

Louvain School of Management

Analyse des opportunités de l'impression 3D dans l'industrie automobile

Mémoire recherche réalisé par
Martin Mirabel

en vue de l'obtention du titre de
Master en ingénieur de gestion, à finalité spécialisée

Promoteur
Bernard Paque

Année académique 2016-2017

Je remercie tout d'abord mon promoteur, Mr. Bernard Paque, pour m'avoir encadré et guidé à travers la rédaction de ce mémoire.

Je remercie également ma famille et mes proches pour m'avoir soutenu tout au long de mon parcours académique.

Merci.

Résumé

Pour survivre dans l'environnement de l'industrie automobile, les entreprises doivent se concentrer sur des capacités spécifiques pouvant conduire à un plus grand avantage compétitif. L'impression 3D se présente comme une solution en cassant les compromis de performance, et en redessinant les contours d'une nouvelle stratégie de deux façons.

Premièrement, l'impression 3D est une source d'innovation de produit. Cette technologie peut produire des composants avec moins de restrictions, à l'inverse des procédés traditionnels qui se voient limités par des contraintes techniques. Cette flexibilité de production est utile lors de la fabrication de biens complexes. Il est dès lors possible de constituer des pièces plus légères, mais aussi plus résistantes. *L'Additive Manufacturing* (AM) permet également de produire des pièces avec des fonctionnalités qui n'étaient pas réalisables auparavant. De plus, les technologies se développent progressivement autour de l'impression multi-matériaux. Ces capacités de contrôler la forme et la composition d'un objet permettent d'en augmenter les fonctionnalités et d'en optimiser la performance. Les processus d'AM jouent un rôle important dans la création de nouveaux véhicules plus sûrs, plus légers et plus efficaces.

Deuxièmement, l'impression 3D agit comme un acteur de changement dans la *supply chain*. Ce procédé de fabrication élimine le besoin de nouveaux outils et permet de produire directement les pièces finales, cela réduit les délais de production et offre une meilleure réactivité de marché. Le potentiel de rupture s'exprime aussi à travers une composante géographique. L'AM peut soutenir une production décentralisée à faible ou moyen volume, il est alors possible de produire au plus proche du point d'utilisation. Ensuite, l'impression 3D privilégie un stockage numérique et une fabrication uniquement fondée sur les besoins, réduisant les coûts d'inventaire. Toutes ces fonctionnalités combinées permettent aux entreprises de générer des changements importants dans leurs chaînes logistiques se traduisant par une amélioration de la performance.

L'AM se présente comme une technologie soutenant les entreprises de l'industrie automobile dans leur poursuite de performance, de croissance et d'innovation. L'innovation de produits et la transformation de la *supply chain* ont le potentiel de développer de nouveaux *business models* et d'améliorer la compétitivité des entreprises automobiles.

Table des matières

INTRODUCTION	1
A. Problématique	1
B. Structure du mémoire	2
PARTIE 1 : ANALYSE THÉORIQUE	3
1. L'impression 3D	4
A. Processus de fabrication	4
B. Histoire de l'impression 3D	5
2. Les différents matériaux	7
A. Les plastiques	7
B. Les métaux	9
C. Les autres matériaux	10
3. Les différentes technologies	11
A. Impression 3D par photopolymérisation	11
B. Impression 3D par liage de poudre	12
C. Impression 3D par extrusion de matière	14
D. Impression 3D par jet de matière	15
E. Impression 3D par jet de liant	16
F. Impression 3D par lamination	17
G. Impression 3D par dépôt d'énergie dirigée	18
H. Technologies et matériaux	18
4. Avantages économiques	20
A. Économies d'échelle	20
B. Économies de champ	21
5. Approches stratégiques	23
A. Approche 1 : Statique	24
B. Approche 2 : Évolution de la supply chain	27
C. Approche 3 : Évolution des produits	29
D. Approche 4 : Nouveaux business models	31
6. Obstacles et défis	33
A. Les obstacles	33
B. Les défis	36
7. Conclusion et hypothèses	38

PARTIE 2 : ANALYSE PRATIQUE	39
1. Méthodologie	40
2. L'industrie automobile	42
A. Tendances et opportunités	43
B. Conclusion sur l'industrie automobile	46
3. L'AM dans l'industrie automobile	47
A. Hype Cycle de Gartner	48
B. Un marché en croissance	51
4. Analyse des approches stratégiques	53
A. Approche 1 : Amélioration de la performance	53
B. Approche 2 : Transformation de la supply chain	58
C. Approche 3 : Innovation de produits	61
D. Approche 4 : Nouveaux business models	67
5. Évolutions technologiques	71
A. Production de larges composants	71
B. Amélioration de la productivité	71
C. Diversification des matériaux	72
D. Impression 4D	73
6. Conclusion	75
A. Analyse des résultats	75
B. Limites et explorations futures	77
BIBLIOGRAPHIE	79

Table des figures

FIGURE 1. PROCESSUS D'ADDITIVE MANUFACTURING.	5
FIGURE 2. PROCEDE DE STEREOLITOGRAFIE.	12
FIGURE 3. PROCEDE DE SELECTIVE LASER SINTERING.....	13
FIGURE 4. PROCEDE DE FUSED DEPOSITION MODELLING.	15
FIGURE 5. PROCEDE DE MATERIAL JETTING 16	
FIGURE 6. PROCEDE DE BINDER JETTING..... 17	
FIGURE 7. TABLEAU DES TECHNOLOGIES ET MATERIAUX..... 19	
FIGURE 8. SEUIL DE RENTABILITE COMPARATIF ENTRE L'AM ET LES PROCEDES CONVENTIONNELS..... 21	
FIGURE 9. LES 4 APPROCHES STRATEGIQUES DE L'AM EN ENTREPRISE. 23	
FIGURE 9. LES 4 APPROCHES STRATEGIQUES SOUS LA FORME D'HYPOTHESES..... 38	
FIGURE 10. EST-CE QUE LES CEO DU SECTEUR AUTOMOBILE SE SENTENT CONCERNES PAR LA VITESSE DU CHANGEMENT TECHNOLOGIQUE ? 46	
FIGURE 11. DOMAINES D'APPLICATIONS DE L'AM. 47	
FIGURE 13. HYPE CYCLE DE L'IMPRESSION 3D EN 2015..... 50	
FIGURE 14. PROTOTYPE EN PLASTIQUE TRANSPARENT..... 54	
FIGURE 15. DETROMPEUR VOLKSWAGEN IMPRIME EN 3D..... 56	
FIGURE 16. GABARIT VOLVO IMPRIME EN 3D. 57	
FIGURE 17. LES TROIS PILIERS DE L'INNOVATION AUTOMOBILE..... 61	
FIGURE 18. CULBUTEURS CLASSIQUES VS CULBUTEURS IMPRIMES EN 3D. 63	
FIGURE 19. COMPOSANTS DE LA KOENIGSEGG ONE:1 PRODUITS PAR AM. 64	
FIGURE 20. CONTOURS DE POIGNEES DE PORTES DE LA DS3 PRODUITS PAR AM..... 65	
FIGURE 21. ROUE MICHELIN VISION..... 69	
FIGURE 22. ARCHE DE ROUE BMW VISION NEXT 100..... 74	
FIGURE 23. LES 4 APPROCHES STRATEGIQUES DE L'AM POUR L'INDUSTRIE AUTOMOBILE..... 75	

Introduction

L'impression 3D se réfère à un ensemble de technologies et de processus développés depuis plus de 30 ans. ASTM International, un organisme mondial pour le développement et l'établissement de normes dans l'industrie manufacturière, définit l'impression 3D comme « *Un procédé d'assemblage de matériaux pour fabriquer des objets à partir des données numériques d'un modèle tridimensionnel, généralement couche par couche, par opposition à des méthodes de fabrication soustractives* » (ASTM, 2013). L'expression générique *impression 3D* recouvre en fait plusieurs procédés de fabrication, se regroupant sous le nom *d'additive manufacturing*, notée AM.

Bien que l'impression 3D soit une technologie disponible depuis les années 1980, ce n'est qu'au cours de la dernière décennie qu'elle a été mise en évidence comme un véritable atout de production pour les industriels. Les récentes avancées technologiques ont permis de transformer les étapes de conception, de développement, de fabrication et de distribution des produits (Cotteleer *et al.*, 2014). Aujourd'hui, les entreprises sont de plus en plus conscientes de l'ampleur de cette technologie et des opportunités qui s'offrent à elles. Dès lors, le monde de l'industrie comme on le connaît, avec ses chaînes de production standardisées, ses économies d'échelle et ses usines délocalisées, risque de se voir complètement transformé par les procédés d'impression 3D (Berchon, 2014). Cette nouvelle technologie, qui prône la customisation de masse, est régulièrement décrite comme la troisième révolution industrielle. Cependant, face à cette grande variété, il y a souvent un manque de connaissance et de clarté pour identifier les bonnes applications et utilisations en fonction de chaque industrie.

A. Problématique

Une première question générale est donc apparue ; comment l'impression 3D peut-elle être bénéfique pour les industriels ? Chaque industrie à ses objectifs et ses exigences particulières, ce qui peut fonctionner pour une ne le sera pas forcément pour une autre. Par conséquent, nous répondrons à cette question en analysant la situation de l'AM dans l'industrie automobile en particulier.

Pour l'industrie automobile, qui est à la recherche perpétuelle de nouvelles solutions pour développer et produire plus rapidement, ces avancées technologiques ont ouvert les portes à la conception de nouveaux produits, plus légers, plus résistants, etc. Mais cela amène aussi les entreprises à se poser les questions du comment, quand et où les composants doivent être fabriqués. Bien qu'il apparaisse que l'utilisation principale de l'impression 3D réside dans le prototypage rapide, le développement constant des processus d'impression, ainsi que les innovations de matériaux, positionnent de plus en plus *l'additive manufacturing* comme une réelle solution de production. L'objectif de ce mémoire est d'analyser la situation de l'impression 3D dans l'industrie automobile, et de comprendre comment cette technologie peut profiter aux constructeurs automobiles en répondant aux sous-questions suivantes :

- Est-ce que l'AM est une technologie utilisée dans l'industrie automobile ?
- Quels sont les avantages de l'AM pour les constructeurs automobiles ?
- Quels sont les obstacles et limites à l'utilisation de l'AM dans l'automobile ?
- Quelles sont les applications pour lesquelles l'AM a le plus de potentiel ?

B. Structure du mémoire

Ce mémoire sera séparé en deux parties principales qui s'accordent pour ne former qu'un écrit. La première partie sera une **partie théorique** composée d'une revue de la littérature sur le sujet de l'impression 3D. Nous essayerons de développer une compréhension de base des différentes technologies et processus qui relèvent de l'AM, ainsi que de l'ensemble des matériaux disponibles. Ensuite, nous analyserons le potentiel économique de l'impression 3D pour les industriels. L'objectif sera de non seulement comprendre comment l'AM peut améliorer la position concurrentielle des entreprises en général, mais nous définirons aussi les approches stratégiques permettant de bénéficier pleinement de cette technologie.

La deuxième partie de ce mémoire sera une **partie pratique**. L'objectif sera de vérifier le potentiel d'utilisation de l'impression 3D défini dans la partie théorique au cas spécifique du secteur automobile. Nous commencerons par regarder la situation économique de l'industrie automobile afin d'en extraire les tendances générales. Ensuite, nous vérifierons le degré d'application des approches stratégiques définies dans la partie théorique à travers l'analyse de plusieurs cas dans l'industrie automobile.

Partie 1 : Analyse théorique

1. L'impression 3D

S'il existe de nombreux procédés *d'additive manufacturing*, ils ont tous pour point commun de construire un objet couche par couche. Ce procédé fait référence à la fabrication dite « additive » car elle fonctionne par addition de matière (Berchon, 2014). L'impression 3D se distingue ainsi des autres technologies manufacturières classiques, dites « soustractives », qui se caractérisent par une soustraction de matière jusqu'à l'obtention de l'objet final. Les équipements d'impression 3D diffèrent les uns des autres en fonction des matériaux qui sont utilisés, la façon dont les couches sont créées et la façon dont elles sont liées les unes aux autres. De telles différences détermineront la précision de la pièce, ses propriétés matérielles et ses propriétés mécaniques. Mais ces différences détermineront également la rapidité avec laquelle la pièce est fabriquée, la taille de l'objet qui est produit, le coût de production, et la quantité de travail après impression qui est requise (Gibson *et al*, 2010).

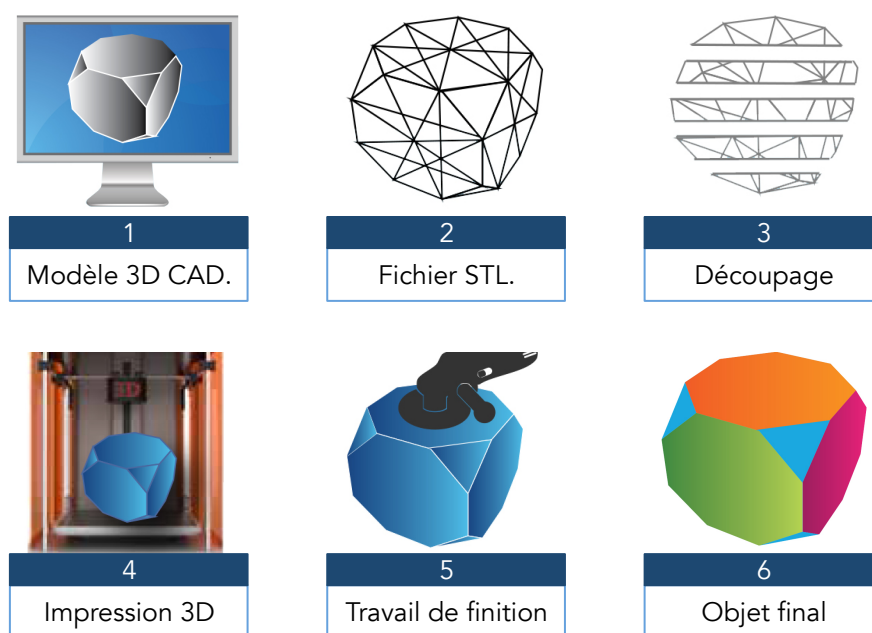
A. Processus de fabrication

Le processus d'AM commence par la création d'un modèle numérique tridimensionnel grâce à l'utilisation d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (Computer Aided Design, CAD). Ensuite, le modèle 3D est généralement converti en un fichier STL. Il s'agit d'un processus par lequel les données géométriques continues du fichier CAD sont converties en une mosaïque de triangles finis, dont chacun doit partager deux arêtes avec les triangles adjacents. La qualité d'impression dépendra en partie de la finesse du maillage de cette mosaïque. Le fichier STL fut créé en 1987 par l'entreprise 3D Systems lorsqu'elle a initialement développé le procédé de stéréolithographie, donnant son nom au fichier. De nos jours, STL fait aussi référence à *Language Standard Tessellation*. Bien qu'il existe d'autres types de fichiers, le format STL s'est imposé comme la norme pour chaque processus *d'additive manufacturing* (Hernandez *et al*, 2012).

La dernière étape qui précède l'impression est le découpage en tranches du fichier STL. Un logiciel, portant le nom de *slicer*, découpe entièrement le modèle numérique en une série de couches individuelles, et envoie à la machine toutes les instructions nécessaires pour réaliser l'impression : positionnement de la pièce, épaisseur de couche, quantité de matière, vitesse de déplacement, etc (Berchon, 2014).

Arrive ensuite l'étape d'impression, la machine commence à fabriquer progressivement l'objet en imprimant chaque couche, l'une à la suite de l'autre, jusqu'à ce que l'objet soit créé. Après cette opération, une variété d'activités de finition peut être requise. Selon le matériau utilisé et la complexité du produit, certaines pièces nécessitent un traitement secondaire, ce qui peut inclure le ponçage, le polissage, le durcissement, le vernissage, la peinture, etc. (Cotteleer *et al*, 2014). Il y a donc un ensemble de cinq étapes, représentées dans la figure 1 ci-dessous, avant l'obtention de la pièce finale.

Figure 1. Processus d'additive manufacturing.



Source : Cotteleer, M., Holdowsky, J., & Mahto, M. (2014).

B. Histoire de l'impression 3D

D'un point de vue historique, l'AM trouve ses racines dans la topographie et la photosculture, ce qui remonte à près de 150 ans. Ces deux applications peuvent être considérées comme des méthodes manuelles de « coupe et empilement » pour construire un objet sous forme de couche. L'une des premières approches ayant des similitudes avec les procédés actuels fut proposée par Ciraud en 1971. Il s'agissait essentiellement d'une méthode de dépôt en poudre utilisant un faisceau d'énergie (Laser Institute of America, 2012).

En 1984, le procédé de stéréolithographie fut inventé par Chuck Hull, permettant à un objet 3D d'être imprimé à partir de données CAD. En 1986, le même personnage fonda 3D System, qui

fut la première entreprise à commercialiser la technologie de stéréolithographie. Le procédé SLS (selective laser sintering) fut créé dans les années 1980 à l'Université du Texas, et est devenu à ce jour l'une des méthodes de fabrication les plus avancées et prometteuses au monde (The University of Texas, 2012). En 1988, Scott et Lisa Crump mettent au point la technologie FDM (Fused Deposition Modelling) et créent l'entreprise Stratasys, qui deviendra l'une des sociétés les plus importantes de l'industrie (Stratasys, n.d.). Il faut ensuite attendre 1993 pour voir apparaître le procédé 3DP, développé par le MIT (Massachusetts Institute of Technology). Ce procédé repose sur la projection de glue sur une surface de poudre formant ainsi progressivement l'objet (Prashanth *et al*, 2017)

Au début des années 1990, les processus d'AM étaient largement orientés vers des applications de prototypage. Mais depuis la fin des années 1990, les technologies et les procédés d'impression 3D évoluent doucement vers des applications industrielles, médicales et de consommation grand public (Cotteleer *et al*, 2014). En 2007, on assiste à l'ouverture de Shapeways, un service en ligne d'impression 3D ouvert aux particuliers. Il est rapidement suivi par Sculpteo, fondée en 2009, il s'agit d'une entreprise qui développe des outils web simplifiant l'ensemble du processus d'impression pour les amateurs (Berchon, 2014). Les importants développements technologiques issus des années 2000 ont permis d'utiliser la technologie d'AM dans la production de pièces aérospatiales, automobiles, et dans le développement de systèmes d'impression d'organes et de tissus (Cotteleer *et al*, 2014).

Suite à l'expiration de nombreux brevets, le marché de l'impression 3D connaît aujourd'hui une pleine expansion. *L'additive manufacturing* n'est donc pas récente, mais ce qui est nouveau c'est l'accès de cette technologie au grand public accompagné de son engouement médiatique. De nos jours, les recherches scientifiques sur la technologie continuent avec l'objectif d'améliorer la vitesse de traitement, la complexité de conception, et la variété des matériaux disponibles (Cotteleer *et al*, 2014).

2. Les différents matériaux

Selon l'ouvrage de Mathilde Berchon (2014), on distingue principalement deux grandes familles de matériaux qui peuvent être utilisées pour *l'additive manufacturing* ; les plastiques et les métaux. À cela s'ajoute d'autres matériaux en plus faible quantité, tels que les céramiques et les matières organiques.

A. Les plastiques

Les plastiques sont actuellement les matériaux les plus populaires dans le domaine de l'impression 3D, représentant 64% du marché, et il est estimé qu'ils garderont cette position dans les années à venir (Loubens, 2016). Les plastiques sont des polymères qui peuvent être mis en forme sous l'effet d'une source thermique, tels que l'ABS et le PLA, ou d'une source lumineuse, tels que les résines.

- Dans la famille des polymères thermoplastiques, on retrouve l'**ABS** (Acrylonitrile butadiène styrène) qui est l'un des matériaux le plus utilisé dans *l'additive manufacturing*. Sa température d'impression se situe entre 200 et 250 °C. On le trouve principalement sous la forme de filament. Il s'agit du matériau des briques de Lego, mais il est aussi très utilisé aussi dans l'automobile, les appareils électroménagers et autres applications (Sanchez, 2013). Il possède l'avantage de bien résister aux chocs, ce qui le rend très utile pour les applications fonctionnelles (Berchon, 2014). Ce matériau offre beaucoup de liberté de conception, cependant, la finition de surface est plus brute qu'avec d'autres matériaux (Materialise, n.d.).
- On retrouve ensuite le **PLA** (acide polylactique) qui appartient également à la famille des polymères thermoplastiques. Ce matériau est fabriqué à partir de composants biologiques comme l'amidon de maïs ou le sucre de canne, il offre donc l'avantage d'être biodégradable et non toxique. On le trouve principalement sous la forme de filament. Lorsqu'il fond, il ne sent pas aussi fort que l'ABS et a besoin de températures moins élevées, sa température d'impression se situe entre 160 et 220 °C (Berchon, 2014). Le PLA est plus facile à imprimer que l'ABS et offre un bon niveau de finition. En revanche il n'est pas très résistant à la chaleur, ni à l'humidité, et casse plus facilement (Chantrel, nd).

- Le **PVA** (alcool polyvinylique) est un plastique principalement utilisé comme matériau de support lors des impressions d'objets en PLA et/ou ABS. Sa température d'impression varie entre 190 et 210 °C. Il est biodégradable et se dissout facilement avec de l'eau, ce qui permet un nettoyage rapide de ces structures additionnelles (Berchon, 2014).
- Le **polyamide** est un autre plastique fortement utilisé dans l'impression 3D. Il se trouve principalement sous forme de fine poudre, blanche et granuleuse, pour être utilisé avec les technologies de frittage laser (SLS). Cependant, certaines familles de ce matériau, comme le nylon, peuvent se présenter sous la forme de filament et être utilisées avec le procédé FDM (Sanchez, 2013). Il possède de nombreuses qualités telles qu'une bonne stabilité, rigidité, flexibilité et une excellente résistance aux chocs. La couleur finale est de nature blanche, mate, et opaque, avec une surface légèrement poreuse (Berchon, 2014).
- La poudre de polyamide peut être mélangée avec de l'aluminium pour donner naissance à l'**alumide**. La combinaison de ces deux composants offre l'avantage de réaliser des pièces à la fois très solides et flexibles, tout en conservant une bonne résistance à la chaleur (Sanchez, 2013). L'impression d'alumide s'effectue avec les technologies de frittage laser (SLS), et produit des objets avec un aspect proche du métal. Néanmoins, sa surface légèrement poreuse et sableuse nécessite souvent un travail de finition, qui peut être de nature diverse (Berchon, 2014).
- Une autre grande famille des plastiques utilisée dans l'impression 3D concerne les **résines**. Ces résines sont des polymères liquides qui constituent le matériau de base de plusieurs techniques d'impression 3D, comme la Stéréolithographie et la PolyJet. Elles permettent d'obtenir des objets avec une très bonne finition externe, de couleur variée, ou même transparente. Dans tous les cas, il est possible de réaliser un processus de coloration ainsi que n'importe quel autre traitement post-impression.

Le choix entre ces différents plastiques va dépendre du procédé d'impression et des propriétés recherchées. Il s'agit d'une liste non exhaustive, le domaine des matériaux plastiques est en constante évolution et voit apparaître régulièrement de nouveaux plastiques.

B. Les métaux

Après les plastiques, les métaux sont les matériaux les plus utilisés dans l'impression 3D, essentiellement par les industriels (Morand *et al.*, 2017). Les métaux se présentent sous forme de poudre, et sont principalement utilisés avec des processus de fusion. Dans cette catégorie, on retrouve la liste non exhaustive des métaux suivants :

- **L'aluminium** et ses d'alliages tels que AlSi12 et AlSi10Mg. Ces matériaux ont l'avantage d'avoir une faible différence entre leur température de fusion et leur point de solidification, à l'inverse des alliages d'aluminium à haute résistance. Ces poudres métalliques permettent la création de pièces légères avec de bonnes propriétés thermiques. Les applications typiques sont des pièces avec des parois minces, telles que des échangeurs de chaleur, des pièces de production ou des pièces de rechange pour l'automobile, l'aérospatiale et l'aviation (Farinia Group, n.d.).
- **Le cobalt-chrome** et ses alliages. Cette classe de super-alliages présente une très bonne résistance à l'usure et à la corrosion, ainsi qu'un comportement non magnétique (Farinia Group, n.d.). Bien que ce matériau existe depuis longtemps, il ne peut être utilisé que depuis récemment pour l'impression 3D, notamment avec la technologie EBM (Berchon, 2014). L'entreprise Suédoise Arcam a par exemple développé l'ASTM F75, un alliage très solide et résistant utilisé dans la conception d'outillage et de moules. Lisse et résistant, le cobalt-chrome est aussi employé pour la réalisation de prothèses médicales, comme un genou ou une hanche.
- **L'acier inoxydable**, connu sous le nom « inox », fut le premier métal commercialement disponible pour l'impression 3D. Comme son nom le suggère il possède des propriétés mécaniques de haute résistance à la corrosion (Berchon, 2014). Certaines entreprises comme ProMetal ou ExOne se sont notamment spécialisées dans la production d'acier inoxydable. Parmi les plus connus, on peut également citer le GP1 du constructeur EOS, qui est une poudre fine d'acier inoxydable réputée pour sa grande résistance à la corrosion et son excellente ductilité (Primante3D, n.d.).
- **L'acier d'outillage** est particulièrement adapté à la fabrication d'outillage rapide et de moules dans les domaines de l'aéronautique, l'aérospatiale, et de l'automobile

(Primante3D, n.d.). Il se caractérise par une excellente dureté, une résistance à l'abrasion et à la déformation, et une bonne capacité à maintenir une arête de coupe à des températures élevées (Farinia Group, n.d.). Ici encore, on peut citer le fabricant EOS et son acier martensitique MS1, capable de produire des pièces d'une très bonne résolution.

- **Le titane** et ses alliages permettent de produire des pièces d'une excellente solidité, légères et très résistantes à la corrosion. Les techniques traditionnelles ont l'inconvénient d'être complexes et coûteuses. De plus, ce matériau est difficile à travailler et peut facilement être contaminé par des impuretés lors de la phase soudage (Primante3D, n.d.). L'impression 3D permet au contraire de travailler le métal sans contraintes et d'éviter la phase de soudage, ce qui en fait la meilleure technologie actuelle pour travailler ce métal (Berchon, 2014).
- **Les métaux précieux.** Bien que depuis peu, des matériaux tels que l'or, le platine, l'argent et le bronze puissent être utilisés en *additive manufacturing*, ils sont le plus souvent coulés dans des moules fabriqués par impression 3D (Primante3D, n.d.).

C. Les autres matériaux

Même si les plastiques et les métaux apparaissent clairement comme les matériaux les plus répandus dans le domaine de l'impression 3D, des expérimentations poussées ont été menées avec d'autres composants. On retrouve par exemple le groupe des céramiques qui ne sont actuellement utilisables qu'avec un nombre restreint de procédés d'impression. La céramique est un matériau avec des propriétés intéressantes, tels que son aspect recyclable et étanche.

On retrouve également le papier, qui est utilisé comme matériau d'impression 3D lors du procédé SDL. Les modèles imprimés avec du papier sont respectueux de l'environnement et facilement recyclables. Il existe aussi une quantité de recherches importantes sur le potentiel de l'impression 3D pour des matériaux biologiques. Le tissu vivant est par exemple étudié dans plusieurs institutions en vue de développer des applications telles que l'impression de tissus externes et d'organes humains pour des transplantations.

