



Fabrication additive

Abdellatif Bouzid
Maurice Duval

6 novembre 2017

La fabrication additive

Auteurs : Abdellatif Bouzid et Maurice Duval

1. Introduction

La fabrication additive (FA), appelée aussi impression 3D, est perçue aujourd'hui comme une véritable révolution. Elle permet de dépasser les limites de la fabrication traditionnelle (moulage par injection, usinage, formage, assemblage) et offre la possibilité de fabriquer des pièces de grande complexité, irréalisables par d'autres techniques, élargissant ainsi le potentiel pour l'innovation. La fabrication additive n'a cessé de se développer et grâce au développement des équipements les activités de prototypage ont migré dans certains domaines vers celles de fabrication directe de pièces fonctionnelles. La maturité des procédés et les équipements actuels permettent la production en série de pièces manufacturées métalliques. Les industries automobile, aéronautique et médicale sont fortement intéressées par le potentiel que peut leur offrir la FA. Les applications pour l'aluminium couvrent essentiellement les prototypes géométriques, les prototypes technologiques (échangeurs thermiques) et la conception et fabrication d'outillages (moules en fonderie d'aluminium et en plasturgie). Ce feuillard technique porte principalement sur la fabrication additive de métal.

Voici quelques définitions liées à la fabrication additive (FA) :

- **Fabrication additive (*Additive Manufacturing*)** : Désigne les procédés de fabrication par ajout de matière. Elle est définie par l'ASTM comme étant le procédé de mise en forme d'une pièce par ajout de matière, par empilement de couches successives, en opposition aux procédés par retrait de matière, tel que l'usinage ;
- **Impression 3D (3D printing)** : Désigne la fabrication des objets en déposant couche par couche un matériau à l'aide d'une tête d'impression, d'une buse ou d'une autre technologie d'imprimante ;
- **Prototype** : Désigne la représentation physique de la totalité ou d'une partie d'un produit qui, bien qu'il puisse présenter des limitations, peut être utilisée pour l'analyse, la conception et l'évaluation ;
- **Prototype géométrique** : Désigne la représentation physique des formes qui permet de vérifier la conformité de l'aspect et des dimensions (points de tangences, raccordements des surfaces) avec le modèle numérique de CAO ;

- **Prototype technologique** : Les prototypes technologiques sont fabriqués avec un matériau conforme à celui de la fabrication de série. Ces prototypes permettent de réaliser des tests mécaniques, thermiques. Souvent fabriqués en plusieurs exemplaires, ils contribuent à la validation du produit, aux choix des opérations de fabrication, ainsi que des moyens de production ;
- **Prototype fonctionnel** : Le prototype fonctionnel permet, par ses caractéristiques « bon matériau » de valider le produit, d'optimiser ses principes d'assemblage et de fonctionnement (ex. : le clippage d'une pièce). La validation de ce prototype permet de lancer la conception des outillages de production (travail du bureau des méthodes) ;
- **Prototypage rapide (Rapid prototyping)** : Le prototypage rapide regroupe un ensemble d'outils qui, agencés entre eux, permettent d'aboutir à des objets de représentation intermédiaire de la conception du produit (les modèles numériques, les maquettes, les prototypes et les préséries) ;
- **Fabrication rapide (Rapid Manufacturing)** : Usage de la fabrication additive destiné à l'élaboration de produits ou d'outillages finis et fonctionnels.

2. Historique

Les deux premiers brevets en lien avec la Fabrication Additive (FA) ont été déposés parallèlement en 1984 par l'équipe de Jean-Claude André et par Charles Hull (brevet US 4,575,330 publié en 1986). La FA par stéréolithographie ^[12] ouvre ainsi la voie vers d'autres techniques innovantes en fabrication et en production. D'un premier fabricant, 3D Systems, en 1986, on retrouve aujourd'hui une cinquantaine de fabricants de machines.

Dates clés de la fabrication additive

– 1952 :	Les avantages de la fabrication par couches superposées sont démontrés par Kojima.
– 1967 :	Un brevet d'un système de durcissement de résine par double rayon lumineux est déposé en Amérique par Swainson.
– 1981 :	Trois méthodes de solidification holographique sont publiées par Kodama.

– 1982 :	Des recherches sur stéréolithographie sont menés par Charles Hull.
– 1984 :	Le brevet 4575330 d'utilisation de stéréolithographie est déposé par Charles Hull.
– 1986 :	Apparition de 3D Systems avec la stéréolithographie, d'autres acteurs entrent en jeu.
– 1987 :	La commercialisation du prototypage rapide.
– 1989 :	Apparition de Stratsys et des imprimantes FDM.
– 1990 :	La réalisation des moules par la fabrication additive.
– 1995 :	Lancement de premières imprimantes 3DP.
– 1996 :	Premières nomination des machines industrielles comme « imprimantes 3D ».
– 2000 :	Produire des pièces industrielles par la fabrication additive.
– 2007 :	De Shapeways sont créés aux Pays-Bas.
– 2009 :	De MakerBot industries est créé et apparition de la MakerBot Cupcake CNC. Apparition de Sculpteo en France.
– 2011 :	La vente de 15 000 imprimantes 3D (environ 40 modèles disponibles).
– 2012 :	La vente de 45 000 nouvelles machines.
– 2013 :	Stratasys absorbe MakerBot Industries. Création de 14 « Fablabs » en France

3. Catégories de procédés

Différents procédés de fabrication additive (FA) ont été introduits sur le marché commercial par des entreprises industrielles, tels que *3D Systems*, *Stratasys*, *Optomec* et *Z Corporation* aux États-Unis, *Electro Optical Systems* (EOS) en Allemagne, *Arcam* en Suède, et *MCP Tooling Technologies* au Royaume-Uni. Les organismes de normalisation ont classé les procédés de FA en sept catégories qui figurent au tableau 1.

Tableau 1 - Les différentes catégories de procédés

1	Projection de matière (<i>material jetting</i>)
2	Extrusion de matière (<i>material extrusion</i>)
3	Projection de liant (<i>binder jetting</i>)
4	Fusion sur lit de poudre (<i>powder bed fusion</i>)
5	Dépôt de matière sous flux d'énergie dirigé (<i>direct energy deposition</i>)
6	La photopolymérisation en cuve (<i>vat photopolymerisation</i>)
7	Stratification de couches (<i>sheet lamination</i>)

- La projection de matière consiste à déposer la matière à partir d'une buse qui se déplace horizontalement sur la plate-forme de construction, où la solidification est produite à l'aide d'une lumière ultraviolette (UV) ;
- L'extrusion de matière consiste à déposer le matériau couche par couche à travers une buse sur une plate-forme, qui se solidifie ensuite en se refroidissant. La buse peut se déplacer suivant trois axes ;
- La projection de liant consiste à déposer un liant entre les couches de poudre pour les agglomérer ;
- La fusion sur lit de poudre utilise soit un laser ou un faisceau d'électrons pour fondre et fusionner la poudre couche sur couche ;
- Le dépôt sous flux d'énergie dirigé consiste à déposer du métal fondu sur la surface spécifiée, où il se solidifie ;
- La polymérisation en cuve utilise une cuve de résine photopolymère liquide, dont le modèle est construit couche par couche. Une lumière ultraviolette (UV) est utilisée pour durcir la résine localement, tandis qu'une plate-forme déplace l'objet vers le bas après la fabrication de chaque nouvelle couche ;

- La stratification en couche consiste à lier les feuilles de matière découpées sélectivement.
- Les pièces réalisées par ces procédés peuvent éventuellement subir un post-traitement thermique afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques.
- La figure suivante représente les dénominations normalisées des catégories de procédés de fabrication additive.

