La prise en compte, à l'issue de cette démarche, des différents champs de connaissance X, lors des phases amont, permettra d'augmenter l'espace solution dans lequel seront recherchées puis sélectionnées les architectures ; contribuant de fait à augmenter la capacité d'innovation des concepteurs.

Les 3 étapes de cette démarche sont rappelées ci-dessous :

- Validation de la forme explicite des connaissances
- Capitalisation des connaissances suivant le principe du juste besoin, permettant de ne conserver que les connaissances utiles. Cette étape se décompose elle-même en 3 phases :
 - o repérer les informations nécessaires et suffisantes aux activités réalisées lors de la conception amont.
 - o les préserver avec des supports adaptés à une utilisation pluridisciplinaire par l'équipe de conception.
 - o les valoriser par une instanciation.
- Formalisation et test de la solution

De cette démarche, découle notre 2^{ème} apport de thèse, c'est-à-dire un modèle de conception enrichi par des connaissances FA au juste besoin permettant la recherche d'architectures créatives par une approche DWAM. Ce modèle apporte selon nous une aide précieuse aux concepteurs puisqu'il leur

permet d'une part de repérer rapidement les activités de conception pour lesquelles des connaissances FA peuvent être utiles et d'autre part de spécifier pour chacune d'elles le moment propice à leur utilisation. Ce modèle enrichi contribue donc à augmenter l'espace solution dans lequel vont être recherchées et sélectionnées les différentes RI clés du modèle. Pour autant nous précisons que la prise en compte des connaissances mises à disposition dans le modèle n'implique pas nécessairement que les solutions sélectionnées seront inspirées des seules possibilités de la FA.

Nous ajoutons que notre modèle enrichi s'inscrit de façon naturelle dans les deux thèmes développés au sein du laboratoire LCPI puisque nous avons à la fois cherché à formaliser des connaissances métiers issues de la FA mais aussi à améliorer le processus de conception amont en proposant une intégration de ces connaissances en fonction des spécificités et des besoins des utilisateurs cibles.

Le 3^{ème} apport de nos travaux correspond quant à lui à la proposition d'un outil, dont l'ossature reprend notre modèle de conception enrichi, dans le but de permettre aux différents acteurs de la conception amont de repérer puis d'utiliser les connaissances relatives à la FA qui sont potentiellement utiles à la conception amont.

6.2 Perspectives

L'aboutissement de ces travaux de thèse préfigure diverses perspectives que nous déclinons autour des 2 thèmes ci-dessous :

- Perspectives de développement
- Perspectives de recherche

6.2.1 Perspectives de développement

Il s'agit là d'une perspective majoritairement à court terme dont la préoccupation centrale porte sur l'amélioration et l'enrichissement des connaissances mises à disposition dans notre outil.

L'un des axes majeurs de développement porte sur la prise en compte des autres types de représentations des connaissances (objet et vidéos, voire virtuelles) en complément de celles picturales déjà utilisées; évitant ainsi que les concepteurs ne se désintéressent d'un outil jugé trop compliqué. Nous prévoyons donc de poursuivre des travaux en ce sens en vue de proposer des supports mieux adaptés à la compréhension des différentes connaissances. Pour cela nous envisageons d'étudier plus en détail la relation qui existe entre information véhiculée et support de représentation employé.

Un 2^{ème} axe d'amélioration porte sur l'élargissement de notre panel d'étude qui nous permettrait d'identifier de nouvelles connaissances FA utiles aux activités de conception amont. En effet, même si les connaissances au juste besoin repérées au cours de nos expérimentations ont été plutôt bien accueillies lors des tests utilisateurs, nous pensons que d'autres peuvent encore être capitalisées voire affinées.

Enfin un dernier axe porte sur l'extension du champ d'application de notre outil dans l'optique d'un usage en contexte industriel. Il semble en effet nécessaire de créer des passerelles avec les autres outils d'aide à la conception utilisés par les concepteurs afin de couvrir l'intégralité du processus de conception. Une telle interconnexion permettrait alors de favoriser l'innovation produit au niveau de l'assemblage puis ensuite au niveau composant tout en garantissant la fabricabilité du produit. Ceci passe donc par la connexion et l'interaction de notre outil avec ceux développés pour l'approche DFAM.

6.2.2 Perspectives de recherche

Le 1^{er} axe de recherche que nous pensons développer porte sur la mise en place d'une réflexion autour de l'évolution des connaissances des concepteurs. En effet, le modèle et l'outil que nous proposons s'adresse prioritairement à des utilisateurs cibles majoritairement novice dans le domaine de la FA. Or au fil du temps et grâce au processus d'apprentissage, les utilisateurs novices vont naturellement évoluer vers des profils experts. Cela implique donc d'adapter la démarche que nous proposons, en particulier lors de la phase de capitalisation des connaissances au juste besoin.

Avec une approche par les sciences cognitives, il serait ainsi intéressant d'étudier plus en détail ce processus d'apprentissage afin de pouvoir quantifier l'évolution du juste besoin en connaissances en fonction du niveau d'expertise mais aussi de la spécialité des concepteurs et ainsi être en mesure de mieux appréhender leurs attentes en termes de contenu, de représentation ou d'instanciation des connaissances.

Le 2^{ème} axe de recherche que nous identifions se situe lui au niveau de la transition entre l'approche DWAM que nous chercherons à favoriser avec l'intégration de connaissances FA au juste besoin et l'approche DFX (X=Additive Manufacturing ou X=Traditional Manufacturing) qui sera développée par la suite dans le processus de conception.

En effet, nous avons défini les architectures préliminaires comme la dernière RI clé de notre modèle mais celles-ci correspondent également aux données d'entrées des méthodologies DFX. Par conséquent il est nécessaire d'être en mesure de les sélectionner ce que nous n'avons pas à ce stade envisagé dans nos travaux. Dès lors il nous semble important de travailler à la définition de critères permettant 1) de sélectionner les architectures les plus prometteuses 2) de sélectionner parmi les approches DFM ou DFAM celle qui sera la plus adaptée pour le développement de l'architecture définitive et des composants.

7 Production scientifique

Revue internationale à comité de lecture

Laverne, F., Segonds, F., D'Antonio, G., & Le Coq, M. (2016). "Enriching Design With X through tailored Additive Manufacturing knowledge: a methodological proposal". *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1-10. doi: 10.1007/s12008-016-0314-7

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". *ASME Journal of Mechanical Design*, 137(12), 8. doi: 10.1115/1.4031589

D'Antonio, G., Segonds, F., **Laverne, F.**, Souza Bedolla, J., & Chiabert, P.. "A framework for Manufacturing Execution System integration in an advanced Additive Manufacturing process". *International Journal of Product Lifecycle Management.*, Accepted, in press

Ouvrages scientifiques

Laverne, F., Segonds, F., & Dubois, P. (2016). "Fabrication additive - Principes généraux" *Techniques de l'Ingénieur* (Vol. BM7017v2). Paris.

Conférences internationales

Laverne, F., Segonds, F., D'Antonio, G., & Le Coq, M. (2016). "AM knowledge integration to foster innovation process: a methodological proposal". Virtual Concept International Workshop on Major Trends in Product Design, Bordeaux, France.