3. Les différentes technologies

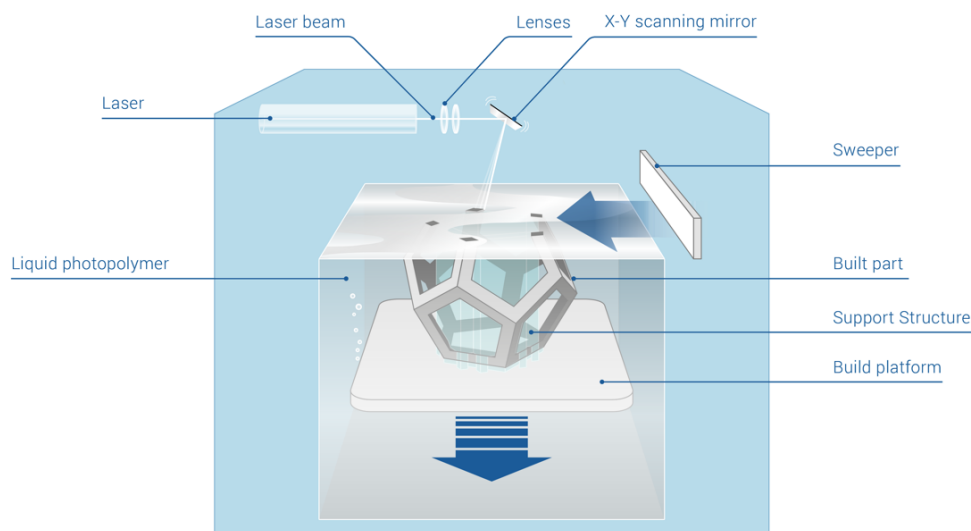
Comme expliqué précédemment, le modèle numérique de l'objet est découpé en plusieurs couches, qui seront chacune imprimée les unes à la suite des autres. Toute technologie d'impression 3D forme donc un objet par dépôts successifs de matière, le tout en suivant un modèle prédéfini (Molinari, 2015). Ce qui va différer d'un procédé à l'autre, ce sont les matériaux qui peuvent être utilisés et la manière dont les couches sont additionnées. L'organisme ASTM International a classifié les technologies additives en 7 catégories principales : photopolymérisation, fusion de poudre, extrusion de matière, jet de matière, jet de liant, laminage de feuilles, et dépôt d'énergie dirigé (ASTM, 2013).

A. Impression 3D par photopolymérisation

La photopolymérisation est un procédé d'impression qui utilise des polymères liquides capables de se solidifier au contact de la lumière. Le premier système d'AM par photopolymérisation fut développé par l'entreprise System 3D, sous le nom de **stéréolithographie** (SLA). Cette technologie est équipée d'un rayon laser ultraviolet qui durcit sélectivement les polymères liquides sensibles aux UV, de façon à créer une couche de matériau solide (Gao *et al*, 2015). La résine de polymère liquide est contenue dans un récipient où se trouve une plate-forme mobile immergée. À chaque fois qu'une couche est formée, la plateforme s'abaisse et le laser effectue son tracé sur une nouvelle surface liquide, curant et liant la résine à la couche précédente (France, 2015). Comme on peut le voir sur la figure 2, ce procédé se répète couche par couche jusqu'à obtention de l'objet final.

La stéréolithographie possède certains avantages tels que la précision et la rapidité d'impression, ainsi qu'une excellente finition de surface. Il s'agit d'un procédé permettant l'impression de grande pièce, ce qui est rare parmi les procédés actuels (Berchon, 2014). Cependant, en raison de sa dépendance à la photopolymérisation, cette technologie est intrinsèquement limitée aux photopolymères, qui sont des matériaux instables dans le temps et qui n'ont pas de propriétés mécaniques bien définies (Gao *et al*, 2015). Parmi les inconvénients, on retrouve aussi les erreurs de processus résultant de la sur-polymérisation, et le besoin d'un travail de solidification après impression. À cela s'ajoute le fait que les équipements et les matériaux sont onéreux (Berchon, 2014).

Figure 2. Procédé de stéréolithographie.



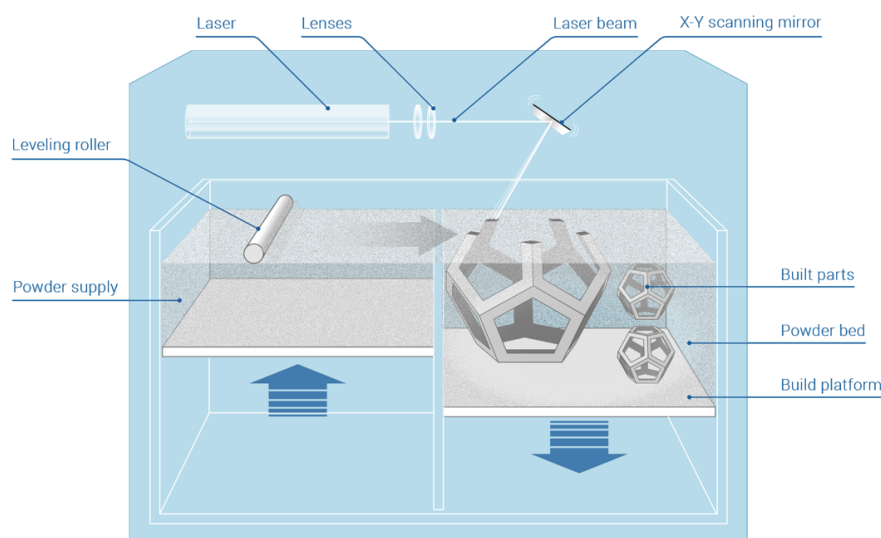
Source: <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography>

La stéréolithographie n'est pas la seule technologie ayant recours à la photopolymérisation, il y a aussi la technologie de **Digital Light Processing (DLP)**. Il s'agit d'un procédé similaire à la stéréolithographie, mais la différence réside dans le type de lumière utilisé, à savoir que la DLP utilise une source de lumière conventionnelle, et pas un laser ultraviolet. De plus, les rayons UV sont appliqués à l'entièreté de la surface du liquide en un seul passage, à l'inverse de la SLA qui nécessite un déplacement du laser sur l'axe horizontal (Berchon, 2014). L'avantage de la DLP est d'être plus rapide et de réduire d'un tiers les coûts d'impression comparé à la SLA, tout en produisant des pièces très précises avec une excellente finition (3D Printing Industry, 2014). Cependant, ses similarités impliquent la même dépendance aux photopolymères et au besoin de travail de finition après impression.

B. Impression 3D par liage de poudre

Les techniques de liage de poudre (**Powder Bed Fusion**) utilisent une source d'énergie thermique, par exemple un laser ou un faisceau d'électrons, pour fusionner sélectivement les particules de poudre (ASTM, 2013). Le laser se déplace à la surface du lit de poudre sur les axes x et y en suivant un tracé déterminé au préalable jusqu'à ce que la première couche soit réalisée. Ensuite, un mécanisme de roulement vient déposer une nouvelle couche de poudre, qui est à son tour fusionnée et liée à la couche précédente par le laser (Hernandez *et al*, 2012). Ce processus de revêtement de poudre et de fonte se répète jusqu'à l'obtention de la pièce finale (figure 3).

Figure 3. Procédé de Selective Laser Sintering.



Source: <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-sintering>

Le procédé d'impression 3D par liage de poudre regroupe quatre technologies : Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) et Electron Beam Mating (EBM) (ASTM, 2013) :

La technologie **SLS** est un processus de « sintering » (frittage), qui ne fond pas entièrement la poudre, mais qui la chauffe au point que les particules puissent fusionner à un niveau moléculaire. Cette technologie possède l'avantage d'utiliser le bac de poudre comme structure de support pendant la fabrication, ce qui permet de produire des formes complexes qui ne pourraient être produites autrement (Berchon, 2014). Le terme SLS est utilisé pour désigner le procédé de frittage appliqué à une large variété de matériaux, tels que le plastique, le verre, la céramique, etc.

DMLS est aussi une technologie de « sintering », mais elle fait référence au procédé appliqué aux alliages métalliques. L'avantage de cette technologie est de produire des objets exempts des contraintes résiduelles et de défauts internes, à l'inverse des composants métalliques fabriqués traditionnellement. Mais l'inconvénient est qu'elle est très coûteuse, ce qui limite son utilisation à des applications haut de gamme, comme la fabrication de pièces dans l'industrie aéronautique (Castells, 2016).

De son côté, la technologie **SLM** est un processus de « melting » qui utilise le laser pour obtenir une fusion complète. En ce sens, la poudre n'est pas simplement fusionnée, mais elle est réellement fondue en une partie homogène. Cette technologie offre l'avantage de produire des objets plus denses et plus résistants que DMLS, mais elle ne peut être utilisée qu'avec certains métaux, à savoir l'acier inoxydable, le titane, le cobalt chrome et l'aluminium. Il s'agit aussi d'une technologie très énergétique, car chaque couche de poudre métallique doit être chauffée au-dessus du point de fusion (Castells, 2016).

La technologie **EBM** est aussi un processus de « melting », très similaire à la fusion sélective par laser (SLM). Elle produit également des modèles très denses, mais la différence entre les deux techniques est que l'EBM utilise un faisceau d'électrons plutôt qu'un laser pour faire fondre la poudre métallique (Berchon, 2014). Elle possède aussi la particularité de se dérouler dans une chambre vide pour éviter les problèmes d'oxydation, ce qui est un avantage considérable pour la fabrication de composants dans l'espace (Hernandez *et al*, 2012).

Un inconvénient commun de ces quatre technologies est la porosité de l'objet final dû aux matériaux utilisés. Les pièces finales ont une apparence sableuse et rugueuse, ce qui implique d'effectuer un travail de finition pour obtenir une surface lisse (Berchon, 2014).

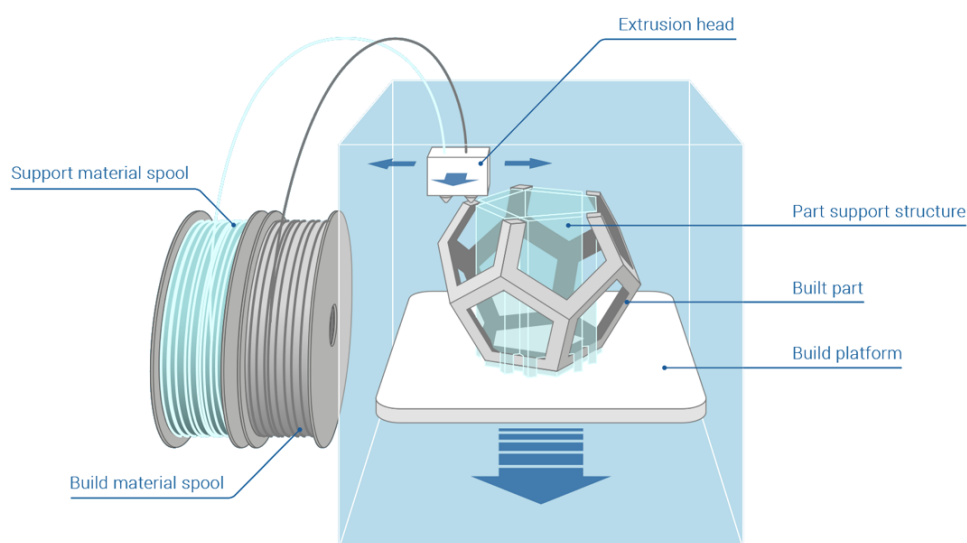
C. Impression 3D par extrusion de matière

La technologie d'extrusion de matière la plus connue est la **Fused Deposition Modelling** (FDM), mise au point par l'entreprise Stratasys. Les autres entreprises développant un procédé similaire regroupent leurs imprimantes sous le nom de **Fused Filament Fabrication** (FFF). Ce type de procédé se caractérise par un dépôt successif de filament de plastique fondu sur un plateau d'impression, tout en respectant le chemin défini par le fichier CAD. Ce dépôt de matière se fait via une buse d'extrusion qui fond le matériau pour de le déposer en couches très fines (Berchon, 2014). Chaque couche durcit progressivement et se lie à la suivante, permettant de créer l'objet de la base vers le sommet (voir figure 4).

Les avantages de ce procédé sont qu'aucun post-traitement chimique n'est requis, il n'y a aucune résine à durcir, et les équipements sont peu coûteux, ce qui en fait un processus rentable. De plus, la majorité des systèmes d'extrusion fonctionne avec des thermoplastiques standard, tel que l'ABS et le PLA, ce qui permet d'obtenir des objets avec de bonnes

propriétés mécaniques et une bonne durabilité dans le temps (Gao *et al*, 2015). Ces avantages en font un système d'impression populaire chez les consommateurs amateurs (Hernandez *et al*, 2012). Les inconvénients sont que la technologie nécessite des températures de fonctionnement élevées, et que la résolution sur l'axe z est faible (0,25 mm) par rapport aux autres processus *d'additive manufacturing*. Cela implique qu'un travail de finition important peut être nécessaire, surtout pour les machines d'entrée de gamme.

Figure 4. Procédé de Fused Deposition Modelling.



Source: <https://www.additively.com/en/learn-about/fused-deposition-modeling>

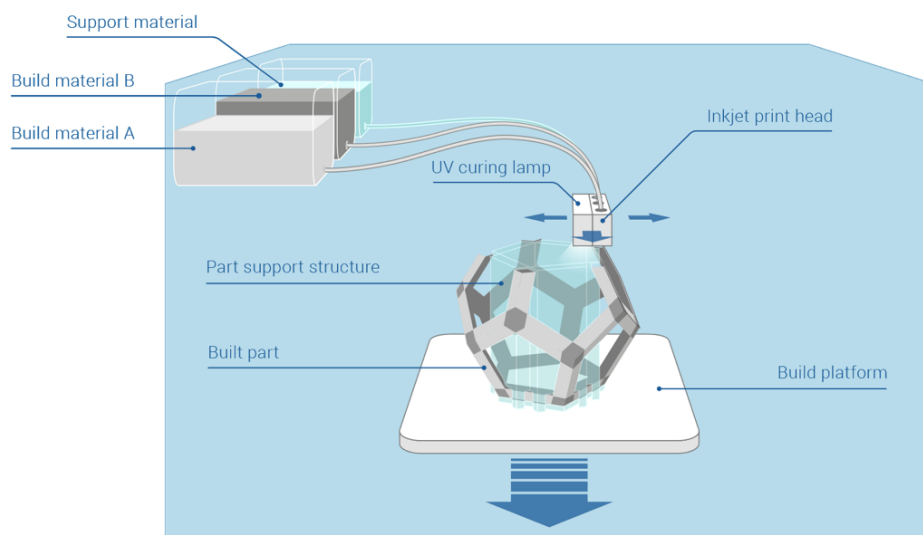
D. Impression 3D par jet de matière

Similaire à la technologie d'impression par jet d'encre des imprimantes 2D, les procédés par jet de matière (**Material Jetting**) déposent de manière sélective des gouttelettes de matériau sur une plateforme de construction (Hernandez *et al*, 2012). Il existe plusieurs technologies fonctionnant par jet de matière, l'une des plus connues est la Polyjet. Mise en œuvre par l'entreprise Objet, cette technologie utilise également le procédé de photopolymérisation, mais d'une façon tout à fait différente de la SLA et de la DGL (Berchon, 2014). La tête à jet d'encre se déplace dans les axes x et y déposant des gouttes de photopolymère, qui sont ensuite durcies par des rayons ultraviolets à la fin de chaque couche (figure 5).

L'épaisseur de couche obtenue dans ce processus est de 16 μm , ce qui permet d'obtenir des pièces en haute résolution (Gao *et al*, 2015). Il est aussi possible avec cette technologie d'utiliser plusieurs matériaux en même temps, ce qui permet d'obtenir des pièces multi-

matériaux et de plusieurs couleurs (Additively). Néanmoins, tout comme la stéréolithographie, ce procédé ne fonctionne qu'avec des photopolymères réagissant aux UV. De plus, les pièces produites avec cette technologie sont moins résistantes qu'avec d'autres procédés, comme la stéréolithographie et le liage de poudre. Finalement, il est souvent nécessaire d'utiliser un matériau de support pendant la construction (Gao *et al*, 2015).

Figure 5. Procédé de Material Jetting



Source: <https://www.additively.com/en/learn-about/material-jetting>

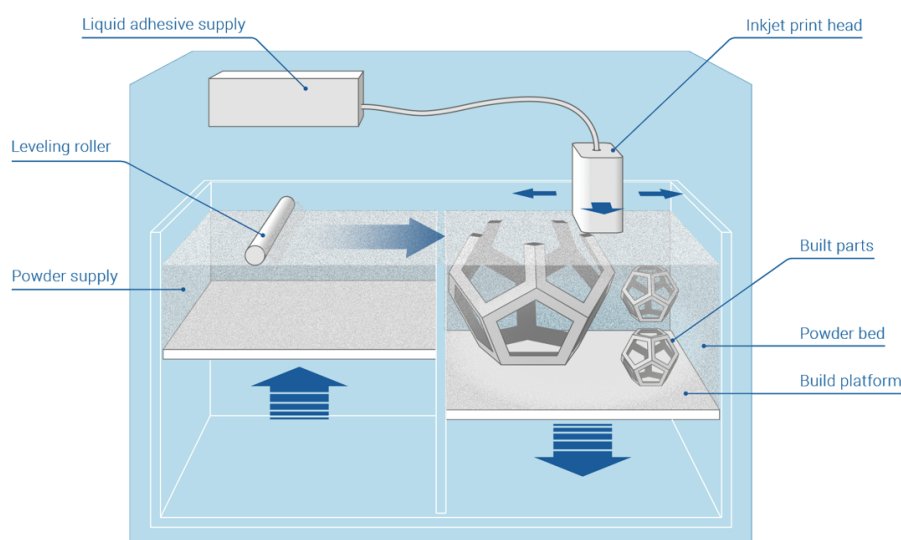
E. Impression 3D par jet de liant

Lors de ce procédé (**Binder Jetting**), un agent de liaison liquide est déposé sélectivement sur un lit de poudre afin d'assembler les particules (ASTM, 2013). Une fois que la première couche est solidifiée, la plate-forme de construction est abaissée et une nouvelle couche de poudre est étalée (Berchon, 2014). En répétant ce processus de pose de poudre et de collage, les différentes couches s'accumulent jusqu'à obtention de l'objet final (figure 6). Bien que cette méthode a d'abord été étudiée au MIT dans les années 1990, elle ne fut commercialisée qu'en 2010 sous le nom de licence 3DP (Prashanth *et al*, 2017).

Tout matériau qui peut être réduit à l'état de poudre, et être humidifié par un liant, peut être traité par cette technologie. Les chercheurs l'ont déjà utilisée pour traiter une variété de métaux, de céramiques, de sable et de matériaux polymères (Gao *et al*, 2015). De plus, le bac de poudre peut servir de structure de support afin de concevoir des pièces géométriquement complexes. Un autre avantage de ce procédé est la possibilité d'ajouter facilement une palette

de couleurs directement lors de l'impression (3D Printing Industry, 2014). Mais la force principale de la méthode 3DP est son faible coût, les imprimantes 3DP peuvent être jusqu'à six fois moins chères que les machines de stéréolithographie (Berchon, 2014). Néanmoins, ce processus implique souvent un travail de post-impression qui peut prendre du temps, et donc entraîner des coûts conséquents. De plus, les pièces produites avec cette technologie sont essentiellement des particules de poudre collées, ce qui se traduit par des pièces fragiles dont la qualité est souvent moindre (Prashanth *et al*, 2017).

Figure 6. Procédé de Binder Jetting.



Source: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>

F. Impression 3D par lamination

Laminated Object Manufacturing (LOM) est un procédé qui fut développé par l'entreprise Helisys en 1986, et qui combine des techniques additives et soustractives pour la création d'objets (Gao *et al*, 2015). Lors de ce procédé, les matériaux sont sous la forme de feuilles, et les couches sont collées par un revêtement adhésif thermique et par application de chaleur. Une fois que la première feuille est collée, un laser, ou une lame, vient couper chaque couche verticalement pour obtenir le contour de l'objet souhaité (Hernandez *et al*, 2012). Lorsque cette séquence de coupe est terminée, l'imprimante dépose la prochaine couche d'adhésif pour ensuite y déposer la feuille suivante, et ainsi de suite jusqu'à ce que la pièce soit terminée.

L'avantage de cette méthode est de pouvoir imprimer du papier, qui n'est autre que le matériau le moins cher du marché (Berchon, 2014). Mais elle peut aussi être utilisée avec d'autres matériaux comme des thermoplastiques et des composites. Elle permet d'obtenir des pièces multicolores, de grandes tailles, et avec une bonne résolution. En revanche, les propriétés mécaniques sont faibles, et les cavités internes complexes sont très difficiles à réaliser. De plus, le résultat final nécessite souvent un travail de finition important pour extraire l'excès de matériau (Hernandez *et al*, 2012).

G. Impression 3D par dépôt d'énergie dirigée

Lors de ce procédé de fabrication (**Directed Energy Deposition**), une énergie thermique focalisée (par exemple, un laser, un faisceau d'électrons ou un arc de plasma) est utilisée pour fusionner des matériaux en les faisant fondre lorsqu'ils sont déposés (ASTM, 2013).

On retrouve dans cette catégorie de procédé la technologie LENS (Laser Engineered Net Shaping), qui fut développée en 1995 par les laboratoires Sandia et commercialisée par Optomec. Avec cette technologie, un faisceau laser est utilisé pour faire fondre de la poudre métallique et l'injecter directement dans un emplacement spécifique. Du coup, en plus de produire un objet à partir de zéro, cette technologie peut être utilisée pour réparer des pièces qui seraient impossible ou trop coûteuses à réparer avec d'autres procédés (Gao *et al*, 2015). Cette technologie peut être utilisée avec une grande variété de métaux et d'alliages, comme l'acier inoxydable, les alliages à base de nickel, les alliages de cuivre, et aussi des matériaux comme l'alumine. Son problème est la tension résiduelle issue d'alternations irrégulières entre chauffage et refroidissement, ce qui peut avoir un impact important dans les applications de haute précision comme la réparation d'une turbine (Hernandez *et al*, 2012).

H. Technologies et matériaux

Chaque type de matériau sera développé et utilisé pour un ou plusieurs procédés d'impression 3D en particulier. L'objectif est d'obtenir des propriétés physiques qui correspondent spécialement à l'application voulue. Le tableau (figure 7) reprend les différents procédés énoncés précédemment en fonction du type de matériau disponible.

Le degré de popularité d'une technologie dépendra notamment du type d'utilisateur ciblé et de l'objectif qu'il poursuit. Actuellement, la stéréolithographie (SLA) et le frittage laser (SLS) sont les procédés les plus employés dans l'industrie dûs à leurs avantages ; le premier permet d'obtenir des impressions précises, de qualités et avec une bonne finition, alors que le second permet l'impression de géométries complexes, tout en utilisant un large nombre de matériaux. Du côté des particuliers, c'est le procédé FDM qui est le plus populaire, principalement dû à son faible coût et sa facilité d'utilisation.

Figure 7. Tableau des technologies et matériaux.

Technologies	Polymères	Métaux	Céramiques
Stéréolithographie	×		
Digital Light Processing	×		
Selective Laser Sintering	×	×	×
Direct Metal Laser Sintering		×	
Selective Laser Melting		×	
Electron Beam Melting		×	
Fused Desposition Modelling	×		
Material Jetting	×		
Binder Jetting	×	×	×
Laminated Object Manufacturing	×	×	×
Directed Energy Deposition		×	

Source : Cotteleer, M., Holdowsky, J., & Mahto, M. (2014).

4. Avantages économiques

L'additive manufacturing casse les compromis de performance actuels en redessinant les contours d'une nouvelle stratégie industrielle de deux façons. Premièrement, elle permet de redéfinir la relation entre le capital investi et les économies d'échelle, et deuxièmement, la flexibilité de cette technologie permet de diminuer le capital requis pour faire des économies de champ (Cotteleer *et al.*, 2014). L'intégration de cette technologie ouvre la voie à de nouvelles façons de concevoir la production industrielle, permettant aux entreprises d'élargir leurs champs d'opportunités et d'améliorer leurs performances.

A. Économies d'échelle

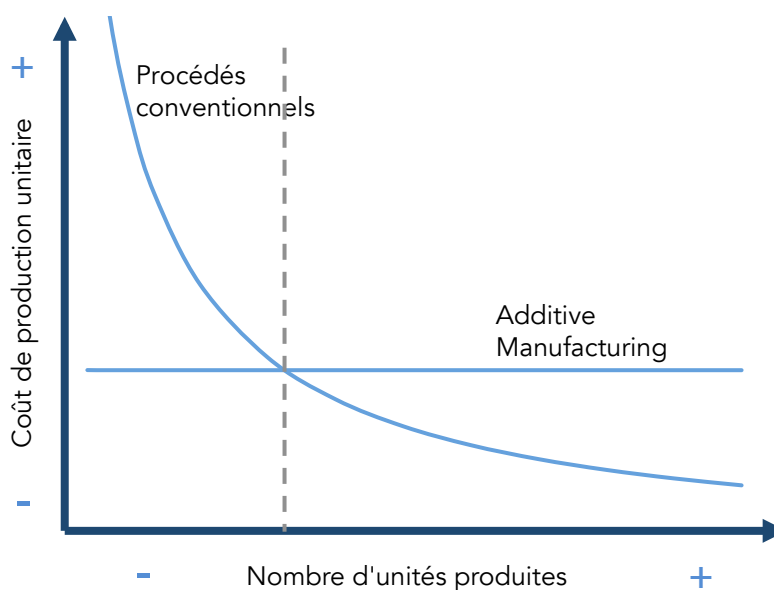
Les techniques de production actuelles demandent de produire vite et en grande quantité, afin de rentabiliser les importants investissements en capital nécessaires à l'acquisition des équipements de production. Avec ce type de production, la première unité est très chère, mais au plus l'entreprise produit d'unités avec la même machine, au plus le coût marginal diminue. Par conséquent, les entreprises augmentent leur quantité de production dans le but de réaliser des économies d'échelle, donnant naissance à la production de masse (D'Aveni, 2015) (Cotteleer *et al.*, 2014). Ce type de production se caractérise par des objets produits de façon standardisée et en très grande quantité, entraînant également des risques de surproduction et de gaspillage (Daumas, 2006).

L'impression 3D impacte ce principe en éliminant la nécessité de produire en grande quantité pour être rentable. Avec cette technologie, le coût minimal unitaire peut être atteint à très faible volume, et chaque unité de production aura presque le même coût (Cotteleer *et al.*, 2014). Cela implique que le modèle des grandes chaînes de production, produisant en masse pour réduire les coûts et amortir le capital, ne représente plus le seul modèle économique viable (Molinari, 2015).

La figure 8, ci-contre, compare la rentabilité des méthodes de production conventionnelles avec les méthodes d'impression 3D. On peut constater que le coût unitaire de l'AM ne varie pas en fonction de la quantité, ce qui ne permet pas de réaliser des économies d'échelle. Cependant, ce coût est initialement plus faible, faisant de l'impression 3D une solution efficace lorsqu'il s'agit de production à faible volume. De plus, avec l'évolution des

technologies, les coûts des équipements d'AM vont continuer de diminuer, ce qui va encore intensifier l'avantage compétitif de cette technologie (Cotteleer *et al.*, 2014). Cela ne veut pas dire qu'il faut tout produire par impression 3D, mais que chaque entreprise devra choisir en fonction de la quantité d'unités qu'elle veut produire, où elle se situe par rapport au seuil de rentabilité et vers quelle technologie elle doit s'orienter.

Figure 8. Seuil de rentabilité comparatif entre l'AM et les procédés conventionnels.



Source: Cotteleer, M. & Joyce, J. (2014).

B. Économies de champ

Les imprimantes 3D sont connues pour être extrêmement flexibles quant à leur capacité de fabriquer des configurations de pièces différentes tout en gardant des coûts de changement réduits, permettant ainsi de réaliser d'importantes économies de champ (Cotteleer *et al.*, 2014). La polyvalence de l'AM permet donc de réduire les investissements liés à la production, ce qui est l'inverse des chaînes de production conventionnelles où chaque unité a un rôle prédéfini, et où chaque modification implique d'acquérir de nouveaux équipements (Berchon, 2015). Avec l'AM, le coût de production unitaire va pouvoir diminuer à chaque fois que le nombre de produits différents fabriqués par la même imprimante augmente (Cotteleer *et al.*, 2014).