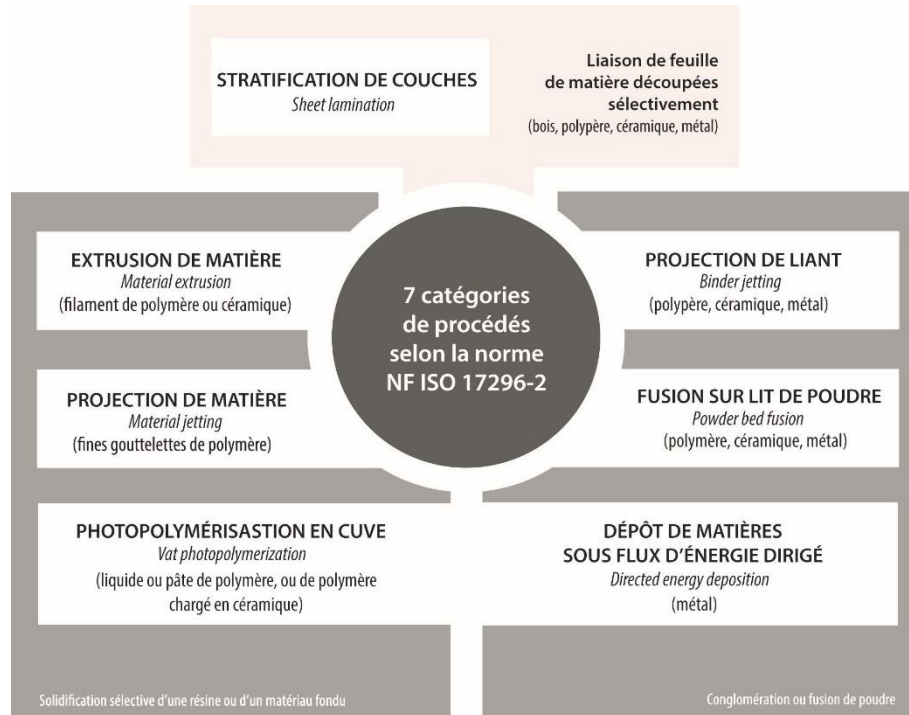


Figure 1. Dénominations normalisées et description succincte des différentes catégories de procédés utilisées en fabrication additive ^[13].

4. Fabrication additive d'aluminium

4.1. Principe de fonctionnement

La fabrication d'additive (FA) est un processus d'assemblage de matériaux couche par couche qui permet de créer des pièces réelles à partir d'un modèle 3D. Il est également connu sous le nom de fabrication rapide ou de prototypage rapide. Contrairement aux techniques classiques de fabrication telles que l'usinage qui réalise des produits en enlevant de la matière sur une pièce de départ, la fabrication d'additive crée directement la pièce finie en ajoutant la matière. Elle a la capacité d'utiliser efficacement les matières premières et de produire moins de déchets tout en obtenant une précision géométrique généralement satisfaisante.

On s'intéresse dans cette partie aux machines et procédés qui concernent la fabrication de produits d'aluminium. Parmi les sept catégories de procédés présentées précédemment, seulement quatre sont capables de fabriquer directement des pièces en aluminium, soit : -Fusion sur lit de poudre ; projection de liant ; -Dépôt de matières sous flux d'énergie dirigé ; -Stratification de couches. Les autres catégories pourront être utiles pour le prototypage et la fabrication de modèles et d'outillage.

Fusion sur lit de poudre

La fusion sur lit de poudre (PBF) utilise une source à haute énergie pour fondre ou fritter (dans le frittage les grains accolés se soudent sans atteindre leur température de fusion) sélectivement une fine couche de poudre métallique qui se soude à la précédente. Selon le type de source d'alimentation, le PBF peut être divisé en deux techniques principales : la fusion sélective par laser (SLM) qui utilise un laser à haute intensité et la fusion à faisceau d'électrons (EBM), qui utilise un faisceau d'électrons. Les deux processus nécessitent que l'atmosphère de la chambre de fabrication soit contrôlée (gaz inerte ou vide).

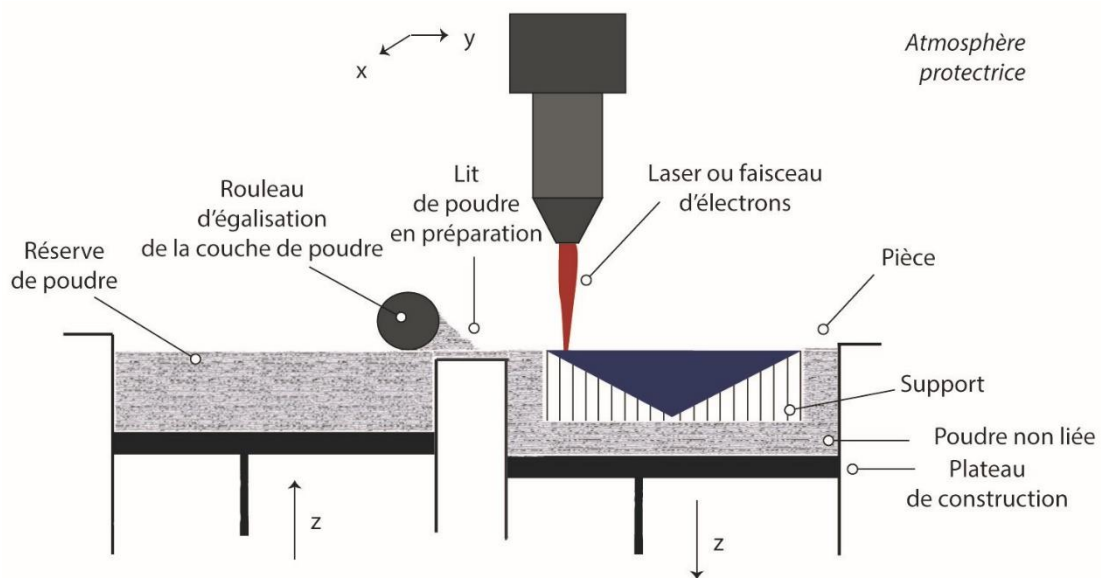


Figure 2. Schéma du procédé de fusion sur lit de poudre [14].

Projection de liant

La projection de liant est parfois nommée impression 3D « à jet d'encre ». L'idée est d'étendre l'impression bidimensionnelle normale à la troisième dimension. En pratique, elle utilise une ou plusieurs buses pour injecter un liant liquide sur le dessus d'un lit de poudre à chaque mise en couche. En s'agglomérant, la poudre des couches successives va former l'objet tridimensionnel. Son principal inconvénient demeure néanmoins la fragilité des pièces obtenues, et

généralement la nécessité d'un post-traitement (frittage, éventuellement suivi d'une infiltration). Les pièces ainsi réalisées vont servir à une utilisation pour des applications sans contraintes mécaniques élevées.

