

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 Twizzy 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.

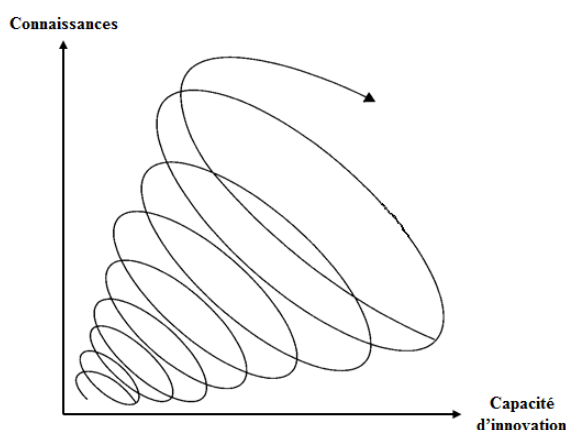


Figure 1 Relation entre connaissances et capacité d'innovation adapté d'Amidon [15]

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.

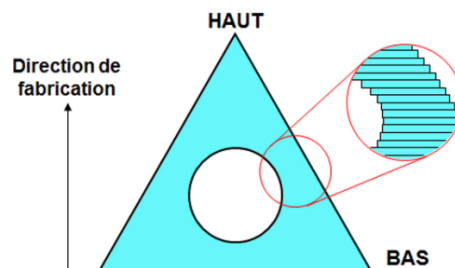


Figure 2 Principe de la FA et effet d'escalier

La FA consiste donc à réaliser un produit grâce à un empilement successif de strates selon un processus génératif constitué de deux étapes répétées 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.

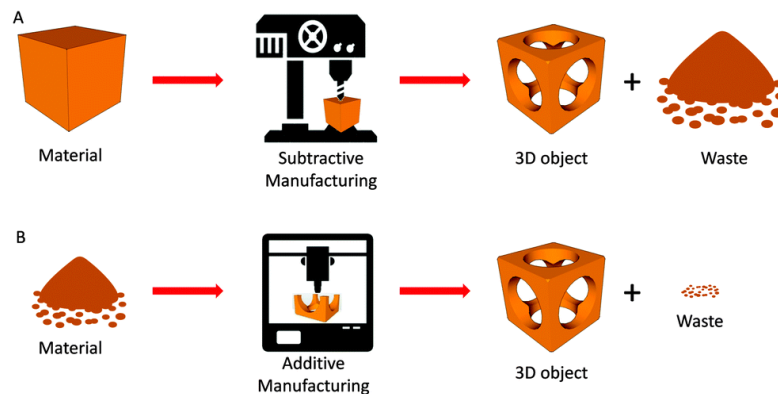


Figure 3 Différence entre fabrication traditionnelle (ici usinage) et FA issu de [22]

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.

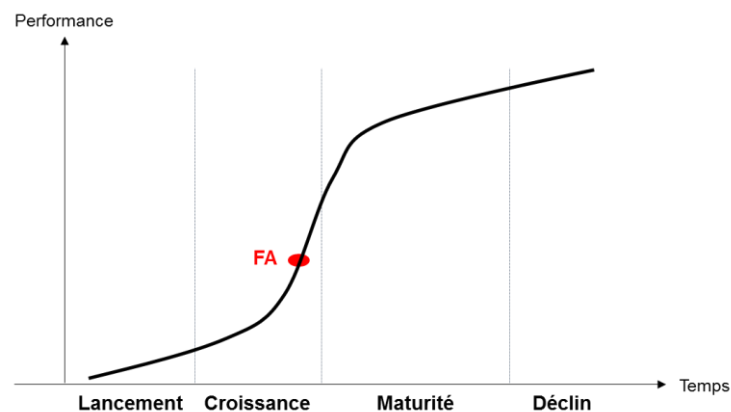


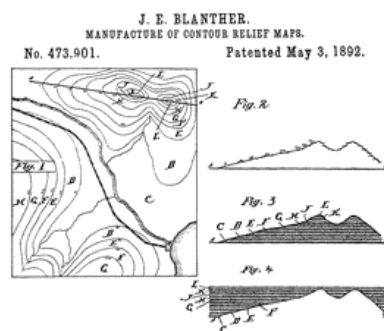
Figure 4 Place de la FA dans le cycle en S

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].