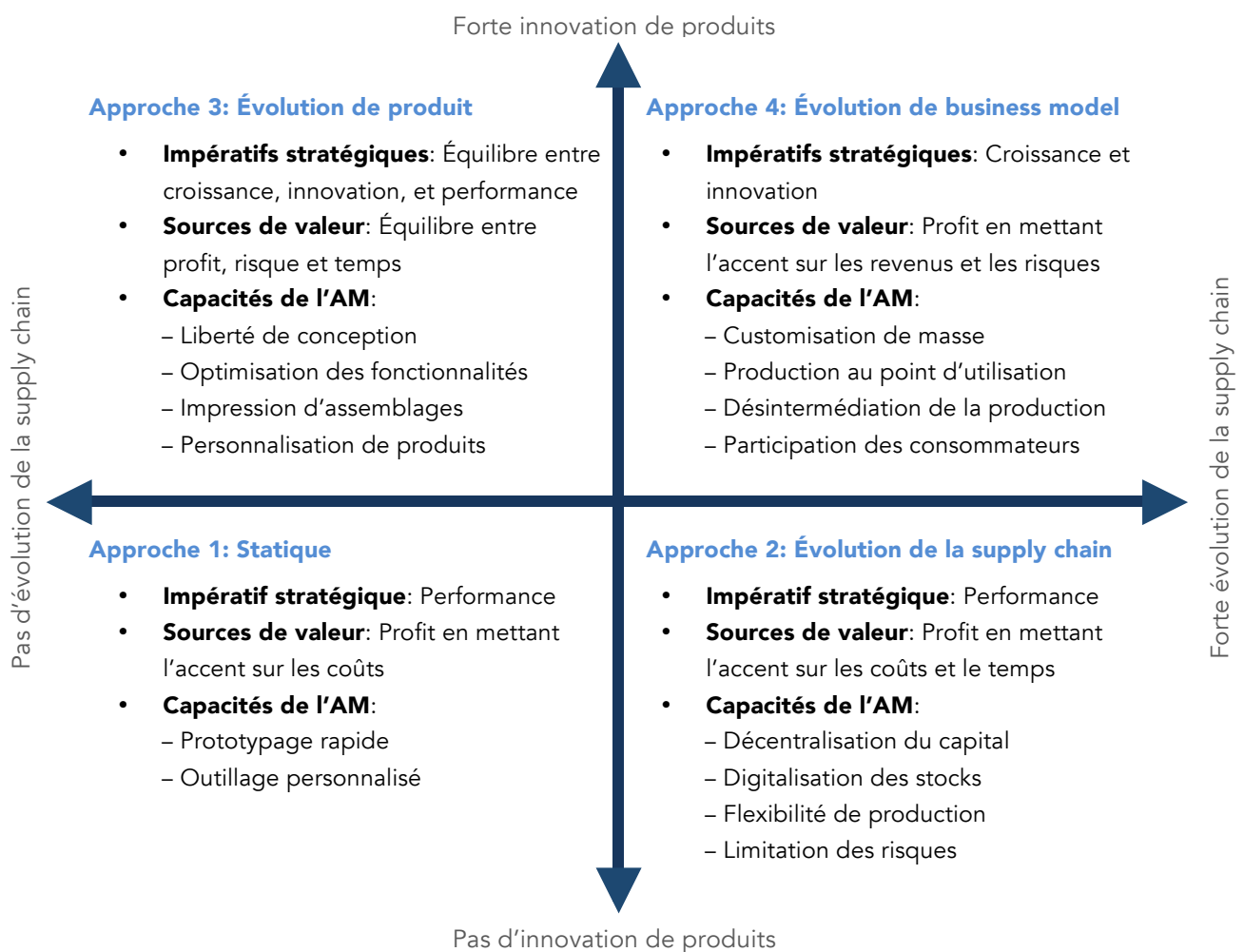
Cet avantage se caractérise notamment, par la capacité de concevoir des pièces géométriquement complexes sans difficultés ni coûts supplémentaires (Guillouzouic, 2013). À l'inverse, les procédés de fabrication traditionnels imposent des limites de conception qui peuvent nuire à la productivité de l'entreprise. Par exemple, dès que la complexité géométrique d'un composant augmente, il ne peut plus être produit directement en une seule pièce et nécessite l'assemblage de plusieurs éléments produits séparément (Cotteleer *et al.*, 2014). L'AM permet de contrer ce problème en concevant directement le composant final en une seule pièce, réduisant les coûts d'assemblage et de production (Campbell, 2011).

Les avantages de *l'additive manufacturing* rendent également cette technologie idéale pour la production de biens sur demande, facilitant la production de pièces uniques, et diminuant les coûts de personnalisation (Despeisse, 2016). La capacité de produire une multitude de modèles différents avec la même machine, et sans modifications significatives de l'outillage, permet d'adapter les produits en fonction des besoins et des désirs de chaque consommateur (Berchon, 2014).

5. Approches stratégiques

Les avantages offerts par l'AM, en terme d'économies d'échelle et de champ, amènent les entreprises à repenser leurs produits et leurs chaînes logistiques pour y intégrer cette technologie. Mark Cotteleer, et Jim Joyce (2014), ont développé 4 approches stratégiques pour bénéficier de l'AM, chacune avec un degré d'intégration différent (figure 9) :

Figure 9. Les 4 approches stratégiques de l'AM en entreprise.



Source: Cotteleer, M. & Joyce, J. (2014).

- **Approche 1** : Les entreprises utilisent l'AM pour améliorer leur capacité de production et réduire leurs coûts, mais elles ne changent pas leurs produits et la structure de leur *supply chain*.
- **Approche 2** : Les entreprises vont bénéficier des avantages de l'AM en terme d'économies d'échelle pour revoir et optimiser leur *supply chain*.

- **Approche 3** : Les entreprises vont bénéficier des avantages de l'AM en terme d'économies de champ pour améliorer et développer leurs produits.
- **Approche 4** : Les entreprises utilisent l'impression 3D pour transformer leur *supply chain* mais aussi pour développer de nouveaux produits.

A. Approche 1 : Statique

L'approche numéro 1 est la version la plus simple et déjà bien utilisée par les industriels. L'impression 3D est utilisée pour optimiser la capacité de production et réduire les coûts. Il s'agit d'une approche à faible risque dans laquelle les entreprises ne changent pas leurs produits, ni la structure de leurs chaînes logistiques. Cela se traduit principalement sous deux façons : la création de prototypes et la création d'outils.

a. Prototypage rapide

Initialement, l'AM faisait référence au prototypage rapide, c'est à dire la production rapide et à faible coût de modèles conceptuels pour en obtenir une représentation réelle. L'objectif était de permettre aux ingénieurs, ou autres concepteurs, d'évaluer la forme esthétique et les caractères physiques d'un objet initialement conçu par ordinateur (Guillouzouic, 2013) (Campbell, 2011). La conception de prototypes est donc utilisée à la fois pour le design des produits mais aussi pour en tester la qualité avant de lancer une production complète. Certains avantages de l'impression 3D permettent d'améliorer l'efficacité de ces étapes de conception de trois façons (Michalil *et al*, 2015):

- **Économie de temps** : En regroupant les opérations de conception et de fabrication, et en éliminant le passage par des intermédiaires, l'impression 3D permet d'accélérer considérablement la phase de prototypage. Les ingénieurs ont désormais la possibilité de créer directement un prototype et de l'évaluer, sans devoir attendre ou passer par un fournisseur (Michalil *et al*, 2015). Il est possible de mettre en place des cycles de conception de type courts et répétitifs. Ce type de système est très semblable à ce que l'on connaît dans le domaine de l'informatique, où une idée peut être testée très rapidement pour un coût proche de zéro (Molinari, 2015).
- **Diminution des coûts** : Un avantage de l'AM est de pouvoir produire de nombreuses variantes d'un produit pour un coût additionnel proche de zéro, permettant ainsi de créer et tester de nombreux prototypes (Cotteleer *et al*, 2014). En effet, l'impression

3D permet de réduire les coûts en éliminant le besoin de fabriquer de l'outillage spécifique, en réduisant la perte de matière, ainsi qu'en facilitant la communication et la coordination des ingénieurs en interne (Michalil *et al*, 2015).

- **Amélioration de la qualité** : Le fait d'accélérer le processus de conception, et d'en réduire les coûts, va aussi permettre de développer des produits finis plus performants et de meilleure qualité. L'AM offre la possibilité aux ingénieurs de tester continuellement de nouveaux designs et de développer leur esprit d'innovation (Michalil *et al*, 2015). Ils peuvent rapidement tester des idées en les imprimant et découvrir ce qui ne fonctionne pas, ce qui permet d'accélérer la découverte amenant à une solution optimale (Dubois, 2014).

L'utilisation de l'AM permet donc d'accélérer l'étape de développement d'un produit et d'en réduire les coûts, ce qui en améliore la qualité et réduit le temps nécessaire avant que le produit final soit sur le marché.

b. Outillage personnalisé

Dans la fabrication industrielle, l'un des stades les plus coûteux est la production d'outillage. Lors d'une enquête sur les procédés de moulage par injections utilisés dans la production de composants électriques, il ressort que 93,5 % des coûts de production sont associés à la conception de moules (Atzeni *et al*, 2010). En plus de leur production, ces outils doivent aussi être stockés et entretenus, amenant une série de dépenses additionnelles (Lindemann *et al*, 2012). L'AM permet de réduire, voir même d'éliminer complètement, le besoin d'outillage lorsqu'elle est utilisée comme moyen de production. La production de certains biens par impression 3D ne nécessite aucun outillage additionnel, éliminant par conséquent les coûts, les délais et le travail qui y sont associés. Il s'agit d'une proposition extrêmement attrayante, dont un nombre croissant de fabricants essayent de profiter (Guillouzouic, 2013) (3D Printing Industry, nd).

Néanmoins, certains industriels ont toujours besoin d'outillage, qui joue un rôle très important dans leur capacité de production. L'AM peut alors être utilisée dans la fabrication de cet outillage. Selon Leandri (2015), Hiemenz (2013), ainsi que Cotteleer, Neier et Crane (2014), produire son outillage en interne avec l'AM offre plusieurs avantages :

- **Raccourcissement des délais** : Utiliser l'AM pour produire son outillage permet de raccourcir le cycle de développement de 40 % à 90 %. En réduisant le délai de production des outils et en permettant leurs mises à jour rapidement, l'AM permet aux entreprises de remplacer et d'améliorer plus fréquemment leurs outils. Les cycles de conception des outils peuvent ainsi suivre le rythme des cycles de conception des produits. De plus, l'impression 3D permet une production de l'outillage plus rapide et plus flexible, ce qui permet une meilleure réactivité et élimine les risques externes.
- **Diminution des coûts** : L'utilisation de l'AM pour la production d'outillage en interne permet de réaliser des économies de 70 % à 90 %, principalement pour les petites séries de produits finaux où l'investissement en outillage traditionnel n'est pas amorti complètement. C'est également le cas pour la conception d'outil à géométries complexes, l'utilisation de l'AM permet de diminuer les coûts en réduisant la perte de matière, surtout lorsque ce sont des matériaux onéreux. Ensuite, la possibilité de fabriquer un outil précis dès qu'il est nécessaire affecte positivement les flux de travail et donc les bénéfices.
- **Optimisation des fonctionnalités** : L'AM offre aux ingénieurs une totale liberté dans la conception des outils, donnant naissance à un outillage plus complexe et plus fonctionnel. Lorsqu'avec les techniques traditionnelles, il était nécessaire d'avoir plusieurs outils pour une seule étape de production, il est maintenant possible de ne concevoir qu'un seul outil reprenant toutes les fonctions nécessaires. De plus, l'AM permet de développer des outils plus performants, qui vont pouvoir supporter un rythme de production plus élevé, tout en améliorant la précision du travail. La qualité de l'outillage aura finalement un impact direct sur la qualité des produits finis.
- **Diminution des barrières** : L'AM réduit le seuil minimum justifiant un investissement dans un nouvel outillage ou le renouvellement de l'outillage actuel. Traditionnellement, en raison de la dépense et de l'effort nécessaire à leur fabrication, les outils étaient utilisés aussi longtemps qu'ils pouvaient l'être. Mais, la réduction des coûts et des délais de fabrication, rendent l'optimisation des outils abordable, même s'ils ne sont pas défectueux. De nouveaux facteurs peuvent à présent être inclus pour améliorer le confort des techniciens et la performance de production.

L'utilisation de l'AM peut être une méthode précieuse et un investissement idéal lorsque la nature des besoins en outillage est évaluée correctement. En rendant la fabrication d'outillage plus rapide et moins coûteuse, l'AM permet d'augmenter le nombre d'outils et de pièces de supports, ce qui aura un impact direct sur la performance et le résultat financier.

c. Proposition de l'approche 1

Que ce soit en tirant bénéfice du prototypage rapide, ou des opportunités en terme d'outillage, l'AM s'inscrit ici comme un vecteur d'amélioration de la performance. Ces gains de performance se traduisent principalement à travers une optimisation du temps et une réduction des coûts. L'avantage de cette première approche est sa facilité d'intégration dans des processus de fabrication déjà existants, n'impliquant aucun changement dramatique dans la *supply chain* ou dans le développement de produits. Les entreprises vont pouvoir découvrir les avantages de l'AM sur leur performance, tout en limitant les risques opérationnels.

B. Approche 2 : Évolution de la supply chain

Cette approche est similaire à l'approche 1 dans sa recherche d'amélioration de la performance, mais comporte cette fois une évolution notable dans la transformation de la *supply chain* (Marchese, 2015). Les entreprises vont bénéficier des avantages de l'AM en terme d'économies d'échelle, leur permettant de revoir et d'optimiser leurs chaînes logistiques de plusieurs façons.

a. Décentralisation du capital

Le potentiel de rupture de l'AM s'exprime tout d'abord à travers une composante géographique de la production. Elle permettra un retour à une production plus localisée répondant à une demande directe des consommateurs (Guillouzouic, 2013). La production additive ne nécessite pas d'infrastructure et d'équipement aussi important que ceux des autres procédés de fabrication, pour lesquels il était nécessaire de rassembler la production en un seul lieu afin de réaliser des économies d'échelles (Hopkinson *et al*, 2003). Par conséquent, il est possible de décentraliser les phases de conception et de production en une multitude de lieux, plus proche du point d'utilisation et du marché (Michalik *et al*, 2015). Cette relocalisation implique que le transport en grande quantité de produits finis ou semi-finis à travers le globe n'est plus nécessaire, ce qui permet une réduction des coûts de transport et de l'impact sur l'environnement (Molinari, 2016).

b. Digitalisation des stocks

L'impression 3D offre l'avantage de pouvoir imprimer une multitude de composants à la demande, éliminant le besoin de stockage physique. L'AM privilégie un stockage numérique et une fabrication uniquement fondée sur les besoins, réduisant considérablement les coûts de stockage et les excès de production (Morand, 2017) (Guillouzouic, 2013). Un inventaire numérique implique également que la circulation de biens se fera à présent de façon digitale. Un fichier pourra être envoyé à n'importe quelle imprimante 3D dans le monde, qui n'aura plus qu'à le fabriquer sur place. Cela permettra une circulation beaucoup plus rapide et moins chère, qui aura le potentiel de transformer le stockage et la distribution de produit de la même façon que le fichier MP3 l'a fait pour la musique (Campbell, 2011).

c. Flexibilité de production

Cette relocalisation et digitalisation amènent aussi à la notion de flexibilité et de production sur demande. L'impression 3D permet de réduire le temps et les ressources nécessaires à la production de biens, ce qui permet aux entreprises de réagir plus rapidement aux variations de la demande. Etant donné que chaque produit se trouvera stocké numériquement, il pourra être fabriqué directement sur demande du consommateur, et au lieu le plus proche (Marchese, 2015). À l'inverse, produire sur demande est trop onéreux et prend trop de temps avec les technologies classiques, ce qui se traduit par des inventaires de pièces qui ne sont pas toujours vendues (Douglas *et al*, 2014). De plus, l'AM permet également d'être plus réactif durant le développement de nouveaux produits, qui seront facilement testables, modifiables et adaptables en fonction des besoins du marché local (Guillouzouic, 2013).

d. Limitation des risques

L'AM permet de réduire la vulnérabilité de la *supply chain* face à tous les événements imprévisibles. En effet, une chaîne de production avec moins d'intermédiaires implique moins de lieux de conflits potentiels et donc moins d'interruptions. À cela s'ajoute le fait qu'une production décentralisée implique des quantités produites moins importantes. Il y a donc un risque uniquement local et de moindre importance par rapport à une production centralisée (Douglas *et al*, 2014). De plus, l'utilisation combinée des systèmes de production conventionnels avec l'AM permet de réduire certains risques liés à la production. L'AM offre aux entreprises un moyen de production secondaire dans le cas où leur procédé principal tombe en panne (Marchese, 2015). La capacité de produire n'importe quel élément, sans coûts additionnels, permettra de ne pas arrêter la production et d'en assurer la livraison finale.

e. Proposition de l'approche 2

L'AM offre la possibilité de produire des pièces en petite quantité, sur place, et seulement en cas de besoin à la demande du client, ce qui a le potentiel de simplifier significativement les chaînes logistiques. Cela inscrit à nouveau la technologie dans un vecteur d'amélioration de la performance, mais cette fois à travers une transformation de la *supply chain*. Ces gains de performance se traduisent principalement à travers une réduction des coûts, une accélération des cycles de production, et une diminution des risques.

C. Approche 3 : Évolution des produits

Dans cette approche numéro 3, l'objectif est de se distancer de la concurrence en marquant une avancée technologique portée sur la performance et l'innovation de produits. Les entreprises vont bénéficier des avantages de l'AM en terme d'économies de champ pour améliorer la performance de leurs produits existants et pour développer de nouveaux produits (Crane, 2014).

a. Réduction de masse

Les procédés de production classiques imposent des contraintes techniques qui limitent considérablement la géométrie d'une pièce. Certains procédés, tel que le moulage par injection, peuvent quand même concevoir des formes complexes, mais il y a alors un lien direct entre la complexité du moule et son coût (Gao *et al.*, 2015). A l'inverse, l'AM impose très peu de contrainte et offre aux ingénieurs une grande liberté de conception, sans augmenter le coût et le temps de production (Lindemann *et al.*, 2012). Il est alors possible de constituer des pièces structurées en forme de grilles, ou de nids-d'abeilles, qui seront composées de moins de matière que l'originale, mais tout aussi solide (Molinari, 2015). Ce type de structure a un impact direct sur le coût du composant, mais aussi sur son poids. Dans l'aérospatiale, certaines pièces peuvent obtenir un gain de masse de 60 % à 70 % lorsqu'elles sont évidées, tout en conservant la même rigidité qu'une pièce pleine (Morand, 2017).

b. Optimisation des fonctionnalités

Le fait de pouvoir imprimer des objets avec des structures complexes permet d'augmenter leur fonctionnalité (Guillouzuic, 2013). Un avantage considérable de l'AM est d'avoir accès à l'entièreté du volume de l'objet lors de sa fabrication. Cela permet de concevoir des objets avec des cloisons internes, qui peuvent servir de refroidissement ou bien contenir d'autres

éléments. Il est alors possible d'intégrer des composants, tel que des circuits électriques, des capteurs ou des micro-batteries, directement pendant la fabrication et sans étape supplémentaire (Gao *et al.*, 2015). Une autre capacité de l'AM concerne l'impression d'objets multi-matériaux et la variation graduelle de leur composition. Le concepteur d'un objet a la possibilité de définir la quantité de chaque matériau, pour chaque endroit, et d'en spécifier les propriétés telles que la dureté, la flexibilité, la couleur, etc (Gao *et al.*, 2015). Cette capacité de contrôler la forme et la composition d'un objet permet d'en augmenter les fonctionnalités et d'en optimiser la performance (Huang, 2015).

c. Impression d'assemblage

L'AM va aussi amener les ingénieurs à revoir la conception de certaines pièces qui étaient auparavant composées de plusieurs éléments. La fabrication couche par couche permet de créer certains éléments en une seule pièce unique, et non pas en un assemblage de plusieurs (Crane, 2014). Certains composants comme des injecteurs dans l'aéronautique, étaient auparavant un assemblage d'une multitude de petites pièces, mais avec l'AM, ces injecteurs sont à présent imprimables en une seule pièce (Morand, 2017). Cela ne concerne pas que les assemblages statiques, mais il est aussi possible de produire en une seule fois un assemblage de pièces s'articulant les unes avec les autres (Lindemann *et al.*, 2012). Les différents éléments du mécanisme sont directement imprimées et intégrées ensemble, tout en laissant un espace minimum garantissant leur liberté de mouvement (Gao *et al.*, 2015). Cela permet d'améliorer la performance du produit, et d'éliminer le temps et le besoin d'assemblage, ainsi que le risque d'erreur qui va avec (Michalik *et al.*, 2015).

d. Personnalisation de produits

L'AM a la capacité de produire une large variété de formes géométriques différentes sans modifications considérables dans le processus de production, ce qui permet de produire des biens à l'unité et de les personnaliser rapidement sans coûts additionnels (Crane, 2014). Cela offre la possibilité aux entreprises de personnaliser leurs produits selon les désirs de leurs clients, voir même de perfectionner certains objets par l'intermédiaire de ceux-ci (Berchon, 2015). Cette personnalisation va permettre d'augmenter la valeur du bien pour le client, sans en augmenter forcément le coût. Ce principe de customisation de masse gagne de l'intérêt dans plusieurs secteurs d'activité, tels que le secteur médical, où il est désormais possible d'imprimer des prothèses sur mesures pour chaque patient (Crane, 2014).

e. Proposition de l'approche 3

La valeur de l'impression 3D se trouve dans l'optimisation de produits existants pour en améliorer la fonctionnalité, et dans le développement de nouveaux produits qui n'étaient pas possible auparavant. Par conséquent, *l'additive manufacturing* s'inscrit ici dans un vecteur d'amélioration de la performance, de croissance et surtout d'innovation des produits, ce qui se traduit par une accélération du cycle de production, une diminution des risques et une augmentation du profit.

D. Approche 4 : Nouveaux business models

A ce stade, l'entreprise affiche clairement la volonté de bénéficier des avantages de l'AM pour améliorer sa compétitivité, mais surtout pour développer de nouveaux *business models*. Elle veut utiliser les procédés d'impression 3D pour développer de nouveaux produits et pour transformer sa *supply chain*. En effet à ce niveau de transformation, des innovations de produits impliquent plus que régulièrement des modifications de la chaîne de distribution et d'approvisionnement. L'arrivée de cette technologie va donc lui servir de levier de croissance pour non seulement bousculer la concurrence actuelle, mais aussi pour accéder à de nouveaux marchés (Cotteler *et al*, 2014).

a. Nouvelles sources de valeur

L'AM amènera les entreprises à explorer de nouveaux marchés, ce qui pourra avoir un impact sur les activités actuelles. Un secteur qui pourrait se voir développer est celui de l'économie de fonctionnalité, où par exemple, les entreprises pourraient proposer une solution intégrant la vente d'un produit et aussi un service de réparation. L'impression 3D a en effet le potentiel d'étendre la durée de vie des produits en facilitant la production de pièces de rechange, et cela localement (Despeisse, 2016). Mais on voit aussi apparaître des entreprises qui fournissent l'équipement nécessaire à la création de prototype ou de produits finis. Ces entreprises louent leur service de fabrication à d'autres sociétés qui en ont besoin, et qui elles, ne se concentrent que sur l'étape de conception et sur le marketing (Mitchell, 2015). Par exemple, Materialise, 3D Hubs, ou Kazzata, sont des entreprises qui offrent l'accès à un service d'impression 3D sans devoir investir dans le matériel nécessaire. Ce type de *business model* permet d'externaliser l'étape d'impression et d'en faciliter l'accès pour les particuliers, mais aussi pour les professionnels (Despeisse, 2016).

Une conséquence de la simplification de l'étape de production est que la valeur d'un bien se trouvera avant tout dans son design, et non plus dans l'objet lui-même. L'AM amène à un changement de la chaîne de valeur, allant de l'objet physique vers l'information permettant de le produire. Des facteurs tels que la complexité d'un bien, son importance, sa protection légale, ainsi que son degré d'innovation, auront un impact direct sur sa valeur numérique (Widmer *et al*, 2016). Du coup, nous verrons aussi apparaître des modèles économiques où les revenus proviennent de la vente de design et de leur protection, et non plus de la vente de biens finis ou de composants (Mitchell, 2015).

La capacité d'une entreprise à bénéficier des opportunités de l'AM dépendra de sa faculté d'intégration. Certaines grandes entreprises, bien que par nature innovantes, peuvent se voir bloquées par l'obligation de satisfaire leurs clients et investisseurs existants. Elles sont contraintes par leur positionnement actuel dans un marché. Par conséquent, l'intégration de l'AM se fera progressivement, par légère modification des produits, ou par le développement de nouveaux services tel que l'approvisionnement de pièces de rechange. À l'inverse, les nouvelles entreprises seront plus flexibles quant à l'utilisation de cette technologie. Elles pourront bénéficier de l'AM pour offrir de nouveaux produits et services dans de nouveaux marchés, amenant un plus grand changement du système (Despeisse, 2016).

b. Proposition de l'approche 4

Dans l'approche 4, l'AM offre simultanément des possibilités d'innovation de produits combinées avec une transformation de la *supply chain*. Cela inscrit la technologie dans un vecteur de croissance et d'innovation, ce qui permettra à l'entreprise de dépasser la concurrence et d'accéder à de nouveaux marchés.

6. Obstacles et défis

Bien que l'impression 3D présente une multitude d'avantages lui assurant un bel avenir, il existe aussi certains obstacles et défis à résoudre afin d'assurer son expansion totale.

A. Les obstacles

Les obstacles rencontrés par l'AM, concernent principalement des limites technologiques liées aux matériaux ou aux procédés de fabrication. Il s'agit néanmoins d'obstacles qui pourront être solutionnés dans le futur, en fonction des avancées scientifiques.

a. Matériaux de production

L'un des obstacles à l'expansion de l'AM concerne la qualité et la variété des matériaux disponibles sur le marché. Les industriels seront en effet moins enclins à utiliser des matériaux dont ils ne sont pas sûrs des propriétés physiques, et dont la disponibilité est moindre (Banerjee *et al*, 2015). Car même si les systèmes d'impression actuels traitent bien les plastiques, certains métaux et des céramiques, la liste des matériaux qui ne peuvent pas être imprimés reste encore longue. De plus, une majorité des procédés actuels ne peuvent traiter qu'un seul type de matériau, et certains d'entre eux souffrent encore d'un manque d'hétérogénéité au niveau de leur répartition, ce qui entraîne des propriétés mécaniques non uniformes (Gao *et al.*, 2015). Ensuite, bien que l'impression multi-matériaux soit réalisable avec certains polymères et métaux, les procédés actuels n'ont pas encore la capacité et la précision nécessaire pour traiter l'entièreté des surfaces multi-matériaux que nous trouvons autour de nous quotidiennement (Slick, 2016). La limite des matériaux est l'un des principaux obstacles à l'expansion de l'AM, il s'agit néanmoins d'un sujet en constante évolution qui voit arriver régulièrement de nouvelles solutions (Berchon, 2014).

b. Qualité de production

Un second obstacle à l'expansion de l'impression 3D est celui de la qualité de production. Les industriels ont besoin de se voir rassurer quant à la qualité, la durabilité, et la fiabilité des procédés d'impression 3D, sans lesquelles ils ne prendront pas le risque d'investir (Wing *et al*, 2015). La reproductibilité des objets n'est pas encore parfaite avec l'AM. D'une impression à l'autre, les matériaux peuvent réagir différemment en fonction de paramètres externes et présenter de légères différences physiques. La qualité de surface, qui se

caractérise par l'épaisseur d'impression, concerne aussi l'un des domaines d'amélioration. En fonction de la technologie utilisée, il peut exister un phénomène d'escalier à la surface de l'objet dû à l'impression couche par couche (Huang *et al*, 2015). Une solution potentielle est d'effectuer un travail de finition après l'impression, mais cela peut être coûteux et long (Gao, 2015). Néanmoins, la prolifération de l'AM permettra de produire plus de pièces et d'enregistrer plus d'information, permettant de développer de l'expertise. À mesure qu'une pièce est produite avec une machine, il sera possible de corriger les erreurs et de ne pas les reproduire (Wing *et al*, 2015). Pour dépasser entièrement le stade de prototypage rapide, il est important que l'AM devienne un procédé de fabrication de qualité, efficace, et qui puisse produire des pièces de façon standardisée (Huang *et al*, 2015).

c. Vitesse de production

La vitesse d'impression est l'un des autres obstacles à l'expansion de l'impression 3D, qui est encore significativement trop lente par rapport aux procédés de production classiques (Berchon, 2014). Et même si les avancées technologiques futures vont permettre d'améliorer fortement cette vitesse de production, il est peu probable que l'AM puisse produire des pièces aussi vite que les procédés industriels actuels (Campbell, 2011). Il est néanmoins important de considérer le cycle de production d'un bien dans son ensemble, et ne pas se focaliser uniquement sur la vitesse d'impression. L'AM permet de produire des pièces en une fois, et ne nécessite pas d'étape de moulage, d'usinage, ou d'assemblage, éliminant ainsi les éventuels délais entre chacune de ces étapes. De plus, les méthodes de production conventionnelles imposent une production centralisée, bien souvent à l'étranger, impliquant une perte de temps en transport (Cotteleer, 2014). Les entreprises doivent par conséquent réfléchir à l'impact réel de la vitesse dans leur production, et comment compenser cette faible vitesse d'impression avec d'autres avantages. À nouveau, il s'agit d'un sujet qui ne cesse d'évoluer et de proposer de nouvelles solutions technologiques (Lindemann *et al*, 2012).

d. Coûts de production

L'un des principaux éléments qui peut bloquer l'expansion d'une nouvelle technologie est son coût. Les coûts de l'impression 3D se divisent en trois parties principales :

- **Le prix des machines** tend à dominer la structure de coût de ce procédé de fabrication, comptant pour environ 60 - 70 % du coût de production (Douglas *et al*, 2014). Certains équipements d'impression 3D peuvent coûter plusieurs centaines de

milliers de dollars, voir même des millions de dollars (Cotteleer, 2014). Selon un rapport de Ernst & Young, le coût des machines représente une barrière pour 40 % des entreprises.