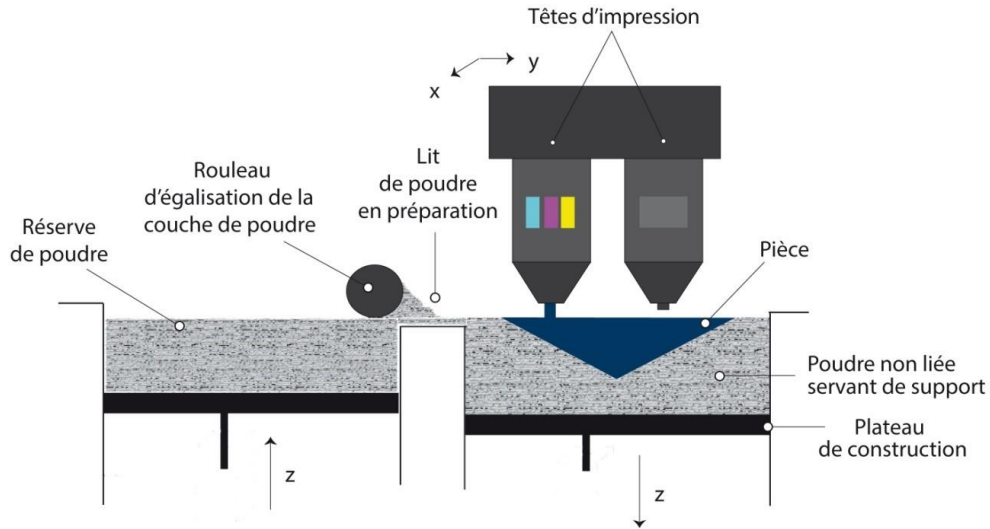


Figure 3. Schéma du procédé de projection de liant [14].

Dépôt de matières sous flux d'énergie dirigé

La technique de dépôt sous flux d'énergie dirigé (DED) utilise un flux de poudre métallique ou un fil métallique injecté comme matière première ainsi qu'une source d'énergie telle qu'un rayon laser, un plasma ou un faisceau d'électrons, pour fondre et déposer le matériau sur le dessus d'un substrat. La technique de DED peut être divisée en deux grandes catégories en fonction des matières premières, poudre ou fil. La réalisation se faisant en couches plus épaisses, le gain en productivité est obtenu au détriment de la précision dimensionnelle.

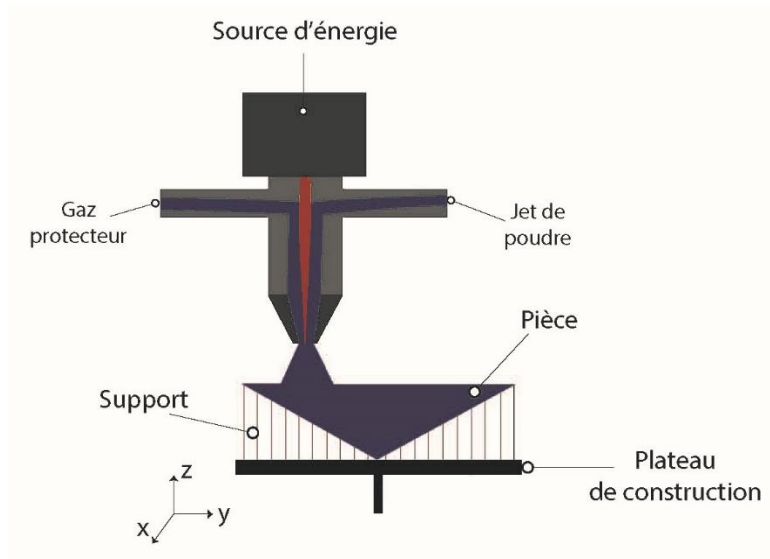


Figure 4. Schéma du procédé de dépôt de matière sous flux d'énergie dirigée [14].

Stratification de couches

La stratification de couches ou la fabrication d'objets laminés (LOM) est une technique de fabrication qui utilise des feuilles métalliques comme matière première. Un adhésif, des inserts ou une source d'énergie localisée (habituellement ultrason ou laser) peut être utilisée afin de lier les découpes de tôle, positionnés pour former un objet 3D [15]. Tous les matériaux existants sous forme de plaques peuvent être utilisés.

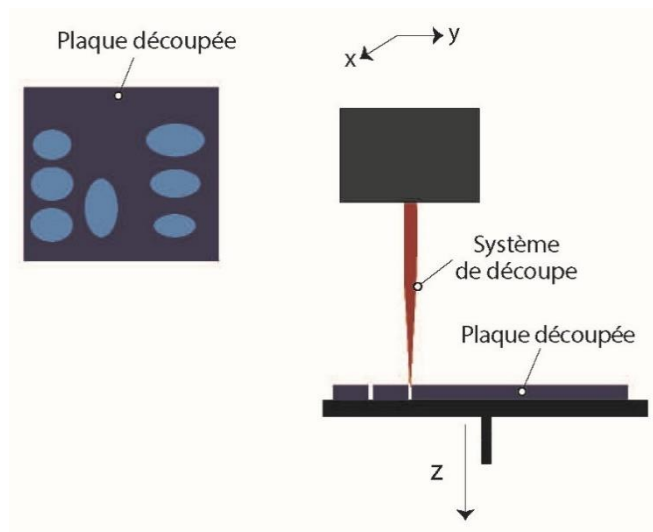


Figure 5. Schéma du procédé de découpe laser des couches de stratification [14].

4.2. Processus de fabrication

Afin de fabriquer un objet réel par le procédé de FA, nous devons nécessairement passer par un objet numérique : on parle de chaîne numérique. Celle-ci peut être décomposée en une séquence de quatre étapes principales :

1. Création d'un modèle numérique 3D du produit à fabriquer ;
2. Conversion et contrôle des données ;
3. Préparation de la fabrication et fabrication ;
4. Parachèvement du produit.
5. Les étapes 3 et 4 sont celles qui limitent la productivité de la FA par rapport aux autres méthodes de fabrication traditionnelle.

4.3. Temps de fabrication

Voici une méthode simple d'estimation des temps de fabrication par fusion laser en ayant pour seules informations, le volume des pièces et la hauteur de la fabrication h . Cette estimation du temps de fabrication ne prend pas en compte les temps de chauffage et de refroidissement de l'enceinte, de réalisation des supports de construction, des contours et de l'enveloppe de la pièce ainsi que du temps mort entre deux traits laser successifs. Aussi elle ne tient pas compte de la nécessité d'un parachèvement lié à la technologie utilisée.

Le temps de fabrication peut être décomposé en deux phases, une phase de mise en couche et une phase de construction laser :

$$T_{\text{fabrication}} = t_{\text{mise en couche}} + t_{\text{construction laser}}$$

Pour la phase de construction laser, on calcule la vitesse de construction laser (généralement donnée en cm^3/heure) avec la formule :

$$V_{\text{construction laser}} = V \cdot E_v \cdot E_c$$

Où V est la vitesse de balayage laser en mm/s , E_v est l'écart vecteur (écart entre 2 balayages) et E_c l'épaisseur de couche.

