

Appuyez sur Imprimer

L'écosystème de la fabrication additive du Canada

Recherche effectuée par



le Conseil des technologies de
l'information et des communications

Canada 

Ce projet est financé en partie par le
Programme d'appui aux initiatives
sectorielles du gouvernement du Canada.

Préface

Le Conseil des technologies de l'information et des communications (CTIC) est un centre national d'expertise pour l'économie numérique. Fort de plus de 25 ans d'expérience en recherche et élaboration de programmes liés à la technologie, le CTIC vise à renforcer l'avantage numérique du Canada dans une économie mondiale. Grâce à des recherches prospectives, à des conseils stratégiques fondés sur des données probantes et à des programmes créatifs de renforcement des capacités, le CTIC favorise des industries canadiennes novatrices et concurrentielles à l'échelle mondiale, habilitées par une main d'œuvre talentueuse et diversifiée.

Pour citer ce rapport

HERRON, Chris, IVUS, Maryna, et KOTAK, Akshay. Appuyez sur « Imprimer » : L'écosystème de la fabrication additive du Canada, Ottawa (Canada), Conseil des technologies de l'information et des communications, 2021, 102 p.

Recherche et rédaction par Maryna Ivus (gestionnaire, Recherche sur le marché du travail), Akshay Kotak (économiste principal et analyste de la recherche), Chris Herron (analyste subalterne de la recherche), avec le généreux soutien de Rob Davidson (directeur, Analyse des données), Arun Sharvirala (analyste des données), Amal Das (analyste subalterne des données), et du Groupe de réflexion numérique du CTIC.

Les opinions et interprétations de la présente publication sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du gouvernement du Canada.

Résumé

Le présent rapport, intitulé Appuyez sur Imprimer - L'écosystème de la fabrication additive du Canada, a pour but d'explorer les technologies de fabrication additive (FA) ainsi que leurs applications, leurs forces, leurs faiblesses et leurs défis, d'évaluer l'état de l'écosystème de la FA du Canada, d'évaluer la demande de talents en FA, et de proposer des recommandations pour accroître l'adoption des technologies de FA au Canada. La présente étude s'appuie sur des recherches primaires et secondaires. La recherche primaire inclut des entrevues réalisées auprès d'experts de l'industrie, les commentaires d'un comité consultatif, et les résultats d'un moissonnage du Web visant à connaître les emplois et les compétences recherchés dans l'ensemble de l'écosystème de la FA du Canada. La recherche secondaire comprend un examen des publications du milieu universitaire et de l'industrie.

La FA comprend un groupe diversifié et croissant de technologies, de procédés et de matériaux. Il existe de nombreux cas pratiques d'application de la FA, allant du prototypage rapide à la personnalisation de masse, en passant même par certaines formes de fabrication de masse. Bien que la FA soit utilisée pour la conception et le prototypage dans l'industrie manufacturière, la recherche intensive en la matière et son adoption sont plus limitées.

Le Canada est un petit joueur dans l'écosystème mondial de la FA, alors que ses niveaux de production manufacturière sont faibles par rapport à des géants de l'industrie comme les États-Unis et la Chine. Néanmoins, il compte plusieurs entreprises de renommée mondiale axées sur le développement de technologies liées à la FA, leur intégration à leurs procédés de production, ou les deux. Dans plusieurs créneaux particuliers, la FA offre une forte intégration verticale, des niveaux élevés de résultats de recherche, ainsi que des relations solides entre le milieu universitaire et l'industrie.

La pandémie de COVID-19 a bouleversé les paradigmes de fabrication dans le monde entier et a permis à la FA de démontrer certains de ses atouts. Cependant, la pandémie a également mis en lumière plusieurs des faiblesses du Canada en matière de FA, comme la faiblesse des chaînes d'approvisionnement, la fragmentation de l'écosystème, et l'aversion aux risques des investisseurs et des fabricants établis.

Le présent rapport propose une étude de cas sur l'Allemagne, un chef de file mondiale reconnue dans le domaine de la FA. L'étude de cas sert de modèle d'écosystème efficace et fournit une liste des orientations possibles pour l'industrie et le gouvernement canadiens alors qu'ils continuent d'établir un écosystème de FA solide.

Mots clés :

Fabrication additive, impression 3D, technologies de pointe, Canada, impacts de la COVID-19, impacts de la pandémie, éducation, application, adoption, analyse de la capacité concurrentielle, perfectionnement de la main-d'œuvre, recherche sur le marché du travail, recommandations de l'industrie, politique.

Remerciements

Les contributions offertes dans le cadre du présent rapport par les 26 répondants clés et 25 membres du comité consultatif sont grandement appréciées. Nous aimerions remercier tous les participants à notre étude, notamment :

Bartosz Bos, consultant en fabrication additive, Island Additive

Bell Textron Canada Ltd.

Cassidy Silbernagel (Ph. D.), ingénieur mécanicien principal en fabrication additive, Exergy Solutions

Francesco Iorio (Ph. D.), PDG, Augmenta AI

Farzaneh Farhang Mehr (Ph. D.), directrice de la fabrication additive, Université de la Colombie Britannique

Floriane Zongo (Ph. D.), consultante en fabrication additive

Frank Defalco, directeur des relations avec les membres, NGen

Gianni Panfili, directeur de la fabrication additive, Siemens Energy

Hargurdeep (Deep) Singh, vice-président de la fabrication additive, CAD MicroSolutions

Harold Godwin, directeur général, Waterloo Advanced Manufacturing Consortium

Iee Lee Hia (Ph. D.), boursière postdoctorale, École polytechnique de Montréal

Jean-Pierre Giroux, président, Excellence in Manufacturing Consortium

John Manley, président, Machine Tool Systems

Jonathan Ladouceur, directeur de l'ingénierie, Twente Additive Manufacturing

Kanwal Chadha (Ph. D.), chercheur postdoctoral, Université du Nouveau-Brunswick

Kassim al-Rubaie (Ph. D.), chercheur universitaire, Université McMaster

Kevin Han, PDG, AON3D

Manuel Martin, directeur technique de la fabrication additive, Conseil national de recherches Canada

Mathieu Brochu (Ph. D.), professeur agrégé, Université McGill

Matthew Harding (Ph. D.), gestionnaire de programme, Tronosjet

Maya HTT

Michael Barré, conseiller en matière de technologies industrielles, Programme d'aide à la recherche industrielle, Conseil national de recherches Canada (PARI-CNRC)

Mostafa Yakout (Ph. D.), boursier postdoctoral, Université McMaster

Nejib Chekir (Ph. D.), spécialiste de la fabrication additive, Liburdi Automation Inc.

Parker Drouillard, PDG, Pep Corp

Philippe Dupuis (Ph. D.), directeur principal de l'ingénierie et des projets de fabrication additive, Precision ADM

Sofiane Benyouci, associé, vice-président consultation, Innovitech

Stan Kleinikkink, directeur de l'innovation, ATS

Steph Sharp, PDG, 3DQue Systems Inc.

Stephan Mansour, spécialiste de la numérisation en construction et de l'impression 3D, Autodesk

Tonya Wolfe (Ph. D.), directrice, Centre pour l'innovation dans le secteur manufacturier, Centre d'accès à la technologie, Red Deer College

Trevor Johnstone, directeur de la fabrication additive, Designfusion

Vesna Cota, membre votant, conseil d'administration, Réseau stratégique pour l'innovation globale dans les procédés de fabrication additive du CRSNG/FCI

Zander Chamberlain, directeur de la fabrication additive, 3D Additive Fabrication

Les citations directes des répondants clés et des membres du comité consultatif présentées dans le présent rapport ont été anonymisées afin de protéger l'identité des intervenants. Veuillez noter que les participants à l'étude qui ont offert des citations n'ont pas tous accepté d'être nommés dans la section « Remerciements » et que les participants nommés dans la section « Remerciements » ne sont pas tous cités directement dans le rapport.

Table des matières

Glossaire	9
Liste d'acronymes récurrents utilisés dans le présent rapport	13
Avant-propos	14
Sommaire	15
Introduction et contexte	18
Qu'est-ce que la fabrication additive?	19
• La fabrication additive : une brève histoire	20
• Les sept familles de la fabrication additive	23
Les possibilités de la FA	26
Les avantages de la FA	28
Agilité : Prototype rapide et itération de la conception	29
Conception complexe : Géométries, propriétés et fabrication uniques en une étape	30
Personnalisation de masse et production sur demande	32
Gestion des stocks et pièces existantes	32
Coûts	33
Durabilité : Réduction des matières résiduelles et de la consommation énergétique	34
Fabrication hybride	35
Fabrication distribuée	35
Fabrication additive : Faiblesses et défis	37
Volumes et échelle de production	38
Résistance et propriétés des matériaux (anisotropie)	39
Contrôle de la qualité et certification de produits	40
Post-traitement exigeant en main-d'œuvre	41
Le défi des cas pratiques (surtout pour la FA sur métal) et l'aversion au risque	42
Manque de compétences et de personnel qualifié	42
Manque de connaissances	43
La FA dans les secteurs stratégiques	46
Fabrication de pointe	47
• Automobile	47
• Aérospatiale	48
• Outillage et autres applications manufacturières	49
• Produits de consommation	49
Sciences de la santé et sciences biologiques	50
Technologies propres	52
Architecture et construction	53

Table des matières

Le paysage canadien de la FA	56
La place du Canada dans l'écosystème mondial de la FA	57
Soutien à la FA au Canada	59
• Le rôle du gouvernement	59
• Le rôle des établissements d'enseignement	62
Les entreprises canadiennes de FA	68
Les forces du Canada en matière de FA	72
Défis pour la FA canadienne	72
• Tolérance au risque	72
• Difficultés au chapitre du contrôle de la qualité, de la certification et de la normalisation	73
• Fragmentation des écosystèmes	74
• Les petites chaînes d'approvisionnement au service de l'écosystème	75
Étude de cas : La FA en Allemagne	76
• L'écosystème de la FA en Allemagne	76
• Les racines du succès allemand en FA	77
• Leçons pour le Canada	80
La demande de talents en FA	83
Embauche anticipée	85
Disponibilité des talents	85
Rôles recherchés	85
Compétences clés pour les rôles recherchés	87
Formation exigée	89
Expérience de travail requise	90
L'impact de la COVID-19 sur la FA	92
Conclusion	96
Annexe	98
I. Méthodologie de recherche	98
• Recherche secondaire	98
• Recherche primaire	98
II. Limites de la recherche	99
III. Autres organisations du domaine de la FA au Canada	100
• Centres de recherche	100
• Organismes et associations sectoriels	101

Glossaire

Ce glossaire présente un aperçu de la terminologie utilisée mais non développée dans le texte. Pour une explication plus détaillée de la fabrication additive, consultez la section 1.

Anisotropie - Désigne un matériau, une substance ou une structure qui présente des variations de ses propriétés physiques ou mécaniques le long de différents axes directionnels. Il s'agit d'une caractéristique de la plupart des procédés de FA, où les objets sont construits couche après couche. En FA, l'anisotropie entraîne une conséquence courante : l'impression est plus faible dans le sens de la fabrication que dans les autres sens en raison de la présence de petits espaces entre les couches appliquées. Le degré d'anisotropie d'un objet imprimé en 3D dépend principalement des matériaux de construction et du procédé utilisé pour lier les couches entre elles.

Bio-impression - Combinaison de techniques de fabrication en 3D et de biomatériaux comme des cellules et des facteurs de croissance. La bio-impression peut être utilisée pour créer des structures qui imitent les tissus biologiques trouvés dans la nature. Il existe plusieurs méthodes de bio-impression fondées sur les technologies d'extraction, à jet d'encre, acoustiques ou laser.

Catalyseur - En fabrication additive, produit chimique qui facilite le procédé de polymérisation.

Chambre de fabrication - Espace clos dans un système de FA ou une imprimante 3D où des pièces peuvent être fabriquées. Le contenu exact de la chambre de fabrication dépend du procédé. Mais dans tous les procédés, la chambre de fabrication contient toujours une plateforme de fabrication et un instrument pour manipuler le matériel d'impression.

Conception algorithmique - Forme de procédé de conception qui utilise une machine pour créer automatiquement des modèles complexes en reproduisant des figures simples et récursives (plutôt que de créer manuellement un modèle complexe). La conception algorithmique se marie bien à d'autres formes de FA en raison de la « complexité libre » qu'elle offre.

Conception assistée par ordinateur (CAO) - En fabrication, désigne l'utilisation d'ordinateurs dans la conception d'un projet à produire. La CAO comprend la création de modèles informatiques, définis par des paramètres géométriques, qui produisent une représentation 3D de la pièce en cours de conception. Le modèle peut être analysé, modifié et optimisé en modifiant les paramètres pertinents. Les logiciels de CAO permettent aux concepteurs de visualiser des objets sous diverses représentations et de tester les modèles en simulant des conditions de fonctionnement réelles. Ils peuvent aussi produire le modèle sous forme de fichier électronique renfermant des informations sur les matériaux, les procédés, les dimensions, les tolérances, etc. Ces fichiers peuvent être introduits dans des systèmes de fabrication automatisés (y compris des imprimantes 3D) et interprétés par le logiciel de la machine pour produire la pièce.

Conception générative - Procédé itératif d'exploration de la conception dans lequel un logiciel (souvent en CAO) génère un certain nombre d'extrants qui répondent à certaines contraintes de conception et un concepteur adapte certaines de ces contraintes pour réduire ou augmenter le nombre d'extrants parmi lesquels choisir. Les logiciels de conception générative appliquent souvent l'intelligence artificielle, en utilisant des algorithmes pour produire de nombreuses options de conception ainsi que l'apprentissage machine pour améliorer et évaluer les extrants de conception qui en découlent. La combinaison d'outils de conception générative avec la flexibilité des méthodes de FA peut contribuer à faire évoluer des solutions novatrices qui se situent en dehors des pratiques de conception conventionnelles (dans des domaines comme la fabrication, l'ingénierie, l'architecture et la construction).

Fabricant d'équipement d'origine (FEO) -

Fabricant de systèmes et de composants utilisés dans le produit final d'une autre entreprise.

Les microprocesseurs, les processeurs et les capteurs utilisés dans les ordinateurs et les autres appareils électroniques sont les exemples les plus courants. Dans les écosystèmes de FA, les FEO désignent (a) les fabricants d'imprimantes et de systèmes qui sont ensuite personnalisés par des revendeurs de produits à valeur ajoutée, ainsi que les fabricants de matériels ou de logiciels utilisés dans les imprimantes, et (b) les grands acheteurs potentiels de services de FA qui fabriquent des équipements d'origine ou exclusifs utilisés dans divers secteurs.

Fabrication additive (impression 3D) -

Catégorie de procédé de fabrication partageant la même approche itérative fondée sur les couches. Un objet ou une pièce est d'abord conçu comme un modèle de conception assistée par ordinateur, puis créé sous forme physique en ajoutant un matériau couche par couche^{1,2}. Le mot additif sert à distinguer cette catégorie de procédé de fabrication de la fabrication soustractive (usinage, fraisage) et formative (moulage, estampage, moulage par injection).

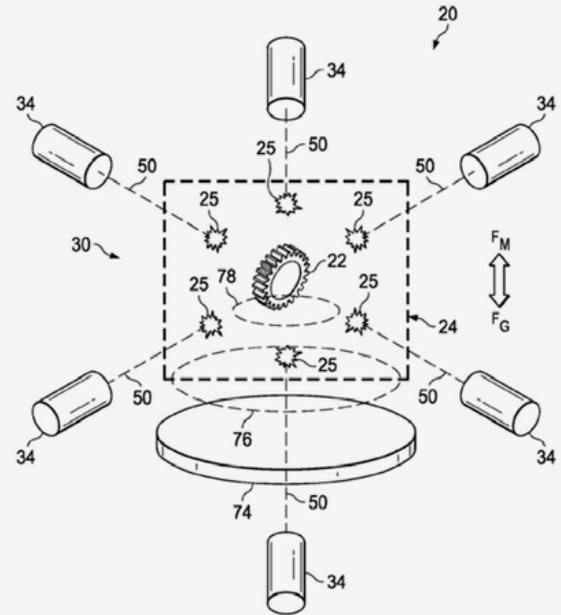


FIG. 11

Fabrication de pointe - Utilisation de technologies novatrices pour améliorer des produits ou des procédés. La fabrication de pointe vise à créer des produits novateurs et intéressants offrant des niveaux supérieurs de conception, de complexité technique, de flexibilité et de multifonctionnalité. La FA est l'une des nombreuses innovations technologiques permettant le paradigme de la fabrication de pointe. Les autres innovations clés comprennent le calcul haute performance, les technologies de haute précision, la robotique de pointe et l'automatisation.