- **Le coût des matériaux** est le deuxième élément le plus onéreux dans l'AM, représentant entre 20 - 30 % du coût unitaire de production, alors qu'il ne représente que 0,2 - 2,7 % dans les procédés conventionnels (Douglas *et al*, 2014) (Cotteleer, 2014). Le prix des matériaux dédiés à l'AM reste encore très élevé, entre 50 et 100 fois plus cher que les matériaux conventionnels (Berchon, 2014). Par exemple, l'ABS se vend brut pour environ 2 \$/kg alors qu'il se vend entre 35 \$/kg et 80 \$/kg sous la forme de filament ou de poudre (Paris Innovation Review, 2014). Cette différence s'explique par la complexité des matériaux et les exigences en terme de pureté et d'homogénéité. Mais la raison principale est le faible nombre de distributeurs proposant ces matériaux, ce qui donne des prix plus élevés (Berchon, 2014). Néanmoins, le coût des matériaux devrait diminuer avec la popularisation de la technologie et l'augmentation du nombre de fabricants (Lindemann *et al*, 2012).
- **Le coût de la main d'œuvre** représente la troisième partie de la structure de coût, comptant pour environ 5 - 10 %. Bien que le procédé d'impression ne demande presque pas d'interventions humaines, les étapes avant et après l'impression ne sont pas automatisées (Lindemann *et al*, 2012). Il faut tout d'abord créer un modèle numérique en 3D, et ensuite le transformer en un fichier imprimable. Et après l'impression, certains objets demandent un travail de finition, tel qu'un nettoyage, un polissage, une inspection, etc. Chacune de ces étapes impliquent de la main d'œuvre qualifiée et donc un coût (Holweg, 2015).

Parvenir à une utilisation plus efficace de l'équipement peut jouer un rôle important dans la réduction des coûts. Par exemple, augmenter les dimensions du volume de production permettrait de répartir certains coûts fixes, tel que l'étape de chauffage, sur une plus grande quantité de production (Baumers *et al*, 2015). De plus, certaines avancées technologiques cherchent à améliorer la productivité des machines en permettant l'impression de plusieurs couches simultanément. Cela montre que, même si l'AM ne permet pas de réaliser des économies d'échelle sur l'outillage, il existe des opportunités de réduction de coûts dans l'amélioration du débit et du volume de production (Baumers *et al*, 2015).

B. Les défis

Il s'agit ici de problèmes que les entreprises rencontrent peut être déjà, mais qu'elles vont surtout rencontrer au fur et à mesure de l'expansion de *l'additive manufacturing*, pour lesquels il est important de mettre en place des solutions dès aujourd'hui.

a. Définition de normes industrielles

Lors de l'introduction de toute nouvelle technologie, l'un des freins à son expansion concerne l'absence de cadre et de normes industrielles. L'introduction d'un ensemble de normes permettra de fournir des spécifications, des caractéristiques et des lignes de conduite qui seront utilisées pour veiller à ce que les matériaux et les procédés soient adaptés à leur usage (Darwin, 2016) (Berchon, 2014). Ces normes auront l'avantage de rassurer les acteurs du secteur quant à la sécurité des matériaux et la fonctionnalité des procédés, tout en garantissant une homogénéité dans la production des pièces. Cela permettra de guider les industriels dans la bonne direction et d'accélérer la croissance de l'industrie (Lefèvre, 2016).

Actuellement, il existe deux organisations de normalisation qui sont actives au niveau de l'AM. L'ASTM (American Society of the International Association for Testing and Materials), qui a créé un comité, nommé F42. Et l'ISO (Organisation Internationale de la Normalisation), qui a développé un ensemble de normes à ce sujet, ISO/TC 261. Ces deux organismes sont de plus en plus actifs dans le domaine de l'AM. Ils ont notamment conclu un accord de coopération qui a pour objectif l'adoption de normes communes à l'échelle mondiale (Lefèvre, 2016). Néanmoins, il sera important de s'assurer que ces normes établies aujourd'hui ne deviennent pas un frein à l'innovation future, et qu'elles puissent aussi s'adapter aux besoins du marché (Tranchard, 2015).

b. Protection de la propriété intellectuelle

L'AM pousse à la distinction entre la phase de conception numérique et la phase de production physique d'un objet. Il est possible d'obtenir une œuvre seulement à l'état numérique, et de la reproduire loin de tout contrôle (Shams, 2017). Du coup, l'une des qualités de l'AM, à savoir la capacité de produire un bien n'importe où, avec n'importe quelle imprimante, peut créer des importants problèmes de propriété intellectuelle (Widmer *et al*, 2016). En effet, l'incapacité de protéger cette information pourrait exposer les entreprises à de sérieux risques. Par exemple, le fichier d'un produit pourrait être modifié et

imprimé, indépendamment de tout contrôle de qualité initialement pris par son concepteur. Et si la qualité ou la performance de l'objet se voient diminuées, cela pourrait amener à des problèmes de sécurité et impacter la réputation de la marque (Widmer *et al*, 2016). Il est donc important de contrer la production de contrefaçons, mais aussi d'éviter que les fichiers soient téléchargés ou modifiés illégalement.

Certaines solutions existent pour contrer cette production de contrefaçons, telles que des mesures d'identifications qui ont pour but d'insérer un marquage particulier dans l'objet, sans pour autant le détériorer (Ghilassene, 2014). Il existe d'autres mesures d'identification qui consiste à vérifier l'authenticité d'un fichier avant son impression. Néanmoins, traquer toutes les personnes qui utilisent des designs ne respectant pas les droits de propriété intellectuelle, ou qui utilise un scanner 3D pour créer leur propre copie digitale, représente une tâche impossible. Il est donc dans l'intérêt des entreprises d'envisager de nouvelles stratégies économiques afin de faire évoluer leur business model (Widmer *et al*, 2016).

c. Développement des ressources humaines

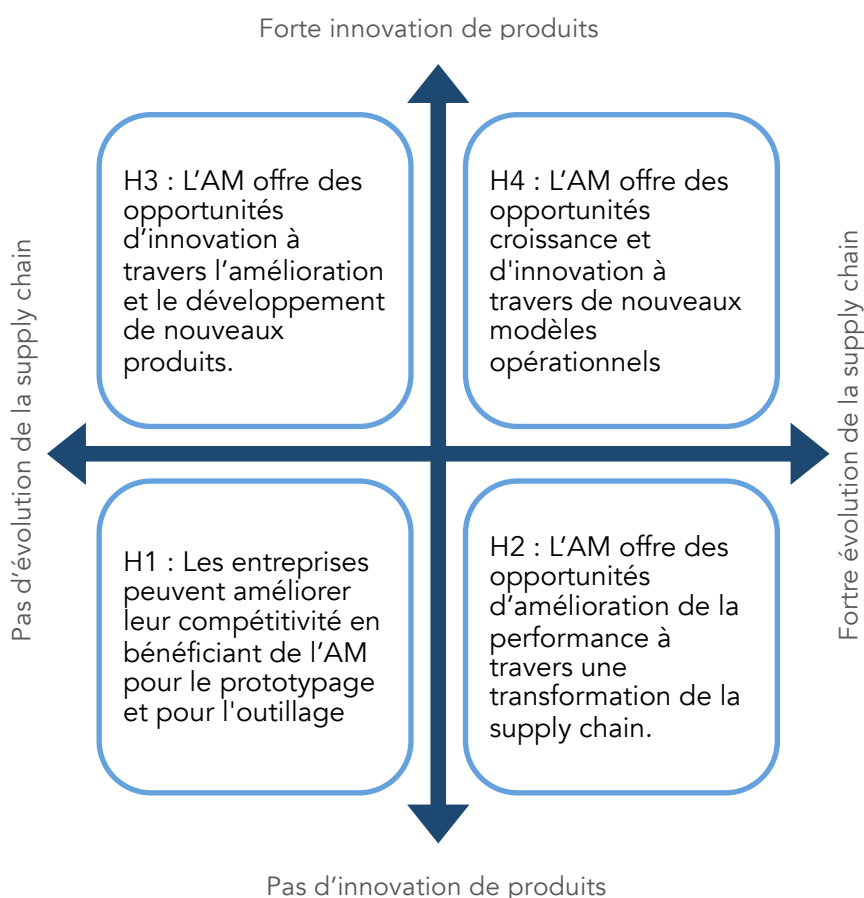
L'AM représente un tel changement dans la façon de concevoir et de distribuer des produits, qu'avoir les bonnes personnes capables d'en tirer profit est un élément critique (Vazquez *et al*, 2016). Au plus les applications de l'AM seront compliquées, au plus les exigences en terme de connaissances, de compétences, et de gestion seront importantes (Marchese *et al*, 2016). Les ingénieurs doivent changer leur façon de penser, allant d'une conception par soustraction vers une conception par addition de matière. Ils doivent ouvrir leur esprit à de nouvelles possibilités qui étaient irréalisables auparavant (Marchese *et al*, 2016). Cela leur permettra de concevoir des produits avec un objectif de performance, sans se soucier des limitations imposées par les procédés de production conventionnels (Michalik *et al*, 2015).

L'un des challenges actuel est que les étudiants fraîchement diplômés n'ont pas développé les connaissances nécessaires à l'exploitation de *l'additive manufacturing*. Il s'agit d'un domaine qui est encore très peu enseigné dans les universités. Par conséquent, la création de formations en interne au sein des entreprises sera un élément critique dans le développement des compétences nécessaires. Et au fur et à mesure que la technologie change et évolue, il sera d'autant plus important que ces employés continuent d'être formés afin de conserver leur niveau de compétence (Vazquez *et al*, 2016).

7. Conclusion et hypothèses

L'intégration de méthodes *d'additive manufacturing* dans une entreprise peut être plus ou moins complète, menant à différents avantages et inconvénients selon les cas. La revue de littérature a permis de mettre en lumière certains aspects théoriques de l'AM. Ceux-ci pourront être testés dans une situation réelle à travers les 4 approches stratégiques discutées précédemment, et représentées ici sous la forme d'hypothèses (figure 10).

Figure 9. Les 4 approches stratégiques sous la forme d'hypothèses.



Les entreprises qui désirent tirer profit de *l'additive manufacturing* devront être capables de comprendre les impacts potentiels de cette technologie sur leur industrie. Celles qui n'y parviendraient pas risquent de potentielles pertes de parts de marché suite à une intensification de la compétition. Il est fortement probable que l'expansion de l'impression 3D ne s'arrêtera pas là. À mesure que les ingénieurs développeront leurs compétences, que les procédés deviendront plus efficaces, et que les coûts diminueront, le nombre d'entreprises profitant des opportunités de l'AM ne cessera de croître (Grymol, 2015).

Partie 2 : Analyse pratique

1. Méthodologie

Dans cette partie pratique, nous nous concentrerons sur *l'additive manufacturing* dans le secteur automobile. Rappelons que l'objectif de ce mémoire est d'analyser spécifiquement le potentiel et les opportunités de l'impression 3D dans l'industrie automobile.

En ce qui concerne la collecte d'informations pour l'étude de cas, la littérature spécifie quatre méthodes qualitatives majeures : questionnaire, entretien de recherche, observation directe et étude de documents (Lejeune, 2013). Pour cette étude, le recueil d'information a été réalisé sous la forme d'une combinaison de ces quatre méthodes.

La recherche d'information a commencé par la visite de la société Sirris. Ce laboratoire a pour objectif d'aider les entreprises à élaborer des innovations technologiques, à les tester et à les mettre en application (Sirris, n.d.). Avec plus de 25 ans d'expérience dans *l'additive manufacturing*, ce laboratoire fait partie des leaders en R&D au niveau européen. Lors de la visite de son département spécialisé dans l'AM, il a été possible d'avoir une **observation directe** de leurs installations et de prendre connaissance de plusieurs projets déjà réalisés.

La deuxième étape passe par la réalisation **d'entretiens**. Les entretiens peuvent prendre une large gamme de formes, de manière totalement non-directive, à entièrement structurée (Lejeune, 2013). La méthode choisie pour la collecte des données de ce mémoire était les entretiens semi-directifs. La force de ce type d'entrevue est d'être flexible et de permettre à l'intervieweur de s'adapter à l'entretien et de diriger la conversation vers des sujets qui n'étaient pas attendus lors de la préparation du guide.

Pour la sélection de l'échantillon de personnes interrogées, nous voulions rencontrer des entreprises spécialisées dans la technologie de l'impression 3D et dans son intégration. Nous avons dès lors rencontré la société Materialise en Belgique. Cette entreprise est spécialisée depuis plus de 25 ans dans le domaine de l'AM, que ce soit de l'activité de software à la production de biens. Ensuite, nous voulions évidemment rencontrer des acteurs du monde automobile afin de connaître leur opinion sur la technologie. Un seul constructeur automobile a accepté de nous accorder une entrevue à condition de ne pas mentionner le nom de l'entreprise, ni le nom de la personne interviewée, la seule chose qui peut être divulguée est qu'il s'agit d'un très grand constructeur automobile allemand.

Le problème est que beaucoup de constructeurs « *ne répondent pas à ce genre de questions en général, car les technologies innovantes constituent la base de leur pouvoir concurrentiel dans le futur* ». Néanmoins, grâce à la connaissance de personnes en interne, il a été possible d'avoir un autre grand constructeur allemand disposé à répondre à quelques questions, mais uniquement sous la forme d'un **questionnaire**. À nouveau il a été demandé de ne pas mentionner le nom de la personne ni celui de l'entreprise

Au vu du degré de confidentialité qui entoure le sujet, il est apparu évident qu'il serait compliqué d'obtenir d'autres entretiens, qui plus est contenant de l'information importante. Par conséquent, nous nous sommes tourné vers la quatrième source d'information, **l'étude de documents**, comme il a été conseillé par le responsable de l'AM chez BMW, « *Veillez comprendre que nous ne pouvons pas répondre à ces questions. Cependant, vous pouvez trouver des réponses dans nos publications, que vous pouvez consulter dans le BMW Press Club* ». Au final, c'est un ensemble de documents et publications officiels venant des constructeurs automobiles, tel que BMW, Mercedes-Benz, Renault, ou Ford, qui viendront s'ajouter à la base de données utilisée pour cette étude de cas.

Concrètement, cette analyse se déroulera en trois parties. Premièrement, nous examinerons la situation économique de l'industrie automobile afin d'en extraire les tendances et opportunités. Deuxièmement, nous regarderons plus précisément la situation de l'impression 3D dans l'industrie automobile, le but est d'en définir l'engouement général et le degré de maturité. Et troisièmement, nous vérifierons le degré d'application des approches stratégiques définies dans la partie théorique à travers l'analyse de plusieurs exemples dans l'industrie automobile. Cela nous permettra de valider, ou non, les quatre hypothèses.

2. L'industrie automobile

De façon générale, l'industrie automobile s'est bien remise de la dernière crise économique. Le profit de l'industrie est passé de 41 milliards € en 2007, à 54 milliards € en 2012, et le futur s'annonce positif, avec un profit global estimé à 79 milliards € pour 2020. Bien que cela apparaisse comme une bonne nouvelle, il faut s'attendre à ce que la répartition géographique de ces bénéfices ne soit pas égale (Mohr *et al*, 2013).

En 2015, le marché américain atteignait un niveau historique, établissant un record des ventes avoisinant les 17,5 millions de véhicules, en hausse de 5,7 % par rapport à l'année précédente (Hirsh *et al*, 2016). Néanmoins, le niveau des ventes n'a augmenté que de 0,2 % en 2016, et on attend un ralentissement de 1 % pour l'année 2017. Il est prévu que le marché américain reste relativement stable au cours des prochaines années (Euler Hermes, 2017). En ce qui concerne l'Union Européenne, les ventes se sont améliorées depuis le ralentissement financier, avec une augmentation de 7 % en 2016. Cependant, l'industrie européenne reste coincée par les menaces de récession, projetant une croissance de 0 % pour 2017 (Euler Hermes, 2017). Les constructeurs automobiles luttent encore pour faire croître leurs économies dans certains pays, où ils font face à des pertes, des marchés fragmentés et des inefficiences dans la prolifération de leurs modèles (Hirsh *et al*, 2016). Les marchés Américain et Européen sont deux marchés développés qui sont arrivés à saturation, où l'intensité concurrentielle est élevée (Mohr *et al*, 2013). Les industriels doivent par conséquent trouver des solutions pour adapter leur production aux tendances du marché, tout en investissant dans de nouveaux produits et de nouvelles technologies (Hirsh *et al*, 2016).

Bien que ces marchés développés ne soient plus en expansion, la croissance va continuer dans les économies émergentes. Des pays comme le Brésil, la Russie, l'Afrique du Sud, mais surtout la Chine et l'Inde, offrent des opportunités de croissance (Gao *et al*, 2016). Le profit global de ces régions comptait pour seulement 30 % de la part de marché mondial en 2007, alors que celle-ci est passée à 60 % en 2012 (Mohr *et al*, 2013). Le marché chinois est notamment devenu le plus grand marché automobile au monde, avec plus de 19 millions de véhicules vendus en 2012. Néanmoins, les dernières années ont été un peu plus dures et ont montré une sous-performance. Alors que la croissance des ventes en Inde est restée à peu près stable en 2015, la croissance en Chine est descendue à 7,3 % en 2015, par rapport aux 10 % de 2014 et aux 16 % de 2013. On voit que, même s'il s'agit de marchés en croissance,

les OEMs (Original Equipment Manufacturers) devront être extrêmement précis s'ils veulent continuer de connaître un tel succès pendant les prochaines années (Hirsh *et al*, 2016).

Par conséquent, on comprend que le secteur de l'industrie automobile est plus difficile qu'il n'en a l'air. À la surface, la performance est forte, avec un niveau de ventes mondiales atteignant les 88 millions d'automobiles vendues en 2016, ce qui représente une hausse de 4,8 % par rapport à l'année précédente (Parkin *et al*, 2017). Mais la réalité n'est pas aussi simple, et les constructeurs dans l'incapacité de s'adapter et d'innover se trouveront en situation difficile. On peut donc espérer que la vague d'innovation actuelle permettra de relancer les ventes dans les pays développés, et d'accroître celles des pays émergents.

A. Tendances et opportunités

L'économie automobile est en train de changer radicalement. Les normes environnementales, les nouvelles technologies, l'évolution des tendances socioculturelles et l'évolution des marchés, sont tous des facteurs qui vont influencer l'industrie pour les années à venir.

a. Respect de l'environnement

La notion du respect de l'environnement a fortement touché l'industrie automobile. Les consommateurs prennent conscience de l'impact négatif de l'automobile sur le réchauffement climatique et sur leur santé. Cela se traduit par l'exigence de véhicules plus respectueux de l'environnement, ou par l'utilisation d'autres moyens de transport. À cela s'ajoute les réglementations relatives aux émissions de carbone qui s'intensifient. Le gouvernement Allemand s'est par exemple prononcé en faveur d'une interdiction des moteurs à combustion au sein de l'UE pour 2030 (Versieux, 2016). Mais ça ne concerne pas que l'Europe, des pays comme la Chine, les États-Unis et le Japon ont également mis en place des lois visant à réduire les émissions (Mohr *et al*, 2013). Afin de contrôler ces régulations, les tests de pollution sont devenus inévitables et les véhicules qui ne passent pas ces tests peuvent se voir interdire dans certains pays (Parkin *et al*, 2017). Par exemple, l'Inde a récemment interdit la vente de 800 000 véhicules parce qu'ils ne correspondaient pas aux nouvelles normes environnementales (Rtbf, 2017). Du coup, tous les acteurs de l'industrie ont dû se concentrer sur la production de véhicules à faible émission. Cela pousse les OEMs à investir considérablement dans le développement de moteurs électriques et hybrides, mais aussi dans les technologies permettant une réduction des masses (Mohr *et al*, 2013).

b. Développements technologiques

L'innovation et la technologie sont devenues des déterminants importants pour le marché automobile. On voit de plus en plus arriver des véhicules électriques qui sont fiables et compétitifs, dont la part de marché pour 2030 est estimée entre 10 % et 50 % (Gao *et al*, 2017). L'innovation concerne également le développement de voitures connectées et intelligentes. Il est estimé qu'en 2020, une voiture sur cinq sera connectée à internet (Mohr *et al*, 2013). Mais ce qui est remarquable avec la vague d'innovation actuelle, ce n'est pas sa vitesse ou son ampleur, mais c'est combien elle redéfinit les caractéristiques de base de l'automobile et amplifie la difficulté et les coûts de fabrication. L'intégration omniprésente d'électronique, la variété des matériaux, ainsi que les nouveaux types de groupe propulseur, sont tous des éléments qui impliquent de nouveaux composants. Pour les constructeurs automobiles, cela a un prix, à savoir un coût de fabrication 20% plus élevé que dans le passé (Parkin *et al*, 2017). À cela s'ajoute le fait que l'innovation technologique est devenue un facteur important de différenciation, et les consommateurs attendent des constructeurs de leur proposer des véhicules avec les derniers accessoires et fonctionnalités. Par conséquent, au plus une entreprise sera innovante, au plus il est probable que sa part de marché sera élevée. Il s'agit néanmoins d'un challenge pour les industriels qui ont du mal à rester à jour, et qui se voient dans l'obligation d'investir énormément dans la recherche et le développement.

c. Évolutions socioculturelles

Les technologies ont le potentiel de modifier fondamentalement les préférences des consommateurs et leurs comportements avec l'industrie automobile (Gao *et al*, 2017). L'information numérique est devenu pour beaucoup de consommateurs la première source d'information utilisée avant d'acheter un véhicule. Auparavant, les clients visitaient les concessionnaires en moyenne 5 fois avant d'acheter une voiture, mais maintenant ils ont toute l'information au préalable, et ils n'entrent dans le showroom qu'une seule fois (Parkin *et al*, 2017). Pour certains d'entre eux, la prochaine étape sera d'acheter directement leur véhicule en ligne. Les OEMs devront donc déterminer la meilleure combinaison entre points de contact en ligne et points de contact physiques, afin d'optimiser l'expérience du client (Mohr *et al*, 2013). L'objectif étant de réduire les coûts en minimisant les dépenses et le nombre de points de vente, ainsi qu'en bénéficiant d'une meilleure gestion des stocks (Parkin *et al*, 2017). Ensuite, les préférences de mobilité des consommateurs évoluent. Ils utilisent de plus en plus des modes de transport multiples pour se déplacer. Il existe des signes selon lesquels

l'importance de posséder une voiture diminue fortement au profit d'un intérêt dans la mobilité partagée. Du coup, le modèle commercial traditionnel de la vente de voitures sera complété par une gamme de solutions de mobilité sur demande. Il est estimé qu'une voiture sur dix vendue en 2030 sera un véhicule partagé (Gao *et al*, 2017). Par conséquent, on peut s'attendre à ce que la production de masse de véhicule privé laisse tout doucement place à la production de véhicule à usage spécifique.

d. Nouvelles formes de collaboration

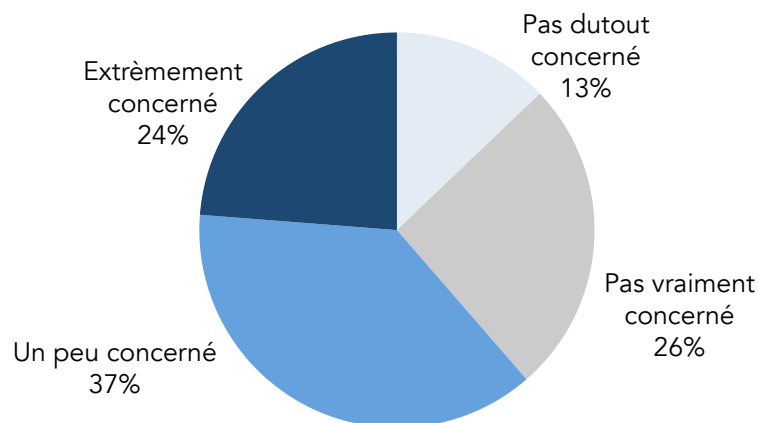
Les consommateurs sont de plus en plus exigeants, recherchant des caractéristiques uniques, des performances et des styles spécifiques à chaque région. Les constructeurs répondent à cette demande de personnalisation avec un nombre croissant de modèles différents, tous construits avec des éléments en commun. Mais continuer à créer plus de dérivés augmente la complexité de production et exerce plus de pression sur les coûts. Pour gérer cette situation, les OEMs doivent développer de nouvelles stratégies de plates-formes globales, y compris des concepts modulaires (Mohr *et al*, 2013). Ils doivent aussi envisager de coopérer avec leurs concurrents pour améliorer l'utilisation de plates-formes entre les segments, les régions et les niveaux de prix. En supprimant l'excès de capacité et en concentrant l'offre, ces solutions collaboratives offrent des opportunités d'économies de capital, particulièrement en R&D (Parkin *et al*, 2017).

Un autre domaine de collaboration concerne les logiciels informatiques, qui deviennent de plus en plus importants avec le développement de voiture connectées et intelligentes. Ces logiciels permettent d'offrir une large gamme de fonctionnalités et de services, tels que des systèmes de localisation et de sécurité avancée (Gao *et al*, 2017). Mais ce type de technologie ne fait pas partie des compétences de base des constructeurs automobiles, ce qui se traduit par une opportunité de collaboration avec les entreprises de logiciels IT (Hirsh *et al*, 2016). Ces partenariats permettront de renforcer l'évolution des écosystèmes connectés et d'accroître la valeur pour les utilisateurs, tout en minimisant les coûts. Cependant, ce type de partenariat ne se limite pas qu'aux logiciels IT, mais s'applique à toutes entreprises développant de nouvelles technologies profitables à l'industrie automobile (Gao *et al*, 2017). Par conséquent, les OEMs devront identifier quels sont les aspects technologiques qu'ils veulent sous-traiter à des entreprises spécialisées, et quels sont ceux qu'ils veulent garder en interne pour se différencier des concurrents (Parkin *et al*, 2017).

B. Conclusion sur l'industrie automobile

Dans l'ensemble, ce sont les défis liés à l'innovation technologique qui vont le plus redéfinir les structures et les relations traditionnelles de l'industrie automobile. Comme le montre le graphique ci-dessous (figure 10), 62 % des CEO d'entreprises automobiles sont en effet préoccupés par la vitesse de cette évolution technologique.

Figure 10. Est-ce que les CEO du secteur automobile se sentent concernés par la vitesse du changement technologique ?



Source: Hirsh, E., Jullens, J., Wilk, R. & Singh, A. (2016).