Conférences nationales

Laverne, F., Segonds, F., Anwer, N., & Le Coq, M. (2015). "Conception pour la fabrication additive: un état de l'art. *AIP PRIMECA'15*, La Plagne, France. <http://hdl.handle.net/10985/9484>

Cousin, J., Segonds, F., **Laverne, F.**, Ratgras, S., Guilloux, S., & Pellat Finet, L. (2015). "Reduction of the global cost of a system thanks to additive manufacturing of metal powder fusion process". *CONFERE'15*, Lisbon, Portugal.

Laverne, F., Segonds, F., Anwer, N., & Le Coq, M. (2014). "DFAM in the design process: A proposal of classification to foster early design stages". *CONFERE'14*, Sibenik, Croatia.

Vitse, M., **Laverne, F.**, Segonds, F., Ratgras, S., Pellat Finet, L., & Yantio, G. (2014). "Fabrication additive : Intégration du DFAM pour la conception petites et moyennes séries dans le domaine aérospatial". *CONFERE'14*, Sibenik, Croatia.

8 Bibliographie

- [1] M. Grundstein, "From capitalizing on company knowledge to knowledge management," *Knowledge management, classic and contemporary works*, vol. 12, pp. 261-287, 2000.
- [2] J. A. I. Schumpeter, *The theory of economic development: An inquiry into profits, capital, credit, interest, and the business cycle* vol. 55: Transaction Publishers, 1934.
- [3] P. Kelly and M. Kranzberg, *Technological innovation: A critical review of current knowledge*. San Francisco: San Francisco Press, 1978.
- [4] D. Norman and R. Verganti, "Incremental and Radical Innovation: Design Research vs. Technology and Meaning Change," *Design Issues*, vol. 30, pp. 78-96, 2014.
- [5] J. S. Gero, "Creativity, emergence and evolution in design," *Knowledge-Based Systems*, vol. 9, pp. 435-448, 1996.
- [6] G. Pahl and W. Beitz, *Engineering Design – A Systematic Approach*, 3rd Edition ed. London: Springer, 2007.
- [7] R. M. Henderson and K. B. Clark, "Architectural innovation: the reconfiguration of existing product technologies and the failure of established firms," *Administrative science quarterly*, vol. 35, pp. 9-30, 1990.
- [8] S. C. Wheelwright and K. B. Clark, "Creating project plans to focus product development," *Harvard Business Review*, vol. 70, p. 70, 1992.
- [9] R. J. Sternberg, J. E. Pretz, and J. C. Kaufman, "A propulsion model of creative leadership," *The Leadership Quarterly*, vol. 14, pp. 455-473, 2003.
- [10] D. Encaoua, D. Foray, A. Hatchuel, and J. Mairesse, *Revue d'économie politique Les enjeux économiques de l'innovation. Bilan du programme CNRS*, vol. 114, pp. 133-168, 2004.
- [11] P. Le Masson, B. Weil, and A. Hatchuel, *Les processus d'innovation: conception innovante et croissance des entreprises*: Hermes science publ., 2006.
- [12] J. Perrin, *Concevoir l'innovation industrielle: méthodologie de conception de l'innovation*. Paris: CNRS, 2001.
- [13] S. Lenfle and C. Midler, "Stratégie d'innovation et organisation de la conception dans les entreprises amont," *Revue française de gestion*, vol. 28, pp. 89-105, 2002.
- [14] B. Jaruzelski and K. Dehoff, "The Global Innovation 1000: How the Top Innovators Keep Winning " *Strategy and Business*, p. 48, 2010.
- [15] D. M. Amidon, "A Bold Awakening," in *Innovation strategy for the knowledge economy: the Ken Awakening*, ed Boston: Butterworth-Heineman, 1997, pp. 1-14.
- [16] A. A. Ammar, "Adaptation et mise en place d'un processus d'innovation et de conception au sein d'une PME," Thèse de doctorat, TREFLE, Arts et Métiers ParisTech, Bordeaux, 2010.
- [17] R. Rothwell, "Towards the Fifth-generation Innovation Process," *International Marketing Review*, vol. 11, pp. 7-31, 1994.
- [18] D. J. Teece, "Profiting from technological innovation: Implications for integration, collaboration, licensing and public policy," *Research Policy*, vol. 15, pp. 285-305, 1986.
- [19] W. J. Abernathy and K. B. Clark, "Comment établir une carte stratégique des innovations dans un secteur industriel?," *Culture technique*, vol. 18, pp. 40-54, 1988.

- [20] AFNOR, "NF E67-001 : Fabrication additive - Vocabulaire," ed, 2011, p. 4.
- [21] A. F2792-12a, "Standard terminology for Additive Manufacturing Technologies," ed. West Conshohocken, PA,: ASTM International, 2012.
- [22] A. Ambrosi and M. Pumera, "3D-printing technologies for electrochemical applications," *Chemical Society Reviews*, vol. 45, pp. 2740-2755, 2016.
- [23] D. Mann, "Using S-curves and trends of evolution in R&D strategy planning," in *TRIZ Journal* vol. 2015, ed, 1999.
- [24] D. L. Bourell, M. C. Leu, and D. W. Rosen, "Roadmap for Additive Manufacturing - Identifying the Future of Freeform Processing," The University of Texas at Austin 2009.
- [25] J. E. Blather, "Manufacture of contour relief-maps," 1892.
- [26] I. Gibson, D. R. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies 2nd Edition*. New York: Springer US, 2015.
- [27] AFNOR, "NF ISO 17296-2 : Fabrication additive - Principes généraux - Partie 2 : vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières de base ", ed, 2015-06-13, p. 16.
- [28] T. T. Wohlers, "Wohlers Report 2013: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report," Wohlers Associates, Inc 2013.
- [29] G. D'Antonio, F. Segonds, F. Laverne, J. Sauza Bedolla, and P. Chiabert, "A framework for Manufacturing Execution System integration in an advanced Additive Manufacturing process," *International Journal of Product Lifecycle Management*, Under Review.
- [30] R. Bonnard, "Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive," Thèse de doctorat, IRCCyN, UMR CNRS 6597, École Centrale de Nantes, 2010.
- [31] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, *et al.*, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2016.
- [32] F. Laverne, F. Segonds, and P. Dubois, "Fabrication additive - Principes généraux," in *Techniques de l'Ingénieur* vol. BM7017v2, ed. Paris, 2016.
- [33] J. J. Beaman, C. Atwood, T. L. Bergman, D. Bourell, S. Hollister, and D. Rosen, "Additive/subtractive manufacturing research and development in Europe," DTIC Document 2004.
- [34] L. E. Murr, S. M. Gaytan, E. Martinez, F. R. Medina, and R. B. Wicker, "Fabricating Functional Ti-Alloy Biomedical Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting. ," *Journal of Biotechnology and Biomaterial*, vol. 2, 2012.
- [35] M. Yamanouchi, T. Hirai, and I. Shiota, "Overall view of the P/M fabrication of functionally gradient materials. ," in *First International Symposium on Functionally Gradient Materials*, Sendai, Japan, 1990, pp. 59–64.
- [36] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3rd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [37] A. M. Lovatt and H. R. Shercliff, "Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: the role of process selection," *Materials & Design*, vol. 19, pp. 205-215, 1998.