La formule suivante permet d'estimer le temps de construction laser d'une pièce dont on connaît le volume.

$$T_{\text{construction laser}} = \text{Volume pièce} / V_{\text{construction laser}}$$

Le tableau suivant présente les vitesses de construction laser en fonction du matériau et de la puissance laser utilisée pour différentes sources bibliographiques. Ces vitesses sont données à titre indicatif.

Tableau 2 - Vitesse de construction laser selon différentes sources ^[16]

Matériaux	Puissance laser (W)	Épaisseur de couche E_c (μm)	Vitesse de balayage laser V (mm.s^{-1})	Écart vecteur E_v (μm)	Vitesse de construction laser (cm^3/h)
AlSi10Mg	200	30	1400	105	15.9
AlSi10Mg	900	50	1700	250	76.5
AlSi10Mg	250	50	500	150	13.5
X110CrMoVAI 8-2	150	30	700	75	5.7
Acier maraging	105	30	150	112	1.8
Ti6Al4V	250	30	1600	60	10.4

Pour la phase de mise en couche, le temps est donné par le nombre de couches nécessaires à la réalisation d'une pièce multipliée par le temps d'une mise en couche :

$$T_{\text{ mise en couche}} = \text{Hauteur de construction} / E_c \cdot t_{\text{ d'une mise en couche}}$$

Si on prend comme exemple une pièce orientée de façon à avoir une hauteur de construction de 100 mm, avec des épaisseurs de couches E_c de 40 μm il faut déposer 2 500 couches. Le temps nécessaire au dépôt d'une couche étant généralement compris entre 5 et 10 s, il faudra donc entre 3 h 30 et 7 h de mise en couches.

4.4. Alliages d'aluminium

L'AlSi10Mg est l'alliage d'aluminium le plus utilisé dans la fabrication additive. Cet alliage possède une bonne coulabilité grâce au pourcentage de silicium proche de l'eutectique. Il possède également une meilleure caractéristique mécanique en traction que celles obtenues par fonderie. Selon la norme NF EN 1706 :2010 (F), à l'état T6 par exemple, sa résistance maximale en traction (R_m) doit être d'au moins 260 MPa alors qu'il est voisin de 400 MPa par fusion laser. En fusion laser, cet alliage d'aluminium présente la composition chimique et les caractéristiques mécaniques données par les tableaux suivants :

Tableau 3 - Composition chimique de l'alliage de l'aluminium AlSi10Mg ^[17]

AlSi10Mg		Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
Pourcentage Massique (%)	Max	Le reste	11	0.55	0.05	0.45	0.45	0.05	0.1	0.05	0.05	0.15
	Min		9				0.2					

Tableau 4 - Caractéristique mécanique en traction de l'alliage de l'aluminium AlSi10Mg ^[17]

AlSi10Mg	Rm(MPa)	Rp0.2(MPa)	A%(%)	E(GPa)
Norme NF EN 1706 : 2010 (F)-T6	260	220	1	
EOS-XY	460 ±20	270 ±10	9 ±2	75 ±10
EOS-Z	460 ±20	240 ±10	6 ±2	70±10
EOS-XY-traité thermiquement	345 ±10	230 ±15	12 ±2	70±10
EOS-Z-traité thermiquement	350±10	230 ±15	11 ±2	60 ±10
SLM Solution	397 ±11	227 ±11	6 ±1	6 4±10
Concept Laser – traité thermiquement	325 à 310	220 à 170	2 à 3	75

Ces caractéristiques mécaniques élevées s'expliquent par la finesse de la structure métallurgique. En structure brut de fusion laser, les intervalles interdendritiques sont de moins de 1 µm alors qu'ils sont de l'ordre de 20 µm pour une fonderie en coquille de qualité. Cette faible taille est due au refroidissement rapide lors du procédé avec des descentes en température de l'ordre de 105 à 106 °C/ seconde.

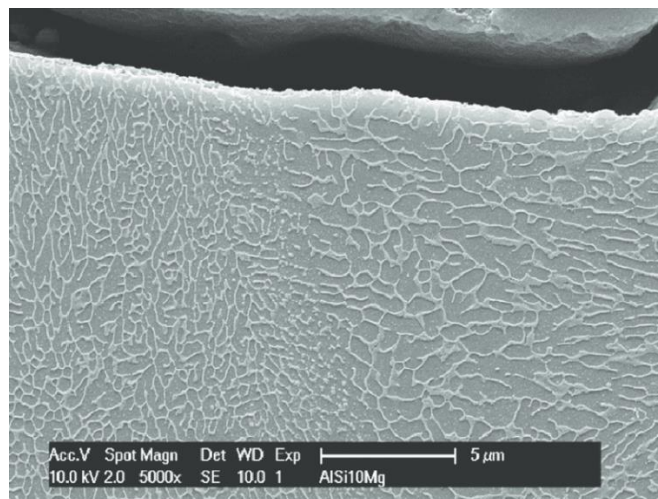


Figure 7. Microstructure de l'AlSi10Mg ^[11].

Vu les contraintes résiduelles induites par la solidification et le refroidissement, la tenue en fatigue est fortement influencée par le traitement thermique. En état brut de fabrication, elle est de l'ordre de 100 MPa et de l'ordre de 160 MPa à 10 millions de cycles après un traitement T6. Dans sa fiche matériau, EOS annonce 97 ± 7 MPa à 5 millions de cycles pour l'état brut de fabrication.

Dans un but d'amélioration des caractéristiques mécaniques, il est possible de mettre en œuvre des alliages contenant également du cuivre. SLM Solutions propose par exemple de l'AlSi9Cu3 sans en préciser les caractéristiques. Le développement de nouveaux alliages d'aluminium et leur validation pour la FA est pour le moment une partie active de la recherche.

Tableau 5 : Synthèse de la faisabilité par nuance et par procédé [18]

ALLIAGE	SÉRIE	LIT DE POUDRE	PROJECTION DE POUDRE	FIL+ ARC	FIL+FAISCEAU ÉLECTRONS	SIMPLICITÉ D'APPROVISIONNEMENT
AlSi12	4 000	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui, alliage répandu en FA aluminium
AlSi10Mg		Oui	Oui			Oui, alliage FA aluminium par défaut
AlSi7Mg0,6		Oui				Alliage moins répandu en FA aluminium
AlSi9Cu3		Oui				
AlSi5		Oui			Oui	Oui, filière soudure
1050A	1 000	Oui				
1100		N.C.		Oui	Oui	Oui, filière soudure
2017A	2 000	Fissuration				
2219		Fissuration		Oui	Oui	
2318				Oui	Oui	Oui, filière soudure
2319				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5083	5 000	Fissuration				
5087				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5183				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5356				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5554				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5556				Oui	Oui	Oui, filière soudure
6061	6 000	Fissuration	Oui			
7020	7 000	Fissuration	Oui			
7050		Fissuration	Oui			
7075		Fissuration	Oui			
AlMgScZr ScAlmloy		Oui	Oui			Nouvelle nuance favorable à la fabrication additive

Comme on le voit dans le tableau 5, les alliages d'aluminium ne se prêtent pas tous à la fabrication additive. De même qu'en fonderie, une des difficultés majeures avec certains alliages est le phénomène de fissuration à la solidification. Ce phénomène dépend des éléments chimiques et de leur concentration dans l'alliage ainsi que de la vitesse de refroidissement avec la technologie utilisée.