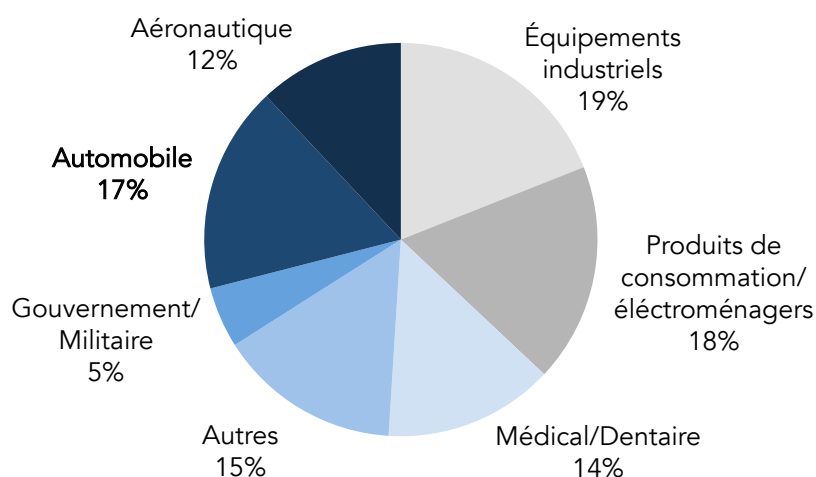
La vitesse croissante de l'innovation exigera des constructeurs automobiles de développer des cycles de production plus courts et plus flexibles. Il sera également crucial d'optimiser les performances physiques des véhicules, notamment en développant des matériaux légers et en produisant des nouveaux moteurs économes. La production de véhicules fiables, à faible émission, et à faible coût est devenue une priorité. Mais les constructeurs devront aussi se différencier avec une offre adaptée et personnalisée, le tout à moindre coût. De plus, la situation économique difficile, combinée avec l'arrivée de nouveaux fournisseurs, aura un impact direct sur l'intensité concurrentielle du secteur. Les OEMs devront ainsi définir les technologies qu'ils peuvent développer en interne, et celles qu'ils doivent externaliser.

Les sources de revenus vont évoluer, et les constructeurs dans l'incapacité de s'adapter se trouveront en situation difficile. Il n'existe pas de solution simple à mettre en place, mais la solution viendra d'une combinaison de plusieurs actions. Les décisions d'investissements et les alliances industrielles qui se font aujourd'hui détermineront les positions dominantes de demain. Par conséquent, le secteur automobile est un secteur à la recherche d'innovations, pour lequel une technologie comme l'AM semble avoir un rôle à jouer.

3. L'AM dans l'industrie automobile

L'histoire de l'impression 3D dans l'industrie automobile n'est pas récente. Les constructeurs automobiles font partie des premiers acteurs à bénéficier des technologies de prototypage rapide telle que la stéréolithographie. L'utilisation de l'impression 3D pour le développement de produits s'est déjà montrée extrêmement bénéfique dans la fabrication automobile, que ce soit pour des véhicules traditionnels, ou pour des véhicules de courses (Smartech Market, 2015). Cela place l'industrie automobile comme l'un des acteurs principaux du marché de l'impression 3D, représentant 17,3 % du marché total en 2013 (figure 11), ce qui correspondait à plus ou moins 530 millions de dollars (Wohlers, 2014).

Figure 11. Domaines d'applications de l'AM.



Source : Wohlers Report. (2014).

D'un point de vue géographique, les États-Unis et le Canada sont les principaux acteurs de l'industrie. De la conception au développement, jusqu'à la production, la technologie a permis de modifier radicalement la production de biens au cours des 10 dernières années. Le secteur de la santé est l'une des industries principales, avec une forte demande en équipements et en matériaux. Mais l'industrie automobile n'est pas en reste, des sociétés bien connues utilisent l'impression 3D depuis des décennies. Et bien que l'accent soit mis principalement sur le prototypage, de nombreux constructeurs constatent qu'ils peuvent aussi produire des pièces de qualité, et de façon plus abordables (Research and Markets, 2016).

En ce qui concerne le marché de l'impression 3D en Europe, les recherches montrent que la technologie a aussi eu un impact considérable dans la conception, le développement et la fabrication de produits. L'industrie automobile se montre comme l'un des grands acteurs en Europe, pour qui les avantages de la technologie deviennent clairs, et la demande continue d'augmenter. L'impression 3D a permis aux constructeurs d'améliorer leur produits tout en ayant un impact positif sur leur résultat financier. En dehors du prototypage rapide, le marché automobile Européen voit aussi une augmentation des dépenses en R&D pour le développement de composants plus légers (Research and Markets, 2016).

Pour les autres parties du globe, telles que le Brésil et l'Afrique du Sud, le rapport de Research and Markets constate à nouveau que les soins de santé et l'automobile sont les moteurs de l'avancement de l'impression 3D. Il y a une augmentation dans la demande de produits haut de gamme et de qualité pour ces pays. Avec l'arrivée de grandes entreprises, le revenu par habitant est en augmentation et cela permet de dépenser plus dans des secteurs comme l'automobile. Selon un rapport de Ernst & Young, environ 2,76 millions de voitures ont été vendues au Brésil en 2013. Et pour l'Afrique du Sud, KPMG prévoit une augmentation de 60 % des ventes pour la fin de 2018. Avec ces chiffres, l'utilisation de l'AM continuera d'augmenter à mesure que les fabricants recherchent des pièces légères, de qualité, et plus abordables. De façon similaire, les pays du Moyen-Orient adoptent de plus en plus l'impression 3D, notamment par sa capacité de générer des pièces personnalisées selon les spécifications de l'entreprise ou des utilisateurs finaux (Research and Markets, 2016).

A. Hype Cycle de Gartner

Afin d'obtenir une représentation de l'engouement et de l'évolution de l'AM, il est intéressant de regarder à ce qu'on appelle un 'Hype Cycle'. Il s'agit d'une représentation graphique de l'adoption des technologies, de leur maturité, et de leur évolution au fil du temps, fournissant de l'information sur leur pertinence pour résoudre des problèmes réels et exploiter de nouvelles opportunités. Chaque cycle se déroule en cinq phases (Gartner, 2017) :

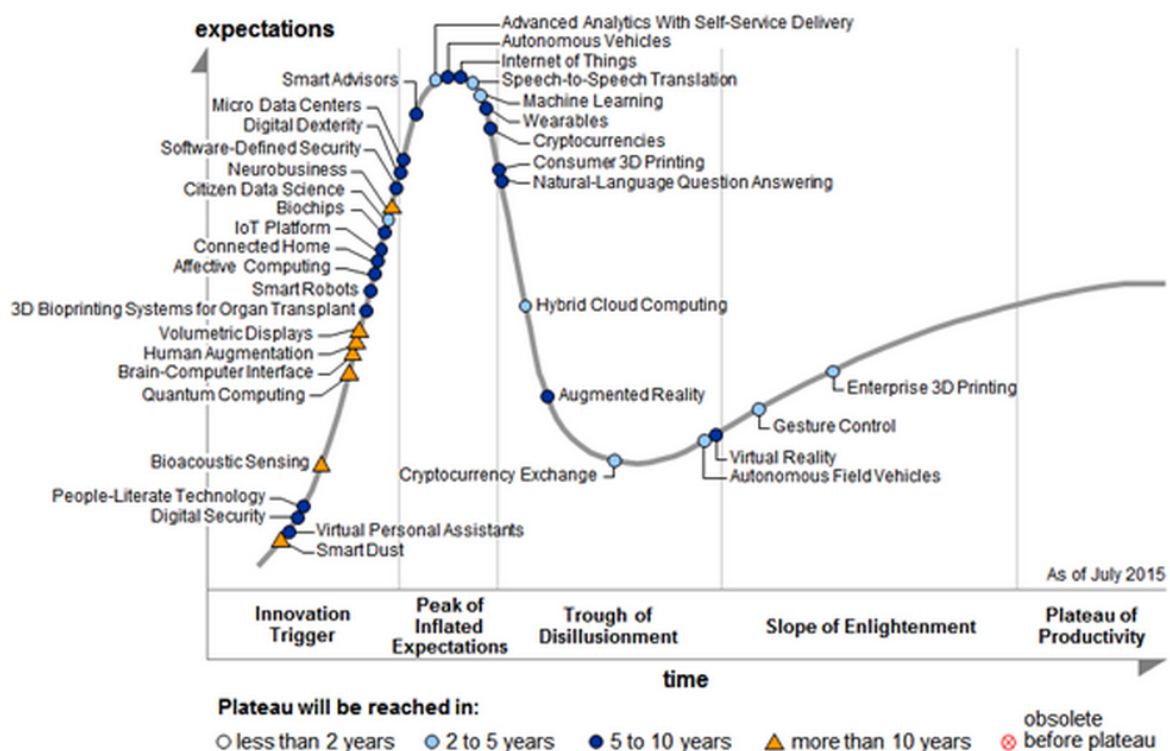
- **Phase de déclenchement** : Apparition d'une découverte technologique suscitant de l'intérêt. La technologie est encore en développement, et aucun produit n'est réellement utilisable ou commerciale.

- **Phase d'espérance** : La technologie commence à se propager et suscite énormément d'intérêt. Certaines entreprises commencent à investir et le nombre d'acteurs dans l'industrie s'accroît.
- **Phase de désillusion** : L'intérêt diminue à mesure que les expériences et les utilisations ne parviennent pas à délivrer les résultats espérés. Certaines entreprises ne survivent pas, et la majorité des autres n'investissent plus.
- **Phase de diffusion** : La technologie montre progressivement des améliorations, ses applications et avantages commencent à être mieux compris. Les produits de seconde et troisième génération apparaissent, les entreprises recommencent à investir.
- **Plateau de productivité** : La technologie est au point et ses critères de viabilité sont clairement définis. L'adoption de la technologie décolle et ses applications sont de plus en plus large.

a. Hype Cycle des technologies émergentes

Le Hype Cycle des technologies émergentes reprises dans l'étude de Gartner en 2015 inclut de nombreuses technologies, telles que la réalité augmentée, les maisons connectées, les véhicules autonomes, mais aussi l'impression 3D (figure 12).

Figure 12. Hype Cycle des technologies émergentes en 2015.



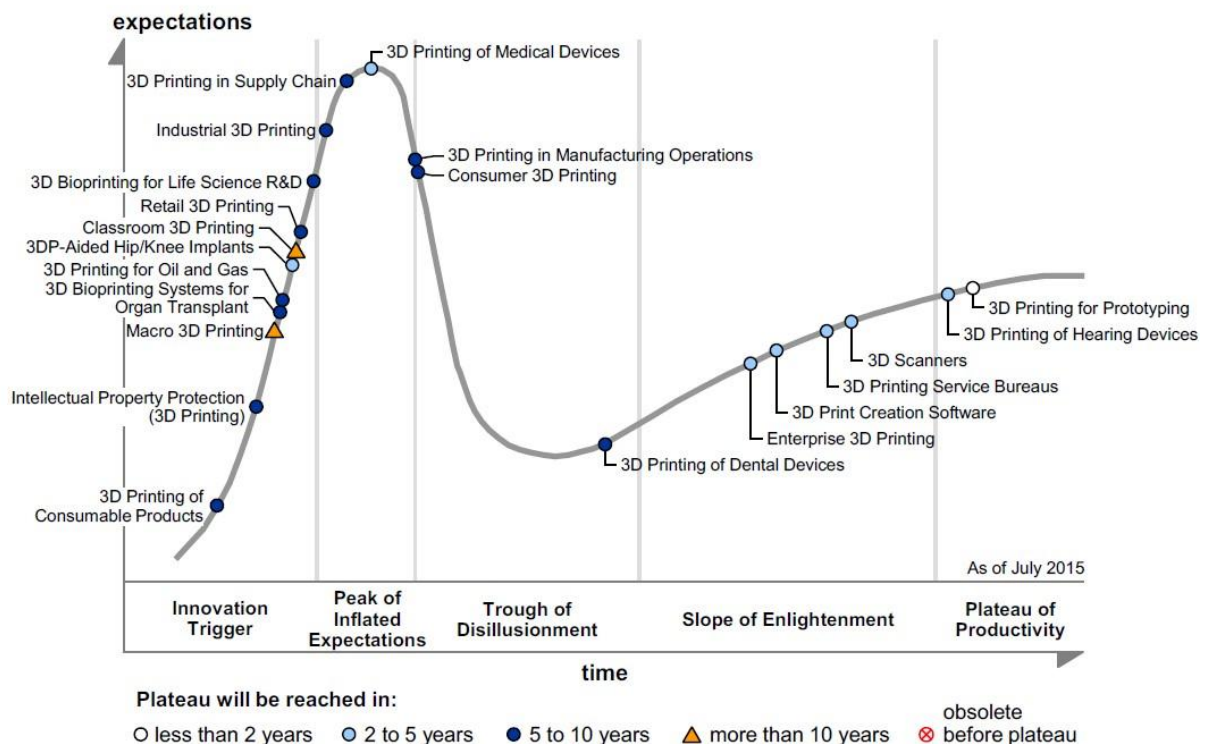
Source : <http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>

L'impression 3D pour les entreprises, et donc pour les constructeurs automobiles, se trouve dans la phase de diffusion. Il faut espérer qu'elle atteigne la phase de productivité dans un délai de deux à cinq ans, c'est à dire son niveau d'adoption global. Le potentiel de l'AM pour les applications industrielles devient de plus en plus largement compris, et un nombre croissant d'entreprises commence à la tester et la mettre en œuvre.

b. Hype Cycle de l'impression 3D

Maintenant que nous connaissons le positionnement de l'impression 3D au milieu des autres technologies, il est intéressant de regarder le hype cycle de cette technologie de façon isolée, et plus précisément ses applications dans le secteur automobile (figure 13) (Gartner, 2016).

Figure 13. Hype Cycle de l'impression 3D en 2015.



Source : <http://www.gartner.com/newsroom/id/3117917>

On retrouve trois applications dans la phase d'espérance qui peuvent concerner l'industrie automobile : l'impression 3D industrielle, l'impression 3D dans la *supply chain*, et l'impression 3D dans les opérations de fabrication. Les deux premières applications se trouvent juste avant le sommet du cycle, alors que la troisième l'a déjà passé et se trouve dans la phase descendante. Beaucoup d'industriels s'intéressent au potentiel de la technologie dans ces trois applications, mais il est probable qu'il s'ensuive une certaine désillusion. La phase

suivante sera le retour de la confiance suite aux évolutions technologique, se caractérisant par une croissance progressive.

Dans le plateau de productivité, on retrouve l'application la plus avancée, qui n'est autre que le prototypage par impression 3D. Du développement d'idées à la conception itérative, les imprimantes professionnelles aident beaucoup les concepteurs de produits à matérialiser leurs idées. L'utilisation de l'impression 3D professionnelle a été fortement stimulée par ce groupe de personnes qui travaillent avec des logiciels CAD, et qui produisent des modèles en 3D de façon journalière. Ce groupe comprend des ingénieurs, des concepteurs de produits, des architectes, des chercheurs, des animateurs et même des dentistes (Lakatos, 2015).

Bien que le prototypage soit la seule utilisation globale, au cours des 2 à 5 prochaines années, il est probable que d'autres technologies se développent en dehors de champs d'application spécialisés. « *Le progrès en dehors des imprimantes en elles-mêmes peut s'avérer être le catalyseur qui entraînera une adoption généralisée* » déclare Peter Basiliere, directeur chez Gartner. On assiste actuellement au développement de logiciels et d'outils de modélisation de qualité. Les scanners 3D deviennent aussi plus performants et plus abordables. L'émergence de sociétés fournissant un service d'impression continue également de s'accélérer. À mesure que cet écosystème évoluera autour des imprimantes, la concurrence et la demande du marché continueront d'augmenter. De façon générale, l'industrie de l'impression 3D continue de voir de la croissance, de l'innovation, et une myriade de nouveaux acteurs.

B. Un marché en croissance

Actuellement, la plupart des applications de l'impression 3D concernent le prototypage rapide. Les fabricants automobiles possèdent déjà un large éventail d'imprimantes 3D capables de produire de grands prototypes fonctionnels. Cependant, ces systèmes deviennent aussi capables d'imprimer des éléments qui peuvent être étendus à d'autres domaines d'application, tels que la fabrication d'outils spécialisés (Smartech Market, 2015). De plus, le développement de nouveaux procédés, combinés avec l'évolution des matériaux, permettront de bénéficier d'avantage de l'AM dans d'autres étapes de production (Giffi *et al*, 2014).

Les industriels prennent conscience du potentiel de l'AM en dehors du prototypage rapide, et investissent de plus en plus dans cette technologie. Le groupe PSA a récemment conclu un partenariat stratégique avec Divergent 3D pour bénéficier de l'AM dans sa production. Carlos

Tavares, du Groupe PSA, a déclaré : « *Nous avons la conviction que ces avancées spectaculaires dans le domaine de l'impression 3D permettront à notre Groupe de se positionner en leader du process de fabrication automobile. Nous disposons du potentiel pour optimiser notre empreinte industrielle, réduire le poids total du véhicule ainsi que la complexité de fabrication tout en nous permettant une flexibilité quasi infinie en termes de conception. Il s'agit d'une transformation radicale pour notre activité* ». L'objectif est de bénéficier de la technologie mise au point par Divergent 3D pour fabriquer des véhicules structurellement plus légers, plus sûrs, et plus respectueux de l'environnement. Il ne s'agit pas d'une implication mineure, mais bien d'une volonté d'intégrer l'AM dans la conception et la fabrication de l'ensemble d'un véhicule (PSA Groupe, 2016).

PSA n'est pas le seul groupe à investir dans l'AM. Au début de l'année, deux entreprises allemandes ont signé un partenariat visant à développer davantage cette technologie dans l'automobile. EOS, entreprise spécialisée dans les solutions d'impression 3D, travaillera avec Audi, l'un des principaux fabricants d'automobiles. La division de conseil d'EOS aidera le constructeur dans le déploiement global de la technologie, mais aussi dans le développement d'un centre d'impression 3D en Allemagne. Güngör Kara, de chez EOS, déclare: « *L'objectif n'est pas seulement de fournir Audi avec les systèmes d'impression et les processus adéquats, mais c'est aussi les soutenir dans le développement d'applications, dans l'élaboration de connaissances en internes, et dans la formation de leurs ingénieurs pour devenir des experts de l'AM.* ». EOS fournira donc Audi avec des équipements d'impression, mais aidera aussi l'entreprise à développer les applications appropriées pour la technologie (EOS, 2017).

Ce genre de partenariat, et de déclaration, prouve un intérêt grandissant des industriels dans l'AM, et confirme le positionnement de la technologie dans la « phase de diffusion » du hype cycle. Les avantages de l'impression 3D commencent à être mieux compris, et les entreprises recommencent à investir. Selon un rapport de Smartech Industry, les revenus de l'impression 3D dans le secteur automobile atteindront les 2,3 milliards de dollars d'ici 2021, dont \$ 530 millions proviendront de la vente de matériaux. Et d'après un rapport de Frost & Sullivan, l'impression 3D va générer 4,3 milliards de dollars dans le secteur automobile en 2025, faisant de l'industrie automobile l'un des acteurs les plus importants du marché. L'AM est donc une technologie déjà intégrée dans la plupart des processus de développement modernes, et est maintenant étendue de plus en plus à d'autres domaines d'applications.

4. Analyse des approches stratégiques

Les objectifs de chaque constructeur ne sont pas les mêmes, certains se concentrent sur l'innovation, d'autres sur le respect de l'environnement, alors que d'autre se focalisent uniquement sur la performance économique. Mais aucun d'entre eux ne peut ignorer les tendances globales de l'industrie, et dans tous les cas, l'AM peut y jouer un rôle important.

A. Approche 1 : Amélioration de la performance

L'industrie automobile est un marché en saturation, principalement dans les pays développés, ce qui implique un degré de compétitivité important. Chaque constructeur est alors constamment à la recherche de solutions pour améliorer sa capacité de production et diminuer ses coûts. En réponse à cette tendance, les constructeurs automobiles utilisent de plus en plus l'impression 3D dans les phases de développement de produits et dans la conception d'outils.

a. Prototypage rapide

Depuis les années 1980, l'industrie automobile utilise les technologies d'AM dans les phases de développement avec la création de prototypes. La capacité de produire rapidement un prototype, et à faible coût, a rendu l'utilisation de l'AM indispensable pour la conception de produits de qualité (Advanced Manufacturing Insight, 2015).

A titre d'exemple, Ford s'intéresse à l'AM depuis plus de 25 ans, et a même participé à l'invention de l'impression 3D dans les années 1980 (Ford, 2013). En 1988, le constructeur achetait la troisième imprimante 3D disponible sur le marché, et aujourd'hui, l'entreprise annonce en posséder plus de 2 000. Ces équipements d'impression sont dispersés dans les cinq centres de recherche du constructeur spécialisés dans le prototypage, produisant environ 225 000 pièces chaque année (Forsmark, 2016). Parmi ces pièces, une majorité concerne la fabrication de prototypes utilisés dans le développement de composants, tels que les collecteurs d'admission, les culasses et les bouches d'aération. La conception d'un collecteur d'admission avec les méthodes traditionnelles implique une attente d'environ 4 mois avant d'obtenir un prototype, pour un coût de 500 000 \$. Mais avec l'AM, Ford peut imprimer la même partie en 4 jours, y compris plusieurs itérations et sans limites d'outils, pour un coût de 3 000 \$ (Ford, 2013). L'impression 3D permet donc d'économiser des millions de dollars dans le processus de développement en éliminant la nécessité d'outils et de moules spéciaux, surtout pour des pièces complexes et susceptibles de changer (Automotive News, 2014).

Le gain de temps permet aussi d'accélérer le diagnostic et la résolution de problèmes. En 2010, les ingénieurs de Ford ont utilisé l'impression 3D pour résoudre rapidement un problème de bruit de frein dans le Ford Explorer peu de temps avant son lancement. Si les équipements d'AM n'avaient pas été disponibles, la société aurait dû faire face à un délai de quatre mois supplémentaires avant de lancer le nouveau véhicule sur le marché (Ford, 2013). Depuis l'utilisation de l'AM, le nombre de rappels liés à des pièces mécaniques défectueuses a considérablement diminué (Automotive News, 2014).

L'impression de prototypes ne permet pas que de réduire les coûts et les délais, mais cela permet aussi d'obtenir des produits finis de meilleure qualité. L'AM offre aux ingénieurs la possibilité d'essayer des conceptions de pièces plus innovantes, mais surtout d'en expérimenter plusieurs modèles à la fois. Les ingénieurs du groupe Fiat Chrysler ont, par exemple, pu tester simultanément une large variété de rétroviseurs différents. Le fait d'avoir une représentation physique de l'objet leur a permis d'effectuer des tests aérodynamiques et de choisir la version optimale (Automotive News, 2014). Il ne s'agit que d'un exemple parmi les nombreux tests effectués chaque jour dans le centre technologique Chrysler. Un autre exemple de test est l'impression de prototypes en plastique transparent. L'AM a permis aux ingénieurs d'examiner l'intérieur de systèmes qui étaient auparavant fermés, tels que les essieux et les pignons (figure 14). Il est à présent possible de visualiser et d'analyser pratiquement le flux des fluides dans ces deux systèmes. Une vision plus claire de ce qui se passe dans le système signifie une meilleure conception finale (3D Print, 2015).

Figure 14. Prototype en plastique transparent.



Source : <https://3dprint.com/60110/fca-3d-print-clear-test-parts>

Actuellement, presque tous les constructeurs automobiles ont fait de l'impression 3D un élément clé dans le développement de produits. Il est estimé que l'AM permet de réduire le temps et le coût de prototypage dans le secteur automobile, de 71 % et 65 % respectivement (Ersnt & Young, 2016). De nombreuses entreprises ont découvert la technologie il y a 10 ou 20 ans avec l'achat d'une petite imprimante pour un prototype spécifique. Mais avec la prise de conscience des avantages de l'AM, ces entreprises n'ont cessé d'investir dans la technologie. Aujourd'hui, les constructeurs automobiles affirment que l'AM a été transformatrice dans la fabrication des prototypes (Automotive News, 2014).

b. Conception d'outillage

Les lignes de production automobiles actuelles sont rapides, complexes et extrêmement bien chorégraphiées. Elles s'appuient sur la technologie et l'automatisation, mais aussi sur des outils et accessoires fabriqués spécifiquement pour une ligne de production, ou pour un modèle individuel (Materialise, n.d.). L'AM dispose d'un grand potentiel pour les entreprises dans la création d'outils personnalisés, de guides, de supports, etc. Avec l'impression 3D, les outils peuvent être adaptés pour répondre aux exigences de production, faisant de l'efficacité et de la performance les principaux moteurs de conception (Gangula *et al*, 2014).

Le cas de Volkswagen Autoeuropa illustre parfaitement la valeur de l'AM dans la fabrication d'outillage. Située au Portugal, la chaîne d'assemblage produit un total de 100 000 véhicules par an. Dans des opérations de fabrication à grande échelle comme celle-ci, l'outillage joue un rôle clé dans la productivité. Les outils mis à disposition des opérateurs leur permettent d'effectuer leurs tâches rapidement et précisément (Molitch-Hou, 2017). Avant d'avoir recours à l'AM, l'usine s'approvisionnait chez des fournisseurs externes pour son outillage. Ces entreprises prenaient plusieurs semaines pour fabriquer les outils en question, ce qui avait directement un impact négatif sur le flux de production de l'usine. De plus, l'externalisation s'est avérée être coûteuse, surtout si des modifications étaient requises (de Vries, 2017).

En 2014, Volkswagen Autoeuropa a décidé d'exploiter des imprimantes 3D fonctionnant avec la technologie FFF (Fused Filament Fabrication) afin d'internaliser la production d'outillage (Molitch-Hou, 2017). Aujourd'hui, l'usine dispose de 7 machines d'impression, produisant 93 % des outils qui étaient auparavant produits en externe. Cette transition a permis de réduire de 91 % les coûts de développement d'outils et de 95 % le temps de

fabrication. Grâce à cette installation, l'usine a économisé environ 150 000 € en 2016, et ce chiffre devrait atteindre les 250 000 € pour 2017 (de Vries, 2017). Parmi les outils créés, on trouve un détrompeur, il s'agit d'un dispositif facilitant le positionnement des vis lors de la fixation d'une roue (figure 15). Sous-traité, ce dispositif coûtait 800 € et prenait 56 jours. Avec l'AM, le coût est de seulement 21 €, avec un délai de 10 jours (Goehrke, 2017).

Figure 15. Détrompeur Volkswagen imprimé en 3D.



Source : <https://ultimaker.com/en/stories/43969-volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed-tools-jigs-and-fixtures>

Néanmoins, il n'est pas forcément nécessaire d'intégrer l'AM en interne pour en tirer profit. Par exemple, Volvo a travaillé en collaboration avec entreprise spécialisée dans l'impression 3D, Materialise, pour optimiser son outillage. Une étape simple, mais cruciale dans l'assemblage de toute Volvo, concerne le marquage de chaque voiture avec le logo de la marque et le modèle. Auparavant, cela était fait avec un certain nombre de guides lourds, encombrants et peu précis. Les ingénieurs de Materialise se sont penché sur le problème, et ont opté pour une combinaison de matériaux standard et d'éléments imprimés en 3D. Le cadre est formé de tubes de carbonnes, alors que les points de connexions, et les éléments de guidage sont réalisés par AM. Le résultat final est un guide qui est 48 % moins cher, 64 % plus léger, et qui atteint une tolérance inférieure à 0,2 mm (figure 16) (Materialise, n.d.). Cet exemple montre aussi qu'il ne faut pas forcément se limiter à une seule technologie et/ou à un seul type de matériaux pour obtenir un résultat optimal.

Figure 16. Gabarit Volvo imprimé en 3D.