- [38] S. Fox, "Third Wave Do-It-Yourself (DIY): Potential for prosumption, innovation, and entrepreneurship by local populations in regions without industrial manufacturing infrastructure," *Technology in Society*, vol. 39, pp. 18-30, 2014.
- [39] B. Vayre, F. Vignat, and F. Villeneuve, "Designing for Additive Manufacturing," presented at the CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2012.
- [40] M. Ferioli, "Phases amont du processus d'innovation: proposition d'une méthode d'aide à l'évaluation d'idées," Thèse de doctorat, ERPI, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [41] T. Tomiyama, P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, C. Kind, and F. Kimura, "Design methodologies: Industrial and educational applications," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 543-565, 2009.
- [42] H. Yoshikawa, "General design theory and a CAD system," *Man-Machine communication in CAD/CAM*, 1981.
- [43] H. Grabowski, R.-S. Lossack, and E.-F. El-Mejbri, "Towards A Universal Design Theory," in *Integration of Process Knowledge into Design Support Systems: Proceedings of the 1999 CIRP International Design Seminar, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 24-26 March, 1999*, H. Kals and F. Houten, Eds., ed Dordrecht: Springer Netherlands, 1999, pp. 47-56.
- [44] A. Hatchuel and B. Weil, "A new approach of innovative Design: an introduction to CK theory," in *International Conference on Engineering Design - ICED 2003*, Stockholm, 2003.
- [45] G. Taguchi, *System of experimental design; engineering methods to optimize quality and minimize costs*, 1987.
- [46] N. P. Suh, *The Principles of Design*: Oxford University Press, 1990.
- [47] N. Lahonde, "Optimisation du processus de conception: proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision," Thèse de doctorat, LCPI, Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2010.
- [48] D. Wynn and J. Clarkson, "Models of designing," in *Design process improvement*, ed: Springer, 2005, pp. 34-59.
- [49] B. Von Stamm, *Managing innovation, design and creativity*: John Wiley & Sons, 2008.
- [50] S. Finger and J. R. Dixon, "A review of research in mechanical engineering design. Part I: Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes," *Research in Engineering Design*, vol. 1, pp. 51-67.
- [51] N. Cross, *Engineering design methods: strategies for product design*. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 2008.
- [52] K. N. Otto and K. L. Wood, *Product Design - Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*: Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 2003.
- [53] T. J. Howard, S. J. Culley, and E. Dekoninck, "Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature," *Design Studies*, vol. 29, pp. 160-180, 2008.
- [54] S. D. Savransky, *Engineering of creativity: introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving*. New York: CRC Press, 2000.
- [55] M. Le Coq, "Approches méthodologiques en conception de produits.," Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, LCPI, Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2007.
- [56] D. G. Ullman and E. A. Jones, *The Mechanical Design Process*. New York: McGraw - Hill Higher Education, 2003.

- [57] S. Tichkiewitch and A. Riel, "The reasons for Integration in Design," in *EMIRAcle.*, 2010.
- [58] D. Scaravetti, "Formulation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire," Thèse de doctorat Dissertation/Thesis, TREFLE, Arts et Métiers ParisTech, Bordeaux, 2004.
- [59] X. Fischer, G. Fadel, and Y. Ledoux, "Interactive Product Design," in *Research in Interactive Design : Proceedings of Virtual Concept 2010*. vol. 3, X. Fischer and J. P. Nadeau, Eds., ed Paris: Springer, 2011.
- [60] F. Segonds, "Contribution à l'intégration d'un environnement collaboratif en conception amont de produits," Thèse de doctorat, LCPI & LSIS, Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2011.
- [61] P. F. Culverhouse, "Constraining designers and their CAD tools," *Design Studies*, vol. 16, pp. 81-101, 1995.
- [62] P. A. Koen, "The Fuzzy Front End for Incremental, Platform, and Breakthrough Products," in *The PDMA Handbook of New Product Development Second Edition*, U. o. Tennessee, Ed., ed: John Wiley & Sons, 2007, pp. 81-91.
- [63] F. Segonds, G. Cohen, P. Véron, and J. Peyceré, "PLM and early stages collaboration in interactive design, a case study in the glass industry," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 10, p. 10, 2014.
- [64] D. Vinck, "De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière : Vers la prise en compte du travail d'équipement," *Revue d'anthropologie des connaissances*, vol. 3, pp. 51-72, 2009.
- [65] A. Kadri, "Contribution de la réalité virtuelle à l'évaluation de produits, dans les phases amonts du processus de conception," Thèse de doctorat, LAMPA, Université d'Angers, 2007.
- [66] C. Bouchard, R. Camous, and A. Aoussat, "Nature and role of intermediate representations (IR) in the design process: Case studies in car design," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 38, pp. 1-25, 2005.
- [67] S. Mer, S. Tichkiewitch, and C. Jeantet, "Les objets intermédiaires de la conception : modélisation et communication," in *Le communicationnel pour concevoir*, E. productions, Ed., ed Paris: Caelen, J; Zreik, K, 1995, pp. 21-41.
- [68] J.-F. Boujut and E. Blanco, "Intermediary Objects as a Means to Foster Co-operation in Engineering Design," *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, vol. 12, pp. 205-219, 2003.
- [69] C. Mougenot, "Modélisation de la phase d'exploration du processus de conception de produits, pour une créativité augmentée," Thèse de doctorat, LCPI, Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2008.
- [70] E. Pei, I. Campbell, and M. Evans, "A taxonomic classification of visual design representations used by industrial designers and engineering designers," *The Design Journal*, vol. 14, pp. 64-91, 2011.
- [71] C. Bouchard, D. Lim, and A. Aoussat, "Development of a Kansei Engineering System for industrial design," in *Asian Design International Conference*, 2003, pp. 1-12.
- [72] A. Chakrabarti, "Defining and supporting design creativity," in *DESIGN 2006, the 9th International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia, 2006, pp. 479-486.
- [73] T. M. Amabile, "A model of creativity and innovation in organizations," *Research in Organizational Behavior*, vol. 10, pp. 123-167, 1988.
- [74] T. Lubart, C. Mouchiroud, S. Tordjman, and F. Zenasni, *Psychologie de la créativité*. Paris, 2003.