Comme on peut le voir sur la Figure 8 une forte teneur en cuivre, silicium et/ou magnésium permet d'éviter le problème de fissuration. L'aluminium relativement pur (série 1000) ou contenant une très faible teneur en élément d'alliage est également peu sensible à ce problème de fissuration.

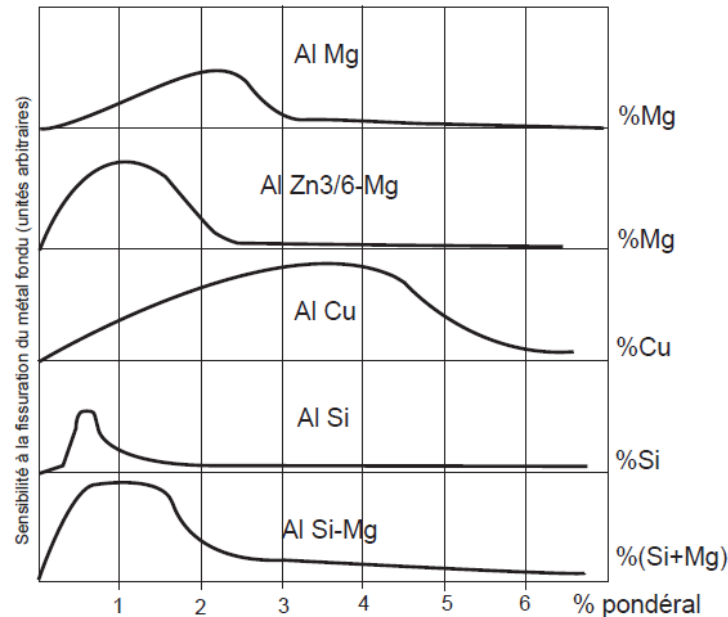


Figure 8. Courbe de sensibilité à la fissuration pour l'aluminium en fonction du taux d'élément d'alliage ^[18].

5. Exemple de réalisation

Optimisation topologique

L'optimisation topologique est un outil d'aide à la conception qui consiste à définir des géométries qui offrent le meilleur compromis entre les performances mécaniques ou thermiques et la quantité de matière requise. En d'autres termes, elle vise à maximiser soit, la résistance, la rigidité et le transfert thermique tout en minimisant la masse des pièces.

La figure 10 présente deux exemples de charnière des portes du train d'atterrissage fabriqué par fabrication additive en utilisant l'optimisation topologique.

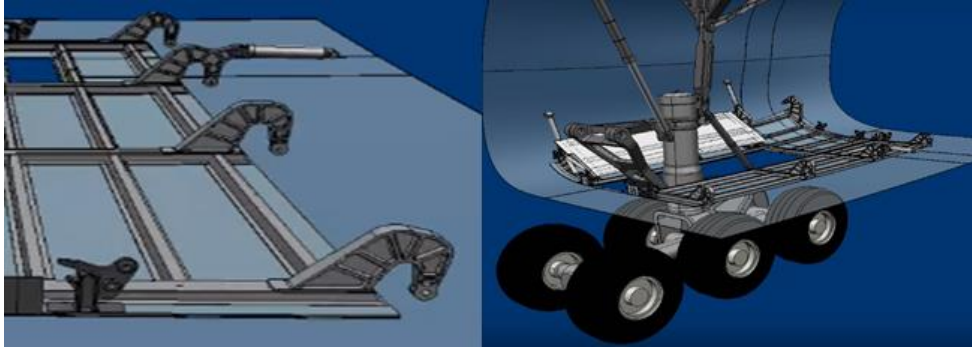


Figure 9. Porte du train d'atterrissage ^[19].



Figure 10 Charnières des portes du train d'atterrissage ^[19].

La figure suivante présente les différentes étapes d'optimisation d'une pièce. Des outils d'ingénierie distincts sont requis afin de réaliser chaque étape d'optimisation.

SÉQUENCE D'OPTIMISATION TYPE

Étape 1 - Sélection d'une pièce ayant un potentiel d'optimisation et définition de l'enveloppe d'optimisation.



Étape 2 - Optimisation topologique pour trouver la distribution de matériau optimale en fonction des chargements.



Étape 3 - Modélisation du résultat d'optimisation Utilisation de logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) pour obtenir un modèle 3D propre à la fabrication.



Étape 4 - Validation du modèle reconstruit par simulations numériques utilisant la méthode des éléments finis.



Étape 5 - Obtention du modèle final Sujet à une optimisation paramétrique pour raffiner le modèle.

Résultat : La pièce obtenue répond aux requis de rigidité et de résistance tout en étant plus légère.



Figure 11 Séquence d'optimisation typique d'une pièce [19].

Potence pour un vélo olympique

La figure ci-contre présente une potence personnalisée et fabriquée par FA. Elle se compose de trois parties, dont le capuchon en plastique, le corps de potence et l'attache de potence. Puisque la potence est soumise plus à la torsion, le corps principal de la pièce est formé d'une paroi épaisse.



Figure 12. Vélo olympique dont la potence est fabriquée par SLM (Selective Laser Melting) [20].

L'alliage d'aluminium (AlSi10Mg) est utilisé pour fabriquer la potence à l'aide de la technique de FA : la fusion sélective par laser d'un lit de poudre (SLM).



Figure 13. Potence d'un vélo olympique réalisé par (FA) ^[20].

Turboréacteur

La fabrication complète par FA d'un turboréacteur fonctionnel, par la compagnie américaine General Electric (GE), dont les caractéristiques techniques suivants :

- Vitesse de rotation : 33 000 tr/min ;
- Diamètre : 20 centimètres (8.875 pouces) ;
- Longueur : 30 centimètres (12 pouces).



Figure 14. Turboréacteur fabriqué par DLMM (Direct Laser Metal Melting) ^[21].

Prothèse de hanche (Tige fémorale)

L'utilisation de la machine l'EOSINT M280 qui fonctionne avec le procédé de fusion sélective par laser (SLM) pour fabriquer la tige fémorale. Le matériau de base utilisé est l'alliage biocompatible EOS Cobalt-Chrome MP1.



Figure 15. Processus de fabrication des tiges fémorale [22].

Production d'outillage pour la fonderie

La FA peut être utilisée pour la fabrication de moules ou de noyaux complexes en sable pour la fonderie d'aluminium. Ainsi on peut fabriquer le moule directement à partir des données CAO sans le besoin de plaques-modèles [36].

6. Quelques techniques de contrôle de procédé

6.1. Contrôles sur la matière première

Dans le but d'améliorer et fiabiliser les caractéristiques mécaniques des pièces finies, différents essais et méthodes de contrôle doivent être réalisés sur la matière première.