Fabrication distribuée (production distribuée, fabrication locale) - Forme de fabrication décentralisée dans laquelle les fabricants utilisent un réseau d'installations géographiquement dispersées qui sont coordonnées à l'aide des technologies de l'information. Aussi, fabrication locale à domicile ou dans des installations à petite échelle qui adopte le modèle de l'« industrie artisanale ».

Fabrication formative - Désigne la famille de procédés de fabrication qui utilisent la déformation des matériaux (plutôt que l'enlèvement de matériaux, comme dans la fabrication soustractive, ou l'ajout de matériaux, comme dans la FA) pour créer des produits. Le moulage, l'estampage et le moulage par injection sont les procédés formatifs les plus courants.

Fabrication soustractive - Catégorie de procédés de fabrication fondés sur l'enlèvement de matériau d'un bloc solide. L'usinage et le fraisage sont les deux principaux types de fabrication soustractive. La fabrication soustractive peut être faite manuellement ou à l'aide d'une machine commandée par ordinateur (dans laquelle des parcours d'outils sont programmés au préalable et interprétés par la machine, éliminant une grande partie de l'interaction humaine avec le matériau).

1 ISO. ISO/ASTM 52900:2015 – Fabrication additive – Principes généraux – Terminologie, ISO, 2015, <https://www.iso.org/fr/standard/69669.html>.

2 Les termes « fabrication additive » et « impression 3D » sont utilisés indistinctement dans l'ensemble du présent rapport.

Industrie 4.0 (quatrième révolution industrielle) - Automatisation continue des pratiques industrielles et manufacturières traditionnelles, facilitée par la communication machine-machine et les capteurs de l'Internet des objets.

Lit de poudre - Plateforme de fabrication remplie de poudre et utilisée dans certains types de procédés de FA. Au fur et à mesure que la série d'impressions progresse, le lit de poudre s'abaisse généralement, permettant à un rouleau de poudre de répartir par-dessus des couches supplémentaires de poudre fraîche, lesquelles sont liées à la pièce sous-jacente à l'aide d'une source thermique ou d'adhésifs chimiques.

Matière première - Matière première en vrac qui est introduite dans le système de FA pour fabriquer les couches constitutives de la pièce finale. Les matières premières pour la FA peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux, notamment des plastiques, des métaux purs, des alliages métalliques, des résines, des céramiques, de la cire et du papier. Elles se présentent aussi sous diverses formes, comme des filaments et des fils, des liquides et des coulis, des poudres, des granulés, des encres et d'autres suspensions, feuilles, rubans et films.

Outillage - Procédé de production ou d'acquisition de composants utilisés comme outils pour fabriquer d'autres marchandises en vrac. L'outillage comprend la production de moules et de matrices (presses), de jauges, de gabarits, de montages et d'outils de coupe.

Photopolymères ou résines photosensibles - Polymères qui subissent une polymérisation lorsqu'ils sont exposés au rayonnement ultraviolet ou visible. L'exposition à la lumière crée des réticulations entre les chaînes de polymère, le faisant passer d'un état fluide à un état solide.

Photopolymérisation - Utilisation de la lumière, qu'elle soit visible ou ultraviolette, pour déclencher une réaction de polymérisation. Dans une réaction de polymérisation, les courtes chaînes de polymères se lient entre elles par des liaisons covalentes pour former soit de longues chaînes de polymères ou une structure réticulée.

Plateforme de fabrication (surface de fabrication) - Base dans la chambre de fabrication d'une imprimante 3D qui fournit une surface pour l'impression de la première couche, qui supporte ensuite la fabrication subséquente couche par couche.

Polymérisation - Procédé chimique qui entraîne le durcissement et la transformation d'un matériau polymère liquide en un solide en provoquant la réticulation des chaînes de polymères. La polymérisation est provoquée par la chaleur ou le rayonnement électromagnétique et peut être facilitée par un catalyseur.

Post-traitement - Étapes suivies au terme d'une série d'impressions 3D pour obtenir les propriétés souhaitées dans le produit fini. L'enlèvement de structures de soutien, le nettoyage, le ponçage, le lissage, le polissage, le revêtement, l'électroplacage et la cuisson dans un séchoir ou un four sont des exemples courants.

Prototypage - Procédé expérimental (et généralement itératif) dans lequel les équipes de conception transforment des idées en une forme tangible. Un prototype est une représentation physique d'un composant ou d'un produit qui peut ne pas avoir toutes les caractéristiques du produit final, mais qui peut être utilisé pour l'analyse, la conception et l'évaluation. Les prototypes sont utilisés pour tester, améliorer et optimiser les modèles avant la production finale.

Revendeur de produits à valeur ajoutée (RPVA) - Entreprise qui fournit à des clients finaux des services après-vente ou des produits personnalisés. Ces revendeurs se situent au milieu de la chaîne de valeur entre les FEO et un client final. Ils informent les clients potentiels sur les applications de FA, se tiennent au courant des besoins des différents marchés, donnent aux FEO leur avis sur leurs produits, et fournissent aux clients des services à valeur ajoutée comme de la formation ou des services de consultation en matière de conception.

Structure de soutien - Partie d'un objet imprimé en 3D qui est incluse dans la conception non pas pour des raisons fonctionnelles ou esthétiques, mais pour soutenir l'impression des autres composants de l'objet. Une fois l'impression terminée, la structure de soutien est retirée. Comme la plupart des formes d'impression 3D comprennent la fabrication par couches, les parties qui ressortent nettement de la partie inférieure (comme les parties supérieures des lettres « T » et « Y » ou la partie horizontale d'un « H ») ne disposeront généralement pas d'un soutien suffisant en dessous pour être imprimées. La structure de soutien d'une impression 3D peut prendre différentes formes selon la conception de l'objet, notamment des colonnes, des structures arborescentes et des modèles linéaires ou en accordéon. Les structures de soutien sont nécessaires pour réaliser de nombreux modèles 3D, mais elles augmentent les coûts, à la fois directement en raison de l'excès de matériau et indirectement en augmentant le temps d'impression et de post-traitement. Les structures de soutien augmentent également le risque d'endommager la pièce imprimée puisque la structure de soutien doit être retirée des autres matériaux imprimés par des procédés mécaniques ou chimiques.

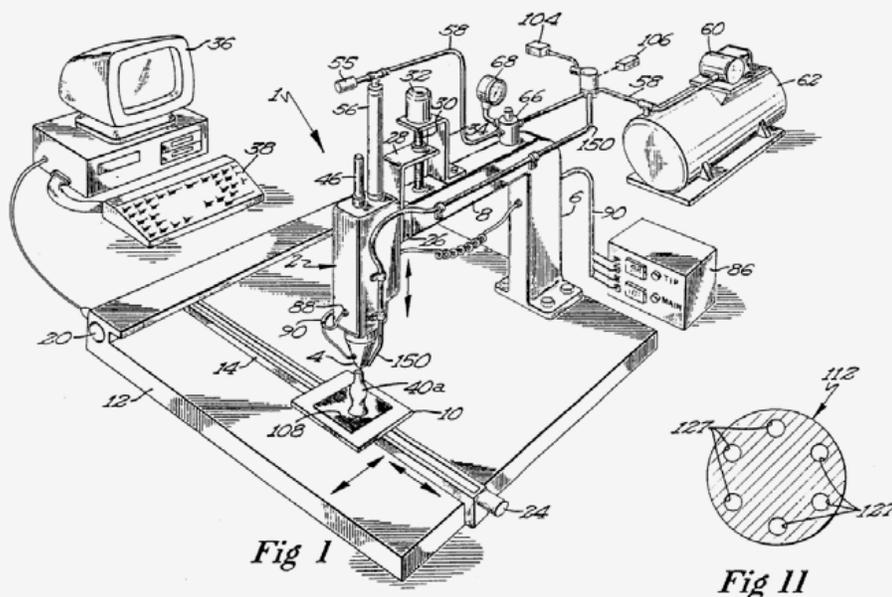
Surface de fabrication - Zone dans une imprimante 3D où un nouveau matériau est ajouté pour former une structure imprimée en 3D. Au début de la plupart des procédés d'impression 3D, la surface de fabrication est la surface de fabrication, mais elle change au fur et à mesure que les procédés d'impression progressent. Dans le cadre de techniques comme l'extrusion ou la projection de matériau, la couche imprimée la plus récente sert de base à la couche d'impression suivante. Dans d'autres procédés, comme la fusion sur lit de poudre, la surface de fabrication est l'endroit où le matériau en poudre fraîche est ajouté afin d'être fusionné aux couches précédentes.

Tête d'impression - Composant d'une imprimante 3D qui se déplace sur la surface de fabrication et dépose le matériau d'impression couche par couche. Les imprimantes 3D ne comprennent pas toutes des têtes d'impression, comme celles qui fonctionnent par fusion sur lit de poudre ou dépôt direct d'énergie.

Thermoplastiques - Matériaux, généralement des polymères plastiques, qui se ramollissent sous l'effet de la chaleur et durcissent lorsqu'ils sont refroidis. Les thermoplastiques peuvent être chauffés et refroidis plusieurs fois sans modifier leurs propriétés mécaniques ou chimiques.

Liste d'acronymes récurrents utilisés dans le présent rapport

3D	Trois dimensions
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAO	Conception assistée par ordinateur
CFA	Conception pour la fabrication additive
CNC	Commande numérique par ordinateur
CNRC	Conseil national de recherches Canada
CTIC	Conseil des technologies de l'information et des communications
EPI	Équipement de protection individuelle
FA	Fabrication additive
FEO	Fabricant d'équipement d'origine
GE	General Electric
ISO	Organisation internationale de normalisation
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
PARI	Programme d'aide à la recherche industrielle
PIB	Produit intérieur brut
PME	Petites et moyennes entreprises
RPVA	Revendeur de produits à valeur ajoutée
STIAM	Science, technologie, ingénierie, arts et mathématiques



Avant-propos

En 2010, j'ai fait ma première expérience pratique de l'impression 3D dans un centre d'accès aux technologies du Collège Sheridan. Au début, en tant que simple amateur, j'ai figolé et expérimenté sans trop réfléchir à la direction que prenait l'industrie de la FA. Peu à peu, je suis devenu fasciné par les matériaux, les procédés et les possibilités apparemment illimitées qu'ils offraient.

Dix ans plus tard, j'ai personnellement installé certaines des technologies de FA les plus avancées au monde dans des installations de fabrication du Canada. En tant que directeur d'un centre d'impression 3D, chercheur et maintenant vice-président d'un RPVA, j'ai vu des entreprises à toutes les étapes du processus d'adoption faire une incursion dans le monde de la FA. J'ai été témoin d'un mouvement qui s'est répandu comme une traînée de poudre partout dans le monde, enflammant l'imagination des créateurs et des exécutants, des étudiants et des enseignants, des ingénieurs et des fabricants. Qu'il s'agisse de jeunes entreprises ou d'organisations mondiales, les entreprises sont constamment à la recherche de moyens de maximiser leurs bénéfices, de minimiser les temps d'arrêt et de demeurer concurrentielles. Les capacités de la FA continuent de progresser rapidement, ce qui nous permet d'ajouter de la valeur au processus de développement des produits de manière unique. Les établissements d'enseignement canadiens investissent dans la FA pour renforcer les capacités de leurs étudiants et les former pour la prochaine génération de la fabrication. Même les fabricants qui sont en activité depuis plus d'un siècle utilisent la FA pour modifier leurs façons de faire.

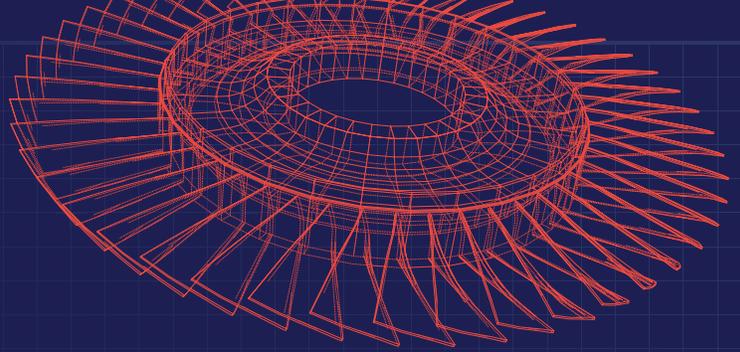
La pandémie de COVID-19 a posé l'un des plus grands défis pour les entreprises de l'histoire moderne et montré la fragilité des chaînes d'approvisionnement mondiales. Ce faisant, elle a fourni une preuve de concept rudimentaire pour la FA. Lorsque le gouvernement du Canada a fait appel à ceux qui disposent de capacités d'impression 3D pour répondre à la pandémie, les fabricants canadiens ont réorganisé leurs chaînes de production pour produire de l'équipement de protection individuelle (EPI), des pièces de ventilateurs et des écouvillons nasopharyngés. J'ai été ému de voir des FEO, des RPVA, des écoles, des entreprises et des entrepreneurs utiliser leurs capacités de FA pour aider les travailleurs de première ligne. Les atouts uniques de la FA ont été démontrés dans le monde entier en cette période d'incertitude. Il existe une réelle occasion pour nous de renforcer l'ensemble de l'économie canadienne en consolidant notre position dominante en matière de FA.

Au cours des prochaines années, la FA continuera de repousser les limites de ce que nous créons et de la façon dont nous le faisons. Les défis et les possibilités abondent. Comme vous le verrez dans le présent rapport, l'écosystème canadien de la FA comprend un groupe diversifié d'organisations, lesquelles ont toutes un rôle à jouer pour favoriser l'adoption de cette technologie transformatrice. En tant qu'employeurs, éducateurs, organismes gouvernementaux et décideurs politiques, nous avons le dernier mot : c'est à nous de décider de l'avenir de la FA au Canada.



Hargurdeep (Deep) Singh, C.E.T.

Vice-président de la fabrication additive, CAD MicroSolutions Inc.



Sommaire

La fabrication additive devrait avoir un impact sur les paradigmes de fabrication dans l'ensemble de l'économie mondiale. Des décennies de progrès technologiques et de baisse de coûts ont engendré une prolifération de nouveaux cas pratiques de la technologie, et ce changement rapide devrait se poursuivre. Au début des années 2000, alors que l'actualisation de la technologie de la FA était plus lente en raison de la baisse des niveaux de financement et d'investissement de l'industrie, l'intérêt pour ce domaine s'est accéléré au cours de la dernière décennie. L'écosystème mondial de la FA connaît actuellement une croissance de 24 % par année, le mettant en bonne voie d'atteindre 35 milliards de dollars étasuniens d'ici 2024³. Le présent rapport visite les technologies de la FA, faisant état de leurs avantages et de leurs limites, ainsi que leurs applications dans des secteurs clés. Il examine les forces et les faiblesses de son écosystème, et explore la diversité des entreprises, des organismes sectoriels et des établissements d'enseignement qui utilisent la FA. Il évalue aussi l'impact de la pandémie de COVID-19 sur l'écosystème de la FA du Canada et explore les politiques visant à promouvoir la croissance postérieure à la pandémie.

La souplesse, la personnalisation et la flexibilité font partie des avantages de la FA en matière de production. Mieux adaptée pour la production de pièces très complexes en petites quantités, la FA peut être utilisée pour créer rapidement des prototypes, réaliser des géométries « impossibles », optimiser la conception des pièces (surtout lorsqu'elle est associée à la conception générative ou algorithmique) et créer des pièces personnalisées sur demande. Elle peut également être intégrée dans les paradigmes traditionnels de fabrication afin de faciliter la production conventionnelle au moyen de gabarits et d'outillages personnalisés, de faciliter la production de composants existants, et de réduire les coûts d'emballage, de logistique et de gestion des stocks. La FA est devenue une cible établie pour la recherche et les investissements dans de nombreux secteurs, notamment les technologies de la santé, la biotechnologie, la fabrication et l'aérospatiale.

Malgré ces avantages et cas pratiques, l'écosystème mondial de la FA représente actuellement moins de 1 % de la valeur de la production manufacturière mondiale, qui était de 13,8 billions de dollars étasuniens en 2019⁴. De nombreux défis techniques et réglementaires devront être relevés avant que la FA ne prenne une place prépondérante dans l'écosystème manufacturier mondial. L'adoption de la FA sera influencée par une série de facteurs, notamment la gamme et la complexité des produits de la FA, les modèles opérationnels, les capacités de fabrication existantes, et l'accès aux ressources financières et aux talents techniques. Au fur et à mesure de l'évolution des technologies de la FA, leur adoption devrait augmenter davantage.