- [75] N. Bonnardel, "Activités de conception et créativité: de l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives," *Le travail humain*, vol. 72, pp. 5-22, 2009.
- [76] Y. Li, J. Wang, X. Li, and W. Zhao, "Design creativity in product innovation," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, pp. 213-222, 2007/06/01 2007.
- [77] M. D. Mumford, M. I. Mobley, R. Reiter-Palmon, C. E. Uhlman, and L. M. Doares, "Process analytic models of creative capacities," *Creativity Research Journal*, vol. 4, pp. 91-122, 1991/01/01 1991.
- [78] C. Zins, "Conceptual approaches for defining data, information, and knowledge," *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 58, pp. 479-493, 2007.
- [79] A. Aamodt and M. Nygård, "Different roles and mutual dependencies of data, information, and knowledge — An AI perspective on their integration," *Data & Knowledge Engineering*, vol. 16, pp. 191-222, 9// 1995.
- [80] A. Skander, L. Roucoules, and J. S. Klein Meyer, "Design and manufacturing interface modelling for manufacturing processes selection and knowledge synthesis in design," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, pp. 443-454, 2008.
- [81] I. Tuomi, "Data is more than knowledge: Implications of the reversed knowledge hierarchy for knowledge management and organizational memory," presented at the Systems Sciences, 1999. HICSS-32. Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on, 1999.
- [82] R. C. Hicks, R. Dattero, and S. D. Galup, "The five-tier knowledge management hierarchy," *Journal of Knowledge Management*, vol. 10, pp. 19-31, 2006.
- [83] A. Braganza, "Rethinking the data-information-knowledge hierarchy: towards a case-based model," *International Journal of Information Management*, vol. 24, pp. 347-356, 2004.
- [84] S. K. Chandrasegaran, K. Ramani, R. D. Sriram, I. Horváth, A. Bernard, R. F. Harik, *et al.*, "The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems," *Computer-Aided Design*, vol. 45, pp. 204-228, 2013.
- [85] I. Nonaka, "A dynamic theory of organizational knowledge creation," *Organization science*, vol. 5, pp. 14-37, 1994.
- [86] Q. Y. Fu, Y. P. Chui, and M. G. Helander, "Knowledge identification and management in product design," *Journal of Knowledge Management*, vol. 10, pp. 50-63, 2006.
- [87] F. Darses, "Editorial," *Le travail humain*, vol. 65, pp. 289-292, 2002.
- [88] L. Alting, "Life-cycle design of products: a new opportunity for manufacturing enterprises," *Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques*, pp. 1-17, 1993.
- [89] O. Broberg, "Integrating ergonomics into the product development process," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 19, pp. 317-327, 1997.
- [90] G. Boothroyd, "Product design for manufacture and assembly," *Computer-Aided Design*, vol. 26, pp. 505-520, 1994.
- [91] R. I. Winner, J. P. Pennell, H. Bertrand, and M. Slusarczuk, "The role of concurrent engineering in weapons system acquisition," DTIC Document1988.
- [92] G. Sohlenius, "Concurrent Engineering," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 41, pp. 645-655, 1992.

- [93] J.-C. Bocquet, "Ingénierie simultanée, conception intégrée " in *Conception de produits mécaniques - Méthodes, modèles et outils*, Hermès, Ed., ed: M. Tollenaere, 1998, pp. 29-52.
- [94] S. Tichkiewitch and M. Véron, "Integration of Manufacturing Processes in Design," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 47, pp. 99-102, 1998.
- [95] P. Lonchamp, "Co évolution de conception intégrée de produits : Modèle et support de l'activité de conception," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004.
- [96] A. Sharma, "Collaborative product innovation: integrating elements of CPI via PLM framework," *Computer-Aided Design*, vol. 37, pp. 1425-1434, 2005.
- [97] G. Q. Huang, *Design for X — Concurrent engineering imperatives*. London: Chapman & Hall, 1996.
- [98] D. P. Fitzgerald, J. W. Herrmann, and L. C. Schmidt, "A Conceptual Design Tool for Resolving Conflicts Between Product Functionality and Environmental Impact," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 132, p. 11, 2010.
- [99] H. MeerKamm and M. Koch, "Design for X," in *Design process improvement: A review of current practice*, ed: Springer, 2005, pp. 306-323.
- [100] T. C. Kuo, S. H. Huang, and H. C. Zhang, "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 41, pp. 241-260, 2001.
- [101] M. Tichem and T. Storm, "Designer support for product structuring - Development of a DFX tool within the design coordination framework," *Computers in Industry*, vol. 33, pp. 155-163, 1997.
- [102] G. Q. Huang and K. L. Mak, "The DFX shell: A generic framework for developing design for X tools," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 13, pp. 271-280, 1997.
- [103] L. Langeveld, "Design with X is new in product design education," in *International Design Conference - DESIGN 2006*, Dubrovnik, Croatia, 2006.
- [104] M. A. Kaulio, "Customer, consumer and user involvement in product development: A framework and a review of selected methods," *Total Quality Management*, vol. 9, pp. 141-149, 1998/02/01 1998.
- [105] J. Barre, "Vers de nouveaux outils pour l'anticipation des besoins utilisateurs: apports méthodologiques pour l'ergonomie prospective," Thèse de doctorat LCPI Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2015.
- [106] P. Serrafero, S. Gomes, D. Bonnivard, and L. Jézéquel, "De la mémoire projet à la compétence métier: vers la synthèse de connaissances métier en ingénierie robuste des produits/process," presented at the International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Grenoble, 2006.
- [107] M. Grundstein, "De la capitalisation des connaissances au renforcement des compétences dans l'entreprise étendue," presented at the er colloque du Groupe de travail "Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel", Nantes, 2002.
- [108] C. Chyi Lee and J. Yang, "Knowledge value chain," *Journal of management development*, vol. 19, pp. 783-794, 2000.
- [109] J. Michel, "Le knowledge management, entre effet de mode et (ré) invention de la roue," *Documentaliste-Sciences de l'information*, vol. 38, pp. 176-186, 2001.
- [110] I. Rasovska, "Knowledge capitalization method building on case-based reasoning : Application on diagnosis within e-maintenance platform," Université de Franche-Comté, 2006.

- [111] J. Kraaijenbrink and F. Wijnhoven, "External Knowledge Integration," in *Encyclopedia of Knowledge Management, Second Edition*, D. Schwartz and D. Te'eni, Eds., ed Hershey, PA, USA: IGI Global, 2011, pp. 308-319.
- [112] R. Van der Spek and A. Spijkervet, "Knowledge management: dealing intelligently with knowledge," in *Knowledge management and its integrative elements*, ed: CRC Press, 1997, pp. 31-59.
- [113] H. Lai and T.-h. Chu, "Knowledge management: A review of theoretical frameworks and industrial cases," in *33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.
- [114] J. Xu, R. Houssin, E. Caillaud, and M. Gardoni, "Macro process of knowledge management for continuous innovation," *Journal of Knowledge Management*, vol. 14, pp. 573-591, 2010.
- [115] J. Kraaijenbrink and F. Wijnhoven, "External Knowledge Integration," in *Knowledge Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. vol. 5, ed: Schwartz, David, 2008, pp. 264-273.
- [116] R. Maier and T. Hadrich, "Knowledge Management Systems," in *Encyclopedia of Knowledge Management, Second Edition*, D. Schwartz and D. Te'eni, Eds., ed Hershey, PA, USA: IGI Global, 2011, pp. 779-790.
- [117] J. Xu, R. Houssin, A. Bernard, and E. Caillaud, "Systemic modeling of knowledge for innovation in design," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 6, pp. 1-12, 2013.
- [118] A. Napoli, "Formalisation et gestion des connaissances dans la modélisation du comportement des incendies de forêt," Université de Nice-Sophia Antipolis, 2010.
- [119] D. W. Rosen, "Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 4, pp. 585-594, 2007.
- [120] L. Toussaint, F. Demoly, N. Lebaal, and S. Gomes, "PLM-based Approach for Design Verification and Validation using Manufacturing Process Knowledge," *Journal of Systemics, Cybernetics & Informatics*, vol. 8, 2010.
- [121] H. S. Byun and K. H. Lee, "A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26, pp. 1338-1347, 2005.
- [122] K. Lokesh and P. K. Jain, "Selection of rapid prototyping technology," *Advances in Production Engineering and Management*, vol. 5, pp. 74-134, 2010.
- [123] C. B. Williams, F. Mistree, and D. W. Rosen, "Towards the Design of a layer-based additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructure," in *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2005, pp. 217-230.
- [124] P. Alexander, S. Allen, and D. Dutta, "Part orientation and build cost determination in layered manufacturing," *Computer-Aided Design*, vol. 30, pp. 343-356, 1998.
- [125] M. Ruffo and R. Hague, "Cost estimation for rapid manufacturing - simultaneous production of mixed components using laser sintering," *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, pp. 1585-1591, 2007.
- [126] N. Hopkinson and P. M. Dickens, "Rapid prototyping for direct manufacture," *Rapid prototyping journal*, vol. 7, pp. 197-202, 2001.
- [127] E. Atzeni and A. Salmi, "Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, pp. 1147-1155, 2012.