Tableau 6 - Quelques méthodes de contrôle et caractérisation à effectuer sur les poudres ^[24]

Type de caractérisation à effectuer	Méthode de caractérisation
Taille Forme Distribution en taille et en forme Porosités intra-particulaires	Microscope électronique à balayage (MEB)
Composition chimique Homogénéité chimique	Fluorescence X
Températures de changement de phase Vitesse de cristallisation	Calorimètre différentiel à balayage (DSC)

6.2. Contrôles sur le matériau

Afin de garantir les meilleures propriétés mécaniques, la bonne construction du matériau doit être contrôlée en production. Après fabrication, des contrôles destructifs (ex. : essais de traction, essais de fatigue, dureté) peuvent être réalisés. Pour identifier si un post-traitement thermique est à appliquer sur le matériau, une étude de l'influence de ce traitement thermique sur les propriétés mécaniques de la pièce est nécessaire.

6.3. Contrôles sur la pièce finie

Un contrôle en volume et non seulement en surface est nécessaire afin de contrôler les pièces de forme complexe fabriquées par la FA. Les méthodes de contrôle dimensionnel de la pièce (rugosité, planéité, dimensions) ainsi que la détection des défauts visuels sont aussi indispensables pour garantir la qualité. Des contrôles non destructifs (rayon X, tomographie) peuvent être réalisés pour évaluer la santé interne de la pièce.

6.4. Contrôles sur la machine

Le contrôle des machines doit se faire sur une base régulière pour s'assurer que le procédé de production est sous contrôle.

Les contrôles portent sur la validation du comportement de chaque fonction essentielle de la machine. Le tout peut être complété par la production d'échantillons témoins dont les propriétés seront validées.

Tableau 7 - Ensemble des contrôles directs à effectuer sur la machine [24]

Pour la matière première	Pour la source d'activation	Pour la chambre
<ul style="list-style-type: none"> • Étalement de la poudre • Distribution en taille de la poudre étalée • Quantité de poudre étalée • Planéité du lit de poudre • Température du lit de poudre 	<ul style="list-style-type: none"> • Puissance • Taille et profil du faisceau • Vitesse de balayage • Pas de balayage • Positionnement et orientation 	<ul style="list-style-type: none"> • Protection gazeuse • Largeur des couches • Température • Facteurs d'influence • Répétabilité • Reproductibilité

7. Pourquoi opter pour la FA

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Liberté de formes • Allégement des pièces • Personnalisation • Élimination des assemblages • Économie de matière • Pas d'outillage • Écologique et économique • Production d'une grande variété de pièces avec une seule et même imprimante. • Réparation de pièces. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mauvais état de surface de l'objet final (rugueux, effet escalier) et le post-traitement nécessite plus de temps que dans le cas de l'usinage • Manque de fiabilité • Petites séries uniquement • Compétences plurielles

Tableau 8 - Avantages et inconvénients spécifiques aux différents procédés de fabrication additive ^[18]

PROCÉDÉS	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS	UTILISATION DU PROCÉDÉ POUR AI	PIÈCES
Fusion laser sur lit de poudre	Précision, pièces complexes	Faible productivité	Forte	Pièces creuses, Structures en treillis
Fusion faisceau d'électrons sur lit de poudre	Faibles contraintes internes, faibles déformations	Taille de pièce très limitée, productivité moyenne	Faible	Pièces creuses, structures en treillis
Fusion avec projection de poudre	Productivité moyenne élevée	Rugosité élevée	Moyenne	Pièces de moyenne dimension
Dépôt de fil	Productivité élevée	Rugosité élevée, peu apte à la complexité	Faible (peu de machines)	Pièces de grandes dimensions
Dépôt de fil et laminage	Productivité élevée	Rugosité élevée, peu apte à la complexité	Faible (peu de machines)	Pièces de grandes dimensions
Fusion laser sur lit de poudre et fraisage	Post-traitements limités, précision	Problème de l'incorporation de copeaux dans la poudre	Faible, en émergence	Moules et outillages
Stratoconception	Simplicité	Qualité peu reproductible, faible qualité de surface	Limitée à des applications de type moules	Moules de plasturgie, outillage de grande taille
Consolidation ultrasonique	Précision, consommation énergétique faible	Technologie peu connue, tenue mécanique inconnue	Faible (peu de machines, applications particulières)	Joins de batterie, pile à combustible

8. L'offre de marché

Les principaux constructeurs de machines permettant la fabrication additive en aluminium sont indiqués dans le tableau 12, par ordre décroissant du nombre total de machines vendues à fin 2015, sans considérer leur utilisation pour l'aluminium.

Tableau 9 - Constructeurs de machines de fabrication additive ^[18]

CONSTRUCTEURS	PROCÉDÉS	PAYS	NOMBRE VENTES EN 2015	NOMBRE VENTES TOTALES
3D System	Frittage direct	États-Unis	1 925	12 688
EOS	Lit de poudre	Allemagne	370	2 132
ConceptLaser	Lit de poudre	Allemagne	161	539
Optomec	Projection poudre	États-Unis	63	313
SLM Solutions GmbH	Lit de poudre	Allemagne	102	225
Trumpf	Projection poudre, lit de poudre	Allemagne	32	156
Realizer	Lit de poudre	Allemagne	19	104
Renishaw	Lit de poudre	Royaume-Uni	39	101
Farsoon	Lit de poudre	Chine	35	77
OPM Lab, filiale de Sodick	Hybride lit de poudre et usinage	Japon	37	47
Matsuura	Hybride lit de poudre et usinage	Japon	12	37
BeAM en partenariat avec FMAS	Projection poudre	France	5	12
Bright Laser Technology	Lit de poudre	Chine	9	12
Sentrol	Lit de poudre	Corée du Sud	10	10
Sciaky	Procédé arc-fil	États-Unis	3	6
Fabrisonic	Consolidation ultrasonique	États-Unis	0	5
Additive Industries b.v.	Lit de poudre	Pays-Bas	1	1
Fives Michelin Additive Solutions	Lit de poudre	France	Lancement 2016	
FormUp™ [37]				

Un certain nombre d'équipements de FA sont disponibles au Québec, dans les centres de recherche industriels et universitaires, ainsi que dans l'industrie : le procédé de fusion laser sur lit de poudre (*Selective Laser Melting* ou *SLM*), le procédé de fusion par balayage d'électrons (*Electron Beam Melting* ou *EBM*) et le procédé de fabrication par dépôt sous énergie concentrée (*Direct Energy Deposition*, *DED*), voir tableau 9 suivant.