Source : <http://www.materialise.com/en/cases/thinking-additive-how-volvo-car-gent-has-reimagined-production-fixtures>

Les avantages de l'AM ne se limitent pas à des économies de temps et de coûts, les outils imprimés en 3D sont également plus ergonomiques et plus fonctionnels. Comme le déclare Sascha Holl, de chez Opel, « *Les outils personnalisés constituent un avantage important de l'impression 3D. Nous sommes maintenant en mesure de produire des formes plus complexes que ce que nous pouvions faire via la fabrication conventionnelle. Cela nous permet d'adapter l'outil au travailleur et à une voiture spécifique* ». Étant donné que l'AM peut produire des formes complexes, les concepteurs d'outils peuvent améliorer les caractéristiques de manipulation, tout en maximisant les performances pour un usage particulier. L'entreprise a maintenant la possibilité d'impliquer les employés dans le processus de conception de l'outillage. Cela permet aux opérateurs d'évaluer les concepts, et d'utiliser leur expérience pour mettre en évidence tout problème potentiel. Avec l'AM, toute modification nécessaire dans la conception d'un outil peut être réalisée en quelques heures, ce qui en améliore considérablement l'efficacité (Wyman, 2015)

Des cas comme VW, Volvo, et Opel, montrent l'intérêt grandissant des OEMs dans l'AM. 31 % des entreprises automobiles déclarent « probable », ou « très probable », l'utilisation de cette technologie pour la fabrication d'outillage dans les 5 années à venir (Ersnt & Young, 2016). La capacité de produire de tels produits à la demande, et à faible coût, se présente comme un réel avantage pouvant accélérer le cycle de production. Et si on combine cela avec la possibilité de créer des outils complexes et personnalisés, on comprend que l'AM peut donner un avantage concurrentiel aux entreprises.

c. Conclusion de l'approche 1

Cette approche est une bonne représentation de la situation actuelle et permet de valider l'hypothèse 1. Quasiment tous les constructeurs automobiles bénéficient de l'AM pour le prototypage, et de plus en plus pour la production d'outillage. Il s'agit de deux activités où le volume de production est faible, et pour lesquelles l'AM ne présente presque que des avantages. Cette technologie permet d'accélérer le cycle de production et d'en diminuer les coûts. Elle offre aussi la possibilité de tester des pièces plus innovantes, et d'en expérimenter plusieurs modèles à la fois. Par conséquent, les entreprises peuvent bénéficier de l'AM comme un facteur d'amélioration de la performance.

B. Approche 2 : Transformation de la supply chain

Les technologies d'AM atteignent maintenant un niveau leur permettant de fabriquer des pièces finales, et le secteur automobile est à nouveau l'un des premiers à en reconnaître le potentiel (Molitch-Hou, 2016). Dans l'approche numéro 2, l'AM offre des opportunités d'optimisation de la *supply chain* sans pour autant modifier l'offre de produits. Il y a deux situations pour lesquelles l'impression 3D peut être avantageuse dans la fabrication de pièces standardisées : la production de faibles volumes, et la production sur demande.

a. Production de faibles volumes

L'impression 3D peut être une alternative rentable pour la production de composants automobiles en faible quantité. A titre d'exemple, le groupe BMW utilise l'AM pour la production de composants en petite quantité depuis 2012. En 2016, le groupe annonçait avoir imprimé plus de 10 000 pièces intégrées dans la Rolls-Royce Phantom. Parmi ces pièces, on retrouve les supports en plastique des feux de détresse, les boutons de verrouillage central, les prises électriques, etc. Depuis 2017, l'entreprise a également commencé à imprimer les supports des câbles électriques pour la Rolls-Royce Dawn (BMW Group, 2016).

L'utilisation de l'AM pour ces pièces s'explique tout d'abord par leur complexité de conception. Bien que ces composants puissent être produits avec des procédés classiques, BMW a estimé que le temps de production pouvait être considérablement réduits avec l'AM (Molitch-Hou, 2016). Mais un deuxième facteur important est la quantité d'unités produites qui est relativement faible, et pour lequel l'AM apparaît comme plus rentable. Néanmoins, l'impression 3D ne permet pas de réaliser des économies d'échelle, donc à partir d'une

certaine quantité, le coût unitaire de production avec les techniques conventionnelles deviendra plus faible. À titre d'exemple, le nombre de Rolls-Royce vendues en 2015 est de 3 785 unités (Rolls-Royce, 2016). Il s'agit d'un montant extrêmement faible quand on le compare au nombre de BMW vendues la même année, à savoir 1 905 234 unités (BMW Group, 2016). Il n'existe pas de nombre précis à partir duquel l'AM devient plus onéreuse que les techniques conventionnelles. Certaines personnes parlent de 1 000, de 10 000, ou même de 50 000 unités par an, cela dépendra de nombreux facteurs tels que la taille des composants et des matériaux utilisés.

b. Production de pièces détachées

La production de pièces détachées à la demande, est un autre sujet pour lequel l'AM est une alternative rentable. Par exemple, Mercedes-Benz utilise l'impression 3D depuis fin 2016 dans la production de pièces de rechanges pour son département camion. Le défi des pièces détachées réside dans leur capacité d'approvisionnement, et cela même pour des modèles de véhicules qui ne sont plus en production. Cela signifie que la gamme disponible comprend des pièces de rechange pour lesquelles il n'y a presque plus de demande. De plus, les équipements de production doivent souvent être conservés et maintenus pendant des années. Le fait de produire ces pièces devient donc de plus en plus onéreux. Mais avec l'AM, ces défis sont une chose du passé. Mercedes-Benz offre actuellement un catalogue de 30 pièces de rechanges pour ses camions qui peuvent être directement imprimées en 3D. Chaque pièce est maintenant disponible sur demande dans le monde entier. Parmi ces pièces, on trouve des composants en plastique de haute qualité, tels que des prises d'aération, des caches de protection, des éléments de support, etc (Daimler, 2016).

L'AM se présente ici comme une opportunité majeure pour les OEMs. Étant donné que les pièces peuvent être imprimées sur base d'un fichier numérique, il est possible de répondre de manière flexible au niveau de demande, et il n'est plus nécessaire de maintenir des stocks indéfinis. L'AM évite la production excédentaire et permet d'atteindre un équilibre entre l'offre et la demande (Gangula *et al*, 2014). Les coûts de stockage se voient épargnés tout en évitant le gaspillage de matériaux, ce qui réduit l'impact sur les coûts mais protège aussi l'environnement (Daimler, 2017). En plus de réduire les coûts, l'AM permet de gagner du temps. L'impression peut avoir lieu directement après la réception de l'ordre de fabrication dans l'usine de production la plus proche du consommateur (Daimler, 2016). « *La disponibilité des pièces peut être considérablement accélérée tout en évitant les longues*

distances de transport, ainsi que des coûts de transport élevés et les frais de douane », explique Hartmut Schick, de chez Daimler. Mercedes-Benz n'est pas le seul constructeur à saisir cette opportunité, 24 % des entreprises automobiles se disent favorable à l'utilisation de l'AM pour la production de pièces détachées dans les années à venir (Ersnt & Young, 2016).

Ensuite, l'AM combiné avec des scanners 3D, pourrait s'avérer idéal pour la production de composants qui ne sont plus disponibles sur le marché ou pour lesquels il n'existe pas de fichier CAD. Les scanners 3D peuvent créer le fichier numérique du composant, et l'AM peut ensuite le reproduire. Il s'agit d'un marché de niche pour lequel il existe une demande. L'une des difficultés quand on possède une vieille voiture est de remplacer une pièce rare pour laquelle il n'existe tout simplement pas de remplacement. Jay Leno, l'hôte d'un talk-show populaire américain, a ainsi fait appel à la société Rapidform pour reproduire un composant d'une de ses voitures datant de 1907 (Gangula *et al*, 2014).

c. Limites technologiques

De façon générale, la fabrication de biens standardisés par impression 3D ne représente pas encore une solution économiquement intéressante pour les constructeurs automobiles. Bien qu'il soit vrai que l'AM se déploie de plus en plus vers la fabrication de biens réels, les volumes de production de l'industrie automobile restent problématiques. Les équipements d'impression ne sont pas encore assez compétitifs par rapport aux techniques conventionnelles. Ils sont encore trop onéreux et souvent, pas assez rapides pour la production de biens en grande quantité. En ce qui concerne le potentiel de production locale, il subsiste un problème de qualité et de reproductibilité. Les technologies ont encore des limites, et beaucoup de constructeurs n'ont pas les capacités nécessaires à la production de pièces de rechanges performantes. Rappelons aussi que l'automobile est une industrie pour laquelle certaines pièces doivent subir de nombreux tests en vue d'être certifiées. À cela s'ajoute les problèmes de protection des données et de propriété intellectuelle, ce qui représente une menace supplémentaire. Par conséquent, beaucoup d'entreprises disposent d'équipements 3D en interne pour découvrir la technologie, mais dès qu'elles veulent un produit de meilleure qualité, elles font appel à des entreprises spécialisées.

d. Conclusion de l'approche 2

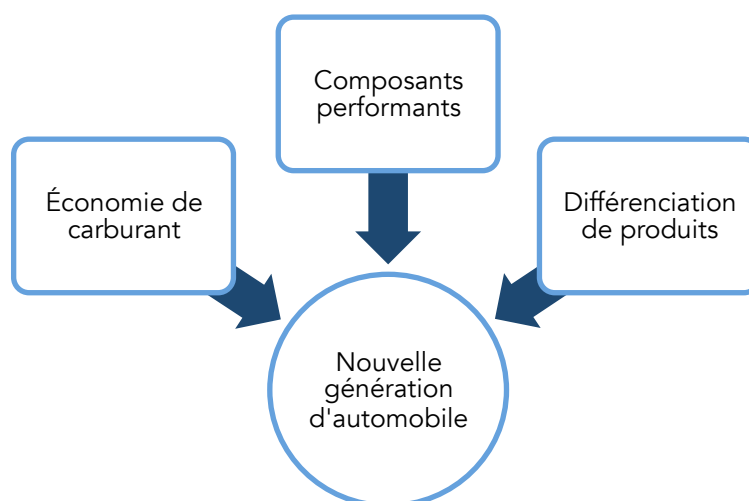
Cette seconde approche permet de valider l'hypothèse 2, mais avec un moindre impact pour l'industrie automobile. Les avantages de l'AM au niveau de la *supply chain* montrent

rapidement leurs limites face aux importants volumes de production du secteur automobile. Pour la production de biens standardisés, les techniques de production conventionnelles sont encore plus rapides et plus économes de par les économies d'échelle réalisées. Mis à part quelques exceptions de production à faible volume, il est peu probable de voir l'impression 3D se développer fortement dans la fabrication de pièces d'origines. En revanche, l'AM offre plus de potentiel pour la production de pièces détachées, et de plus en plus de constructeurs songent à l'utiliser. Les volumes de production sont plus faibles et l'impression 3D offre de nombreux avantages dans la gestion des stocks, que ce soit en terme de coût ou de disponibilité. Actuellement, il existe encore certaines limites mais cela devrait se dissiper avec les futures évolutions technologies.

C. Approche 3 : Innovation de produits

Afin de suivre les tendances industrielles actuelles, il est vital pour les constructeurs de développer la nouvelle génération d'automobiles. La figure 17 représente les trois domaines sur lesquelles les constructeurs doivent se concentrer pour développer ces voitures de demain. Elles devront tout d'abord être respectueuses de l'environnement, il s'agit d'une des contraintes les plus importantes. Mais elles devront également être performantes d'une façon générale. Et pour se développer dans cet environnement compétitif, les constructeurs devront aussi être capable de se différencier l'un des autres. Le véritable potentiel de l'AM dans un plus long terme se trouve donc dans l'approche numéro 3, à travers l'innovation de produits.

Figure 17. Les trois piliers de l'innovation automobile.



Source : SmartechMarkets Publishing. (2016).

a. Économie de carburant

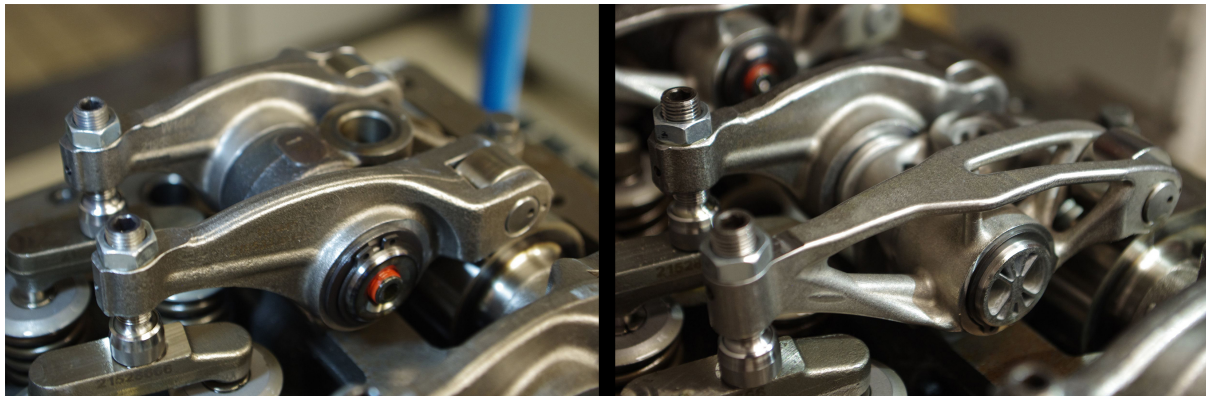
Les constructeurs automobiles sont constamment à la recherche de solutions pour réduire la consommation en carburant. Du coup, la réduction du poids des véhicules est devenue l'un des objectifs majeurs de l'industrie (Gangula *et al*, 2014). L'AM se présente ici avec un réel avantage en permettant de réaliser des pièces par optimisation topologique. Cette méthode consiste à réduire la quantité de matière au minimum, tout en respectant les contraintes de performance et en assurant le bon fonctionnement de l'objet. En définissant au préalable les différentes charges et forces supportées par une pièce, un logiciel d'optimisation peut perfectionner la structure d'une pièce de façon à ne conserver que l'essentiel de matière là où les contraintes l'imposent. L'AM et sa liberté de conception permettent d'économiser du poids en produisant des formes qu'on ne peut pas créer avec d'autres technologies.

Au vu de cet avantage, il est naturel que Ferrari ait décidé d'utiliser l'AM pour ses voitures de Formule 1. Depuis début 2017, le moteur de la Ferrari comporte des pistons en forme de nids d'abeilles composés d'un alliage en acier (Peels, 2017). L'utilisation de l'AM a permis de réduire la masse des pistons tout en conservant le même niveau de solidité. Ce type de structure est aussi une pratique courante dans l'industrie aérospatiale où le poids joue un rôle considérable sur la consommation de carburant (Gangula *et al*, 2014). Il s'agit également d'une méthode utilisée par l'entreprise Divergent 3D, avec laquelle PSA a récemment signé un partenariat. L'entreprise a ainsi pu développer un châssis imprimé en 3D tout en réduisant au minimum la quantité d'énergie et de matériaux utilisée (PSA Groupe, 2016).

L'allègement d'un véhicule passe aussi par son moteur. Renault Trucks travaille au développement de l'AM de métaux en tant que procédé de fabrication pour les moteurs de demain. Le constructeur a développé le prototype d'un moteur en utilisant exclusivement l'impression 3D. Bien que le moteur complet ne soit qu'au stade de prototypage, des culbuteurs et supports de culbuteurs en métal ont été produits par AM et testés avec succès sur un moteur classique (Renault, 2017). La figure 18 montre la différence entre les culbuteurs classiques et ceux produits par AM sur la droite. *« Le but de ce projet est de démontrer l'impact positif de l'AM métallique sur la taille et la masse du moteur. Ce procédé nous a permis de diminuer de 25 %, soit 120 kg, le poids d'un moteur quatre cylindres »*, explique Damien Lemasson, chef de projet chez Renault Trucks. L'impression 3D offre une perspective de rupture technologique pour les nouveaux moteurs, qui seraient plus légers, et

plus économes. Pour l'instant, l'AM métallique ne sera utilisée chez Renault que pour des petites séries et des applications spécifiques. Mais, après ces premiers tests concluants, le constructeur va continuer d'explorer la technologie dans le but d'augmenter la fonctionnalité et la performance de ses composants (Renault, 2017).

Figure 18. Culbuteurs classiques vs culbuteurs imprimés en 3D.



Source: <http://corporate.renault-trucks.com/fr>.

b. Composants performants

L'optimisation des composants passe par leur allègement, mais il ne s'agit pas du seul critère. Les constructeurs automobiles sont constamment à la recherche de pièces plus performantes et plus fonctionnelles. Prenons le cas des turbocompresseurs, qui sont composés de plusieurs pièces, telles qu'une chambre de compression, une turbine, un axe, un système de roulement, etc. (Kech *et al*, 2014). L'utilisation de l'AM peut être particulièrement efficace pour intégrer les différentes pièces en une seule étape, mais aussi pour créer de nouvelles fonctionnalités. Par exemple, la société MTU Friedrichshafen a développé un turbocompresseur qui contient des canaux internes servant à diminuer la température. Grâce à l'AM, les ingénieurs ont pu développer des canaux plus complexes, ce qui a permis d'améliorer le système de refroidissement et de lubrification, et donc d'éviter les dommages causés par la chaleur. L'amélioration du turbocompresseur permet de réduire la consommation et la température du carburant, ce qui réduit à son tour les émissions de CO₂ (Giet, 2014).

Bien que ce premier exemple concerne la production de compresseurs utilisés pour des véhicules militaires et agricoles, il existe aussi des entreprises qui utilisent l'AM pour la production de véhicules de route, tel que le constructeur de voitures de sport Koenigsegg. L'entreprise Suédoise a mis au point un turbo à géométrie variable qui offre le niveau de

boost idéal à chaque niveau de rotation. Au vu de la complexité du composant, le constructeur s'est rapidement tourné vers l'impression 3D pour sa fabrication. Le turbo se caractérise par deux chambres de compressions pour lesquelles il était nécessaire d'imprimer les éléments internes en même temps que le boîtier externe (Drive, 2014). L'AM a donc permis de produire l'assemblage en une seule fois, tout en assurant la mobilité des différentes pièces. À cela s'ajoute une réduction du temps de production, mais aussi des coûts, étant donné que la phase d'assemblage n'est plus nécessaire. Le pot d'échappement en titane de cette supercar a lui aussi été produit couche par couche afin de réduire son poids de 1 kilo (Koenigsegg, 2015). Cependant, il reste important de préciser que cette voiture n'a été produite qu'à 6 exemplaires, tous vendus au prix de 1 450 000 € (Caradisiac, 2015).

Figure 19. Composants de la Koenigsegg One:1 produits par AM.



Sources : <https://www.youtube.com/watch?v=DNedUZxP8NU> et <http://koenigsegg.com/details-koenigsegg-one1-exhaust-tailpiece/>.

À plus grande échelle, bien que toujours limitée, la production de composants performants est aussi un élément crucial dans le sport automobile. BMW, qui est très actif dans l'utilisation de l'AM, bénéficie notamment de la technologie pour la production de pièces utilisées dans le championnat DTM. Le constructeur annonçait en 2016 avoir produit plus de 500 turbines installées dans les pompes à eau de ses voitures de courses. Il s'agit d'une pièce mobile de haute précision, qui doit être capable de résister à des conditions extrêmes. C'est pourquoi les ingénieurs de BMW ont décidé de développer une turbine monobloc composée d'un alliage d'aluminium et produite avec le procédé SLM (Selective Laser Melting) (BMW Group, 2016). L'AM a permis une optimisation du design de la turbine avec un aérodynamisme adapté aux courses DTM. La technologie a aussi permis d'éliminer le besoin d'outillage complexe, ce qui rend la production plus rapide et plus rentable (BMW Group, 2016).

c. Différenciation de produits

Les consommateurs sont de plus en plus au courant des nouveautés technologiques, des nouveaux matériaux, design, etc. Et les constructeurs ne peuvent plus se permettre de proposer des produits standardisés et uniformes. L'AM peut jouer un rôle favorable dans la production de nouveaux matériaux et de nouvelles structures permettant aux constructeurs de se différencier. Le concept-car Peugeot Fractal en démontre les possibilités. Ce prototype est une exploration de l'AM pour l'intérieur des véhicules de demain, dont plus de 80% des surfaces ont été imprimé en 3D. L'objectif premier était de créer une immersion sonore intégrale (Materialise, nd). Pour ce faire, les parois internes ont été recouvertes par une surface irrégulière qui annule tout bruit extérieur et absorbe les échos internes. Peugeot l'affirme, ce design aurait été impossible à créer avec des méthodes conventionnelles (Peugeot, 2015).

Bien que ce premier exemple ne serve que de démonstration, l'autre marque du groupe PSA, à savoir Citroën, utilise l'AM pour l'intérieur de voitures de production. La nouvelle DS 3, édition Dark Side, intégrera des contours de poignées de porte et un insert de clé en titane, tous les deux imprimés par liage de poudre (figure 20) (PSA Groupe, 2017). Bien qu'il ne s'agisse que de deux composants de petite taille, c'est une des premières fois que nous retrouvons des pièces fabriquées par AM dans un véhicule entrée de gamme. Le prix de vente de la DS 3 est légèrement supérieur à 25 000 €, ce qui est considérablement plus abordable que la Koenisegg évoquée précédemment (Caradisiac, 2017).

Figure 20. Contour de poignées de porte de la DS3 produit par AM.



Source : <http://www.3dnatives.com/ds-3-dark-side-050620173/>.

L'AM peut aussi être utilisée pour la personnalisation de produits. Des constructeurs de luxe, tel que Bentley ou Bugatti, utilisent déjà l'AM pour customiser certains composants en fonction des demandes de leurs clients. Il s'agit d'un segment où les volumes de production sont très faibles, et pour lequel les clients sont disposés à mettre le prix (Gangula *et al*, 2014). Dans un secteur plus abordable, Mercedes-Benz utilise l'AM pour personnaliser certains composants dans ses bus. La technologie permet de produire des pièces spécifiques qui peuvent être modifiées et adaptées aux exigences particulières des clients qui le demandent. Parmi les composants personnalisables chez Mercedes-Benz Bus, et imprimés en 3D, on retrouve des tiroirs, des moulures, des accroches, etc (Daimler, 2017). Ces pièces sont fabriquées avec des composants en plastique polyamide de haute qualité, et créées avec le processus d'impression SLS (Selective Laser Sintering) (Saunders, 2017).

Cette personnalisation de véhicules peut aussi s'intégrer dans le cadre d'une mobilité partagée. Le groupe BMW a utilisé le processus d'AM pour personnaliser une partie de sa flotte de véhicules « DriveNow ». Lors d'une campagne sur les réseaux sociaux, les clients allemands ont voté et choisis des noms différents pour une centaine de Mini Cooper. La technologie d'impression 3D a ensuite été utilisée pour intégrer ces noms dans les indicateurs latéraux de chaque véhicule (BMW Group Press, 2016). L'AM se présente comme une proposition intéressante pour les clients qui attachent une importance particulière à certains aspects esthétiques et fonctionnels.

d. Limites technologiques

Il est vrai que l'impression 3D offre une grande liberté de conception et de nombreuses opportunités qui ne sont pas possible avec les autres technologies, mais il existe quand même des limites. En fonction des matériaux et des procédés, il faudra utiliser ce qu'on appelle des structures de supports. Par exemple, avec certains procédés (FDM, SLM, Stéréolithographie, etc), il est nécessaire d'imprimer une structure de support pour que la pièce principale ne se déforme pas, ou ne se déplace pas. Ce soutien doit être pensé lors de l'étape de conception afin de ne pas trop restreindre le champ de possibilités. Mais ces supports représentent aussi un coût et ils prennent du temps. Ils sont imprimés en même temps et avec le même matériau que la pièce principale, pour ensuite être jetés. Il est donc nécessaire de limiter leur usage au minimum quand on utilise des matériaux onéreux, tel que le titane.

e. Conclusion de l'approche 3

L'approche 3 reste encore peu utilisée dans le secteur automobile mais elle montre beaucoup de potentiel pour le futur, confirmant l'hypothèse 3. Bien que les importants volumes de production restent problématiques, et que la production peut s'avérer plus lente et plus chère, l'utilisation de l'AM se justifie par une innovation de produits. La production de composants de haute performance, ou de biens personnalisés, ne s'applique pas encore à un marché de masse. Actuellement, cela ne concerne qu'une clientèle minoritaire qui est disposée à mettre le prix pour acquérir un véhicule particulier. En revanche, la production de composants plus économes représente une réelle opportunité pour les constructeurs automobiles. Les normes environnementales sont de plus en plus strictes et cette tendance va continuer de s'intensifier. À long terme, l'AM va devenir de plus en plus attrayante pour la fabrication à grande échelle grâce à son potentiel de réduction de masse et, par conséquent, d'économie de carburant.

D. Approche 4 : Nouveaux business models

L'approche numéro 4 représente une évolution de *business model* à travers une innovation de produits accompagnée d'une transformation de la *supply chain* (Gangula *et al*, 2014). Il s'agit d'une approche qui n'est presque pas utilisée, mais qui offre de sérieuses pistes d'évolution pour les industriels prêts à franchir le pas. Selon Ersnt & Young (2016), 21% des entreprises automobiles voient l'AM comme une opportunité d'évolution de leur modèle d'entreprise dans les 5 prochaines années.

a. De la course à la route

L'équipe de Formule 1 McLaren-Honda est déjà active à ce stade d'évolution. Plus tôt cette année, l'écurie a signé un partenariat de quatre ans avec Stratasys qui servira de fournisseur officiel de solutions d'AM pour l'équipe de F1. « *En intégrant l'utilisation de l'impression 3D dans nos processus de fabrication, y compris la production de composants finaux, de composites, d'outils spécialisés, de gabarits de découpe, et plus, nous réduisons nos délais tout en augmentant la complexité des composants* » déclare Neil Oatley, directeur du design et du développement chez McLaren. De plus, les équipements d'impression seront implantés directement à côté du circuit, ce qui permettra de produire des pièces et des outils à la demande pour une évaluation immédiate pendant les séances d'entraînement et les courses (McLaren, 2017). Ces pièces seront conçues spécifiquement pour augmenter les performances des voitures de F1, tout en assurant une livraison rapide par l'AM.

Cet exemple intègre presque tous les avantages discutés précédemment. L'approche 1 offre une amélioration du design et une réduction du temps de développement. L'approche 3 est utilisée pour produire des pièces plus performantes et plus légères. Et finalement l'approche 2 offre des possibilités de production délocalisée, sans intermédiaire, et avec une meilleure réactivité. Maintenant, la question est de savoir comment bénéficier des leçons apprises dans le monde de la course automobile, et les transférer vers la production de véhicules en masse.

b. Personnalisation de masse

Selon Ford, le rôle de l'AM dans la fabrication automobile continuera de croître et fera partie intégrante du processus. L'avenir de l'industrie verra non seulement des voitures électriques, mais aussi des voitures personnalisables avec des composants imprimés en 3D. *« Il y a déjà des entreprises qui impriment en 3D des éléments pour les voitures. Qu'est-ce que cela signifie à long terme ? Je ne parle pas de 5 ans, cela pourrait prendre 15 ou 20 ans, mais avoir la capacité d'imprimer une voiture, et au vu de l'évolution rapide de la technologie, vous pourriez vraiment commencer à personnaliser une voiture pour des particuliers ou des besoins »* déclare Joel Piaskowski, Directeur du design chez Ford. La prochaine génération de propriétaires et de conducteurs d'automobiles sera tout à fait différente de la nôtre (Grunewald, 2015). Ils auront peut être le besoin de personnaliser leurs véhicules pour des expériences spécifiques, et des désirs qui peuvent être en dehors des modèles standards.