- [128] S. Yim and D. Rosen, "Build Time and Cost Models for Additive Manufacturing Process Selection," in *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, 2012, pp. 375-382.
- [129] F. Laverne, F. Segonds, N. Anwer, and M. Le Coq, "Conception pour la fabrication additive: un état de l'art," presented at the AIP PRIMECA'15, La Plagne, France, 2015.
- [130] R. Hague, I. Campbell, and P. Dickens, "Implications on design of rapid manufacturing," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 217, pp. 25-30, 2003.
- [131] Z. Doubrovski, J. C. Verlinden, and J. M. Geraedts, "Optimal design for additive manufacturing : opportunities and challenges," in *ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2011, pp. 635-646.
- [132] G. Reinhart and S. Teufelhart, "Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures," *Physics Procedia*, vol. 12, Part A, pp. 385-392, 2011.
- [133] C. Emmelmann, P. Sander, J. Kranz, and E. Wycisk, "Laser Additive Manufacturing and Bionics: Redefining Lightweight Design," *Physics Procedia*, vol. 12, Part A, pp. 364-368, 2011.
- [134] N. P. Fey, B. J. South, C. C. Seepersad, and R. R. Neptune, "Topology Optimization and Freeform Fabrication Framework for Developing Prosthetic Feet," in *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2009, pp. 607-619.
- [135] H. Rodrigue and M. Rivette, "An assembly-level design for additive manufacturing methodology," presented at the IDMME - Virtual Concept 2010, Bordeaux, 2010.
- [136] N. Boyard, M. Rivette, O. Christmann, and S. Richir, "A design methodology for parts using Additive Manufacturing," presented at the International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 2013.
- [137] J. Choi and Y. Chang, "Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, pp. 597-607, 2005.
- [138] M. Alimardani, E. Toyserkani, and J. P. Huissoon, "A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45, pp. 1115-1130, Dec 2007.
- [139] H. K. Rafi, T. L. Starr, and B. E. Stucker, "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.," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* vol. 69, pp. 1299 – 1309, 2013.
- [140] S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, pp. 248-257, 2002.
- [141] P. Muller, P. Mognol, and J.-Y. Hascoet, "Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 685-692, 2013.
- [142] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, and K. E. Evans, "A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 66, pp. 1247-1254, 2013.
- [143] N. Anwer, A. Ballu, and L. Mathieu, "The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 62, pp. 143-146, 2013.

- [144] F. Laverne, F. Segonds, N. Anwer, and M. Le Coq, "Assembly-based methods to support product innovation in Design for Additive Manufacturing: An exploratory case study," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 137, pp. 121701-121701-8, 2015.
- [145] ISO, "Systèmes de management de la qualité : Principes essentiels et vocabulaire " vol. NF EN ISO 9000, ed. Paris: AFNOR, 2009.
- [146] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, and J.-Y. Hascoet, "A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, pp. 389-398, 2014.
- [147] C. Chu, G. Graf, and D. W. Rosen, "Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 5, pp. 686-696, 2008.
- [148] U. Maheshwaraa, C. Seepersad, and D. L. Bourell, "Design and Freeform Fabrication of Deployable Structures with Lattice Skins," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, pp. 213-225, 2007.
- [149] M. Vitse, F. Laverne, F. Segonds, S. Ratgras, L. Pellat Finet, and G. Yantio, "Fabrication additive : Integration du DFAM pour la conception petites et moyennes séries dans le domaine aérospatial," presented at the CONFERE'14, Sibenik, Croatia, 2014.
- [150] G. D'Antonio, "Manufacturing Execution Systems for lean, adaptive production processes," Thèse de doctorat, DIGEP, Politecnico di Torino, Torino, 2016.
- [151] L. A. Currell, R. H. Forrester, J. F. Dawson, and M. A. West, "It's what you do and the way that you do it: Team task, team size, and innovation-related group processes," *European Journal of Work and Organizational Psychology*, vol. 10, pp. 187-204, 2001.
- [152] R. L. Moreland, J. M. Levine, and M. L. Wingert, "Creating the ideal group: Composition effects at work," in *Understanding group behavior*. vol. 2, E. Witte and J. H. Davis, Eds., ed, 1996, pp. 11-35.
- [153] A. F. Osborn, *Applied imagination: principles and procedures of creative problem solving*. New York: Charles Scribener's Sons, 1957.
- [154] G. H. Kent and A. J. Rosanoff, "A study of association in insanity," *American Journal of Psychiatry*, vol. 67, pp. 317-390, 1910.
- [155] N. Bonnardel and C. Bouchard, "Design, ergonomics and user interfaces: complementary and interdisciplinary studies to enhance creative activities," in *Ergonomie et Informatique Avancée Conference*, Bidart-Biarritz, France, 2014, pp. 2-10.
- [156] D. Schon, "Designing as reflective conversation with the materials of a design situation," *Research in Engineering Design*, vol. 3, pp. 131-147, 1992.
- [157] G. Borst, A. Dubois, and T. I. Lubart, "Structures et mécanismes cérébraux sous tendant la créativité : une revue de la littérature," *Approche Neuropsychologique des Apprentissages de l'Enfant*, vol. 18, pp. 96-113, 2006.
- [158] S. Bin Maidin, I. Campbell, and E. Pei, "Development of a design feature database to support design for additive manufacturing," *Assembly Automation*, vol. 32, pp. 235 - 244, 2012.
- [159] M. N. Saunders, C. C. Seepersad, and K. Hölttä-Otto, "The characteristics of innovative, mechanical products," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 133, p. 9, 2011.
- [160] H. Laroche and J.-P. Nioche, "L'approche cognitive de la stratégie d'entreprise," *Revue française de gestion*, vol. 160, pp. 81-105, 2006.

- [161] R. Owen and I. Horváth, "Towards product-related knowledge asset warehousing in enterprises," in *Proceedings of the 4th international symposium on tools and methods of competitive engineering, TMCE*, 2002, pp. 155-70.
- [162] C. Mougnot, K. Watanabe, C. Bouchard, and A. Aoussat, "Visual materials and designers' cognitive activity: Towards in-depth investigations of design cognition," presented at the International Association of Societies of Design Research, Seoul, 2009.
- [163] A. Grimand, "Quand le knowledge management redécouvre l'acteur : la dynamique d'appropriation des connaissances en organisation," *Management & Avenir*, vol. 3, pp. 141-157, 2006.