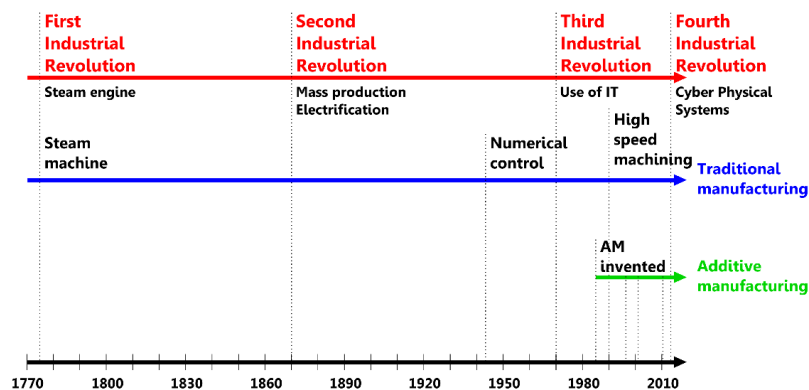


Figure 6 Echelle de temps des usages industriels de la fabrication traditionnelle et de la FA [29].

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, ...

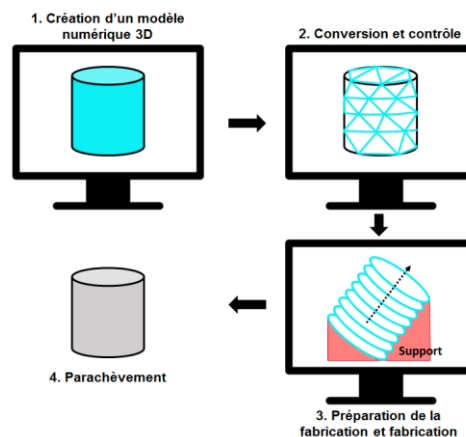


Figure 7 Chaîne numérique associée à la FA

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).

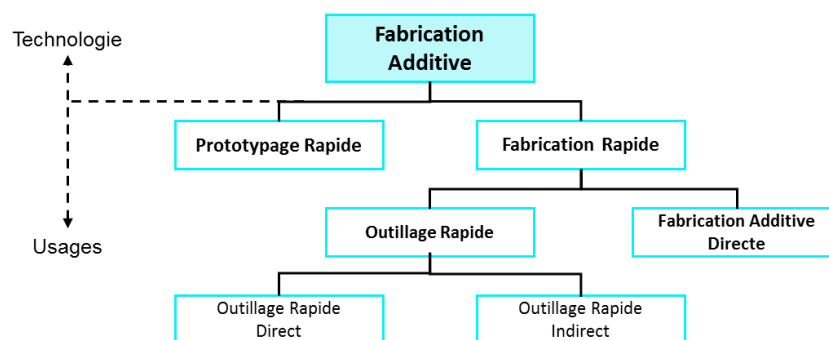


Figure 8 Les différents usages de la FA issu de [32]

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).

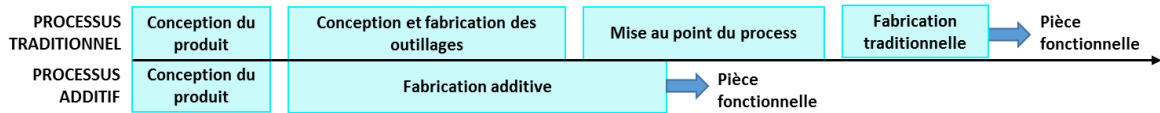


Figure 9 Impact du processus choisi sur les temps et étapes de développement et fabrication d'une pièce fonctionnelle issu de [32]

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.

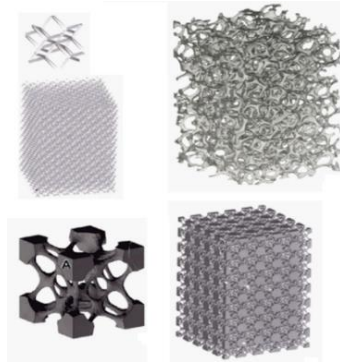


Figure 10 Exemples de structures complexes réalisables en FA selon Murr, et al. [34]

- *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.

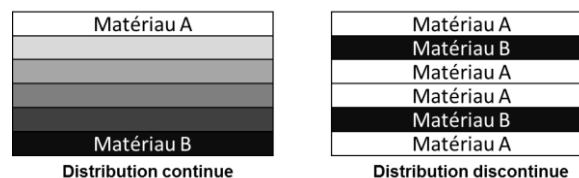


Figure 11 Illustration de la complexité matériau permise par la FA

- *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 inexplorées. 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.