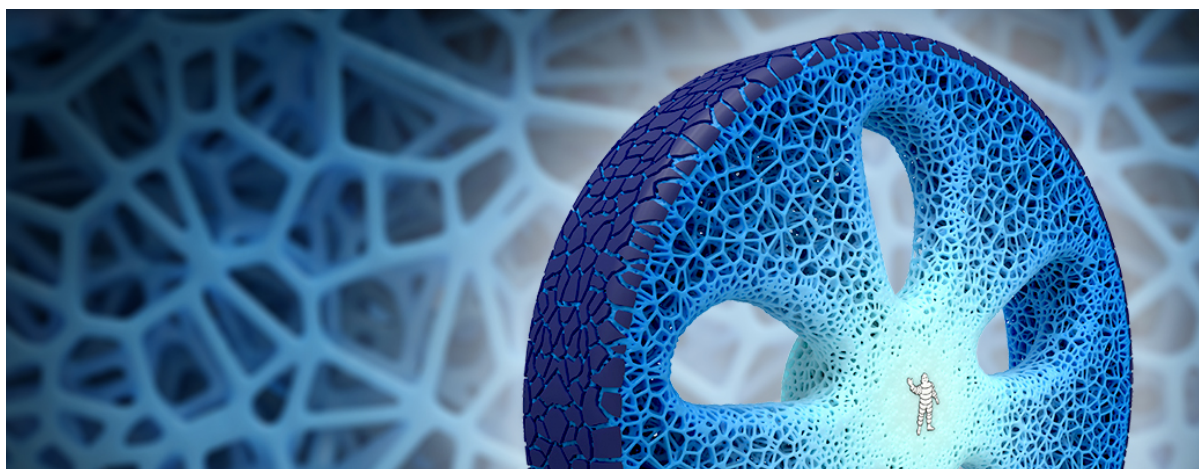
Cette vision plus futuriste de l'impression 3D décrite par Ford est également soutenue par Honda. Le constructeur japonais a aussi une vision dans laquelle les véhicules sont adaptables aux besoins des usagers. L'un des derniers concept-car de la marque, le Honda Micro, est un véhicule de petite taille dont l'extérieur est presque entièrement imprimé en 3D (3D natives, 2016). L'intérêt de cette voiture réside avant tout dans sa capacité de customisation pour s'adapter aux divers besoins de son acquéreur. Le modèle d'exhibition a été produit spécialement pour une société de confiserie avec une décoration externe personnalisée. La voiture a aussi été conçue spécialement pour répondre aux besoins de la livraison, par exemple avec l'intégration de plateaux glissants et des attaches stabilisantes. La voiture est également petite afin de circuler au mieux dans les zones de livraison étroites. (Scott, 2016). Leur point de vue est qu'avec l'AM, les options pour créer un véhicule complètement individualisé, personnalisé en apparence et en fonction, sont possible d'une manière qui n'a jamais été réalisable auparavant.

c. Vers une économie de fonctionnalité

L'économie de fonctionnalité, ou d'usage, gagne en popularité depuis quelques années. Michelin est l'une des premières sociétés à proposer à ses clients une offre répondant aux caractéristiques de ce type d'économie. L'entreprise offre depuis plusieurs années une formule tout compris de location et d'entretien destinée aux professionnels, passant d'une pure logique de vente à une culture de service (Silly, 2009). Cet exemple démontre la volonté de Michelin de développer des services et des solutions autour du pneu s'inscrivant dans un objectif d'amélioration de la mobilité (Michelin, 2016).

Michelin le sait, l'impression 3D peut l'aider dans son évolution de service. Plus tôt cette année, le producteur de pneus a dévoilé un concept de roue, nommé Vision. Il ne s'agit pas uniquement d'un pneu (tyre), ni d'une jante (wheel), mais de la combinaison des deux, c'est un tweel (figure 21). Vision est un pneu personnalisable, sans air, connecté, rechargeable, et imprimé avec des matériaux recyclés et biologiques. La conception de cette roue a été possible grâce à l'AM et à l'architecture interne alvéolaire. La jante en forme de nid d'abeille dispose d'un centre rigide qui s'adoucit progressivement à mesure qu'il se rapproche du bord extérieur. Le résultat permet d'avoir une roue solide qui garantit la sécurité et le confort des passagers (Saunders, 2017). Le concept Vision est également écologique, car il est fait de matériaux biodégradables et peut être rechargé en imprimant une nouvelle bande de roulement à chaque fois que l'ancienne est épuisée. De plus, cette surface extérieure, imprimée en 3D, peut être personnalisée pour s'adapter aux changements de besoins du conducteur, tels que des variations saisonnières (Monino, 2017).

Figure 21. Concept Michelin Vision.



Source : <http://www.michelin.com/fre/presse/Presse-et-actualites/actualite-michelin/Innovation/Concept-Vision-MICHELIN>.

Le résultat est un produit s'intégrant dans une économie de fonctionnalité, et qui est rendu possible grâce à l'AM. L'objet en lui-même est innovant, mais il s'accompagne aussi d'un service de maintenance et d'une personnalisation continue. Bien que le concept Vision ne soit pas prêt d'arriver sur les routes, Michelin offre déjà des tweels pour des véhicules industriels.

d. Conclusion de l'approche 4

Il faudra encore plusieurs années avant que les constructeurs automobiles atteignent ce niveau d'intégration. Néanmoins, c'est dans cette approche 4 que l'impression 3D offrira tout son potentiel économique, et il serait dommage de ne pas y penser. L'utilisation de l'AM dans les modèles économiques actuels peut rapidement être limitée par les contraintes technologiques discutées précédemment. La solution réside peut être dans l'évolution vers de nouveaux *business models* se rapprochant du modèle de la course automobile, ce qui confirme l'hypothèse 4. Que ce soit à travers une personnalisation de masse, ou une économie de fonctionnalité, il devient alors possible d'éviter certains obstacles et de profiter pleinement de l'AM.

5. Évolutions technologiques

Le succès de l'AM et son expansion dans l'industrie automobile dépendra fortement des évolutions technologiques à venir dans les prochaines années. Au plus il y aura de nouvelles avancées dans la recherche et le développement, au plus l'adoption sera globale.

A. Production de larges composants

L'une des limites de *l'additive manufacturing* concerne l'enveloppe de construction des technologies actuelles qui est encore limitée. Compte tenu de cette restriction, les composants plus importants qui sont produits par AM doivent être joints ensemble par des procédés classiques, tels que le soudage ou l'assemblage mécanique (Gangula *et al*, 2014).

Il existe néanmoins certaines évolutions, tel que l'équipement de stéréolithographie développé par Materialise. Ces machines, nommées Mammouth, ont une enveloppe de construction de 2 100 mm x 680 mm x 800 mm, ce qui est assez grand pour fabriquer la plupart des composants automobiles. Plus récemment, Stratasys a développé un équipement d'impression, nommé Infinite Build, qui permet de produire des composants en plastique de taille presque illimitée. À l'inverse des autres procédés d'impression, celui-ci imprime sur une plaque verticale et progresse donc horizontalement. La technologie Infinite Build a été développée spécialement pour les besoins de l'industrie aérospatiale et automobile (Stratasys, 2016). Boeing et Ford ont notamment travaillé en étroite collaboration avec Stratasys pour le développement de ce système. Grâce à ce procédé, Ford est maintenant capable de produire des outils, des fixations, et des composants de grandes tailles qui étaient impossibles auparavant en raison des contraintes de taille (Ford, 2017).

B. Amélioration de la productivité

En 2016, 94 millions d'automobiles ont été produites à l'échelle mondiale (Statista, 2017). La rentabilité de l'industrie automobile dépend du volume, et la faible vitesse de production de l'AM est encore un obstacle à son adoption dans la fabrication de pièces finales.

L'entreprise Carbon3D détient potentiellement la solution avec une technologie capable d'imprimer 25 à 100 fois plus vite que les autres procédés d'impressions, tout en procurant des finitions de surface plus lisses (Krassenstein, 2015). Ce procédé, nommé Continuous

Liquid Interface Production (CLIP), repose à la fois sur la lumière et l'oxygène pour durcir des résines photosensibles. Au lieu d'imprimer un objet couche par couche, ce qui entraîne des vitesses incroyablement lentes, ce nouveau procédé exploite la lumière pour durcir la résine et l'oxygène comme un agent inhibiteur. En apportant de l'oxygène dans l'équation, le procédé d'impression qui est traditionnellement mécanique, devient un processus photochimique (Carbon3D, 2017). Le résultat est une technique qui est plus rapide, mais qui supprime aussi l'effet de couche et procure un produit plus résistant.

Il ne s'agit pas de la seule société qui s'attaque au problème de productivité dans l'impression 3D. L'entreprise HP a récemment développé une nouvelle imprimante, sous le nom de Multi Jet Fusion, qui s'appuie sur une combinaison de liants et de fusion infrarouge pour produire des composants. Une tête d'impression dépose 30 millions de gouttes d'encre par seconde sur un lit de poudre, avant qu'un ensemble de lampes infrarouges passe et lie les agents de fusion ensemble (HP, 2017). Le résultat est un procédé 25 fois plus rapide qu'un procédé FDM, et 10 fois plus rapide que le frittage laser, le tout avec une résolution pouvant atteindre 20 microns (Goehrke, 2017).

Ces deux nouveaux procédés ont rapidement intéressé les constructeurs automobiles. Ford utilise la technologie CLIP depuis son lancement dans son centre de recherche. Il en ressort que les produits imprimés avec cette technologie ont pu être fabriqués 3 fois plus vite, et avec des matériaux plus proches de ceux utilisés dans le véhicule réel. Le procédé a été utilisé pour la création de prototypes, et pour la production d'outils spécialisés (Carbon3D, 2017). De son côté, BMW a décidé de l'utiliser directement dans la production de biens finis. Les indicateurs latéraux personnalisés pour les Mini Cooper, décrit précédemment, ont été produits avec cette technologie. En ce qui concerne le procédé Multi Jet Fusion, BMW a décidé de l'utiliser initialement dans le prototypage, mais le constructeur prévoit déjà de l'étendre à long terme dans la production en série (BMW Group press, 2016).

C. Diversification des matériaux

Une grande variété de matériaux permet d'intégrer un plus grand nombre de propriétés dans les produits finaux. Malheureusement, les applications d'AM ont souvent été restreintes en raison de la limitation des matériaux utilisables. Toutefois, la recherche a significativement progressé au cours des dernières années afin d'élargir le portefeuille de matériel disponible.

On assiste au développement de nouveaux matériaux. Par exemple, des chercheurs de l'Université de Warwick ont développé un matériau composite peu coûteux, qui est spécialement conçu pour l'impression 3D de composants électroniques (Leigh *et al*, 2012). Stratasys a récemment annoncé l'arrivée d'un nouveau thermoplastique suffisamment solide et robuste qu'il pourrait remplacer les composants métalliques. Cette force provient du fait qu'il contient 35 % de fibres de carbone, ce qui lui offre un excellent rapport rigidité/poids (Stratasys, 2017). Le carbone est beaucoup utilisé dans le sport automobile pour fabriquer des composants légers tels que des aérations, des châssis, ou bien des ailerons. L'AM commence à pouvoir en bénéficier suite au lancement d'imprimantes capables d'utiliser directement ce matériau (Jeffries, 2014). L'impression métallique de qualité est aussi un élément crucial pour l'expansion de la technologie. Le groupe BMW montre à nouveau la direction à suivre, le constructeur a dernièrement signé un partenariat avec l'entreprise Desktop Metal (BMW Group press, 2017). Il s'agit d'une startup qui a pour vocation d'accélérer l'adoption de l'impression 3D métallique grâce à la création de technologies innovantes.

De façon générale, il est attendu que le taux de croissance du secteur des matériaux augmente plus vite que celui du *hardware*. Les matériaux sont en effet des consommables qui devront être rachetés régulièrement. Les applications industrielles de l'impression 3D sont en constante augmentation, et à mesure qu'un plus grand nombre d'entreprises intègrent l'AM dans leur flux de travail, l'utilisation de consommables va exploser (Grunewald, 2016). D'un point de vue économique, le marché des matériaux devrait passer de 530,1 millions \$ en 2015 à 1 409,5 millions \$ en 2021, ce qui représente un taux de croissance de 21.6 % (Sirris, 2016). La croissance ne sera pas seulement limitée aux ventes, mais cela concernera aussi le développement continu de nouveaux matériaux spécialisés.

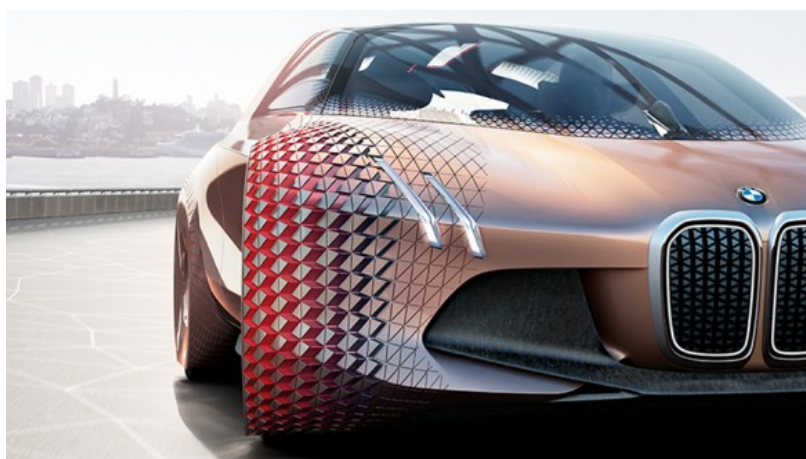
D. Impression 4D

Nous n'avons pas encore découvert tout ce qui est possible avec l'impression 3D que des scientifiques travaillent déjà sur la prochaine évolution, l'impression 4D. Cette technologie se réfère à la production d'objets imprimés en 3D pour lesquels la dimension supplémentaire est celle du temps. La forme des objets peut évoluer automatiquement, sans intervention humaine, sous l'effet d'un stimulus extérieur (Sirris, 2016).

De tels objets sont composés de matériaux intelligents qui ont une mémoire de forme. À titre d'exemple, des chercheurs du Lawrence Livermore National Laboratory, étudient l'impression 4D et les changements de forme sous l'effet de la chaleur. Ils ont travaillé sur les principes de l'origami avec des polymères à mémoire de forme pour des applications dans l'aéronautique, le médical, l'électronique et la robotique. Des scientifiques de Harvard et de l'Institut Wyss ont quant à eux développé une formulation d'hydrogel composite permettant d'imprimer des structures 3D qui changent de forme lorsqu'elles sont au contact de l'eau (Sirris, 2016). En produisant des objets statiques avec des caractéristiques dynamiques, l'impression 4D ouvre un tout nouveau champ de futures possibilités.

Bien que pour l'instant réservé aux laboratoires scientifiques, il est probable que l'impression 4D jouera un rôle clé dans les futurs véhicules de production. Le constructeur BMW imagine déjà un futur où, par exemple, la coque extérieure d'un véhicule changerait de forme en réponse aux flux d'air. Dans le domaine de l'aérodynamique, l'impression 4D pourrait jouer un rôle majeur dans l'optimisation de l'écoulement d'air. Les arches de roues pourraient également être produites de la même manière, de façon à se déplacer avec chaque mouvement de direction (figure 22). L'impression 4D fournit donc un élément de base pour définir de nouvelles normes en cinématique, performance et conception (BMW, 2016).

Figure 22. Arche de roue BMW Vision Next 100.



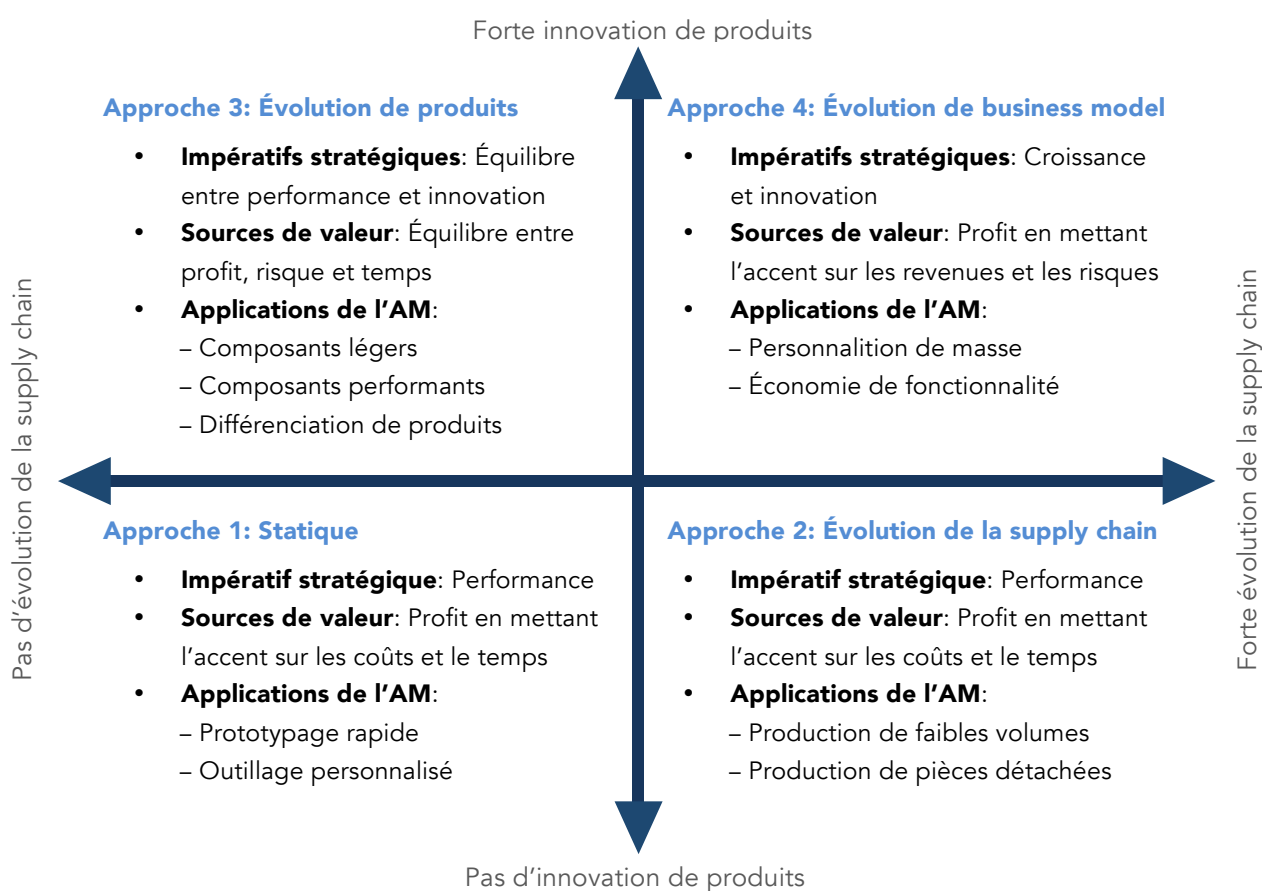
Source: <https://www.next100.bmw/en/topics/articles/material-performer.html>.

6. Conclusion

A. Analyse des résultats

Malgré les défis, l'AM reste une technologie qui peut soutenir les entreprises de l'industrie automobiles dans leur poursuite de performance, de croissance et d'innovation. Compte tenu de l'ampleur de ses capacités, les dirigeants d'entreprises devront envisager l'utilisation de cette technologie selon l'une des quatre approches stratégiques ci-dessous (figure 23).

Figure 23. Les 4 approches stratégiques de l'AM pour l'industrie automobile



À l'heure actuelle, les constructeurs automobiles utilisent principalement l'AM pour son application la plus traditionnelle, le prototypage rapide, mais aussi de plus en plus pour la production d'outillage. L'impression 3D se présente ici comme un facteur d'amélioration de la performance. En dehors de ces deux applications, il n'existe pas encore d'évolutions majeures dans les produits ou dans les chaînes logistiques, à l'exception des marchés du luxe et de la course automobile. Cependant, il est dans l'intérêt des constructeurs automobiles de ne pas ignorer les autres approches s'ils veulent bénéficier pleinement de l'AM.

À mesure que les technologies évoluent, l'AM va se placer comme un facteur de changement pour les futures opérations de l'industrie automobile. Les constructeurs devront suivre l'exemple des marchés du luxe et de la course automobile en s'aventurant dans l'approche 3. La liberté de conception de l'AM, combiné avec la réduction du temps entre les étapes de conception et de production, permettra aux OEMs de produire des pièces complexes et performantes pour une utilisation finale. L'impression 3D va notamment devenir de plus en plus attractive pour la production de biens finis grâce à son potentiel de réduction de masse et, par conséquent, d'économie de carburant. Les entreprises automobiles devront aussi envisager d'exploiter l'AM dans l'approche 2. L'impression 3D apparaît comme un moyen de production intéressant pour servir les consommateurs à des endroits plus proches de l'utilisation finale, et en faible quantité. La disponibilité des pièces détachées pourra être accélérée tout en évitant les longues distances de transport, ainsi que les coûts de stockage.

L'industrie automobile est une industrie à faible marge et à forte intensité de capital. Pour soutenir leur rentabilité et conserver leur part de marché, les OEMs devront aussi envisager de nouveaux modèles d'entreprise. La simplification des pièces permettra d'obtenir des composants plus performants, et cela réduira aussi la taille et la complexité de la *supply chain*. De plus, en réduisant l'échelle de production au minimum, et en offrant une polyvalence de production, l'AM se place comme un élément en faveur de la personnalisation de masse. À mesure que les innovations de produits supportées par l'AM augmenteront, les constructeurs automobiles auront aussi la possibilité d'améliorer leur *business model* en exploitant une chaîne logistique plus flexible et plus courte.

Afin d'assurer l'expansion de l'impression 3D, les constructeurs automobiles ne doivent pas seulement travailler sur la façon d'utiliser les avantages de l'AM, mais ils doivent aussi participer activement à la résolution des défis qui lui font face. A l'instar de Ford et Stratasys, les entreprises doivent collaborer avec les organismes de recherche pour faire évoluer la technologie sur base de leur modèle d'opération. Au lieu d'attendre que les matériaux et les procédés d'impression se développent ailleurs pour ensuite les adapter, les constructeurs automobiles doivent se demander s'ils peuvent jouer un rôle actif dans leur développement.

Alors que les techniques de fabrication traditionnelles sont profondément enracinées dans l'industrie automobile, et qu'elles continueront d'occuper une position dominante, l'impression 3D y trouve tout doucement sa place. L'AM ne deviendra probablement pas la

seule technique de fabrication à l'avenir, mais elle jouera néanmoins un rôle important dans l'évolution de l'industrie mondiale.

B. Limites et explorations futures

Il faut néanmoins nuancer les résultats issus de ce mémoire. Compte tenu des choix qui ont été faits, il est évident qu'il n'a pas été possible d'analyser tous les éléments en profondeur et qu'il existe des limites.

Premièrement, l'émergence et la popularité des technologies *d'additive manufacturing* sont en constante évolution. On assiste régulièrement au développement de nouveaux procédés et de nouveaux matériaux redéfinissant les frontières actuelles. Il y a donc une limite au caractère exhaustif de cette analyse. Dès lors, il serait intéressant de reconduire cette analyse dans quelques années pour évaluer l'évolution de l'AM et son degré d'utilisation par les constructeurs automobiles.

Deuxièmement, bien que cette analyse se concentre sur le secteur de l'automobile en particulier, elle ne permet pas de tirer des conclusions systématiques quant à l'utilisation de l'AM pour une application précise. Ce type de décision dépend de l'analyse de plusieurs variables. Les résultats ne seront pas les mêmes en fonction des matériaux, des procédés, des volumes, de la qualité, etc. La décision d'utilisation de l'AM doit par conséquent s'étudier de façon isolée en tenant compte des exigences de chaque application.

Une troisième limite concerne le manque d'information. Il aurait été nécessaire d'interroger un plus grand nombre d'entreprises pour recueillir davantage d'information confirmant la théorie ou apportant de nouveaux éléments. Néanmoins, le caractère innovant de l'AM implique un important degré de confidentialité. Les constructeurs automobiles ne sont généralement pas disposés à partager de l'information et à communiquer sur le sujet. Et même si la majorité des sources s'accordent entre elles, il n'est pas possible de tirer des conclusions génériques sur base de la quantité d'information disponible.

Ensuite, nous avons certaines notions issues de la théorie qui n'ont presque pas été évoquées dans la partie pratique. On retrouve ainsi le problème des normes industrielles, la question de propriété intellectuelle, et le développement des ressources humaines. Ces notions nécessitent

une étude plus approfondie afin de mesurer leur impact potentiel sur l'utilisation de l'AM dans l'industrie automobile.

L'impact environnemental de l'impression 3D mérite également d'être étudié plus en profondeur. On a pu déduire que l'AM pouvait avoir un impact positif en limitant les besoins de transports et en réduisant l'utilisation de matériaux, cependant, il peut aussi exister des désavantages liés à la toxicité des matériaux et à la consommation d'énergie. Il serait donc nécessaire d'analyser cet aspect en profondeur afin d'en extraire les tendances générales.

Finalement, les conclusions tirées tout au long de ce mémoire découlent de l'univers automobile. Il était indispensable de faire des choix et de se concentrer sur une industrie en particulier pour analyser le sujet en profondeur. Il serait cependant intéressant de faire cet exercice pour d'autres industries, telles que l'industrie aéronautique et l'industrie médicale. Il s'agit de deux industries qui semblent adaptées à l'utilisation de l'AM. Cela permettrait de déterminer si des conclusions différentes et si certaines peuvent être considérées comme génériques.