9 Index des figures

Figure 1 Relation entre connaissances et capacité d'innovation adapté d'Amidon [15]	11
Figure 2 Principe de la FA et effet d'escalier	12
Figure 3 Différence entre fabrication traditionnelle (ici usinage) et FA issu de [22]	13
Figure 4 Place de la FA dans le cycle en S.....	13
Figure 5 Principes de la photosculpture et de la topographie	14
Figure 6 Echelle de temps des usages industriels de la fabrication traditionnelle et de la FA [29].	14
Figure 7 Chaîne numérique associée à la FA	15
Figure 8 Les différentes usages de la FA issu de [32]	16
Figure 9 Impact du processus choisi sur les temps et étapes de développement et fabrication d'une pièce fonctionnelle issu de [32]	17
Figure 10 Exemples de structures complexes réalisables en FA selon Murr, et al. [34]	18
Figure 11 Illustration de la complexité matériau permise par la FA	18
Figure 12 Position des familles de DTM selon les critères de Tomiyama [41].....	30
Figure 13 Analyse comparative de différents modèles de processus de conception [53].....	32
Figure 14 Processus de conception de Pahl and Beitz [6] (représentation détaillée).....	33
Figure 15 Processus de conception de Pahl and Beitz [6] (représentation simplifiée)	33
Figure 16 Illustration du paradoxe de conception, adapté de [56] et [57]	34
Figure 17 Place des phases amont dans le modèle de Pahl and Beitz [6].....	35
Figure 18 Impact des phases amont sur la typologie d'innovation extrait de [63]	35
Figure 19 Classification et fonction des RI dans le processus traditionnel selon Bouchard, et al. [66]	36
Figure 20 Typologies des informations véhiculées par une RI selon Pei, et al. [70].....	37
Figure 21 Exemple de fiche concept (produite au cours de l'expérimentation 1)	38
Figure 22 Place des RI clés des phases amonts du processus de conception de Pahl and Beitz [6]	38
Figure 23 Cycle d'activités divergentes et convergentes adapté de [71].....	39
Figure 24 Modèles hiérarchiques de la connaissance	43
Figure 25 Modes de création des connaissances selon Nonaka [85]	45
Figure 26 Typologies de connaissances selon Fu, et al. [86].....	46
Figure 27 Limites de l'ingénierie séquentielle	47
Figure 28 Principe de l'ingénierie concourante selon Lonchamp [95].....	48
Figure 29 Différence entre coordination, coopération et collaboration	49
Figure 30 Champ d'action du DFX	51
Figure 31 Champ d'action du DWX.....	52
Figure 32 Activités du KM extrait de Rasovska [110]	54
Figure 33 Modèle de KM par phases de Kraaijenbrink and Wijnhoven [115].....	55
Figure 34 Ordre d'utilisation envisagé d'utilisation des approches DWX et DFX dans le processus de conception	58
Figure 35 Classification des approches développées dans la stratégie DFAM.....	59
Figure 36 Place des DFAM Contrainte et Opportunité dans la stratégie DFAM	61
Figure 37 Espaces solution considérés dans les DFAM opportunité et contrainte	63
Figure 38 Place des DFAM Globales	66
Figure 39 Répartition des DFAM globales suivant le niveau systémique du produit [144].....	67
Figure 40 C-DFAM proposée par Ponche, et al. [146].....	68
Figure 41 C-DFAM proposée par Vayre, et al. [39].....	68
Figure 42 Démarche C-DFAM selon Rosen [119].....	69

Figure 43 Workflow des DFAM Composant (extrait de Laverne, et al. [144])	69
Figure 44 Méthodologie A-DFAM proposée par Rodrigue and Rivette [135]	70
Figure 45 Méthodologie A-DFAM proposée par Boyard, et al. [136].....	71
Figure 46 Workflow des DFAM Assemblage (extrait de Laverne, et al. [144]).....	71
Figure 47 Approche DWX et DFX et signification du X dans les méthodologies C-DFAM	72
Figure 48 Approche DWX et DFX et signification du X dans les méthodologies A-DFAM.....	72
Figure 49 Place du DWAM et DFAM dans une démarche de conception innovante	75
Figure 50 Hypothèse de résolution n°1	79
Figure 51 Hypothèse de résolution n°2	79
Figure 52 Démarche mise en place pour répondre à la question de recherche et place des hypothèses	80
Figure 53 Périmètre de la thèse dans les phases amont du modèle de Pahl and Beitz	81
Figure 54 Place des approches DWAM et DFX sur le modèle de Pahl and Beitz	81
Figure 55 Modèle initial proposé	82
Figure 56 Démarche proposée et place des expérimentations.....	83
Figure 57 Place de l'expérimentation 1 et résultat attendu	84
Figure 58 Place de la zone d'intérêt de l'expérimentation 1 dans le modèle	84
Figure 59 Robot DARwIn.....	85
Figure 60 Protocole expérimental de l'expérimentation 1	85
Figure 61 Exemple de fiches techniques fournies au groupe 2	86
Figure 62 Trame d'évaluation des FC	90
Figure 63 Total et unicité des idées et familles d'idées obtenues à l'issue du brainstorming	90
Figure 64 Répartition des catégories d'idées proposées par les groupes.....	91
Figure 65 Note moyenne et erreur type des FC originales avec ou sans KFA (gauche) et selon le type de KFA (droite)	92
Figure 66 Illustration de la différence de complexité dans les concepts	93
Figure 67 Note moyenne et erreur type des FC fabricables avec ou sans KFA (gauche) et selon le type de KFA (droite)	94
Figure 68 Place des expérimentations 2A à 2C dans la démarche globale	96
Figure 69 Place des expérimentations 2A à 2C dans la phase de capitalisation des connaissances	96
Figure 70 Place de l'expérimentation 2A et résultat attendu.....	97
Figure 71 Protocole expérimental de l'expérimentation 2A	98
Figure 72 Réalisation des cartographies à l'issue des entretiens.....	99
Figure 73 Cartographie des RI issu de l'entretien avec le participant 1	102
Figure 74 Cartographie des critères de sélection de l'entretien avec le participant 1	102
Figure 75 Preuve de concept illustrant l'amortissement par gel (projet 13).....	105
Figure 76 Démarche d'analyse du questionnaire	107
Figure 77 Utilité perçue des KFA en conception amont	107
Figure 78 Utilité des KFA dans le développement des familles de caractéristiques innovantes.....	108
Figure 79 Utilité des KFA suivant le type de caractéristiques innovantes	110
Figure 80 Place de l'expérimentation 2B et résultat attendu.....	112
Figure 81 Moyenne et erreur type de l'appréciation des supports de connaissance.....	113
Figure 82 Moyenne et erreur type de l'appréciation des supports selon le profil des concepteurs	114
Figure 83 Place de l'expérimentation 2C et résultats attendus.....	116
Figure 84 Objectif de l'expérimentation 2C : Valorisation des KFA par une instanciation adaptée	116
Figure 85 1 ^{ère} occurrence d'utilisation des KFA	118
Figure 86 Répartition de l'utilisation des catégories de KFA entre activités divergentes et convergentes. ...	119
Figure 87 Répartition de l'utilisation des catégories de KFA dans les phases du modèle.	120

Figure 88 Place de la phase de formalisation et de test dans la démarche.....	122
Figure 89 Modèle de conception enrichi	123
Figure 90 Organisation de l'interface de l'outil	126
Figure 91 Capture d'écran des affichages pour le scénario 1	127
Figure 92 Capture d'écran des affichages pour le scénario 2	128
Figure 93 Protocole de l'expérimentation 3	129
Figure 94 Nuages de mots extraits du questionnaire	133
Figure 95 Moyenne et erreur type des évaluations pour les apports JB1 et JB2	135
Figure 96 Moyenne et erreur type des évaluations pour les apports JB3 et JB4	135
Figure 97 Concept utilisant des connaissances FA issues de l'apport de connaissances.....	137
Figure 98 Nouveau modèle de conception enrichi proposé après les tests utilisateurs.....	139
Figure 99 Rappel des hypothèses et expérimentations dans la démarche suivie	140