³ Tess Roberts et coll., *3D printing trends 2020*, 3D Hubs, 2020, https://downloads.3dhubs.com/3D_printing_trends_report_2020.pdf.

⁴ *Fabrication, valeur ajoutée (en \$ US actuels)*, Banque mondiale, 2019, https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV.IND.MANF.CD?most_recent_value_desc=true.

Le Canada est une petite puissance dans l'écosystème mondial de la FA, lequel est présentement dominé par la Chine, les États-Unis et l'Union européenne (particulièrement, l'Allemagne). Le Canada compte plusieurs entreprises de renommée mondiale et connaît des succès notables dans plusieurs créneaux, notamment les matières premières de poudre métallique, la recherche en FA des métaux, et les applications de FA dans les secteurs de l'aérospatiale et des sciences de la santé. L'écosystème canadien de la FA est très diversifié et comprend des FEO, des bureaux de services, des RPVA, des cabinets-conseils, de jeunes entreprises, des adoptants sectoriels, et des producteurs de matières premières. Le gouvernement canadien soutient l'écosystème par le biais d'une série de conseils de recherche, d'accélérateurs et de programmes de financement. Il existe des occasions de tirer parti des infrastructures de FA dans les établissements d'enseignement du Canada afin de s'attaquer à la recherche et au développement à haut risque et de faciliter les programmes de formation, tout en créant la canalisation de transfert des technologies de recherche et développement vers l'industrie.

Malgré ces possibilités, l'écosystème canadien de la FA fait face à de nombreux défis. L'industrie a été lente à adopter la FA, surtout en raison des coûts et du rendement incertain des investissements. Les personnes interrogées dans le cadre de l'étude ont mentionné la faible utilisation des fonds publics en raison d'un manque de sensibilisation à ces ressources et des procédés complexes nécessaires pour y accéder. Les participants considèrent également que les programmes de financement sont disproportionnellement axés sur la recherche, plutôt que sur l'adoption et la commercialisation accrue. Les entreprises canadiennes dépendent des chefs de file mondiaux (surtout, la Chine et les États-Unis) pour le matériel de production, les machines et les services techniques. Elles font généralement face à une forte concurrence dans ces pays, lesquels disposent d'économies d'échelle et d'un accès au capital remarquables. Les programmes d'études en FA au Canada, bien que déjà répandus, en sont présentement à leurs balbutiements et doivent bénéficier d'un effort soutenu pour assurer leur émergence. Aucun établissement ne propose guère plus que quelques cours en FA, lesquels sont souvent réservés aux étudiants de niveau supérieur. En raison des coûts d'exploitation et du manque de financement pour le développement de programmes éducatifs, l'équipement industriel haut de gamme en FA sert généralement d'infrastructure de recherche, et l'accès aux ressources de FA sur les campus se limite généralement aux imprimantes à polymères grand public.

La mesure dans laquelle les organisations canadiennes de FA emploient des spécialistes en FA varie, les grandes organisations étant plus susceptibles d'adopter des technologies que d'innover. Le recrutement pour des postes en FA s'étant nettement accéléré au cours des trois dernières années, il semble avoir diminué récemment en raison de la pandémie de COVID-19. Alors que la croissance de la FA devrait généralement être rapide à moyen terme (environ 20 % par année)⁵, elle repose sur une base relativement limitée. Actuellement, peu d'organisations au Canada utilisent la FA pour fabriquer des produits en grandes quantités, et les rôles axés sur la FA représentent un faible pourcentage des emplois dans les organisations qui adoptent la technologie.

⁵ Voir figure 1 : Taille du marché de la fabrication additive – Histoire et prévisions. Source : 3D Printing Trends 2020: Industry Highlights and Market Trends, 3D Hubs, p. 25.

Les récentes perturbations des chaînes d'approvisionnement et de la fabrication à l'échelle mondiale ont offert une occasion unique à la FA d'intervenir et de combler des lacunes inattendues. Le Canada, comme de nombreux autres pays, a vu une mobilisation à grande échelle des capacités de la FA de produire des dispositifs médicaux et des EPI. Les participants à l'étude ont noté que la pandémie de COVID-19 et les perturbations connexes ont contribué à faire connaître et accepter la FA. La pandémie a permis à certaines entreprises de l'écosystème de la FA du Canada de se développer rapidement, mais elle a aussi été un choc à court terme pour d'autres. Si la plupart des entreprises canadiennes de FA ne font pas menacées par la pandémie et les fermetures qui en découlent, les leçons tirées de cette période de turbulences peuvent servir de guide aux organisations en difficulté qui dépendent de sources de revenus limitées, du bouche-à-oreille, du commerce en face à face et de chaînes d'approvisionnement complexes ou internationales.

Les interventions qui pourraient contribuer à la croissance de l'écosystème de FA au Canada sont nombreuses, comprenant notamment des investissements dans l'éducation et d'autres formes d'aide. Il pourrait s'agir d'offrir aux étudiants de tous les niveaux une exposition pratique à des équipements industriels de grande valeur ou encore de créer une stratégie nationale en la matière. À l'heure actuelle, l'écosystème de la FA du Canada se trouve à la croisée des chemins. Bien que les progrès technologiques et les tendances du marché mondial favorisent la croissance continue de la FA dans le monde entier et que le Canada ait un fort potentiel d'exploitation de la croissance de la FA, rien ne garantit qu'il le fera, étant donné le dynamisme et la capacité concurrentielle du marché. Grâce à une stratégie solide et ciblée ainsi qu'à un ensemble de politiques axées sur l'industrie qui exploitent les atouts de la FA, le Canada peut accroître ses chances de demeurer un joueur concurrentiel dans ce secteur en pleine évolution.



Introduction et contexte

Qu'est-ce que la fabrication additive?

La fabrication additive, aussi connue sous le nom d'impression tridimensionnelle (ou 3D), est une catégorie de procédés de fabrication grâce à laquelle un objet ou une pièce est fabriqué en convertissant une version numérique de la pièce en sa forme physique 3D par l'ajout de matériau couche par couche⁶. L'appellation *fabrication additive* permet de distinguer cette catégorie de procédés de fabrication des procédés *soustractifs* (usinage, fraisage) et *formatifs* (moulage, estampage, moulage par injection) traditionnels.

Tous les procédés de FA suivent le même flux de travail de base. Un modèle numérique est d'abord créé pour servir de schéma directeur à l'objet produit. Un logiciel convertit ensuite ce modèle informatique 3D en fines couches bidimensionnelles qui sont ensuite imprimées en couches superposées à l'aide d'un ou de plusieurs procédés électriques, mécaniques et chimiques. Les récents progrès réalisés dans certains procédés de FA^{7,8,9} commencent aussi à permettre l'impression 3D d'objets entiers en une seule fois, contournant ainsi l'approche couche par couche et ses faiblesses inhérentes.

Les différents types de procédés de FA ont leurs avantages et limites respectifs et facilitent la production au moyen de divers matériaux comme les plastiques, les céramiques, les métaux et les composites. Le temps nécessaire à une impression 3D particulière dépend de plusieurs facteurs, notamment de la taille et de la complexité de l'objet fabriqué ainsi que du type de procédé de FA et d'imprimante 3D utilisée¹⁰. Les pièces imprimées en 3D nécessitent souvent aussi un certain post-traitement (nettoyage, lissage, polissage, cuisson dans un séchoir ou un four, élimination de structures de soutien, etc.) avant qu'elles soient prêtes à l'emploi.

La FA ne fait généralement pas appel à des outils ou à des moules spécialisés puisque l'objet final est directement fabriqué sur la plateforme de fabrication de l'imprimante 3D. Les coûts de mise en place des procédés de FA sont donc relativement faibles, ce qui en fait une option économique pour le prototypage et le développement de produits, la production à faible volume et la personnalisation individuelle. Grâce aux récents progrès réalisés dans les matériaux d'impression 3D et les matières premières ainsi qu'au perfectionnement des technologies de FA, une prolifération de nouveaux cas pratiques de FA a été observée. Ces progrès ont également contribué à réduire davantage les coûts unitaires. Bien que la plupart des fabricants de produits de FA utilisent la technologie pour des séries limitées (des centaines de pièces ou moins)¹¹, la production à plus grande échelle est de plus en plus viable sur le plan économique. Dans quelques cas, la FA a été adoptée avec succès pour la production en série, allant de dizaines de milliers à des millions d'unités^{12,13,14}.

6 ISO/ASTM 52900:2015 – Fabrication additive – Principes généraux – Terminologie, ISO, 2015, <https://www.iso.org/fr/standard/69669.html>.

7 Carbon3D introduces CLIP, breakthrough technology for layerless 3D printing, Carbon, 2015, <https://www.carbon3d.com/news/press-releases/carbon3d-introduces-clip-breakthrough-technology-for-layerless-3d-printing/>.

8 Davide Castelvecchi, « Forget everything you know about 3D printing – the 'replicator' is here », Nature, 2019, <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07798-9>.

9 Damien Loterie, Paul Delrot et Christophe Moser, « High-resolution tomographic volumetric additive manufacturing », Nature Communications, Nature, 2020, <https://www.nature.com/articles/s41467-020-14630-4>.

10 What is 3D printing? The definitive guide, 3D Hubs, 2017, https://downloads.3dhubs.com/3D_Printing_The_Definitive_Guide.pdf.

11 3D Printing At Scale: A Survey of 3D Production Manufacturing Stakeholders, Dimensional Research, 2019, https://www.essentium.com/wp-content/uploads/2019/10/3D_Printing_at_Scale_A_Study_by_Dimensional_Research_and_Sponsored_by_Essentium.pdf.

12 Jon Bruner, et Balazs Kisgergely, The Digital Factory Report, Formlabs, 2019, <https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/The-Digital-Factory-Report.pdf>.

13 Kristel Milet, « 3D printing, from Chanel's new mascara brush to the current health emergency », Beauty News, 2020, <https://www.premiumbeautynews.com/en/3d-printing-from-chanel-s-new,16631>.

14 « Erpro Group, pionnier de la production en série », L'usine nouvelle, 2020, <https://www.usinenouvelle.com/article/erpro-group-pionnier-de-la-production-en-serie.N1010154>.



La fabrication additive : une brève histoire

Bien que certains chercheurs aient émis des théories sur les procédés de FA dès les années 1950 et 1960, les premières étapes pour en faire un procédé de fabrication courant ont été entreprises dans les années 1980. En 1964, le rédacteur scientifique et futuriste Arthur C. Clarke a imaginé un « répliqueur » capable de fabriquer des objets « aussi facilement que nous pouvons fabriquer des livres aujourd'hui¹⁵ ». En 1974, le chimiste et auteur David E.H. Jones a publié ses « réflexions sur les nouveaux procédés de fabrication des plastiques » dans sa chronique régulière « Ariadne » du populaire magazine scientifique *New Scientist*¹⁶. L'article exposait le concept de base de l'impression 3D par photopolymérisation. Les premiers brevets pour des méthodes et des équipements de FA ont été déposés au Japon et en France au début des années 1980, mais les projets associés à ces brevets ont été abandonnés par manque d'intérêt et de financement.¹⁷

L'innovation dans le domaine de la FA a commencé à se développer aux États-Unis au milieu et à la fin des années 1980 ainsi qu'au début des années 1990. À cette époque, des brevets ont été accordés pour certains des procédés les plus populaires utilisés aujourd'hui, notamment la stéréolithographie¹⁸, le frittage sélectif au laser¹⁹ et le dépôt de filament fondu²⁰. Les premières imprimantes commerciales 3D étaient grandes et coûteuses et produisaient des pièces en plastique dont la résolution était inférieure et les propriétés physiques plus faibles que les pièces fabriquées selon les méthodes de fabrication traditionnelles. Ces imprimantes ont donc été utilisées principalement pour le prototypage industriel de pièces fonctionnelles non critiques, pour lesquelles les propriétés mécaniques n'étaient pas cruciales et la réduction des délais et des coûts de développement de produits justifiait l'important investissement initial requis.

¹⁵ « How was Arthur C. Clarke able to see into the future? », BBC, 2018, <https://www.bbc.co.uk/ideas/videos/how-was-arthur-c-clarke-able-to-see-into-the-future/p05tdpm6>. [traduction]

¹⁶ « Ariadne », *New Scientist*, 3 octobre 1974, p. 80, <https://books.google.ca/books?id=nvabM3KXNsUC&pg=PA80#v=onepage&q&f=false>. [traduction]

¹⁷ Leo Greguric, *History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented?*, All3DP, 2018, <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>.

¹⁸ Charles Hull, *Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography*, Brevet étasunien no 4,575,330. United States Patent and Trademark Office, 1986, <https://patents.google.com/patent/US4575330>.

¹⁹ Carl Deckard, *Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering*, Brevet étasunien no 4,863,538. United States Patent and Trademark Office, 1989, <https://patents.google.com/patent/US4863538A>.

²⁰ S. Scott Crump, *Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects*, Brevet étasunien no 5,121,329. United States Patent and Trademark Office, 1992, <https://patents.google.com/patent/US5121329A>.

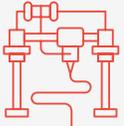
À la fin des années 1990 et au début des années 2000, le développement des technologies de FA s'est accéléré. La technologie de frittage sélectif au laser a été brevetée en Allemagne en 1996²¹, jetant les bases du développement de l'impression 3D sur métal. C'est aussi pendant cette période que la bio impression 3D et la FA en sciences médicales ont fait leurs premiers pas, alors que des recherches révolutionnaires étaient menées au Wake Forest Institute of Regenerative Medicine^{22,23}, et à l'Université de Clemson^{24,25}.

Entre le milieu des années 2000 et le milieu des années 2010, la FA est devenue de plus en plus accessible et a été adoptée pour un plus grand nombre de cas pratiques que jamais. Le projet RepRap²⁶ a été lancé au Royaume-Uni en 2004 en tant qu'initiative de source ouverte pour fabriquer une « machine de fabrication autorépliquable²⁷ ». En 2008, il a lancé Darwin²⁸, une imprimante 3D pouvant imprimer 70 % de ses propres pièces (le reste étant des composants électroniques et mécaniques bon marché et facilement accessibles). L'expiration des brevets de plusieurs technologies clés de FA a aussi permis de réduire les obstacles à l'entrée pour les innovateurs²⁹, permettant ainsi l'émergence de plusieurs nouvelles entreprises axées sur le marché de l'impression 3D grand public et entraînant une réduction drastique du prix des imprimantes 3D de bureau. Ces développements ont suscité un engouement généralisé pour l'impression 3D et été les principaux moteurs de croissance d'une « culture du fabricant³⁰ » (une extension technologique de la culture du bricolage libre-service). Le domaine a bénéficié d'un nouvel élan grâce au président étasunien Barack Obama. Dans son discours sur l'état de l'Union de 2013, le président en a parlé comme d'un moteur de croissance de l'emploi et de revitalisation du secteur manufacturier³¹.

D'après les recherches faites dans Google dans le monde entier, l'intérêt pour l'impression 3D a grimpé en flèche au début des années 2010 et semble avoir atteint son apogée vers 2013, avant de reculer au milieu des années 2010. L'engouement a progressivement repris de la vigueur depuis, augmentant encore au milieu de l'année 2020 pendant la pandémie³². Au cours des dernières années, un rajustement des attentes et de l'engouement a été observé, ainsi qu'un changement d'orientation de l'adoption généralisée par les consommateurs vers l'industrie manufacturière et la production industrielle.