Tableau 10 - Équipements de fabrication additive disponibles dans quelques centres et institutions au Québec

Centre métallurgie du Québec (CMQ) [25]

- Marque : ExOne
- Modèle : Flex Platform
- Procédé : Projection de liant
- Matériau(x) : Acier inoxydable, Fer, Autres, Bronze, Céramiques
- Enveloppe de travail (mm) : 400 x 250 x 250



- Marque : Fabrisonic
- Modèle : SonicLayer 4000
- Procédé : Stratoconception
- Matériau(x) : Acier inoxydable, Acier, Aluminium, Alliages de Nickel, Titane, Tantale, Cuivre, Fer
- Enveloppe de travail (mm) : 1000 x 610 x 610



- Marque : Optomec
- Modèle : LENS 450
- Procédé : Dépôt énergétique direct
- Matériau(x) : Acier inoxydable, Acier, Aluminium, Alliages de Nickel, Titane, Tantale, Cuivre, Acier outil
- Enveloppe de travail (mm) : 100 x 100 x 100



- La pièce fabriquée par le procédé DED
- (A. Bois-Brochu, CMQ)



Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) [26]

- Marque : EOS
- Modèle : EOSINT M270/280/290
- Procédé : Fusion de lit de poudre
- Matériau(x) : Acier inoxydable, Aluminium, Titane, Acier outil, Cobalt-Chrome, Inconel
- Enveloppe de travail (mm) : 250 x 250 x 325



EOSINT M 280 : fusion directe au laser métallique (DMLS)

- Dimensions (w x d x h) : 2200 x 1070 x 2290 mm
- Volume fabriqué (l x w x h) : 325 x 250 x 250 mm
- Puissance nominale de laser : 200 ou 400 w (optionnel)



M-Flex™ ExOne : Binder Jetting

- Dimensions (l x w x h) : 1675 x 1400 x 1855 mm
- Volume fabriqué (l x w x h) : 400 x 250 x 250 mm
- Vitesse de fabrication : 30–60 seconds/couche



Différentes poudres métalliques utilisées dans la fabrication additive
Prix : 162.5 CAD/kg



Les enjeux industriels de la fabrication additive

Les principaux enjeux actuels de la fabrication additive se résument dans les points suivants :

- **La vitesse de production** : En raison du faible débit matière (actuellement de l'ordre de 10 cm³/heure pour du lit de poudre ou 100

cm³/heure pour de la projection), la technologie est inadaptée aux grandes séries. C'est la limitation majeure. Le tableau 14 donne un point de comparaison entre les différents matériaux en termes de vitesse maximale de fabrication.

Tableau 14 – Vitesse maximale de fabrication (cm³/h) de différents matériaux métalliques selon les données du constructeur EOS, pour une machine EOSINT M280 contenant un laser de 400 W. [18]

Matériaux	Vitesse maximale de fabrication (cm ³ /h)
Acier maraging 300	19,8
316L, 17-4 PH	7,2
15-5 PH	11,5
Inconel 625, hastelloy X	7,2
Inconel 718	14,4
Alliages de titane	32,4
Alliages d'aluminium	26,6

- **Le prix des machines** : Le coût d'achat machine est aussi un enjeu majeur puisqu'une machine de fabrication additive métallique coûte de 200 000 \$ à 2 500 000 \$ selon la technologie de fabrication utilisée et le niveau de performance visé.
- **Le prix des produits** : Les poudres sont généralement fournies par les fabricants de machines eux-mêmes. Des fabricants génériques commencent à apparaître, avec des coûts inférieurs, mais l'appel à ces fournisseurs tiers est encore limité.

Tableau 15 - Exemple de prix des poudres [27]

Matériaux	Fournisseur machine	Fournisseurs tiers
Acier Maraging	192 CAD/kg	-
Inox 316L	118 CAD/kg	74 CAD/kg
AlSi10Mg	162.5 CAD/kg	52 à 83 CAD/kg
Co-Cr (médical)	325 CAD/kg	-
TiAl6V (médical)	872 CAD/kg	448 CAD/kg
Inconel	199.5 CAD/kg	-

- **La qualité de la pièce** : Les technologies actuelles de fabrication additive ne permettent pas d'atteindre une précision dimensionnelle du niveau de celle de l'usinage conventionnel : 90 % des pièces sont

reprises en usinage. Rugosité et précision moyennes (Ra 5 à 20 µm, précision 0,1 à 0,5 mm).

- **Le volume de chambre** : Volume de fabrication relativement faible pour le lit de poudre (125 dm³ pour la plus grande des machines actuelles).

Les orientations du marché sur :

La vitesse de production	<p>Introduction de plusieurs lasers. Structure de couches optimisée avec différentes épaisseurs.</p> <p>· Mis en parallèle des processus de mise en couche. Plusieurs chambres de fabrication. Meilleure stabilisation du processus du fait de nouveaux modes de suivis en ligne.</p>
Le prix des machines	<p>Coût accepté par les clients. Amélioration des processus et augmentation des contrôles qualité, de l'électronique, du nombre de lasers augmentent le prix de la machine, en partie compensé par des économies d'échelle.</p>
Le prix des poudres	<p>Les prix de vente par les fournisseurs ne sont pas représentatifs des coûts de production. Avec l'accroissement en volume du marché, les producteurs de poudres vendront directement aux utilisateurs, mais problématique de la qualification des poudres à prendre en compte.</p>
La qualité de la pièce	<p>Rechercher des adaptations des traitements thermiques au type de métallurgie obtenu par fabrication additive. Développer la recherche métallurgique pour mettre au point de nouvelles nuances d'alliages d'aluminium compatibles avec la fabrication additive.</p>
Le volume de chambre	<p>Ils ne sont actuellement pas perçus comme le facteur limitant. Les problèmes liés à la fiabilité du processus mettront au second plan les efforts pour augmenter le volume.</p>

Les points clés pour la maîtrise de la technologie

Il existe une forte interdépendance entre les matériaux, les procédés et les post-traitements.

- Conception optimisée de la pièce (optimisation topologique, structuration, éviter les angles vifs, mettre des congés, prévoir l'évacuation de la poudre, etc).
- Choix de la technologie de fabrication, paramétrage de la machine, mise en plateau, création des supports.
- Choix des matériaux et caractéristiques de la poudre.
- Post traitement : découpe des supports, traitements thermiques ou de surfaces, reprises d'usinage, nettoyage, contrôles non destructifs.

9. Principales entreprises de fabrication additive au Canada

Entreprise	Site internet	Localisation	Responsable
Agile Manufacturing Inc.	www.agile-manufacturing.com	UXBRIDGE, Ontario	Hugues Tremblay hugues@agile-manufacturing.com
Axis Prototypes Inc.	www.axisproto.com	SAINT-LÉONARD, Québec	Gilles Desharnais gdesharnais@axisproto.com
Canadian Additive Manufacturing Solutions Inc.	www.canadianadditive.ca	Mississauga, Ontario	Curtis Pastorius cpastorius@canadianadditive.ca
Evolv3D	www.evolv3dlabs.com	AURORA, Ontario	Lee Taylor Ltaylor@evolv3dlabs.com
Fraser Valley Makerspace	www.fvmakers.com	LANGLEY, Colombie-Britannique	Mike Kirk mike@fvmakers.com