Bibliographie

- 3D Print. (2015). *Inside Your Axle - Fiat Chrysler Uses 3D Printing to Open a Window on Automotive Fluid Dynamics*. En ligne sur <https://3dprint.com/60110/fca-3d-print-clear-test-parts/>, consulté le 15 juin 2017.
- 3D Printing Industry. (2014). *The free beginner's guide to 3D printing*. New York, NY : 3D Printing Industry.
- 3D Natives. (n.d.). *A la découverte des matériaux d'impression 3D – Première partie: Les plastiques*. En ligne sur <http://www.3dnatives.com/materiaux-impression-3d-abs-pla-polyamides-alumide/>, consulté le 18 avril 2017.
- 3D Natives. (2017). *La DS3 Dark Side, un modèle unique grâce à la fabrication additive*. En ligne sur <http://www.3dnatives.com/ds-3-dark-side-050620173/>, consulté le 3 juillet 2017.
- 3D Natives. (2016). *Micro commuter: l'utilitaire imprimé en 3D par Honda*. En ligne sur <http://www.3dnatives.com/micro-commuter-11102016/>, consulté le 15 juillet 2017
- Additively. (n.d.). *Overview over 3D printing technologies* En ligne sur <https://www.additively.com/en/learn-about/3d-printing-technologies>, consulté le 20 mai 2017.
- Additively. (n.d.). *Stereolithography*. En ligne sur <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography>, consulté le 20 mai 2017.
- Additively. (n.d.). *Laser Sintering*. En ligne sur <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-sintering>, consulté le 20 mai 2017.
- Additively. (n.d.). *Fused Deposition Modelling*. En ligne sur <https://www.additively.com/en/learn-about/fused-deposition-modeling>, consulté le 20 mai 2017.
- Additively. (n.d.). *Material Jetting*. En ligne sur <https://www.additively.com/en/learn-about/material-jetting>, consulté le 20 mai 2017.
- Additively. (n.d.). *Binder Jetting*. En ligne sur <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>, consulté le 20 mai 2017.
- Advanced Manufacturing Insight. (2015). *Implications of Additive Manufacturing for the auto industry*. En ligne sur <http://advancedmanufacturinginsight.com/archived-articles/item/implications-of-additive-manufacturing-for-the-auto-industry>, consulté le 12 juin 2017.
- Anaqua. (2016). *Intellectual property protection and on demand 3D printing*. En ligne sur <http://www.anaqua.com/learn/anaqua-perspectives/intellectual-property-protection-and-demand-3d-printing>, consulté le 24 mai 2017.
- ASTM International. (2013). *Standard Terminology for additive manufacturing technologies. Designation F2792 - 12a*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Atzeni, E., Luliano, L., Minetola, P. & Salmi, A. (2010). Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 16, 308-317
- Automotive D&P (2011). *Rapid Prototyping: How it's done at GM*. En ligne sur <http://www.adandp.media/articles/rapid-prototyping-how-its-done-at-gm>, consulté le 28 juin 2017.
- Automotive News. (2014). *Auto industry uses 3-D printing heavily in product development*. En ligne sur <http://www.autonews.com/article/20141027/OEM06/310279987/auto-industry-uses-3-d-printing-heavily-in-product-development>, consulté le 8 juin 2017.
- Banerjee, P. & Sallomi, P. (2015). *3D opportunity for technologie, media, and telecommunications*. Westlake, TX : Deloitte University

- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C. & Hague, R. (2015). The cost of additive manufacturing: Machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological forecasting and social change*, 102, 193-201.
- Berchon, M., Luyt, B. (2014). *L'impression 3D*. Paris: Eyrolles
- BMW Group Press. (2016). *Series components made by 3D printers: BMW Group expands use of additive manufacturing processes*. En ligne sur <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0261924EN/series-components-made-by-3d-printers:-bmw-group-expands-use-of-additive-manufacturing-processes?language=en>, consulté le 29 juin 2017.
- BMW Group Press. (2016). *BMW Group achieves fifth consecutive record sales year*. En ligne sur <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0249765EN/bmw-group-achieves-fifth-consecutive-record-sales-year?language=en>, consulté le 29 juin 2017.
- BMW Group Press. (2016). *Racing technology right from the 3D printer: BMW makes water pump wheel for DTM racecars using additive production method*. En ligne sur <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0215062EN/racing-technology-right-from-the-3d-printer:-bmw-makes-water-pump-wheel-for-dtm-racecars-using-additive-production-method>, consulté le 29 juin 2017.
- BMW Group Press. (2017). *BMW I Ventures announces strategic investment in Desktop Metal*. En ligne sur https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0267766EN_US/bmw-i-ventures-announces-strategic-investment-in-desktop-metal?language=en_US, consulté le 29 juin 2017.
- BMW Next 100. (2016). *A new dimension: how 4D printing will change the world*. En ligne sur <https://www.next100.bmw/en/topics/articles/4d-printing.html>, consulté le 18 juillet 2017
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., Garret, B. (2011). Could 3D printing change the world?. *Strategic Foresight Report - Atlantic Council*.
- Caradisiac. (2015). *Genève 2014: Koenigsegg One:1*. En ligne sur <http://www.caradisiac.com/Geneve-2014-Koenigsegg-Agera-One-1-les-photos-et-infos-officielles-92810.htm>, consulté le 17 juin 2017.
- Caradisiac. (2017). *La DS3 en série spéciale Dark Side*. En ligne sur <http://www.caradisiac.com/la-ds-3-en-serie-speciale-dark-side-114609.htm>, consulté le 19 juin 2017.
- Carbon3D. (2017). *Our process*. En ligne sur <http://www.carbon3d.com/clip-process>, consulté le 7 juillet 2017.
- Carbon3D. (2017). *Ford Motor company on the road to 3D manufacturing*. En ligne sur <http://www.carbon3d.com/stories/ford-motor-company-on-the-road-to-3d-manufacturing/>, consulté le 7 juillet 2017
- Castells, R. (2016). DMLS vs SLM 3D printing for metal manufacturing. En ligne sur <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>, consulté le 12 juin 2017
- Chantrel, F. (n.d.). *Différence entre ABS et PLA*. En ligne sur <http://www.monunivers3d.com/guide/abs-pla/>, consulté le 26 mai 2017
- Cotteleer, M., Crane, J., & Neier, M. (2014). *3D opportunity in tooling*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Cotteleer, M., Coykendall, J., Holdowsky, J., & Mahto, M. (2014). *3D opportunity in aerospace and defense*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Cotteleer, M., Kotek, B., & Snyder, G. (2014). *3D opportunity in medical technology*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Cotteleer, M., Holdowsky, J., & Mahto, M. (2014). *The 3D opportunity primer: the basics of additive manufacturing*. Westlake, TX : Deloitte University.

Cotteleer, M. & Joyce, J. (2014). *3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth*. Deloitte Review.

Cotteleer, M. (2014). *3d opportunity for production. Additive manufacturing makes its case*. Westlake, TX : Deloitte University

Crane, J., Crestani, R., & Cotteleer, M. (2014). *3D opportunity for end-use products*. Westlake, TX : Deloitte University.

D'Aveni, R. (2015). *The 3-D printing revolution*. En ligne sur <https://hbr.org/2015/05/the-3-d-printing-revolution>, consulté le 7 mai 2017

Daimler. (2016). Mercedes-Benz Trucks uses pionerring future technology: 3D printing: truck spare parts available on demande. En ligne sur <http://media.daimler.com/marsMediaSite/searchresult/searchresult.xhtml?searchString=3D+printing&searchId=0&searchType=detailed>, consulté le 29 juin 2017.

Daimler. (2017). Daimler Buses fulfilling customers' individual wishes for the first time with 3D printing technology. En ligne sur <http://media.daimler.com/marsMediaSite/searchresult/searchresult.xhtml?searchString=3d+printing&searchId=0&searchType=detailed>, consulté le 29 juin 2017.

Darwin, J. (2016). *3 obstacles to the growth of 3D printing*. En ligne sur <http://www.nebrskamanufacturing.com/2016/04/3-obstacles-to-the-growth-of-3d-printing/>, consulté le 19 mai 2017.

Daumas, J. (2006). Consommation de masse et grande distribution: Une révolution permanente (1957-2005). *Vingtième Siècle. Revue d'histoire* 2006/3 (no91), p. 57-76.

De Vries, C. (2017). *Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures*. En ligne sur <https://ultimaker.com/en/stories/43969-volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed-tools-jigs-and-fixtures>, consulté le 29 juin 2017

Despeisse, M. & Ford, S. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of cleaner production*, 137, 1573-1587.

Douglas, T. & Gilbert, S. (2014). Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. *NIST Special Publication*, 1176.

Drive. (2014). *The 3D printed variable turbo*. En ligne sur <https://www.youtube.com/watch?v=DNedUZxP8NU>, consulté le 2 juillet 2017.

Dubois, P., Aoussat, A. & Duchamp, R. Prototypage rapide, généralités. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique*, pp.1 -10, 2000.

EOS. (2017). *Audi and EOS: Development partnership focuses on holistic approach for metal-based additive manufacturing*. En ligne sur <https://www.eos.info/press/development-partnershi-between-audi-and-eos>, consulté le 13 juin 2017.

Euler Hermes. (2017). *Global automotive report*. En ligne sur <http://www.eulerhermes.com/economic-research/sector-risks/Global-Automotive-Report/Pages/default.aspx>, consulté le 6 juin 2017.

Farinia Group. (n.d.). Available Materials for Metal additive manufacturing: characteristic & applications. En ligne sur <http://www.farinia.com/additive-manufacturing/3d-materials/characteristics-and-applications-of-available-metals-for-additive-manufacturing>, consulté le 26 mai 2017.

Ford. (2013). *Ford's 3D-printed auto parts save millions, boost quality*. En ligne sur https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2013/12/12/ford_s-3d-printed-auto-parts-save-millions--boost-quality.html, consulté le 19 juin 2017.

Ford. (2017). *Ford tests large-scale 3D Printing with light-weighting and personalization in mind*. En ligne sur <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2017/03/06/ford-tests-large-scale-3d-printing.html>, consulté le 19 juin 2017.

Forsmark, J. (2016). Additive Manufacturing at Ford Motor Company: past, present, and future. En ligne sur http://www.sme.org/uploadedFiles/Smart_Manufacturing_Education_Series/Forsmark.pdf, consulté le 19 juin 2017.

France, A. (2015). *Pratique de l'impression 3D*. Paris: Eyrolles

Frost & Sullivan. (2016). *Global additive manufacturing market, forecast to 2025*. En ligne sur <https://www.frost.com/sublib/display-report.do?id=MB74-01-00-00-00>, consulté le 21 juin 2017.

Gangula, B., Giffi, C., & Illinda, P. (2014). *3D opportunity in the automotive industry*. Westlake, TX : Deloitte University

Gao, P., Mohr, D., Kaas, H., Wee, D. & Möller, T. (2016). *Automotive revolution - perspective towards 2030*. Advanced industries: McKinsey & Company.

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K. Chen, Y., Williams, C., Wang, C., Shin, Y., Zhang, S., & Zavattieri, P. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided-Design*, 69, 65-89.

Gartner. (2017). *Gartner Hype Cycle*. En ligne sur <http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/hype-cycle.jsp>, consulté le 12 juillet 2017.

Gartner. (2015). *Gartner's 2015 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies the Computing Innovations That Organizations Should Monitor*. En ligne sur <http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>, consulté le 12 juillet 2017.

Gartner. (2015). *Gartner Says Medical Applications Are Leading Advancement in 3D Printing*. En ligne sur <http://www.gartner.com/newsroom/id/3117917>, consulté le 12 juillet 2017.

Ghilassene, F. (2014). *Impression 3d et propriété intellectuelle: un problème, des solutions*. En ligne sur <http://parisinnovationreview.com/2014/12/16/impression-3d-pi/>, consulté le 25 mai 2017.

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer

Giet, S. (2014). *Can 3D printing make economical auto parts?* En ligne sur <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/8765/Can-3D-Printing-make-Economical-Auto-Parts.aspx>, consulté le 23 juin 2017.

Goehrke, S. (2017). *Desktop 3D printing on the automotive assembly line - A few questions for: Volkswagen Autoeuropa*. En ligne sur <https://www.3dprint.com/178994/volkswagen-autoeuropa-ultimaker/>, consulté le 19 juin 2017.

Goehrke, S. (2017). *HP's Multi Jet Fusion technology remaking the landscape of 3D printing*. En ligne sur <https://3dprint.com/172448/hp-remaking-the-landscape/>, consulté le 16 juillet 2017.

Grunewald, S. (2015). *Ford sees 3D printing as part of the future of car design & end-use vehicle components*. En ligne sur <https://3dprint.com/59055/ford-3d-printing-future-cars/>, consulté le 11 juillet 2017.

Grunewald, S. (2016). *The 3d printing materials market is expected to expand significantly in the next four years*. En ligne sur <https://3dprint.com/133406/3d-printing-materials-market/>, consulté le 25 mai 2017.

Grynol, B. (2015). *Disruptive Manufacturing. The effects of 3D printing*. Westlake, TX : Deloitte University

Guillouzouic-Le Corff, A. (2013). *L'impression tridimensionnelle, une technologie clé pour les usines du futur*

?. *Annales des Mines - Réalités industrielles* 2013/4, p. 88-97.

Hernandez, A. & Wong, K. (2012). A review of additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 10.

Heutger, M., Kuckelhaus, M. (2016). 3D printing and the future of supply chains. *DHL Trend Research*.

Hiemenz, J. (2013). *3D printing jigs, fixtures and other manufacturing tools*. En ligne sur <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/White%20Papers/Rebranded/SSYSWP3DPrintingJigsFixtures0313.pdf?v=635004364020117830>, consulté le 23 mai 2017.

Hirsh, E., Jullens, J., Wilk, R. & Singh, A. (2016). *Automakers and suppliers can no longer sit out the industry's transformation*. En ligne sur <https://www.strategyand.pwc.com/trends/2016-auto-industry-trends>, consulté le 14 juin 2017.

Holweg, M. (2015). The limits of 3D printing. En ligne sur <https://hbr.org/2015/06/the-limits-of-3d-printing>, consulté le 29 mai 2017.

Hopkinson, N. & Dickens, P. (2003). Analysis of rapid manufacturing - using layer manufacturing processes for production. *Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217, 31-39.

HP. (2017). *Présentation de la solution d'impression 3D HP Jet Fusion*. En ligne sur <http://www8.hp.com/be/fr/printers/3d-printers.html>, consulté le 16 juillet 2017.

Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., & Donmez, A. (2015). Additive manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 137(1), [014001].

Jeffries, A. (2014). *New 3d printer can print in carbon fiber*. En ligne sur <https://www.theverge.com/2014/1/29/5357186/new-3d-printer-can-print-in-carbon-fiber>, consulté le 17 juillet 2017.

Johnson, G., Whittington, R., Scholes, K., Angwin, D. & Regnér, P. (2014). *Stratégique*. Pearson : France.

Kech, J., Hegner, R. & Männle, T. (2014). *Turbocharging: key technology for high-performance engines*. En ligne sur http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/whitepapers/3100641_MTU_General_WhitePaper_Turbocharging_2014.pdf, consulté le 17 juin 2017.

Koenigsegg. (2015). *Details - Koenigsegg One:1 exhaust tailpipe*. En ligne sur <http://koenigsegg.com/details-koenigsegg-one1-exhaust-tailpipe/>, consulté le 17 juin 2017.

Krassenstein, B. (2015). Carbon3D unveils breakthrough CLIP 3D printing technology. En ligne sur <https://3dprint.com/51566/carbon3d-clip-3d-printing/>, consulté le 18 juillet 2017.

Lakatos, D. (2015). *After the hype hangover: What's next for 3D printing and additive manufacturing?* En ligne sur <https://engineering.formlabs.com/3d-printing-after-the-hype-hangover-8b8a5504a554>, consulté le 12 juillet 2017.

Laser Institute of America. (2012). *The history of laser additive manufacturing*. En ligne sur https://www.lia.org/sites/default/files/pdf/LIA%20Today%20Jan-Feb%2712_FINAL.pdf, consulté le 26 mai 2017.

Leandri, A. (2015). *What can additive manufacturing do for tooling?* En ligne sur <https://3dprint.com/55676/additive-manufacturing-tooling/>, consulté le 17 mai 2017.

Lee, P., Stewart, D. (2015). *3D printing is a revolution: just not the revolution you think*. London : Deloitte

- Lefèvre, G. (2016). *Réglementation de la fabrication additive et de l'impression 3D*. En ligne sur <http://www.a3dm-magazine.fr/reglementation-de-la-fabrication-additive-et-de-limpression-3d/>, consulté le 12 juin 2017.
- Leigh, S., Bradley, R., Purssell, C., Billson, D. & Hutchins, A. (2012). *A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors*. PLoS ONE 7(11): e49365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049365>, consulté le 17 juillet 2017.
- Lindemann, C., Jahnke, U., Moi, M. & Koch, R. (2012). Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. *Solid Freeform Fabrication Proceedings; Annual international solid freeform fabrication symposium*, 177-188.
- Louben, A. (2016). *Les nouveaux matériaux de l'impression 3D*. Le focus: Techniques de l'ingénieur
- Marchese, K., Crane, J., & Haley, C. (2015) *3D opportunity for the supply chain*. Westlake, TX : Deloitte University.
- Materialise. (n.d.). *The Peugeot Fractal concept car: 3D printing acoustic interiors*. En ligne sur <http://www.materialise.com/en/cases/peugeot-fractal-concept-car-3d-printing-acoustic-interiors>, consulté le 21 mai 2017.
- Materialise. (n.d.). *Thinking additive: How Volvo car Gent has reimagined production fixtures*. En ligne sur <http://www.materialise.com/en/cases/thinking-additive-how-volvo-car-gent-has-reimagined-production-fixtures>, consulté le 24 juin 2017.
- McLaren. (2017). *McLaren deploys stratasy's additive manufacturing to improve 2017 car performance*. En ligne sur <http://www.mclaren.com/formula1/partners/stratasy/mclaren-deploys-stratasy-additive-manufacturing-improve-2017-car-performance/>, consulté le 15 juillet 2017.
- Michalik, J., Joyce, J., Barney, R. & McGune, G. (2015). *3D opportunity for product design. Additive manufacturing and the early stage*. Westlake, TX : Deloitte University
- Michelin. (2016). *Nous demain*. En ligne sur <http://www.michelin.com/fre/groupe-michelin/strategie/Nous-demain>, consulté le 17 juillet 2017.
- Mitchell, R. (2015). What business models will emerge around 3D printing? *SAP Center for Business Insight*, No 157.
- Mohr, D., Müller, N., Krieg, A., Gao, P., Kaas, H., Krieger, A. & Hensley, R. (2013). *The road to 2020 and beyond: what's driving the global automotive industry?* Advanced industries: McKinsey & Company.
- Molinari, L. (2015). *L'impression 3D dans une perspective de développement durable*. Le focus: Techniques de l'ingénieur
- Molitch-Hou, M. (2017). *Volkswagen Autoeuropa 3D prints manufacturing tools to save thousands of euros*. En ligne sur http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14729/Volkswagen-Autoeuropa-3D-Prints-Manufacturing-Tools-to-Save-Thousands-of-Euros.aspx#at_pco=smlwn-1.0&at_si=59500a030548e96c&at_ab=per-2&at_pos=0&at_tot=1, consulté le 3 juillet 2017.
- Molitch-Hou, M. (2016). *Under the hood: BMW talks in-house 3D printign*. En ligne sur <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/12856/Under-the-Hood-BMW-Talks-In-House-3D-Printing.aspx>, consulté le 1 juillet 2017.
- Monino, A. (2017). *Tweel, the 3D printed airless wheel that will change the automobile world*. En ligne sur <https://www.ennomotive.com/tweel-3d-printed-airless-wheel/>, consulté le 17 juillet 2017.
- Morand, P., Rosenberg, J. & Turcq, D. (2017). Fabrication additive: où en sommes-nous ? *Annales des Mines - Réalités industrielles* 2017/4, p. 113-116.
- Paris Innovation Review. (2014). *Les défis industriels de l'impression 3D*. En ligne sur

<http://parisinnovationreview.com/2014/04/10/impression-3d-defis-industriels/>, consulté le 12 mai 2017.

Parkin, R., Wilk, R., Hirsh, E. & Singh, A. (2017). 2017. *Automotive industry trends. The future depends on improving returns on capital*. En ligne sur <https://www.strategyand.pwc.com/trend/2017-automotive-industry-trends>, consulté le 19 juin 2017.

Peels, J. (2017). *3D Printing in Formula 1: Ferrari to 3D print pistons*. En ligne sur <https://3dprint.com/163734/ferrari-3d-print-pistons-formula-1/>, consulté le 4 juillet 2017.

Peugeot media. (2015). *Fractal, le Peugeot i-Cockpit amplifié par le son*. En ligne sur <http://fr-media.peugeot.com/fr/peugeot/modèles/concept-cars/fractal/fractal-le-peugeot-i-cockpit-amplifié-par-le-son>, consulté le 29 juin 2017.

Pfilmin, E. (2017). *Volkswagen passe devant Toyota au niveau mondial*. En ligne sur http://www.lemonde.fr/automobile/article/2017/01/30/volkswagen-passe-devant-toyota-au-niveau-mondial_5071552_1654940.html, consulté le 2 août 2017.

Prashanth, K., Kolla, S. & Eckert, J. (2017). Additive Manufacturing processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting - Selection guidelines. *Materials*, 10(6).

Primante 3D. (n.d.). *Quels matériaux pour imprimer en 3D*. En ligne sur <http://www.primante3d.com/materiaux/>, consulté le 28 mai 2017.

Protais, M. (2016). *Qui est Divergent 3D, le nouveau partenaire de PSA?* En ligne sur <http://www.usinenouvelle.com/article/qui-est-divergent-3d-le-nouveau-partenaire-de-psa.N437627>, consulté le 16 juin 2017.

PSA Groupe. (2016). *Le Groupe PSA signe avec Divergent 3D une lettre d'intention en vue d'un partenariat stratégique, ouvrant la voie à une production automobile plus efficiente*. En ligne sur <http://media.groupe-psa.com/fr/communiqués-de-presse/groupe/le-groupe-psa-signe-avec-divergent-3d-une-lettre-d-intention>, consulté le 16 juin 2017.

PSA Groupe. (2017). *DS3 Dark Side: Radicale du design, fascination des sens*. En ligne sur <http://fr-media.driveds.com/fr/ds-3-dark-side-radicalite-du-design-fascination-des-sens#prettyPhoto>, consulté le 24 juin 2017.

Renault Trucks. (2017). *L'impression 3D en métal: une technologie d'avenir pour des moteurs plus légers et plus compacts*. En ligne sur <http://corporate.renault-trucks.com/fr/les-communiqués/2017-01-11-l-impression-3d-metal-une-technologie-d-avenir-pour-des-moteurs-plus-legers-et-plus-compacts.html>, consulté le 27 juin 2017.

Research and Markets. (2016). *North America 3D printing market (2016-2022)*. En ligne sur https://www.researchandmarkets.com/research/2jb5q6/north_america_3d, consulté le 12 juillet 2017.

Research and Markets. (2016). *Europe 3D printing market (2016-2022)*. En ligne sur https://www.researchandmarkets.com/research/g74nqg/europe_3d, consulté le 12 juillet 2017.

Research and Markets. (2016). *LAMEA 3D printing market (2016-2022)*. En ligne sur https://www.researchandmarkets.com/research/b8cggx/lamea_3d_printing, consulté le 12 juillet 2017.

Rolls-Royce Press. (2016). *Rolls-Royce Motor cars celebrate second highest sales record in marque's 112-year history*. En ligne sur <https://www.press.rolls-roycemotorcars.com/rolls-royce-motor-cars-pressclub/article/detail/T0249766EN/rolls-royce-motor-cars-celebrates-second-highest-sales-record-in-marque's-112-year-history?language=en>, consulté le 3 juillet 2017.

Rtbf. (2017). *Pollution: l'Inde interdit la vente de 800 000 véhicules non conformes*. En ligne sur https://www.rtbf.be/info/societe/detail_pollution-l-inde-interdit-la-vente-de-800-000-vehicules?id=9567660

Saunders, S. (2017). *America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaboration publishes completed AM standardization roadmap*. En ligne sur <https://3dprint.com/166552/amsc-publishes-final-roadmap/>, consulté le 23 juin 2017.

Saunders, S. (2017). *Daimler Buses 3d printing parts for replacement, small series production, special customer requests*. En ligne sur <https://3dprint.com/176737/daimler-buses-3d-printing/>, consulté le 12 juin 2017.

Saunders, S. (2017). *Metal additive manufacturing helps Renault trucks reduce weight of 4-cylinder engine by 25% using 3d printed components*. En ligne sur <https://3dprint.com/161346/renault-3d-print-engine-components/>, consulté le 27 juin 2017.

Saunders, S. (2017). *Movin' on with tweels: Michelin debuts 3D printed, biodegradable smart tire at its sustainable mobility summit*. En ligne sur <https://3dprint.com/178021/michelin-3d-printed-vision-tire/>, consulté le 22 juillet 2017.

Scott, C. (2016). *Honda shows off 3d printed electric car, customized in both appearance and function*. En ligne sur <https://3dprint.com/151523/honda-3d-printed-electric-car/>, consulté le 23 juillet 2017.

Shams, K. (2017). *The new world of 3D printing... and counterfeiting*. En ligne sur <http://parisinnovationreview.com/2017/03/13/3d-printing-and-counterfeiting/>, consulté le 27 mai 2017.

Silly, G. (2009). *Pourquoi Michelin mise sur la location de pneus*. En ligne sur <http://www.capital.fr/entreprises-marches/pourquoi-michelin-mise-sur-la-location-de-pneus-365980>, consulté le 22 juillet 2017.

Sirris. (2016). *Additive Manufacturing: nouvelles machines*. En ligne sur <http://techniline.sirris.be/WO.wsc/webextra/prg/olContent3?vWebSessionID=78063&vUserID=50544&ENewsID=110965&TopicID=1662&TopicList=1662>, consulté le 23 juin 2017.

Sirris. (2016). *Additive Manufacturing: quelques données de marché*. En ligne sur <http://techniline.sirris.be/WO.wsc/webextra/prg/olContent3?vWebSessionID=77329&vUserID=50544&t=Daily&ENewsID=110974&TopicID=0&FWords=nouveau%20design&TopicList=1662&ShowSummary=yes&From=0&FAction=SearchAdv>, consulté le 13 juin 2017.

Sirris. (2016). *Impression 4D*. En ligne sur <http://techniline.sirris.be/WO.wsc/webextra/prg/olContent3?vWebSessionID=48412&vUserID=50544&t=Daily&ENewsID=108760&TopicID=0&FWords=impression%204D&TopicList=0&ShowSummary=yes&From=0&FAction=searchAdv>, consulté le 13 juillet 2017.

Sirris. (2016). *Additive Manufacturing et impression 4D*. En ligne sur <http://techniline.sirris.be/WO.wsc/webextra/prg/olContent3?vWebSessionID=48412&vUserID=50544&t=Daily&ENewsID=112410&TopicID=0&FWords=impression%204D&TopicList=0&ShowSummary=yes&From=0&FAction=searchAdv>, consulté le 13 juillet 2017.

Slick, J. (2016). *Roadblocks and implications for 3D printing*. En ligne sur <https://www.lifewire.com/roadblocks-and-implications-for-3d-printing-1969>, consulté le 29 juin 2017.

Smartech Markets. (2014). *Additive manufacturing opportunities in the automotive industry*. Charlottesville, VA: Smartech Markets Publishing.

Smartech Markets. (2016). *Additive manufacturing in automotive 2016*. Charlottesville, VA: Smartech Markets Publishing.

Smith, R. (2015). *7 ways 3D printing is already disrupting global manufacturing*. En ligne sur <https://www.forbes.com/sites/ricksmith/2015/06/29/7-ways-3d-printing-is-already-disrupting-global-manufacturing/2/#6b10490817c0>, consulté le 1 juillet 2017.

Statista. (2017). *Worldwide automobile production from 2000 to 2016*. En ligne sur <https://www.statista.com/statistics/262747/worldwide-automobile-production-since-2000/>, consulté le 20 juillet 2017.

- Stock, K. (2017). Porsche Pockets \$17,250 profit on every car. En ligne sur <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-03-20/the-porsche-premium-revs-up-to-17-250>, consulté le 2 août 2017.
- Stratasys. (2015). *Wind tunnel testing with polyjet or FDM parts*. En ligne sur http://www.stratasys.com/fr/applications/rapid-prototyping/prototypes-fonctionnels/wind-tunnel-testing#_ga=2.174951714.1806865803.1497112945-1677680373.1497112945, consulté le 28 mai 2017.
- Stratasys. (2014). *FDM soluble cores simplify production of composite parts*. En ligne sur <https://www.stratasysdirect.com/blog/fdm-soluble-cores/>, consulté le 19 juin 2017.
- Stratasys. (n.d.). *History of invention*. En ligne sur <http://www.stratasys.com/j750/history>, consulté le 18 mai 2017.
- Stratasys. (2016). *Leading manufacturing forward*. En ligne sur <http://www.stratasys.com/imts2016>, consulté le 14 juillet 2017.
- Stratasys. (2017). *3D printing with carbon fiber*. En ligne sur <http://www.stratasys.com/nylon12cf>, consulté le 14 juillet 2017.
- Techniques de l'ingénieur. (2016). *Implants, prothèses, organes artificiels... jusqu'où réparer le corps ?* En ligne sur <http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/implants-protheses-organes-artificiels-jusquou-reparer-le-corps-32737/>, consulté le 25 mai 2017.
- The University of Texas at Austin. (2012). *Selective Laser Sintering, Birth of an industry*. En ligne sur <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>, consulté le 21 juillet 2017.
- Tranchard, S. & Rojas, V. (2015). *L'avenir en fabrication 3D*. En ligne sur <https://www.iso.org/fr/news/2015/05/Ref1956.html>, consulté le 30 mai 2017.
- Vazquez, E., Passaretti, M. & Valenzuela, P. (2016). *3D opportunity for the talent gap. Additive manufacturing and the workforce of the future*. Westlake, TX : Deloitte University
- Versieux, N. (2016). *L'Allemagne vers une interdiction des moteurs à combustion en 2030 ?* En ligne sur <https://www.letemps.ch/economie/2016/10/13/lallemagne-vers-une-interdiction-moteurs-combustion-2030>, consulté le 9 juillet 2017.
- Widmer, M. & Rajan, V. (2016). *3D opportunity for intellectual property risk. Additive manufacturing stakes its claim*. Westlake, TX : Deloitte University
- Wing, I., Gorham, R. & Sniderman, B. (2015). *3D opportunity for quality assurance and parts qualification. Additive manufacturing clears the bar*. Westlake, TX : Deloitte University
- Wohler Report. (2014). *3D Printing and Additive Manufactueing state of the industry*. Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates.
- Wyman, C. (2015). *Opel Reducing Assembly Tool Production Costs By Up to 90% with Stratasys 3D Printing*. En ligne sur <http://blog.stratasys.com/2015/11/18/opel-3d-printing/>, consulté le 24 juin 2017.
- Wyman, C. (2015). *3D printed soluble cores keep Porsche purring*. En ligne sur <http://blog.stratasys.com/2015/01/08/porsche-3d-printing-soluble-cores/>, consulté le 19 juin 2017.