- 21 Wilhelm Meiners, Konrad Dr Wissenbach et Andres Dr Gasser, *Shaped body especially prototype or replacement part production*, DE19649865C1. German Patent and Trademark Office, 1998, <https://patents.google.com/patent/DE19649865C1/en>
- 22 A Record of Firsts, Wake Forest School of Medicine, 2020, <https://school.wakehealth.edu/Research/Institutes-and-Centers/Wake-Forest-Institute-for-Regenerative-Medicine/Research/A-Record-of-Firsts>.
- 23 Matthew Whitaker, « The history of 3D printing in healthcare », *The Bulletin*, 2018, <https://publishing.rcseng.ac.uk/doi/pdf/10.1308/147363514X13990346756481>
- 24 Charles Choi, « Ink-jet printing creates tubes of living tissue », *New Scientist*, 2003, <https://www.newscientist.com/article/dn3292-ink-jet-printing-creates-tubes-of-living-tissue/>.
- 25 Thomas Boland, William C. Wilson et Tao Xu, *Ink-jet printing of viable cells*, Brevet no 7051654. Clemson Patents, 2006, https://tigerprints.clemson.edu/clemson_patents/218/
- 26 Welcome to RepRap.org, RepRap.org, 2020, <https://reprap.org/wiki/RepRap>.
- 27 <https://www.cambridge.org/core/journals/robotica/article/reprap-the-replicating-rapid-prototyper/5979FD7B0C066CBCE43EEAD869E871AA>
- 28 Zach Smith, RepRapOneDarwin, RepRap.org, 2007, https://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin#How_to_build_RepRap_1.0_.22Darwin.22
- 29 « How expiring patents are ushering in the next generation of 3D printing », *Tech Crunch*, 2016, <https://techcrunch.com/2016/05/15/how-expiring-patents-are-usher-in-the-next-generation-of-3d-printing/>
- 30 Tim Bjarin, « Why the Maker Movement is Important to America's Future », *Time*, 2014, <https://time.com/104210/maker-faire-maker-movement/>
- 31 Doug Gross, « Obama's speech highlights rise of 3-D Printing ». *CNN Business*, 2013, <https://www.cnn.com/2013/02/13/tech/innovation/obama-3d-printing/index.html>
- 32 Google Trends. 2020, <https://trends.google.com/trends/explore?date=all&q=3D%20printing,%2Fm%2F04rk8g>

Bien que certaines prévisions fantaisistes faites pendant l'engouement pour l'impression 3D ne se soient pas matérialisées, la technologie sous-jacente a connu un développement constant qui facilite la FA employant une plus grande variété de matériaux, la réduction des coûts, et des résultats de meilleure qualité³³. Grâce à plusieurs avancées dans l'impression 3D sur métal³⁴ et à de nouvelles découvertes utilisant l'intelligence artificielle, les structures en treillis et les géométries complexes pour optimiser la conception, le poids et le rendement des pièces³⁵, la FA est bien placée pour connaître une expansion et une adoption accrue au cours des prochaines années.



En combinant la conception générative, l'apprentissage machine, la robotique intelligente et les matériaux intelligents pour créer une nouvelle génération de puissants outils de conception et d'ingénierie, un nouvel horizon plus prometteur se dessine pour la fabrication additive, un horizon dont l'obstacle à l'entrée est nettement moins important. Grâce à ses solides racines dans l'industrie des logiciels de CAO et à ses talents nombreux et diversifiés dans le domaine de l'intelligence artificielle, le Canada est très bien placé pour être à l'avant-garde de cette révolution en tant que fournisseur majeur de technologies de conception numérique, d'éducation et de services de fabrication, à condition que le secteur privé investisse de manière ciblée et que le gouvernement offre un soutien adéquat. [traduction]

– Cadre, entreprise de logiciels de FA, Ontario

³³ Mark Zastrow, « 3D printing gets bigger, faster and stronger », *Nature*, 2020, <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00271-6>

³⁴ « Metal 3D Printing as an Enabler of Industry 4.0 », *The Digital Factory*, 2019, <https://www.thedigitalfactory.com/videos/metal-3d-printing-as-an-enabler-of-industry-4-0>

³⁵ Torsten Schnabel, Markus Oettel et Dr. Bernhard Mueller, « Design for Additive Manufacturing: Guidelines and Case Studies for Metal Applications », *Fraunhofer IWU*, 2017, http://canadamakes.ca/wp-content/uploads/2017/05/2017-05-15_Industry-Canada_Design4AM_141283.pdf

Les sept familles de la fabrication additive

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'American Society for Testing and Materials (ASTM) ont collectivement présenté sept grandes catégories de procédés de FA, conformément à la dernière norme (ISO/ASTM 52900:2015³⁶). Ces catégories sont définies et comparées dans le tableau ci-après.

Tableau 1 : Les sept familles de la fabrication additive

Données compilées par le CTIC auprès de sources de référence multiples^{37,38,39,40,41}



TECHNOLOGIES



APPLICATIONS



MATÉRIAUX



FORCES ET LIMITES

1 PROJECTION DE LIANT

L'agent liant liquide est déposé de manière sélective en couches minces pour lier la matière en poudre.

Comme pour une imprimante à jet d'encre, la tête d'impression se déplace sur la plateforme de fabrication et dépose des gouttelettes d'adhésif liant. Lorsqu'une couche est complète, le lit de poudre descend, une nouvelle couche de poudre est dispersée sur la plateforme de fabrication, et la couche suivante est imprimée par-dessus la précédente.

Modèles architecturaux en couleur, emballage, etc.

Moules et noyaux pour moulage au sable

Pièces métalliques non critiques basse performance

Plastique en poudre
Métal
Céramique
Verre
Sable et gypse

- Faible coût de production
- Vitesse relativement élevée
- Aucune distorsion thermique
- Impression en couleur
- Propriétés mécaniques relativement faibles
- Post-traitement nécessaire

2 DÉPÔT D'ÉNERGIE DIRIGÉE

Une énergie thermique ciblée est utilisée pour fusionner les matériaux en les faisant fondre au fur et à mesure qu'ils sont déposés

Ce procédé est essentiellement une forme de soudage par accumulation automatisée. Un fil ou une poudre métallique est ajouté à une cuve d'immersion créée sur la surface de fabrication à l'aide d'une source d'énergie comme un faisceau laser ou électronique. Le nouveau métal fusionne avec la couche sous-jacente pour former la pièce.

Dépôt de métal au laser
Procédé LENS
Procédé DMD
Fabrication additive à faisceau électronique
Fabrication additive à l'arc électrique

Réparation et modification de pièces métalliques existantes ou endommagées
Forme quasi nette de grandes pièces

Fil et poudre métalliques (titane, acier inoxydable, aluminium, cuivre, Metal Wire and Powder, acier à outils)

- Plus facile de produire de grandes pièces composées de plusieurs métaux
- Meilleures propriétés mécaniques
- Matière première moins coûteuse que la fabrication par métal en poudre
- Vitesse d'impression élevée
- Coût élevé en capital
- Basse résolution
- Mauvaise finition de surface
- Pas idéal pour certaines géométries

³⁶ ISO/ASTM 52900:2015 – Fabrication additive – Principes généraux – Terminologie, ISO, 2015, <https://www.iso.org/fr/standard/69669.html>

³⁷ Quick Reference: 7 Families of Additive Manufacturing, Hybrid Manufacturing Technologies, 2015, www.additivemanufacturing.media/cdn/cms/7_families_print_version.pdf

³⁸ Additive Manufacturing Technologies, 3D Hubs, 2020, <https://www.3dhubs.com/get/am-technologies/>

³⁹ Ben Redwood, Additive manufacturing technologies: An overview, 3D Hubs, <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>

⁴⁰ Cassidy Silbernagel, Additive Manufacturing 101: What is it?, LinkedIn, <https://www.linkedin.com/pulse/additive-manufacturing-101-what-cassidy-silbernagel/>

⁴¹ Mohammad Rafiee, Rouhollah D. Farahani et Daniel Therriault, « Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey », Advanced Science, 2020, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/advs.201902307>



TECHNOLOGIES



APPLICATIONS



MATÉRIAUX



FORCES ET LIMITES

3

EXTRUSION DE MATÉRIAU

Le matériau est distribué de manière sélective par une buse ou un orifice.

Le matériau de fabrication est extrudé par une buse, une seringue ou un autre orifice et déposé en fines couches sous forme de lignes ou de gouttes. Les procédés les plus couramment utilisés consistent à faire passer des filaments ou des granules thermoplastiques dans une buse chauffée (semblable à un pistolet à colle chaude), ou des liquides ou des coulis dans une seringue.

Dépôt de filament fondu
Dépôt de filament en fusion
Impression à jet sur plastique
Écriture directe à l'encre
Dépôt de plastique par couche

Prototypage
Emballage
Kits de loisirs et de bricolage
Conduits d'air en aérospatiale
Gabarits et accessoires
Applications médicales

Filaments et granules thermoplastiques, liquides, résines thermodurcies, biopolymères et coulis

- Faibles coûts d'installation et de production
- Utilisation facile avec possibilité d'impression à l'interne, sans nécessiter d'atelier
- Imprimante de taille relativement petite
- Sensible au gauchissement et au délaminage
- Peut avoir une précision dimensionnelle relativement faible
- Lignes de couche visibles dans la finition
- Forte anisotropie

4

PROJECTION DE MATÉRIAU

Des gouttelettes de matériaux de fabrication sont déposées de manière sélective.

Comme dans le cas d'une imprimante à jet d'encre, la tête d'impression se déplace sur la surface de fabrication et dépose des gouttelettes « d'encre » (photopolymères, ou suspensions liquides de métal, de cire, etc.) pour former une couche. Chaque couche est durcie par exposition à la chaleur ou à la lumière ultraviolette avant que la suivante soit imprimée par-dessus.

Projection de polymères
Impression à courbure lisse
Modelage à jets multiples
Projection de nanoparticules
Goutte à la demande

Prototypes visuels et haptiques haute résolution en couleur
Moules et gabarits pour moulage à la cire perdue et fabrication de moules

Photopolymères
Polymères
« Encres » métalliques et céramiques
Cires

- Résolution, détails et finition de surface de grande qualité
- Impression à matériaux et couleurs multiples
- Coûts d'installation et de production élevés
- Propriétés mécaniques faibles

5

FUSION SUR LIT DE POUDRE

L'énergie thermique fusionne de manière sélective les sections d'un lit de poudre.

Une source d'énergie thermique ciblée (laser, faisceau d'électrons, etc.) se déplace sur un lit de poudre pour fusionner les particules aux couches sous-jacentes par frittage ou fusion localisé. Après l'impression de chaque couche, la plateforme de fabrication est abaissée, une nouvelle couche de poudre est déposée sur le lit de poudre, et la couche suivante est imprimée par dessus. À la fin du procédé, la pièce terminée est retirée du lit de poudre non fondue.

Frittage sélectif au laser
Procédé DMLS
Procédé DMLM
Fusion sélective au laser
Fusion par faisceau d'électrons
Frittage sélectif à la chaleur
Fusion par jets multiples

Fabrication de produits finis de pièces métalliques et plastiques dans diverses industries
Implants médicaux et outils chirurgicaux

Plastiques
Poudres métalliques et céramiques
Sable

- Excellentes propriétés mécaniques
- Haute résolution et complexité
- Consommation d'énergie relativement élevée
- Coûts d'installation et de matériaux élevés
- Rugosité de la surface et fini initial qui dépendent de la qualité des premières matières
- Peut être sensible au gauchissement, au rétrécissement et à d'autres déformations thermiques
- Plus de gaspillage de matériaux que les autres procédés de FA



TECHNOLOGIES



APPLICATIONS



MATÉRIAUX



FORCES ET LIMITES

6 STRATIFICATION EN FEUILLE

Des feuilles de matériau sont collées pour former une pièce.

De minces feuilles de matériau sont empilées et laminées ensemble pour former la pièce. Selon le procédé, chaque nouvelle couche est découpée et collée aux autres couches, ou vice versa. Selon les matériaux d'impression, le procédé de collage peut faire appel à des adhésifs ou à d'autres produits chimiques, à la soudure par ultrasons ou au brasage.

Procédé soustractif de lamination
Stratification sélective à dépôt
Fabrication additive à ultrasons
Fabrication assistée par ordinateur de matériaux d'ingénierie laminés

Prototypes basse fidélité
Emballage
Pièces avec composants de FEO intégrés
Production de pièces de fibre composite ou céramique de qualité

Papier
Feuilles de plastique
Feuilles et rubans métalliques
Feuilles de fibres composites et céramiques

- Coût relativement faible et taux de fabrication élevé
- Permet l'impression à matériaux multiples et l'intégration de composants externes
- Possibilité d'imprimer en couleur avec du papier
- Post-traitement nécessaire
- Plus de gaspillage que les autres procédés de FA
- Résolution qui dépend de l'épaisseur des matières premières

7 PHOTOPOLYMÉRISATION EN CUVE

Le photopolymère liquide dans une cuve est durci de manière sélective par polymérisation activée par la lumière.

La lumière ultraviolette ou visible est projetée ou tracée sur la surface de fabrication, laquelle est submergée dans une cuve de résine photopolymère liquide. La section de la résine qui est exposée à la lumière se solidifie et fusionne avec les couches précédentes. La plateforme de fabrication est ensuite déplacée pour permettre à une nouvelle couche de résine de couler sur la surface de fabrication, et le procédé se répète pour imprimer la couche suivante.

Appareil de stéréolithographie
Traitement numérique de la lumière
Balayage, rotation et photopolymérisation sélective
Production continue d'interface liquide (aussi appelée traitement continu de la lumière directe)
Polymérisation à deux photons

Prototypes visuels
Gabarits par moulage par injection à faible tirage
Guides chirurgicaux, gabarits orthodontiques, gouttières dentaires, appareils de rétention et prothèses

Résines photopolymères (plastiques) durcissant à la lumière ou aux rayons ultraviolets

- Résolution, précision et complexité de grande qualité
- Finition de surface lisse
- Possibilité d'impression à l'interne sans nécessiter d'atelier
- Pièces fragiles dont la résistance mécanique et l'anisotropie sont limitées
- Structures de soutien toujours essentielles, nécessitant leur élimination et un post-traitement
- Courbage et autres distorsions

Les possibilités de la FA

D'abord utilisée pour le prototypage et les tests rapides, la FA est maintenant utilisée pour la fabrication de petits lots, la personnalisation, les réparations, la fabrication de pièces de rechange, et même la production en série⁴². Selon le rapport Wohlers publié en 2020⁴³, la valeur de tous les produits et services de FA dans le monde a augmenté de 21,2 % en 2019, pour atteindre un total de 11,87 milliards de dollars étasuniens. Ce chiffre inclut les ventes de systèmes d'impression 3D industriels, d'imprimantes 3D de bureau, de matières premières, de pièces, de logiciels et d'autres services de fournisseurs. Cette estimation de la taille du marché de la FA a presque doublé depuis 2016, alors que le marché était évalué à 6,06 milliards de dollars étasuniens⁴⁴. Des études réalisées par EY⁴⁵ et SmartTech⁴⁶ ont révélé des estimations similaires de la taille et de la croissance du marché de la FA. La croissance de la FA est guidée à la fois par l'adoption des technologies de FA par de nouvelles organisations et l'adoption accrue de la FA par les utilisateurs actuels de la technologie.

Les investissements privés et publics dans la FA ont également connu une croissance tout aussi impressionnante au cours des dernières années. Les investissements en capital-risque dans les entreprises de FA entre 2016 et le troisième trimestre de 2020 ont dépassé les 4 milliards de dollars étasuniens⁴⁷. En 2019, le financement du capital-risque dans les jeunes entreprises de FA a connu une année record, enregistrant des investissements de plus d'un milliard de dollars étasuniens⁴⁸. Compte tenu de la crise économique et de la volatilité des marchés financiers engendrées par la pandémie de COVID-19, l'année 2020 devrait enregistrer une baisse des investissements en capital-risque. Néanmoins, des investissements de plus de 600 millions de dollars étasuniens ont été réalisés dans de jeunes entreprises de FA jusqu'au troisième trimestre, y compris des cycles de financement important pour les entreprises canadiennes Equispheres⁴⁹ et Aspect Biosystems⁵⁰. Une croissance similaire a également été observée dans les activités de fusion et d'acquisition sur le marché de la FA, les transactions entre les fabricants traditionnels, les fabricants d'équipement de FA et les entreprises de l'ensemble de la chaîne de valeur de la FA enregistrant une hausse⁵¹.

Une grande partie des investissements récents dans la FA ont été consacrés à des applications industrielles et de production⁵². Les autres tendances marquantes qui se dessinent dans l'espace de la FA incluent une hausse de l'adoption par les utilisateurs industriels ainsi que pour la production de pièces finales⁵³.

⁴² Jon Bruner et Balazs Kisgergely, *The Digital Factory Report*, Formlabs, 2019,

<https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/The-Digital-Factory-Report.pdf>

⁴³ Wohlers Report 2020, Wohlers Associates, 2020, <https://wohlersassociates.com/2020report.htm>

⁴⁴ Ibid.