FusiA Impression 3D Métal Inc.	www.fusia.fr	SAINT- LAURENT, Québec	Cyrille Chanal contact@fusia.fr
Genistar Inc.	www.genistar.com	SAINT- LÉONARD, Québec	Gilles Desharnais info@axisproto.com
Jesse Garant Metrology Center	jgarantmc.com/	Windsor, Ontario	Spiro Spiliadis spiros@jgarantmc.com
KUZMA Industrial Group	www.kuzmaindustrial.com	CALGARY, Alberta	Dusan Kuzma dusan@kuzmaindustrial.com
Le Groupe A&A	www.groupeaa.ca/fr	ANJOU, Québec	Hugo Contant hcontant@groupeaa.ca
Les Laboratoires Nucléaires Canadiens	www.cnl.ca	CHALK RIVER, Ontario	Elliott Gillespie elliott.gillespie@cnl.ca
MOdEL3D	www.m-3d.com	BOUCHERVILLE, Québec	Sophie Riendeau sophie.riendeau@m-3d.com
NOVACAD	www.novacad3d.com	DARTMOUTH, Nouvelle- Écosse	Michael Fanning mfanning@novacad3d.com
Objex Unlimited Inc.	objexunlimited.com/	Etobicoke, Ontario	Steve Cory sales@objexunlimited.com
Openforge 3D printing services	www.openforge.ca	CANTLEY, Québec	David Hatin info@openforge.ca
Pinsky Law	www.pinskylaw.ca	NORTH YORK, Ontario	Andrey Pinsky nospam@pinskylaw.ca

Precision ADM	www.precisionadm.com	Winnipeg, Manitoba	Derek VanDenDriessche dvan@precisionadm.com
Proto3000 Inc.	www.proto3000.com	WOODBRI DGE, Ontario	John Frangella info@proto3000.com
PyroGénèse Canada inc.	www.pyrogenesis.com/ fr	MONTRÉAL, Québec	Pierre Carabin pcarabin@pyrogenesis.com
Renishaw (Canada) Limited	www.renishaw.com	MISSISSAUGA , Ontario	Mark Kirby mark.kirby@renishaw.com
Shimifrez	www.shimifrez.com	CONCORD, Ontario	Hassan Nojoumi (905) 695-6898
TechAlley	www.techalley.ca	LONDON, Ontario	Andrew Trudgeon andrew@techalley.ca
Troadey Inc.	www.corp.troadey.com/	QUÉBEC, Québec	Samuel Côté scote@troadey.com
3D Print Western	www.3dprintwestern.co m	EDMONTON, Alberta	James LaFleur jamesl@3dprintwestern.com
3Dponics	www.3dponics.com	OTTAWA, Ontario	John Ward info@3dponics.com
3Dprintler: 3D Printing Ideas	www.3dprintler.com	OTTAWA, Ontario	Michael Golubev michael@3dprintler.com
3DRPD Inc.	www.3DRPD.com	MONTRÉAL, Québec	DENIS THERIAULT denis.theriault@3DRPD.com

Références

1. ASTM international, Designation: F2792 – 12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.

2. ISO/ASTM 52900:2015(E), Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology.
3. ERNARD (A.), TAILLANDIER (G.), MOSCHETTA (J.M.) – Fabrication additive : état de l’art et besoins métrologiques engendrés.
4. Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215-243.
5. OBATON, A. F., BERNARD, A., TAILLANDIER, G., & MOSCHETTA, J. M. Fabrication additive: état de l’art et besoins métrologiques engendrés Additive manufacturing: state of the art and generated metrological need
6. Song, B. (2014). Nouvelles voies de fabrication d’alliages métalliques à hautes performances à partir de poudres (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard).
7. Buchbinder, D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2015). Selective laser melting of aluminum die-cast alloy—Correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties. *Journal of Laser Applications*, 27(S2), S29205.
8. Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., & Buchbinder, D. (2012). Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design*, 34, 159-169.
9. Feuerhahn, F., Schulz, A., Seefeld, T., & Vollertsen, F. (2013). Microstructure and properties of selective laser melted high hardness tool steel. *Physics Procedia*, 41, 843-848.
10. Clijsters, S., Craeghs, T., Buls, S., Kempen, K., & Kruth, J. P. (2014). In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8), 1089-1101.
11. Kempen, L.Thijs, J. Van Humbeeck & J.-P. Kruth, Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting, *Physics Procedia* 39 (2012).
12. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/fabrication-additive-impression-3d-42633210/stereolithographie-par-photopolymerisation-bm7910/>
13. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/fabrication-additive-impression-3d-42633210/fabrication-additive-controles-bm7950/rappels-bm7950niv10001.html#niv-nv17277104316>
14. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/fabrication-additive-impression-3d-42633210/fabrication-additive-bm7017/triptyque-materiaux-procedes-machines-en-fabrication-additive-bm7017v2niv10003.html>
15. <https://www.youtube.com/watch?v=Rpqia4j75ek>

16. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/fabrication-additive-impression-3d-42633210/fusion-laser-selective-de-lit-de-poudres-metalliques-bm7900/temps-de-fabrication-bm7900niv10006.html>
17. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/fabrication-additive-impression-3d-42633210/fusion-laser-selective-de-lit-de-poudres-metalliques-bm7900/materiaux-mis-en-uvre-bm7900niv10007.html>
18. https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2017-Fabrication-additive-aluminium.pdf
19. <http://substance.etsmtl.ca/tirer-profit-fabrication-additive-defi/>
20. <http://substance.etsmtl.ca/potence-velo-olympique-fabrication-additive/>
21. <http://substance.etsmtl.ca/general-electric-devoile-le-1er-turboreacteur-concu-entierement-par-impression-3d-2/>
22. <http://substance.etsmtl.ca/comment-prolonger-la-duree-de-vie-des-protheses-de-la-hanche/>
23. <http://fr.developmentscout.com/fachgebiete/werkstoffe-verfahren/formgebung/4600-werkzeuglose-formherstellung-mit-der-3d-drucktechnologie-sandgussformen>
24. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/fabrication-additive-impression-3d-42633210/fabrication-additive-controles-bm7950/controles-necessaires-en-fa-bm7950niv10003.html>
25. <http://cmqtr.qc.ca/liste-de-nos-equipements/>
26. <http://www.reseauquebec3d.com/fr/points-de-service/liste-de-points-de-service-pour-concevoir-et-fabriquer-des-pieces/equipements>
27. http://www.ardi-rhonealpes.fr/ardi-web/upload/docs/application/pdf/2015-12/billet_etonnement_2015-11-06_cop_fa.pdf
28. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/fabrication-additive-impression-3d-42633210/fabrication-additive-bm7017/chaine-numerique-de-la-fabrication-additive-du-modele-au-produit-bm7017v2niv10002.html>
29. <https://www.fusia.fr/contactus?lightbox=i5zss>
30. <http://www.3dnatives.com/ge-50m-centre-impression-3d/>
31. <https://www.ic.qc.ca/app/ccc/sld/cmpny.do?tag=010004&profileId=2187&lang=fra>
32. <http://serialmakers.com/petit-historique-de-limpression-3d/>
33. <http://www.cetim-certec.com>
34. https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280
35. <http://www.exone.com/Systems/Production-Printers/M-Flex>

36. <http://substance.etsmtl.ca/general-electric-devoile-le-1er-turboreacteur-concu-entierement-par-impression-3d-2/>
37. https://www.researchgate.net/publication/278670051_Selective_laser_melting_of_AlSi10Mg_alloy_Process_optimisation_and_mechanical_properties_development
38. http://www.addupsolutions.com/content/uploads/2017/01/ADDUP_FORMUP350_FR_090117.pdf
39. <http://ici.radio-canada.ca/tele/decouverte/2014-2015/segments/reportage/988/impression-3d>