10 Index des tableaux

Tableau 1 Synthèses des informations relatives aux entreprises étudiées	21
Tableau 2 Exemple d'activités pouvant nécessiter de l'expertise FA et place dans le processus.....	22
Tableau 3 Démarche des DFAM dédiées à la recherche d'une géométrie optimisée pour la FA :.....	62
Tableau 4 Comparaison des géométries obtenues avec et sans utilisation du DFAM:.....	62
Tableau 5 Exemple d'utilisation des expertises FA dans les méthodologies DFAM	65
Tableau 6 Caractéristiques des groupes.....	87
Tableau 7 Profil des participants	87
Tableau 8 Profil des juges	89
Tableau 9 Résultats de l'analyse quantitative des idées.	90
Tableau 10 Résultats de l'analyse quantitative des catégories d'idées.	91
Tableau 11 Résultats de l'évaluation qualitative et quantitative des FC	92
Tableau 12 Caractéristiques des participants.....	98
Tableau 13 Caractéristiques des produits innovants selon [159].....	100
Tableau 14 Caractéristiques des études de cas présentées.....	101
Tableau 15 Récapitulatif des valeurs du test de Kruskal Wallis pour chaque variable.	108
Tableau 16 Récapitulatif des valeurs du test de Kruskal Wallis pour chaque variable.	109
Tableau 17 Propositions d'exemples industriels permettant d'illustrer les KFA sur la complexité	115
Tableau 18 Familles et libellés des KFA testées	118
Tableau 19 Caractéristiques (contenu, support, instanciation) des apports de connaissances au juste besoin	123
Tableau 20 Menus de l'outil.....	125
Tableau 21 Profils des chefs de projet.....	131
Tableau 22 Moyenne et écart type des réponses fournies par les chefs de projet et le groupe	133
Tableau 23 Récapitulatif des valeurs du test de Kruskal Wallis pour la variable « spécialité ».....	134
Tableau 24 Modifications à effectuer sur le prototype et le modèle.....	138
Tableau 25 Synthèse des expérimentations et des hypothèses validées	140

11 Annexes

11.1 Annexe 1 : Questionnaire expérimentation 1

Genre : Homme <input type="checkbox"/> Femme <input type="checkbox"/>								Age :																																					
Ma performance :																																													
<table border="0"> <tr> <td></td> <td colspan="7" style="text-align: center;">Pas du tout d'accord</td> <td colspan="7" style="text-align: center;">Tout à fait d'accord</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">7</td> </tr> </table>																	Pas du tout d'accord							Tout à fait d'accord								1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
	Pas du tout d'accord							Tout à fait d'accord																																					
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7																															
J'ai proposé beaucoup d'idées lors de cette séance																																													
J'ai proposé des idées de qualité																																													
J'ai beaucoup collaboré / communiqué avec les autres																																													
J'étais motivé à bien faire																																													
Les résultats sont importants pour moi																																													
J'ai essayé de faire de mon mieux																																													
J'aimerais connaître ma performance																																													
J'aimerais connaître la performance des autres																																													
Mon avis :																																													
<table border="0"> <tr> <td></td> <td colspan="7" style="text-align: center;">Pas du tout d'accord</td> <td colspan="7" style="text-align: center;">Tout à fait d'accord</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">7</td> </tr> </table>																	Pas du tout d'accord							Tout à fait d'accord								1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
	Pas du tout d'accord							Tout à fait d'accord																																					
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7																															
Cette séance de créativité était agréable																																													
Cette séance était amusante																																													
Cette séance était efficace																																													
C'était facile de trouver des idées																																													
Suggestions d'amélioration :																																													
...																																													
...																																													
...																																													

11.2 Annexe 2 : Questionnaire expérimentation 2A

Q1– Pensez-vous que vos connaissances en FA vous apportent aujourd’hui de nouvelles opportunités de conception ? OUI NON

Q2– Pensez-vous que vos connaissances en FA vous apportent aujourd’hui de nouvelles contraintes de conception ? OUI NON

Pour les projets que vous traitez habituellement, pouvez-vous identifier dans la liste des caractéristiques des produits innovants ci-dessous celles qui, selon vous, sont directement impactées par vos connaissances en FA (cochez les cases vous correspondant) :

Q3– Ajout de fonction -----

Q4– Modification / Adaptation des fonctions -----

Q5– Modification des dimensions -----

Q6– Modification de l'agencement des composants -----

Q7– Elargissement de l'environnement d'utilisation -----

Q8– Modification de la disposition de la matière -----

Q9– Modification du flux d'énergie -----

Q10– Modification du flux d'information -----

Q11– Amélioration de l'ergonomie (produit plus aisé à manipuler) -----

Q12– Amélioration sensorielle (produit plus agréable à utiliser) -----

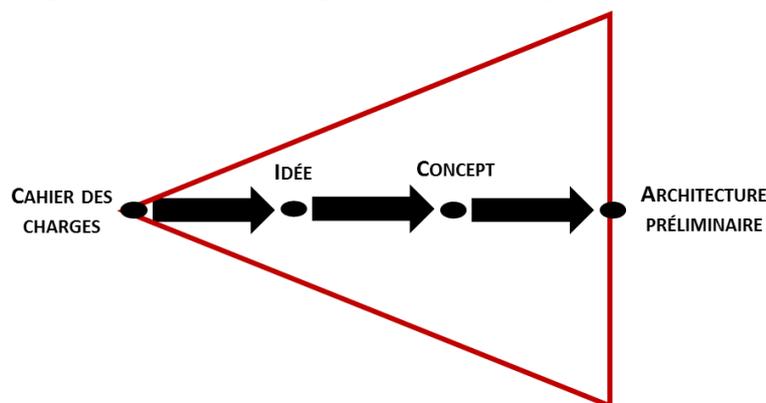
Q13– Amélioration cognitive (produit plus facile à comprendre) -----

Q14– Modification du coût d'achat -----

Q15– Modification du coût de fonctionnement ou de maintenance -----

11.3 Annexe 3 : Questionnaire expérimentation 2C

Nous venons de vous présenter le modèle de processus de conception amont suivant :



Pouvez-vous identifier, parmi les activités de conception réalisées lors de 3 étapes du modèle et listées ci-dessous, celles pour lesquelles les connaissances FA qui vous ont été présentées vous semblent nécessaires.

Cochez les cases correspondantes.