⁴⁵ Stefana Karevska et coll., *3D printing: hype or game changer?*, EY, 2019,

https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/advisory/ey-3d-printing-game-changer.pdf

⁴⁶ « SmarTech Publishing Issues 2019 Additive Manufacturing Market Outlook ». SmarTech Analysis, 2019 : <https://www.smartechanalysis.com/news/smartech-publishing-issues-2019-additive-manufacturing-market-outlook/>

⁴⁷ 3D Printing Q3 Summary Card, Venture Scanner, 2020, <https://www.venturescanner.com/2020/10/16/3d-printing-q3-summary-card/>

⁴⁸ Roberts et coll., loc. cit.

⁴⁹ David Sali, « Ottawa's Equispheres lands \$17 M in new funding for high-tech metal powder », *Ottawa Business Journal*, 2020, <https://www.obj.ca/article/ottawas-equispheres-lands-17m-new-funding-high-tech-metal-powder>

⁵⁰ Meagan Simpson, Aspect Biosystems Raises \$26 million CAD in Series A for 3D Printing of Human Tissues, Betakit, 2020, <https://betakit.com/aspect-biosystems-raises-26-million-cad-in-series-a-for-3d-printing-of-human-tissues/>

⁵¹ Karevska, loc. cit.

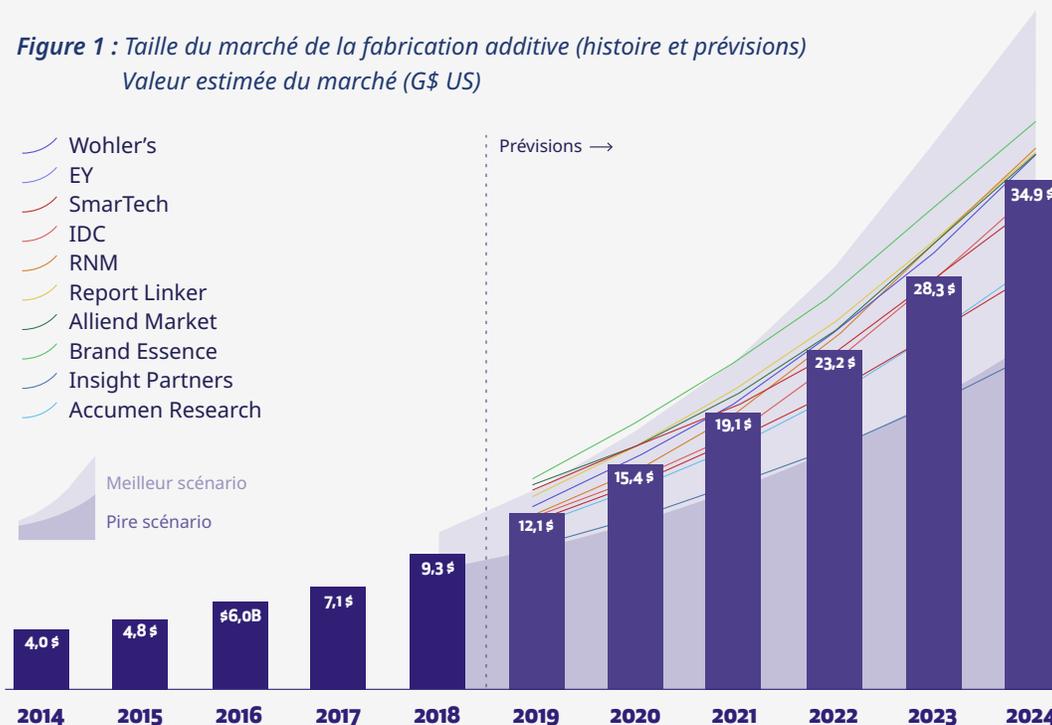
⁵² Sarah Goehrke, « Why Are Investors Pouring Millions into 3-D Printing? », *Forbes*, 2019, <https://www.forbes.com/sites/sarahgoehrke/2019/01/25/why-are-investors-pouring-millions-into-3-d-printing/?sh=1683b2c97f94>

⁵³ Karevska, loc. cit.

De plus en plus d'entreprises investissent également dans la FA, et ces investissements sont plus importants⁵⁴. Bien qu'il reste des défis majeurs à relever pour une adoption industrielle à plus grande échelle, notamment augmenter la fiabilité, réduire les coûts des matières premières, en particulier pour la FA sur métal, et promouvoir davantage l'éducation et la formation au sujet des différentes technologies de FA, les perspectives globales du marché mondial de la FA sont positives. Les analystes s'attendent à ce que le marché connaisse une croissance annuelle de 20 à 30 % au cours des prochaines années, doublant effectivement sa taille tous les 3 à 4 ans. La figure suivante combine les prévisions de croissance du marché de la FA de plusieurs analystes du marché. Elle estime que ce marché représentera près de 35 milliards de dollars étasuniens d'ici 2024.⁵⁵

Figure 1 : Taille du marché de la fabrication additive (histoire et prévisions)

Valeur estimée du marché (G\$ US)



Source : 3D Printing Trends 2020: Industry Highlights and Market Trends, 3D Hubs⁵⁶

Il est important de noter que ces prévisions ont été faites avant la COVID-19 et les perturbations économiques et financières attribuables aux confinements mondiaux. Comme la plupart des secteurs, l'industrie manufacturière (y compris la FA) devrait subir une baisse de la demande et des investissements à court terme étant donné le ralentissement macroéconomique mondial. Cependant, il y a des signes encourageants pour la FA puisque plusieurs de ses avantages clés, y compris sa souplesse, sa personnalisation, sa flexibilité et la résilience relative de ses chaînes d'approvisionnement plus courtes et plus simples, ont suscité un intérêt général dans le contexte des confinements et des perturbations des chaînes d'approvisionnement à l'échelle mondiale. Même si l'incertitude demeure quant à l'impact ultime de la pandémie de COVID-19 sur la FA, l'optimisme est général quant aux perspectives à moyen et long terme de cette technologie, malgré quelques revers à court terme⁵⁷. Ce point de vue est corroboré et développé dans notre recherche primaire auprès d'experts de la FA au Canada, comme nous le verrons plus loin, dans la section sur la COVID-19 du présent rapport.

⁵⁴ The State of 3D Printing: 2020 Edition, Sculpteo, 2020, https://info.sculpteo.com/hubfs/downloads/The%20State%20of%203D%20Printing_2020%20edition.pdf

⁵⁵ Roberts et coll., loc. cit.

⁵⁶ Ibid.

⁵⁷ TJ McCue, Additive Manufacturing Industry Grows to Almost \$12 Billion in 2019, Forbes, 2020, <https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2020/05/08/additive-manufacturing-industry-grows-to-almost-12-billion-in-2019/?sh=52dba8735678>.

A close-up photograph of a metallic mesh structure with a wavy, undulating pattern. The mesh is composed of interconnected, rounded, wave-like segments that create a series of small, irregular openings. The lighting is dramatic, highlighting the metallic texture and the three-dimensional quality of the structure. The background is a solid, dark blue-grey color.

Les avantages de la FA

L'intérêt et l'innovation dans le domaine de la FA ont été motivés par ses avantages uniques par rapport à la fabrication formative ou soustractive traditionnelle ainsi que les lacunes de ces procédés.

Agilité - Prototype rapide et itération de la conception

La FA permet la production de petits lots sans nécessiter d'outils ni d'installations. Cet avantage a permis à la technologie de la FA d'être une option commercialement viable pour le prototypage industriel et les tests de conception dès les premières étapes de son propre développement. Le prototypage rapide et l'itération de la conception sont les plus anciens cas pratiques de la FA⁵⁸. La création de prototypes à l'aide de méthodes conventionnelles prenait souvent des semaines, voire des mois. Les procédés de FA peuvent produire des prototypes en quelques heures, accélérant ainsi considérablement la conception de produits et le délai de mise en marché. Des décennies d'amélioration du matériel, des matériaux et des compétences des utilisateurs en la matière ont permis d'améliorer considérablement la qualité des produits, les propriétés mécaniques, la vitesse de production et les coûts, ce qui a permis à un plus grand nombre d'industries et de participants, des multinationales aux élèves du secondaire⁵⁹, d'utiliser la FA pour l'idéation et la conception.



C'est une question d'agilité et de vitesse. Nous pouvons rapidement modifier nos installations pour répondre à nos besoins. Nous pouvons rapidement passer par le procédé d'itération du développement. C'est très important pour nous. [traduction]

– Responsable de la FA, secteur de l'aérospatiale, Canada atlantique

Le prototypage rapide est fantastique. C'est génial pour la phase de validation du concept. Vous pouvez partir du concept et confirmer qu'il fera ce que vous voulez qu'il fasse avant d'investir du temps pour produire le produit final. Si je devais faire affaire avec une société d'ingénierie, le procédé me prendrait beaucoup plus de temps et d'argent. [traduction]

– Concepteur en FA à la pige, Alberta

La FA peut être combinée à des outils de conception (plateformes logicielles) qui intègrent diverses technologies pour renforcer les capacités du concepteur, y compris la conception générative, l'intelligence artificielle et la conception algorithmique. L'intelligence artificielle peut également être utilisée pour analyser les résultats de fabrication et les échecs précédents afin de réaliser des modèles plus efficaces et de réduire la probabilité d'échecs de production^{60,61}. Des solutions intégrées qui permettent de réaliser l'ensemble du procédé de conception et de fabrication sur une seule plateforme sont une autre option. De nombreuses personnes interrogées considèrent ces plateformes comme essentielles pour faire accepter la FA et exploiter son potentiel en matière de conception.

⁵⁸ K. K. B. Hon, *Digital Additive Manufacturing: From Rapid Prototyping to Rapid Manufacturing*, Délibérations de la 35e International MATADOR Conference, 2007, https://doi.org/10.1007/978-1-84628-988-0_76

⁵⁹ Jean-Adrien Delicano, *3D printing offers Ontario students a foundation for 21st century skills*, Ontario Centres of Excellence, 2018, <https://blog.oce-ontario.org/3d-printing-offers-ontario-students-a-foundation-for-21st-century-skills-d55eb4b72bdc>

⁶⁰ Jimeng Yang et coll., *Survey on artificial intelligence for additive manufacturing*, Délibérations de la 23e International Conference on Automation and Computing, 2017, https://www.researchgate.net/profile/Jimeng_Yang/publication/320824036_Survey_on_artificial_intelligence_for_additive_manufacturing/links/5a54fbf945851547b1bd5705/Survey-on-artificial-intelligence-for-additive-manufacturing.pdf

⁶¹ Peter Zelinski, *Where AM meets AI*, *Modern Machine Shop*, 2019, p. 4, <https://drive.google.com/file/d/12uy4sh3nXA4IggpH4COS7zSr4RSliJKt/view>



La fabrication additive ne vous offre pas beaucoup d'avantages si vous ne savez pas comment concevoir des produits pour la fabrication additive. Je crois que le plus grand défi maintenant est le manque fondamental de compétences en conception pour exploiter ces technologies, ce qui freine l'utilisation de la technologie. Nous devons aussi créer des outils et des instruments plus intelligents. [traduction]

- Cadre, entreprise de logiciels de FA, Ontario

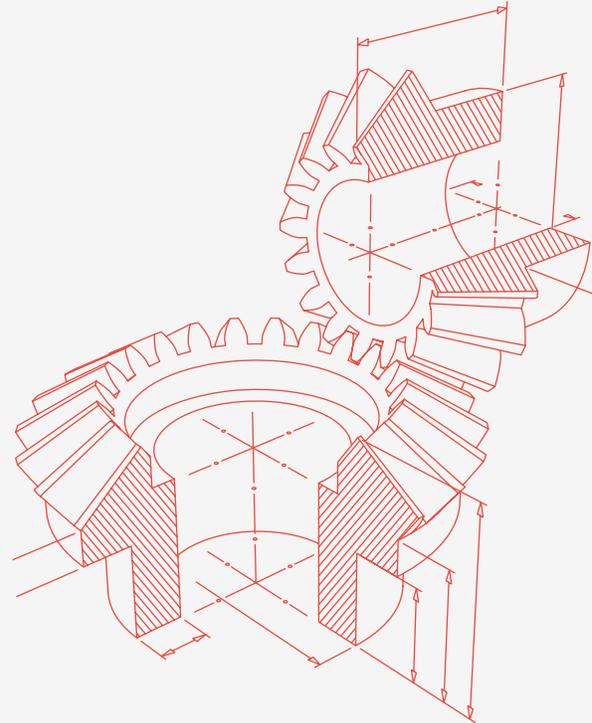
Nous considérons les outils intégrés de développement comme étant l'avenir. L'idée est de franchir toutes les étapes, soit l'intégration du design, sa mise au point, la simulation du procédé et l'impression, et de les intégrer. Certaines entreprises mettent au point des solutions pour gérer l'ensemble du flux de travail. [traduction]

- Directeur, entreprise de logiciels de FA, Québec

Conception complexe - Géométries, propriétés et fabrication uniques en une étape

L'application du matériau couche par couche, plutôt que par fraisage, déformation ou injection dans un moule, permet une conception complexe à un coût moins élevé que dans d'autres procédés de fabrication, offrant une liberté sans précédent aux concepteurs. La FA peut être combinée à des méthodes de conception générative et algorithmique pour des améliorations potentielles encore plus importantes des possibilités de conception⁶².

Grâce à sa rapidité et à son agilité, la FA offre des possibilités de conception qui en font une technologie idéale pour créer des prototypes des variations de concepts complexes de n'importe quel produit ou pièce, les tester et les comparer. Au bout du compte, la pièce peut être produite en série soit en utilisant la FA ou par le biais d'un procédé soustractif traditionnel. Selon le nombre de produits requis, la première option peut être plus rapide et plus rentable. Dans certains cas, la FA peut être le seul moyen de réaliser le modèle optimal.



⁶² Anton Wiberg, Johan Persson et Johan Olvander, « Design for additive manufacturing – a review of available design methods and software », *Rapid Prototyping Journal*, 2019, <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-10-2018-0262/full/html>

L'utilisation de géométries⁶³ et de treillis⁶⁴ complexes représente une autre possibilité, particulièrement précieuse dans des secteurs comme l'aérospatiale et les équipements militaires. Ceux-ci peuvent réduire la quantité de matériau nécessaire pour renforcer une structure tout en offrant d'autres avantages (p. ex. amélioration de la sécurité puisque le treillis peut agir comme amortisseur de chocs)⁶⁵. Pour les pièces créées à l'aide de méthodes soustractives, l'enlèvement de matériaux pour alléger les pièces comprend un traitement plus important et un gaspillage accru de matériaux, augmentant ainsi les coûts. Cependant, dans le secteur de la FA, cette complexité accrue n'entraîne que peu ou pas de coûts supplémentaires et pourrait même permettre de réaliser des économies grâce à une réduction des matériaux nécessaires pour la pièce finale⁶⁶.

La FA peut être utilisée pour créer des prototypes et des pièces pour des concepts dont le coût est prohibitif ou qui sont impossibles à réaliser au moyen d'autres procédés de fabrication. Ces concepts « impossibles » ont été utilisés pour construire des réacteurs nucléaires⁶⁷, des turbines à gaz haute performance⁶⁸, des puits thermiques⁶⁹, des modèles d'écoulement des fluides⁷⁰, et des implants médicaux comportant des microstructures poreuses qui peuvent imiter les tissus naturels⁷¹.



Nous avons choisi d'utiliser la fabrication additive parce qu'elle nous permet de fonctionner en utilisant des pièces existantes. Nous pouvons réduire la quantité d'usinage nécessaire sur les pièces, ce qui simplifie toute une série de procédés. Et les grandes pièces peuvent être imprimées à partir de zéro. Elle offre beaucoup de liberté. Nous pouvons manipuler notre matériau de manière plus complexe. [traduction]

– Spécialiste de la FA, secteur de la fabrication, Québec

Du point de vue de la conception, la complexité est presque libre. Vous ne pouvez pas tout imprimer, mais vous pouvez imprimer presque tout. [traduction]

– Directeur de l'ingénierie, secteur de la construction, Québec

⁶³ A. W. Gebisa, et H. G. Lemu, A case study on topology optimized design for additive manufacturing, First Conference of Computational Methods in Offshore Technology, 2017, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/276/1/012026/pdf>

⁶⁴ Rethinking foam – the Carbon lattice innovation, Carbon, 2020, <https://www.carbon3d.com/resources/whitepaper/rethinking-foam-carbons-lattice-innovation/>

⁶⁵ 3D printing helps create safer padding for helmets, The Engineer, 2020, <https://www.theengineer.co.uk/helmet-padding-combat/>

⁶⁶ « 3D printing transforms the economics of manufacturing », The Economist, 2017, <https://www.economist.com/briefing/2017/07/01/3d-printing-transforms-the-economics-of-manufacturing>

⁶⁷ Daniel Oberhaus, Coming Soon: A Nuclear Reactor – With a 3D-Printed Core, Wired, 2020, <https://www.wired.com/story/coming-soon-a-nuclear-reactor-with-a-3d-printed-core/>

⁶⁸ Chris Noon, Hot off the press: 3D Printing Has Pushed This Gas Turbine to New Heights, GE, 2018, <https://www.ge.com/news/reports/hot-off-press-3d-printing-pushed-turbine-new-highs>

⁶⁹ Joris Peels, CERN & 3D Systems 3D Print Parts for the Large Hadron Collider, 3DPrint.com, 2020, <https://3dprint.com/276380/cern-3d-systems-3d-print-parts-for-the-large-hadron-collider/>

⁷⁰ « Another Use for 3D Printing: Physically Modeling Fluid Flow Trajectory Lines », Design News, 2020, <https://www.designnews.com/alternative-energy/another-use-3d-printing-physically-modeling-fluid-flow-trajectory-lines>

⁷¹ J. Ni et coll., « Three-dimensional printing of metals for biomedical applications », Materials Today Bio, 2019, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259000641930050X>

Personnalisation de masse et production sur demande

L'amélioration de la qualité des produits imprimés 3D et les progrès de la technologie des matériaux de FA ont permis d'étendre le paradigme du prototypage rapide à la production de produits finis. La FA permet désormais de produire rapidement et de manière rentable des produits personnalisés dans une variété de matériaux, ce qui est particulièrement utile dans les cas où la personnalisation est bénéfique ou importante et où les consommateurs sont prêts à payer plus cher pour des produits personnalisés de FA que pour des versions non personnalisées produites en masse fabriquées selon des méthodes traditionnelles. Les exemples comprennent les dispositifs et les implants médicaux⁷², l'orthodontie⁷³, les prothèses⁷⁴, et les biens de consommation comme les chaussures⁷⁵ et les bijoux⁷⁶. À mesure que le matériel et les matières premières pour la FA deviennent plus économiques, d'autres cas pratiques de personnalisation de masse devraient devenir viables.



En adoptant l'impression 3D, il n'est pas nécessaire de se rééquiper. Vous n'avez pas besoin de fabriquer une pièce. La personnalisation de masse est un autre avantage. Vous pouvez construire toute une gamme de produits prêts à l'emploi qui sont personnalisés. Il est impossible de le faire au moyen d'une chaîne de montage traditionnelle. [traduction]

– Consultant en FA à la pîge, Colombie-Britannique

Gestion des stocks et pièces existantes

La FA permet l'entretien facile de produits complexes et la fabrication de pièces de rechange en une seule fois sans avoir à les conserver dans un inventaire physique⁷⁷. Elle permet également de passer à des matériaux plus récents et mieux adaptés pour améliorer la fiabilité des pièces tout en conservant le même modèle pour s'adapter aux systèmes existants, ce qui peut aider les entreprises à réduire leurs coûts d'inventaire tout en leur donnant la possibilité de moderniser les pièces des machines plus anciennes, prolongeant ainsi leur durée de vie.

⁷² 3D Printing of Medical Devices, US Food & Drug Administration, 2020, <https://www.fda.gov/medical-devices/products-and-medical-procedures/3d-printing-medical-devices>

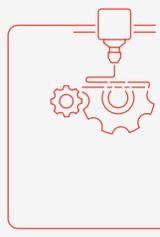
⁷³ 3D Printing in Dentistry, University of Toronto Libraries, <https://guides.library.utoronto.ca/c.php?g=370430&p=5150683>

⁷⁴ 3D-Printable Prosthetic Devices, National Institutes of Health, <https://3dprint.nih.gov/collections/prosthetics>

⁷⁵ « Shoemakers bring bespoke footwear to the high street », *The Economist*, 2018, <https://www.economist.com/science-and-technology/2018/05/24/shoemakers-bring-bespoke-footwear-to-the-high-street>

⁷⁶ How 3D Printing is Disrupting the Jewelry Industry, Formlabs, 2019, <https://formlabs.com/blog/3d-printed-jewelry/>

⁷⁷ J. Jakob Heinen et Kai Hoberg, « Assessing the potential of additive manufacturing for the provision of spare parts », *Journal of Operations Management*, 2019, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joom.1054>



Je suis allé dans une foire de l'emploi à Comox et j'ai parlé à quelqu'un du secteur des usines de papier. Je lui ai demandé si son entreprise avait un programme de fabrication additive. Au début, le recruteur ne comprenait même pas comment la technologie fonctionnait. J'ai découvert qu'une division entière de l'entreprise était dédiée à la recherche de vieilles machines de traitement du papier. Ils achètent une machine, puis la transportent à l'autre bout du monde et la démontent pour en récupérer les pièces. La flotte de recherche et de sauvetage de l'armée de l'air fait quelque chose de semblable. Pour entretenir ses flottes, elle a acheté une flotte entière d'hélicoptères seulement pour en récupérer les pièces. La fabrication additive est la solution logique à ce type de situation. Elle permet d'économiser d'importants coûts en pièces. [traduction]

– Consultant en FA à la pige, Colombie-Britannique

La fabrication additive est une technologie idéale pour le marché des pièces de rechange. Pour les avions, le fuselage peut durer 60 ans ou plus. Mais de nombreux composants du moteur doivent être remplacés assez fréquemment. Les pièces doivent être remplacées, et nous sommes en mesure de fournir des pièces rapidement à tous nos clients. Évidemment, il est très coûteux de maintenir un inventaire de 300 ou 400 pièces par modèle d'avion. Nous essayons donc d'imprimer les pièces de rechange, plutôt que de les conserver dans notre entrepôt. Dans l'entrepôt de l'avenir, plutôt que d'y entreposer 6 000 pièces, il serait beaucoup plus facile d'installer 3 imprimantes offrant 3 types différents de poudres métalliques. [traduction]

– Ingénieur, secteur de l'aérospatiale, Québec

Coûts

La FA permet une fabrication en une seule étape dont les coûts de mise en place sont faibles puisque aucun outillage ou prétraitement n'est nécessaire (à l'exception de la conception de la pièce). De plus, les procédés de FA peuvent permettre de réaliser des économies supplémentaires grâce à l'efficacité de la conception et à la réduction des coûts des matériaux, d'énergie, d'expédition et de logistique. Les avantages en matière de coûts de la FA sont plus prononcés pour les produits complexes ou très personnalisés, mais dépendent grandement des particularités du procédé et des matériaux utilisés.⁷⁸



« Je viens d'un milieu d'usinage et j'ai constaté que la fabrication additive était un bon moyen d'obtenir des formes 3D incroyables sans avoir à enlever tout le reste du matériau. C'était souvent plus efficace et simplement plus facile. Par exemple, il faudra environ 300 heures pour fabriquer une figurine 3D et elle coûtera environ 1 000 \$ au total. Et ce n'est que le coût de détail! La production coûte 500 \$, soit la moitié de ce montant. En comparaison, il en coûterait 6 500 \$ pour l'usiner et la fabrication prendrait beaucoup plus de temps. [traduction]

– Cadre, cabinet-conseil en FA, Ontario

⁷⁸ « 3D printing transforms the economics of manufacturing », *The Economist*, 2017, <https://www.economist.com/briefing/2017/07/01/3d-printing-transforms-the-economics-of-manufacturing>

Toutefois, le volume de production a un impact sur l'avantage de coût de la FA par rapport à la fabrication traditionnelle. Par exemple, le moulage par injection exige des coûts initiaux élevés, puis des coûts unitaires extrêmement bas. La courbe des coûts commence à un niveau élevé et chute rapidement. En comparaison, les procédés de FA ont généralement des coûts initiaux plus faibles, mais des coûts unitaires plus élevés, se traduisant par une courbe de coûts plus uniforme. Par conséquent, l'avantage de coût de la FA par rapport au moulage par injection diminue généralement pour des volumes de production plus élevés, s'il ne disparaît pas même entièrement.^{79,80,81}

Durabilité : Réduction des matières résiduelles et de la consommation énergétique

La fabrication de structures complexes à l'aide de techniques traditionnelles (comme le moulage par injection ou l'usinage) génère souvent un grand gaspillage de matériaux, et l'enlèvement de ces matériaux représente également une perte d'énergie et de temps productif. La capacité de la FA de créer des formes complexes couche par couche permet de fabriquer ces pièces en gaspillant considérablement moins de matériaux et d'énergie et en passant moins de temps en post-traitement, lui donnant ainsi un avantage sur la fabrication traditionnelle dans ce domaine. La FA peut également jouer un rôle dans la réduction des coûts d'emballage et d'expédition en permettant de fabriquer certains produits sur place au lieu de devoir les emballer et les expédier sur de grandes distances.

L'intégration des procédés de FA pourrait améliorer l'efficacité des ressources tout au long du cycle de vie des produits⁸². De la conception des produits et des procédés à la fabrication de composants uniques, en passant par la réparation, la remise à neuf et le recyclage, les interventions fondées sur la FA peuvent contribuer à améliorer la durabilité des produits, des procédés et des systèmes. Une étude récente met en évidence plusieurs exemples d'améliorations commerciales fondées sur la FA qui ont été mises en œuvre dans le monde entier.⁸³



La fabrication additive est un élément clé pour réduire l'empreinte environnementale de la fabrication. L'expédition de plastique est un énorme gaspillage. Par exemple, lorsque nous expédions des visières, nous payons plus pour l'expédition que la fabrication elle-même. Les impacts environnementaux sont énormes. [traduction]

– Cadre, jeune entreprise de FA, Colombie-Britannique

⁷⁹ 3DPrintUK, 2020, <https://www.3dprint-uk.co.uk/low-volume-production-calculator/>

⁸⁰ Making Injection Molding Cost-Effective: How Many Units Do You Need to Order?, 3DPrint.com, 2020, <https://3dprint.com/268013/making-injection-molding-cost-effective/>

⁸¹ Angela Linneman, High-Volume 3D Printing Vs. Injection Molding, Shapeways, 2020, <https://www.shapeways.com/blog/archives/35860-high-volume-3d-printing-vs-injection-molding.html>

⁸² Simon Ford et Mélanie Despeisse, «The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability », *Advances in Production Management Systems*, 2015, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22759-7_15

⁸³ Simon Ford et Mélanie Despeisse, « Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges », *Journal of Cleaner Production*, 2016, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616304395?via%3Dihub>

Fabrication hybride

Selon un récent rapport publié par EY⁸⁴, les chefs d'entreprises considèrent de plus en plus la FA comme un complément aux technologies de fabrication traditionnelles et non comme un remplacement. Au cours des dernières années, l'accent a été mis sur l'étude de la manière dont la FA peut être intégrée aux procédés, systèmes et flux de production existants ainsi que sur la création de nouveaux procédés hybrides.

La fabrication hybride cherche à combiner la FA et les procédés soustractifs traditionnels, en tirant parti des forces relatives de chacun. La combinaison de la fabrication sans outils de la FA et de la précision du fraisage CNC permet de produire de manière rentable de petits lots de modèles métalliques complexes ayant un haut degré de précision, faisant peu de gaspillage, et offrant de la flexibilité dans le choix des matériaux afin de consentir des propriétés mécaniques personnalisées⁸⁵.



L'approche à l'ancienne vous donne une fonctionnalité et une résistance simples sur l'ensemble de la structure. La fabrication additive vous permet de varier les propriétés des différentes parties d'une même structure. Par exemple, je fabriquais une barre dont un côté a un coefficient de dilatation thermique élevé alors que l'autre côté a un faible coefficient de dilatation thermique : j'ai pu obtenir des composants multifonctionnels, ce qui n'était pas possible auparavant. [traduction]

– Boursier postdoctoral, secteur de l'éducation, Ontario

Fabrication distribuée

Un autre avantage de la FA souvent citée par ses adeptes : sa capacité de faciliter la fabrication distribuée. La FA pourrait faciliter la mise en place d'un réseau décentralisé et dispersé de sites de fabrication pouvant mieux servir les marchés locaux, simplifier les chaînes d'approvisionnement et réduire considérablement les délais et les coûts d'expédition et de logistique^{86,87}. Certains de ces avantages ont été mis à profit lors de la récente pandémie de COVID-19 lorsque des concepteurs et des fabricants du monde entier ont pu concevoir et itérer rapidement, puis imprimer localement des fournitures médicales, y compris des EPI et des composants pour ventilateurs, malgré les confinements et les perturbations des chaînes d'approvisionnement à l'échelle mondiale.⁸⁸



Elle permet d'avoir un meilleur contrôle dans son propre pays. [traduction]

– Cadre, secteur manufacturier, Ontario

⁸⁴ How 3D printing brings transformational change, EY, 2019,

https://www.ey.com/en_gl/consulting/how-3d-printing-brings-transformational-change

⁸⁵ Marion Merklein et coll., « Hybrid Additive Manufacturing Technologies », *Physics Procedia*, 2016,

<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.057>

⁸⁶ Flexibility Redefined, Jabil, 2019, <https://www.jabil.com/dam/jcr:2c53a0a4-939e-4aed-af29-c60c4933a77a/distributed-manufacturing-whitepaper.pdf>

⁸⁷ Rush LaSelle, *Seven Ways Additive Manufacturing Helps Accelerate the Production of Industrial Machines and Capital Equipment*, Jabil, 2020, <https://www.jabil.com/dam/jcr:9dd20f0a-417d-46e6-9838-669874be1113/additive-industrial-machines-white-paper.pdf>

⁸⁸ Albert Manero et coll., « Leveraging 3D Printing Capacity in Times of Crisis: Recommendations for COVID-19 Distributed Manufacturing for Medical Equipment Rapid Response », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7370126/>

Bien que la FA facilite davantage la fabrication distribuée que les techniques de fabrication traditionnelles, elle n'élimine pas nécessairement les facteurs qui favorisent les modèles de production existants⁸⁹. Les bénéfices économiques en faveur de la fabrication distribuée ne sont pas encore clairement définis, en particulier pour les industries à faibles marges. Le fabricant de vêtements de sport Adidas et ses « Speedfactories » en Allemagne et aux États-Unis⁹⁰ en sont un exemple notable récent. Adidas a lancé ces usines de haute technologie et fortement automatisées en 2017 pour répondre à la demande de livraison plus rapide de nouveaux styles de chaussures de sport vers les principaux marchés occidentaux ainsi que pour contrer la hausse des coûts d'expédition et de fabrication dans ses usines en Asie. Toutefois, ces nouvelles usines ont été fermées au début de l'année 2020 et Adidas prévoit transférer les méthodes de production (y compris les techniques fondées sur la FA) développées dans ces usines vers deux de ses fournisseurs en Asie⁹¹.

⁸⁹ Emily Durham, *Could 3D printing lead to distributed manufacturing?*, Carnegie Mellon University, 2019, <https://www.cmu.edu/news/stories/archives/2019/july/distributed-manufacturing.html>

⁹⁰ « 3D printers start to build factories of the future », *The Economist*, 2017, <https://www.economist.com/briefing/2017/06/29/3d-printers-start-to-build-factories-of-the-future>

⁹¹ « Adidas to close German, U.S. robot factories », *Reuters*, 2019, <https://mobile-reuters-com.cdn.ampproject.org/c/s/mobile.reuters.com/article/amp/idUSKBN1XL16U>



Fabrication additive : Faiblesses et défis

Bien que la technologie de la FA ait fait des progrès impressionnants au cours des dernières années pour améliorer sa proposition de valeur, il reste encore plusieurs défis à relever.

Volumes et échelle de production

Au cours de dernières années, certains grands fabricants ont démontré la rentabilité de la FA pour la production en usine à grande échelle de certains produits complexes, notamment les robinets⁹², les putters de golf⁹³ et les brosses à mascara⁹⁴. En outre, les innovations récentes continuent d'augmenter la vitesse d'impression, un autre inconvénient habituellement associé à la FA^{95,96,97}.