Plusieurs réponses sont possibles

	Complexité en FA					
	Recherche d'idées	Sélection des idées	Recherche de concepts	Choix des concepts	Recherche d'architecture	Etape ultérieure
Création de structures complexes réglées (treillis, cellules) ou aléatoires, à différentes échelles	<input type="checkbox"/>					
Création de géométries complexes : formes imbriquées, creuses, internes, ...	<input type="checkbox"/>					
Création de matériaux complexes : multi matériau, multi couleur, ...	<input type="checkbox"/>					
Augmentation de la fonctionnalité (insertion de composants, texturation locale de la surface, ...)	<input type="checkbox"/>					
	Valeur ajoutée					
	Recherche d'idées	Sélection des idées	Recherche de concepts	Choix des concepts	Recherche d'architecture	Etape ultérieure
VA conception : allègement, sur mesure, personnalisation,	<input type="checkbox"/>					
VA fabrication : pas d'outillage spécifique, petites séries, délais courts, instant assembly, ...	<input type="checkbox"/>					
VA cycle de vie : fabrication à la demande, 0 stock	<input type="checkbox"/>					

Matériaux

	Recherche d'idées	Sélection des idées	Recherche de concepts	Choix des concepts	Recherche d'architecture	Etape ultérieure
Disponibilité (famille matériau, nuance matière, état initial, ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Précautions d'utilisation (préchauffage, oxydation, vieillissement, ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				

Caractéristiques des produits et machines

	Recherche d'idées	Sélection des idées	Recherche de concepts	Choix des concepts	Recherche d'architecture	Etape ultérieure
Qualification (type d'application, secteur, ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Caractéristiques dimensionnelles (dimensions plateau, dimension chambre, notion de découpe, ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Caractéristiques géométriques (rugosité, effet escalier, ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Seuil de rentabilité selon taille série, complexité, ...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
Type de machine (classification, gamme, usage, ...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				

11.4 Annexe 4 : Questionnaire expérimentation 3

1. De façon générale, quel a été votre ressenti en tant que chef de projet vis-à-vis des connaissances qui vous ont été fournies ?

2. Le ressenti de votre équipe projet vis-à-vis de cet apport de connaissance a-t-il été identique ?

3. Comment évaluez-vous l'affirmation suivante : « Les connaissances qui vous ont été fournies étaient compréhensibles facilement »

- | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1. Pas du tout d'accord | 2. Pas tellement d'accord | 3. Moyennement d'accord | 4. Plutôt d'accord | 5. Tout à fait d'accord |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Si « Moyennement » à « Pas du tout » : **Pourquoi ? Qu'est-ce qui vous a gêné ?**

4. Comment évaluez-vous l'affirmation suivante : « Les connaissances qui vous ont été fournies étaient compréhensibles facilement par l'ensemble des membres du groupe »

- | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1. Pas du tout d'accord | 2. Pas tellement d'accord | 3. Moyennement d'accord | 4. Plutôt d'accord | 5. Tout à fait d'accord |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Si « Moyennement » à « Pas du tout » : **Pourquoi ? Les personnes appartenaient elles à la même spécialité ?**

5. Comment jugez-vous la complétude des connaissances ?

- | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1. Pas du tout d'accord | 2. Pas tellement d'accord | 3. Moyennement d'accord | 4. Plutôt d'accord | 5. Tout à fait d'accord |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Si « Moyennement » à « Pas du tout » : **Pourquoi ? Que manquait-il selon vous ? Où avez-vous trouvé ce complément ?**

6. Au vu des activités que vous étiez en train de réaliser, pensez-vous que le moment était adapté pour vous apporter ces connaissances ?

- | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1. Pas du tout d'accord | 2. Pas tellement d'accord | 3. Moyennement d'accord | 4. Plutôt d'accord | 5. Tout à fait d'accord |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Si « Moyennement » à « Pas du tout » : **Pourquoi ? A quel moment auriez-vous préféré qu'elle vous soit donnée ?**

7. Les connaissances fournies vous ont-elles été utiles ?

- | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1. Pas du tout
d'accord | 2. Pas tellement
d'accord | 3. Moyennement
d'accord | 4. Plutôt d'accord | 5. Tout à fait
d'accord |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Si « Tout à fait » ou « Plutôt » : **Pour quoi faire ?**

Si « Moyennement » à « Pas du tout » : **Pourquoi ?**

8. Pensez-vous que la représentation utilisée pour vous fournir les connaissances était adaptée ?

- | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1. Pas du tout
d'accord | 2. Pas tellement
d'accord | 3. Moyennement
d'accord | 4. Plutôt d'accord | 5. Tout à fait
d'accord |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Si « Tout à fait » ou « Plutôt » : **Pourriez-vous expliquer s'il vous plait ?**

Si « Moyennement » à « Pas du tout » : **En quoi était-elle inadaptée ? Qu'auriez-vous préféré ?**

9. La représentation des connaissances vous a-t-elle permis d'appréhender rapidement leur contenu ?

- | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1. Pas du tout
d'accord | 2. Pas tellement
d'accord | 3. Moyennement
d'accord | 4. Plutôt d'accord | 5. Tout à fait
d'accord |
| <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Souhaitez-vous vous exprimer sur d'autres points ?

CONCEVOIR AVEC LA FABRICATION ADDITIVE : PROPOSITION D'INTEGRATION AMONT DE CONNAISSANCES RELATIVES A UNE INNOVATION TECHNOLOGIQUE

RESUME : La Fabrication Additive (FA) vient aujourd'hui bouleverser des habitudes de conception bien ancrées, et suscite dans le même temps un intérêt grandissant pour les perspectives qu'elle offre pour l'innovation produit. Pourtant, alors que les enjeux liés à l'innovation sont prépondérants en conception amont, peu de concepteurs connaissent et utilisent le potentiel des connaissances FA pour développer puis sélectionner des solutions créatives. Dans ce contexte, notre recherche a pour objectif d'augmenter la capacité d'innovation des concepteurs en intégrant des connaissances FA lors de la conception amont.

Pour cela nous proposons d'intégrer des connaissances FA explicites dites « au juste besoin », c'est-à-dire dont le contenu, l'instanciation et le support sont adaptés aux besoins des équipes de conception. De plus, nous proposons que cette intégration s'effectue dans un modèle de conception permettant l'approche Design With Additive Manufacturing (DWAM).

Nos apports sont la proposition : d'une démarche, basée sur le Knowledge Management, permettant de repérer, capitaliser puis valoriser les connaissances FA au juste besoin ; mais également d'un modèle de conception amont en 3 étapes dans lequel les connaissances FA utiles à l'approche DWAM sont spécifiées. Enfin, ce modèle enrichi est valorisé dans un outil numérique support afin de faciliter le travail collaboratif et concourant.

Mots clés : Fabrication Additive, Design With Additive Manufacturing (DWAM), innovation, conception amont, connaissances.

DESIGN WITH ADDITIVE MANUFACTURING: PROPOSAL FOR INTEGRATING KNOWLEDGE ON TECHNICAL INNOVATION INTO EARLY DESIGN STAGES

ABSTRACT: The onset of Additive Manufacturing (AM) upsets design practices and is receiving attention because its potential is promising for product innovation. However, while innovation issues are paramount during early design stages, few designers have sufficient knowledge about AM and use it poorly to develop creative solutions. Thus, our research objective is the increase of the innovation capacity of the design team through the integration of AM knowledge into early design. To do this, we propose to use “just needed” AM knowledge, i.e., AM knowledge whose contents, supports and instancing are tailored to the design team needs. Moreover, we propose that this integration takes place in a design model that allows the Design With Additive Manufacturing (DWAM) approach.

Our contributions are both the proposal of a methodology based on Knowledge Management dedicated to the identification, the capitalization and the valorization of the “just needed” AM knowledge; and of a design model in 3 stages, in which the useful for DWAM approach AM knowledge is specified. Finally, this enriched model is valued in a digital tool in order to improve collaborative and concurrent design.

Keywords : Additive Manufacturing (AM), Design With Additive Manufacturing (DWAM), innovation, early design stages, knowledge