Toutefois, l'adoption globale de la FA pour les grandes séries de production a été très modeste jusqu'à présent. De nombreux obstacles empêchent actuellement l'utilisation de la FA pour la production à grande échelle. Bien que la « complexité libre » soit l'une de ses principales caractéristique, la FA n'est pas aussi rentable que les méthodes traditionnelles pour les séries de production offrant des modèles plus simples⁹⁸. Même si les coûts d'outillage et de mise en place de la FA sont relativement faibles, en faisant un outil économique pour le prototypage et la production en petites quantités, cela signifie aussi qu'elle ne bénéficie pas des mêmes économies d'échelle que la fabrication traditionnelle⁹⁹. Compte tenu de ces limites, la grande majorité des participants à cette étude ont décrit la FA comme une technologie qui complète et améliore les méthodes de fabrication existantes, sans toutefois la remplacer.



Oui, la FA est formidable, pour les séries de 10 000 à 50 000 produits, mais pour la production de quantités vraiment élevées, le moulage par injection dominera à l'avenir. Cela étant dit, l'avantage quantitatif du moulage par injection risque de diminuer. Nous avons multiplié nos vitesses de production par 10 en un an seulement. [traduction]

– Cadre, jeune entreprise de FA, Colombie-Britannique

Il est évident que l'impression 3D n'est pas idéale pour tout. Si vous voulez obtenir une pièce vraiment solide ou fabriquer un produit en grandes quantités, il est préférable de recourir au moulage par injection. Pour le plastique, l'impression 3D est idéale pour les petites pièces dont le concept est complexe. Dans le bon créneau, l'impression 3D est plus rapide, plus fiable et plus rentable. [traduction]

– Cadre, jeune entreprise de FA, Ontario

⁹² Isaac Maw, *How Additive Manufacturing Can Compete in Full-Scale Factory Production*, Engineering.com, 2019, <https://www.engineering.com/story/how-additive-manufacturing-can-compete-in-full-scale-factory-production>

⁹³ Erik Matuszewski, « Cobra Golf, HP unveils 3D-Printed Putter, and Bryson DeChambeau had a hand in its development », Forbes, 2020, <https://www.forbes.com/sites/erikmatuszewski/2020/11/17/cobra-golf-hp-unveil-3d-printed-putter-and-bryson-dechambeau-had-a-hand-in-its-development/?sh=46261d3c791d>

⁹⁴ Lauren Murdoch-Smith, « Chanel Launches First Ever 3D-Printed Mascara », Vogue, 2018, <https://www.vogue.co.uk/article/chanel-3d-printed-mascara>

⁹⁵ « Carbon3D introduces CLIP, breakthrough technology for layerless 3D printing ». Carbon, 2015 : <https://www.carbon3d.com/news/press-releases/carbon3d-introduces-clip-breakthrough-technology-for-layerless-3d-printing/>

⁹⁶ Castelvechi, loc. cit.

⁹⁷ Loterie, loc. cit.

⁹⁸ Harald Proff, et Andreas Staffen, *Challenges of Additive Manufacturing: Why companies don't use Additive Manufacturing in serial production*, Deloitte, 2019, https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/Deloitte_Challenges_of_Additive_Manufacturing.pdf

⁹⁹ What is 3D printing? The definitive guide, 3D Hubs, 2017, https://downloads.3dhubs.com/3D_Printing_The_Definitive_Guide.pdf

Résistance et propriétés des matériaux (anisotropie)

En tant que procédé de fabrication, la FA est unique : dans un modèle additif, la forme géométrique extérieure d'une pièce et sa structure matérielle interne sont créées en même temps¹⁰⁰. La construction couche par couche impose des limites inhérentes aux propriétés mécaniques des pièces imprimées 3D, surtout dans les procédés où les couches sont collées par des procédés chimiques ou thermiques à basse température. L'anisotropie est l'un des plus grands défis de la FA : la pièce fabriquée possède des propriétés mécaniques différentes (telles que la résistance à la traction) dans le sens de la fabrication par rapport aux autres sens.

L'anisotropie n'est pas en soi un obstacle à l'utilisation de la FA comme matériau de fabrication fiable : en effet, des matériaux comme le bois et le béton sont anisotropes et utilisés depuis des décennies dans la construction. En outre, la FA s'est avérée capable de produire des pièces fonctionnelles haute performance pour de nombreux secteurs, y compris l'automobile¹⁰¹, l'aérospatiale^{102,103}, et la défense¹⁰⁴. Toutefois, l'anisotropie est un problème pour les cas pratiques dans lesquels la FA est le plus souvent en concurrence avec d'autres procédés (tels que le métal et les plastiques non renforcés produits par moulage par injection traditionnel) et peut être considérée comme un inconvénient ou un défi conceptuel indésirable. Les récents progrès de la science des matériaux peuvent aider à surmonter ce problème.¹⁰⁵



Une sorte d'impasse se présente où le véritable potentiel de la FA ne peut se matérialiser que s'il existe des matériaux développés exclusivement pour elle, mais en même temps, les gens hésitent à développer des matériaux exclusivement pour la FA précisément parce qu'il s'agit d'une nouvelle technologie à laquelle les gens ne font pas encore vraiment confiance. [traduction]

– Ingénieur, secteur de l'énergie, Alberta

Par définition, la FA crée le problème d'isotropie. Les propriétés d'un objet sont plus complexes : elles changent en fonction de la direction dans laquelle la force est exercée sur l'objet. Ce n'est pas nécessairement un problème. Cela dépend de l'application. Ce n'est qu'un des nombreux défis à relever. [traduction]

– Boursier postdoctoral, secteur de l'éducation, Ontario

¹⁰⁰ Peter Zelinski, "Where AM meets AI," *Modern Machine Shop*, 2019, pg 4, <https://drive.google.com/file/d/12uy4sh3nXA4lggpH4C0S7zSr4RSliJKt/view>

¹⁰¹ "Bugatti's 3D-printed brake caliper ready for the road," *CTV News*, 2018. <https://www.ctvnews.ca/autos/bugatti-s-3d-printed-brake-caliper-ready-for-the-road-1.4232168>

¹⁰² Sam Davies, "Premium Aerotec to produce A320 aircraft parts with GE Additive Concept Laser M2 machine after Airbus validation," *TCT Mag*, 2020. <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/premium-aerotec-a320-aircraft-ge-additive-concept-laser/>

¹⁰³ Michael Sheetz, "Relativity Space adds \$500 million to 'war chest' for scaling production of 3D-printed rockets," *CNBC*, 2020. <https://www.cnbc.com/2020/11/23/relativity-space-builds-war-chest-for-building-.html>

¹⁰⁴ Jen Judson, "US Army developing process for using 3D printing at depots and in the field," *DefenseNews*, 2020. <https://www.defensenews.com/land/2020/02/04/us-army-developing-process-for-using-3d-printing-at-depots-and-in-the-field/>

¹⁰⁵ Amy J. Clarke, "Designer alloy enables 3D printing of fine-grained metals," *Nature*, 2019. <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03701-2>

Contrôle de la qualité et certification de produits

La variabilité de la fabrication finale des produits imprimés en 3D est un problème qui afflige la FA depuis des années. Les ingénieurs et les responsables de la production doivent accorder une attention particulière à l'uniformité du produit, c'est-à-dire à la précision dimensionnelle et aux propriétés des matériaux comme la porosité, la solidité, ainsi que la résistance à la température et aux produits chimiques¹⁰⁶. C'est particulièrement important dans les cas pratiques où l'intégrité des pièces est liée à la sécurité, comme dans l'industrie automobile, médicale ou aérospatiale. Les spécifications et la qualité de la fabrication en FA sont influencées par des facteurs comme le design des pièces, la qualité des matières premières, le procédé de FA utilisé, et l'optimisation de l'imprimante¹⁰⁷. Alors que les niveaux actuels d'uniformité sont suffisants pour divers produits (appareils dentaires, lentilles optiques, métal non porteur et pièces de rechange en plastique pour les locomotives, équipement industriel lourd, avions, etc.), il est encore possible d'améliorer le matériel, les logiciels et les procédés de FA avant qu'elle puisse être adoptée à grande échelle pour des cas pratiques plus complexes¹⁰⁸.

L'élaboration de normes mondiales pour les matériaux, le contrôle des procédés et la certification de la FA représente un autre défi majeur¹⁰⁹. Comme il existe de nombreuses variantes du procédé de FA et que leurs défauts sont très différents de ceux des procédés formatifs, l'industrie de la FA a été lente à définir des normes de rendement et de fiabilité. La FA tient compte de plusieurs facteurs, allant de la sélection et de la qualification des matières premières à l'optimisation de la conception, en passant par la sélection des procédés. Chacune de ces sous-tâches complexes renferme plusieurs paramètres et variables de décision qui affectent à la fois le matériel et les logiciels. Ceux-ci doivent être surveillés, évalués et contrôlés pour assurer la répétabilité et la fiabilité de la production¹¹⁰.

Sans normes industrielles pour définir ces paramètres et créer un ensemble de critères de référence pour mesurer la qualité du procédé et de la production, la production par la FA offrant un niveau de qualité constant peut devenir un coûteux processus d'essais et d'erreurs. Des normes bien définies et acceptées à l'échelle mondiale contribueraient également à faciliter et à rationaliser la qualification et la certification des pièces produites par la FA pour une utilisation dans des secteurs hautement réglementés comme l'aérospatiale, la médecine et l'automobile. Tant que ces obstacles subsisteront, l'investissement dans la FA ne sera probablement viable que pour les entreprises ayant une tolérance élevée au risque et un faible coût effectif du capital.

Bien que le comité technique conjoint¹¹¹ de l'ISO et d'ASTM International ait publié 19 normes internationales¹¹², ces dernières sont surtout axées sur les principes généraux et la conception de pièces. Pour stimuler l'adoption de la FA et l'investissement dans des applications plus larges, il faudra augmenter le nombre de normes industrielles acceptées à l'échelle mondiale qui sont axées sur les essais de produits, l'assurance de la qualité et la qualification (au-delà des 28 normes actuellement en cours d'élaboration)¹¹³.

¹⁰⁶ Richard D'Aveni et Ankush Venkatesh, « How to Make 3D Printing Better », *Harvard Business Review*, 2020, <https://hbr.org/2020/09/how-to-make-3d-printing-better>

¹⁰⁷ What is 3D printing? The definitive guide, 3D Hubs, 2017, https://downloads.3dhubs.com/3D_Printing_The_Definitive_Guide.pdf

¹⁰⁸ D'Aveni, loc. cit.

¹⁰⁹ *Developing Standards for 3D Printing: Where are We Today? (2020 Update)*, AMFG, 2018, <https://amfg.ai/2018/10/19/developing-3d-printing-standards-where-are-we-today/>

¹¹⁰ Ibid.

¹¹¹ ISO/TC 261 – Chairman Statement, ISO, 2021, <https://committee.iso.org/home/tc261>.

¹¹² Normes du ISO/TC 261 : Normes publiées, ISO, 2021, <https://www.iso.org/fr/committee/629086/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>

¹¹³ Normes du ISO/TC 261 : Projets de normes, ISO, 2021, <https://www.iso.org/fr/committee/629086/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>



Autre défi : les progrès techniques qui garantissent une qualité de production élevée et fiable sont souvent protégés par la propriété intellectuelle du fournisseur de services, ce qui retarde leur adoption par le reste de l'industrie. Il n'est donc peut-être pas surprenant que les participants à l'étude aient décrit ces difficultés comme contribuant à la réticence d'une base plus large de consommateurs, d'entrepreneurs, de décideurs politiques et d'investisseurs à essayer des produits et des modèles opérationnels fondés sur la FA.



La fabrication additive est incroyablement délicate par rapport aux procédés de fabrication traditionnels. Dans certains cas, vous placez simultanément des microns de matériaux. Elle n'offre pas un niveau de régularité digne des chaînes de montage. Je viens du monde des finances, et j'ai été surpris de constater à quel point l'impression 3D dépend de l'opérateur, c'est-à-dire que vous avez besoin de beaucoup de précision tant pour le matériel que les logiciels. Il y a aussi toute la question des réglages et de la façon dont la chimie des différents matériaux peut interagir avec les réglages de la machine. [traduction]

– Cadre, jeune entreprise de FA, Colombie Britannique

La qualification sera toujours la partie la plus difficile pour les pièces de FA : convaincre les gens qu'il vaut la peine d'utiliser ces pièces, surtout pour les projets d'infrastructures clés comme les ponts, les navires, des choses qui, si elles font défaut, se détériorent rapidement. [traduction]

– Cadre, cabinet-conseil en FA, Ontario

Post-traitement exigeant en main-d'œuvre

Paradoxalement, la main-d'œuvre est souvent l'élément le plus coûteux des procédés de FA¹¹⁴. Une pièce imprimée en 3D sort rarement de l'imprimante sous la forme d'un produit fini. Les techniciens doivent retirer les pièces de l'imprimante et les soumettre à une forme de post-traitement (p. ex. nettoyage, lissage, polissage, cuisson dans un séchoir ou un four, élimination des structures de soutien), avant qu'elles soient prêtes à l'emploi. Pour que la FA soit viable sur le plan économique dans un plus grand nombre d'environnements de production, la technologie devra réduire le coût en temps du post traitement, permettant aux techniciens d'imprimer un plus grand nombre de pièces.¹¹⁵



Le post-traitement pose des défis techniques. La fabrication en 3D nécessite toujours un post-traitement. Le défi technique est grand. Souvent, le coût et le temps du post-traitement peuvent faire en sorte que le coût de la FA est plus élevé que celui de la fabrication soustractive. [traduction]

– Boursier postdoctoral, secteur de l'éducation, Ontario

La dimension manuelle reste encore l'un des grands avantages de la FA. Une fois que votre produit est imprimé, il faut l'extraire, répéter le procédé, appliquer un post traitement, etc. La tâche nécessite des gens très compétents, mais elle est relativement répétitive. [traduction]

– Directeur de la production, secteur du commerce au détail, Canada atlantique

¹¹⁴ Jon Bruner et Balazs Kisgergely, *The Digital Factory Report*, Formlabs, 2019, <https://3d.formlabs.com/rs/060-UIG-504/images/The-Digital-Factory-Report.pdf>

¹¹⁵ Ibid.

Le défi des cas pratiques (surtout pour la FA sur métal) et l'aversion au risque

La FA peut présenter des coûts initiaux élevés malgré les innovations techniques qui continuent de faire baisser ces coûts. L'expertise en FA industrielle est souvent très coûteuse à employer puisqu'elle est rare et demande souvent de grandes compétences (plusieurs spécialistes ayant un doctorat). Bien que les imprimantes « d'amateurs » destinées aux consommateurs ne se vendent qu'à quelques centaines de dollars, les imprimantes industrielles, elles, peuvent souvent coûter plusieurs centaines de milliers de dollars¹¹⁶. Dans le cadre de la FA sur métal et béton, le coût des imprimantes est encore plus élevé¹¹⁷. Les coûts des autres équipements ainsi que les frais d'entretien et de post-traitement sont également élevés. Cela dit, bon nombre des équipements utilisés dans la fabrication traditionnelle sont également coûteux : le défi n'est pas donc pas le coût en soi, mais le risque élevé d'un investissement dans une nouvelle technologie dont l'analyse de rentabilité est incertaine. L'adoption des imprimantes de qualité industrielle les plus coûteuses est limitée soit aux grandes organisations qui peuvent absorber ces coûts dans leur service de recherche, soit à celles qui réalisent des marges bénéficiaires très élevées en raison de leur secteur d'activité (comme l'aérospatiale ou le biomédical). En raison des coûts élevés, il est difficile pour les organisations qui ne dominent pas le marché et qui ne sont pas déjà bien établies d'adopter la FA de manière non superficielle, en particulier les petites et moyennes entreprises (PME)¹¹⁸. Les défis techniques tels que la garantie d'une qualité constante des pièces, la maîtrise de l'anisotropie ou la production à une échelle suffisante pour assurer la rentabilité de la production (tous mentionnés précédemment) constituent également des obstacles à une adoption élargie et à l'investissement.



Je crois que le prix est l'un des plus grands problèmes actuels de l'industrie, en particulier en ce qui concerne la FA sur métal ou la FA très avancée sur plastique. En tant qu'intervenant dans l'industrie, j'ai participé à des dizaines de réunions budgétaires où nous avons discuté de la FA comme d'un objectif que nous aimerions atteindre, mais il s'agit constamment d'une question de rendement des investissements et de la rapidité avec laquelle nous allons voir ce rendement. [traduction]

– Cadre, cabinet-conseil en FA, Ontario

Manque de compétences et de personnel qualifié

La FA est un domaine multidisciplinaire qui englobe des aspects du génie mécanique, de la science des matériaux, de l'ingénierie manufacturière et industrielle, de la mécatronique, de la robotique, du développement de logiciels et du design industriel¹¹⁹. Très peu de personnes possèdent des compétences en FA, et dans certains domaines, comme la conception pour la fabrication additive (CFA), la pénurie de professionnels qualifiés est particulièrement grave.¹²⁰

¹¹⁶ Douglas S. Thomas et Stanley W. Gilbert, *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing*, National Institutes of Standards and Technology, 2014, <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1176.pdf>

¹¹⁷ Avetik Chalabyan et coll., *How 3-D printing will transform the metals industry*, McKinsey & Company, 2017, <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/how-3d-printing-will-transform-the-metals-industry>
Joe Bauer et Patrick Malone, *Cost Estimating Challenges in Additive Manufacturing*, International Cost Estimating and

¹¹⁸ Analysis Association, 2015,

<http://www.iceaaonline.com/ready/wp-content/uploads/2015/06/MM01-Paper-Bauer-Additive-Manufacturing.pdf>

¹¹⁹ 3D opportunity for the talent gap, *Deloitte Insights*, 2016,

<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/3d-printing-talent-gap-workforce-development.html>

¹²⁰ Yuri Borgianni et coll., *University Education in Additive Manufacturing and the Need to Boost Design Aspects*, *Délibérations de la Design Society: International Conference on Engineering Design*, 2019, <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.67>

À ces défis du marché du travail s'ajoute le fait que les procédés de FA peuvent être très différents les uns des autres et que les applications et les matériaux varient aussi grandement d'un secteur à l'autre. Par conséquent, les compétences relatives à un type de procédé de FA peuvent ne pas être transférables vers un autre procédé. Une exploration approfondie du marché des talents en FA est incluse dans la section intitulée, « La demande de talents en FA ».

Manque de connaissances

De nombreux participants à l'étude ont cité le manque de compréhension de ce que la FA est capable de faire comme un obstacle majeur à la croissance de l'écosystème de la FA, en particulier parce qu'elle empêche des organisations établies, qui pourraient en bénéficier, d'adopter la FA. Pour certaines des applications de pointe de la FA, comme la construction, il existe un tel manque de connaissances que les entrepreneurs ont dit que leurs efforts pour vendre la FA à leurs clients revenaient à « parler une autre langue ». Certaines PME et jeunes entreprises ont mentionné avoir dû choisir entre investir dans la « commercialisation » de la FA et investir dans leur produit.



Nous ne pouvons pas créer une campagne de plusieurs millions de dollars pour informer les gens. Si seulement la moitié de la population du Canada savait ce qu'est la fabrication additive et si nous pouvions avoir une petite part de ce secteur, nous pourrions être extrêmement rentables. Mais il n'y a aucune sensibilisation à ce stade, même dans notre marché cible. Il est évident que les entreprises avec lesquelles nous avons fait des affaires en sont conscientes et sont enthousiastes, mais tout repose sur le bouche-à-oreille, une interaction à la fois. Nous sommes la seule entreprise au Canada à le faire. Nous sommes donc le seul moyen pour les gens de la découvrir. [traduction]

– Directeur de l'ingénierie, secteur de la construction, Québec

J'ai essayé de faire en sorte qu'une entreprise locale s'intéresse à la FA, mais pour elle, c'est comme si je parlais une autre langue. Elle est incapable de comprendre. [traduction]

– Consultant, secteur de la construction, Ontario

Les participants à l'étude ont perçu le scepticisme à l'égard de la FA comme un défi majeur pour la croissance de l'écosystème dans son ensemble. Ils ont également mentionné que ce scepticisme freine leurs propres entreprises. Ils ont cité le plus fréquemment les deux perceptions suivantes : a) la FA ne convient qu'au prototypage et ne peut pas produire des pièces finales viables et robustes, et b) la FA ne peut pas être utilisée efficacement pour des séries de production à grande échelle. Les participants ont déclaré que ces opinions étaient historiquement valables, mais actuellement dépassées. Des opinions sceptiques sont fréquemment entendues dans le secteur de la fabrication traditionnelle, au sein du grand public et même parmi les professionnels de la FA.



J'ai passé près de 30 ans dans ce domaine, et je ne peux plus compter le nombre de fois où j'ai rencontré des points de vue dépassés et des opinions sans fondement.

– Membre, association en FA, Ontario

La population générale ne comprend pas vraiment ce qu'est la fabrication additive. Si vous leur parlez de fabrication additive, les gens n'ont littéralement aucune idée de ce que c'est. Lorsque vous leur expliquez qu'il s'agit en fait d'impression en 3D, mais à l'échelle industrielle, ils en ont alors une meilleure idée. Mais ils rechignent parce qu'ils voient l'image de gens qui bricolent des imprimantes 3D dans leur sous-sol. Ils ne comprennent pas qu'elle peut répondre aux exigences de l'industrie. [traduction]

– Responsable de la FA, secteur de l'aérospatiale, Canada atlantique

Les préjugés à l'égard de l'impression 3D sont importants. Les gens pensent qu'il ne s'agit que de prototypes, ou que la technologie est trop coûteuse pour réaliser une production significative. C'est étrange : je donne des conférences dans des événements organisés dans l'industrie, et un homme que je connais vend des imprimantes 3D. Il fait un excellent travail de promotion du secteur. Quoi qu'il en soit, il a parlé lors d'une conférence de la façon dont l'impression 3D ne pouvait être utilisée que pour le prototypage. Juste après lui, lors de cette même conférence, j'ai parlé de la façon dont nous pouvions produire des dizaines de milliers de pièces. Il est ensuite venu me voir et m'a dit qu'il ne savait pas que des gens comme nous existaient. [traduction]

– Cadre, jeune entreprise, Ontario

J'ai été de ceux qui pensaient que la fabrication additive n'était qu'une technologie ludique, même si j'ai un doctorat en FA, parce que c'est ce qu'était la technologie au début. [traduction]

– Boursier postdoctoral, secteur de l'éducation, Ontario

Toutefois, bon nombre de participants à l'étude ont également dit que la FA était considérée comme un « engouement » par les adeptes qui ont fait abstraction de ses faiblesses et l'ont présentée comme une solution universelle de fabrication plutôt qu'un outil spécialisé. Certains croyaient que l'industrie avait été complice de cet engouement par le passé (surtout au début des années 2010) et que l'incapacité de la FA d'être à la hauteur de cet engouement avait amené certaines personnes à en être « victimes ». Quelques-uns pensaient qu'il était encore courant pour les entreprises de FA de faire de fausses déclarations ou de déformer les capacités de la technologie.

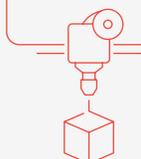


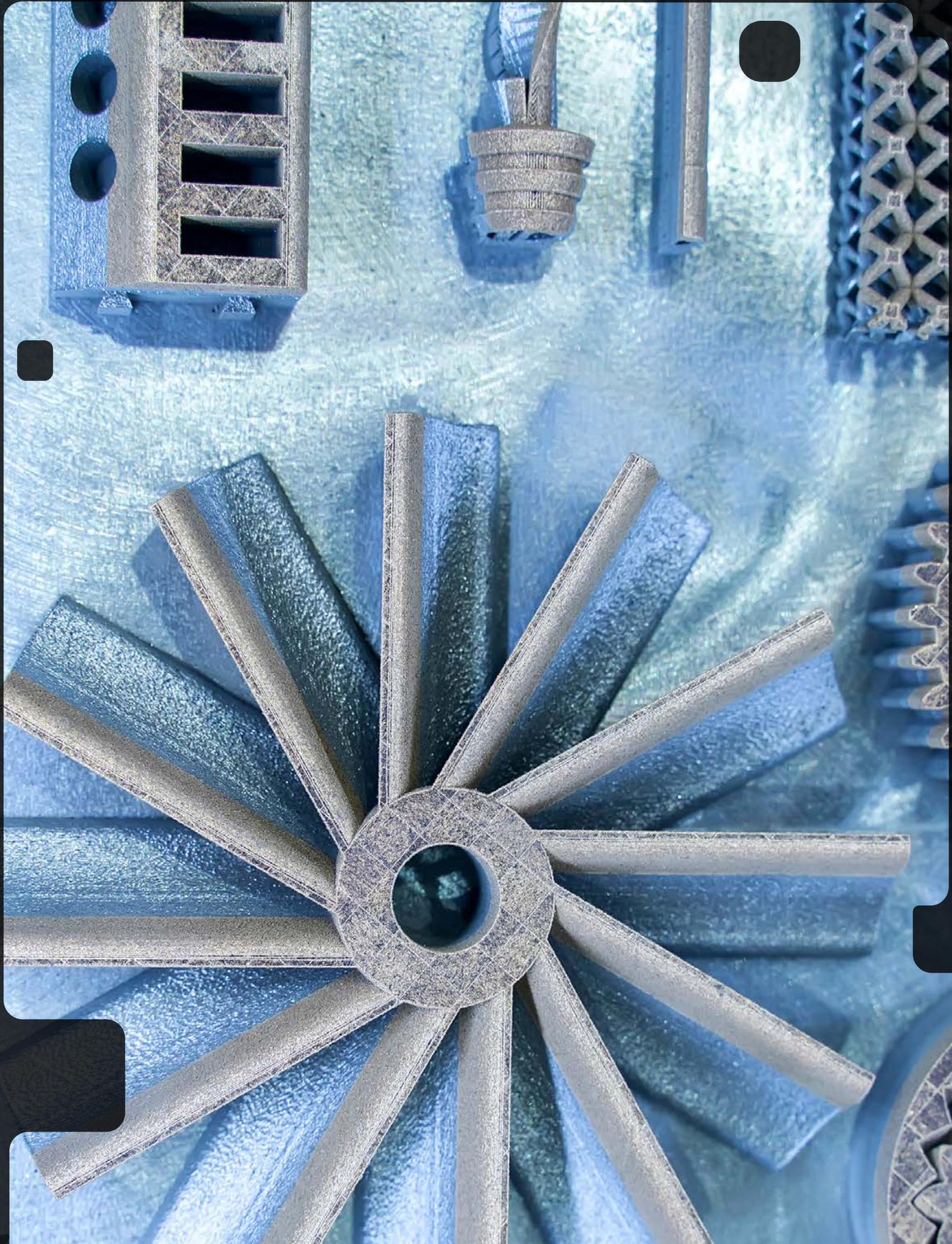
Les gens ne savent pas vraiment comment fonctionne l'impression 3D. Certains de nos clients pensent parfois qu'il s'agit d'un procédé magique qui leur donnera exactement ce qu'ils veulent. Comme pour tous les procédés de fabrication, il y a des avantages et des inconvénients. [traduction]

– Directeur, RPVA, Saskatchewan

Il y a beaucoup de fausses revendications commerciales. Un de nos concurrents prétend pouvoir fabriquer un produit pour un montant donné. En fait, c'est plus du double si vous lisez les petits caractères, mais il dit que ce prix sera atteint un jour. Son entreprise vient de recevoir un financement d'amorçage de plusieurs millions de dollars. Nous ne voulons pas propager de fausses revendications, mais il est évidemment beaucoup plus facile de favoriser l'intérêt pour la technologie. [traduction]

– Directeur de l'ingénierie, secteur de la construction, Québec





La FA dans les secteurs stratégiques

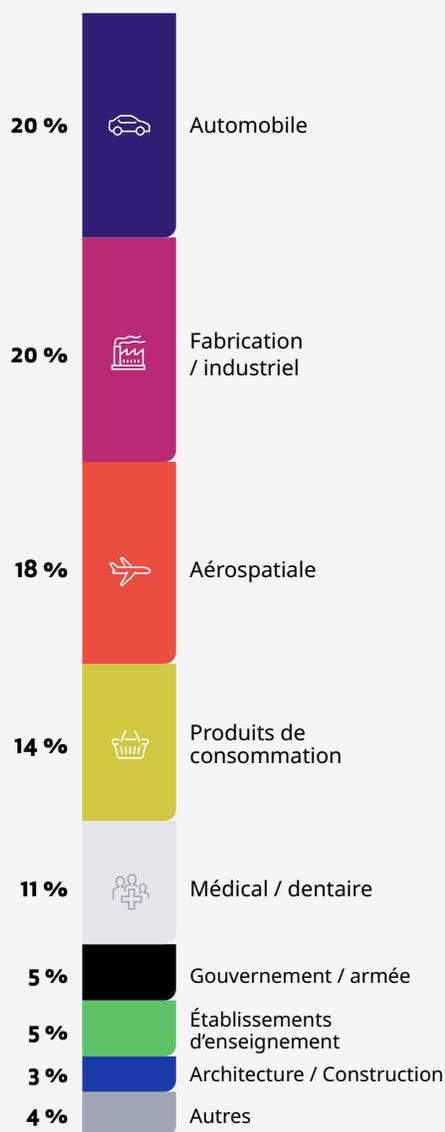
Compte tenu du large éventail d'avantages qu'offre la FA par rapport aux procédés de fabrication traditionnels, il n'est pas surprenant de savoir qu'il existe de nombreux cas pratiques à différents stades de développement dans une multitude de secteurs industriels. Selon la rentabilité et les coûts actuels de la technologie de la FA, plus de 70 % de la valeur marchande de la FA touche quatre principaux secteurs industriels¹²¹. La valeur économique la plus importante de la FA se situe actuellement dans la production à forte valeur et à faible volume pour des secteurs comme l'aérospatiale et l'automobile ou dans des secteurs où la personnalisation est importante, comme les implants médicaux et dentaires et les produits de consommation portables. Bien qu'il existe de nombreux autres cas pratiques dans d'autres secteurs, notamment les transports, l'aérospatiale, la marine, l'énergie ainsi que l'alimentation et les boissons¹²², nous examinerons dans cette section certains des cas pratiques de la FA les plus courants dans les secteurs stratégiques clés du Canada.¹²³



Quatre principaux secteurs s'intéressent à la FA : l'aérospatiale, l'automobile, les soins de santé et l'outillage. Dans le secteur de l'automobile, les entreprises se concentrent sur le design parce qu'elles veulent que les produits soient bon marché et légers. La FA les aide à en réduire le poids. En aérospatiale, les entreprises s'intéressent aux composants légers ainsi qu'aux matériaux et aux fonctionnalités de pointe. Dans l'industrie de l'outillage, elles s'intéressent particulièrement à l'utilisation de la FA pour fabriquer des outils perfectionnés. Le secteur biomédical s'intéresse à la fabrication de produits sur mesure comme les prothèses de la hanche offrant des matériaux biocompatibles de pointe. [traduction]

– Boursier postdoctoral, secteur de l'éducation, Ontario

Figure 2 : Part de marché de la FA, par industrie



Source: Wohlers Report, 2019.¹²⁴

¹²¹ Marie-Pierre Ippersiel et coll., *Livre blanc sur la fabrication additive au Québec*, Prima, 2020, <https://www.prima.ca/wp-content/uploads/2020/06/Livre-blanc-Fabrication-additive-au-Quebec-2020.pdf>
¹²² New Wohlers Report 2020 Documents more than 250 Applications of Additive Manufacturing, Wohlers Associates, 2020, <http://wohlersassociates.com/press82.html>
¹²³ Tables sectorielles de stratégies économiques, ISDE, <https://www.ic.gc.ca/eic/site/O98.nsf/fra/accueil>
¹²⁴ Wohlers Report 2019, Wohlers Associates, 2019, <https://wohlersassociates.com/2019report.htm>

Fabrication de pointe

La fabrication de pointe se définit par le développement et l'adoption de technologies novatrices pour créer de nouveaux produits, améliorer les procédés, et établir des méthodes de travail plus efficaces et plus rentables¹²⁵. Les technologies de FA sont considérées comme des technologies de fabrication de pointe clés au Canada^{126,127}. Plusieurs cas pratiques courants de la FA peuvent être observés dans les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale, de la fabrication industrielle et du commerce au détail.



Automobile

Dans le secteur concurrentiel de la fabrication automobile mondiale, les avantages en matière de coûts peuvent aider les participants à augmenter leurs marges bénéficiaires et à accroître leur part de marché¹²⁸. En outre, la personnalisation peut contribuer à générer une demande spécifique, et l'optimisation des modèles peut contribuer à améliorer le rendement et le kilométrage des véhicules¹²⁹. La FA est intéressante pour le secteur automobile en raison de sa capacité de faciliter la production rentable de petits lots, de l'optimisation du design et du poids, de la réduction des déchets, et de la fabrication de pièces complexes en une seule étape. Les cas pratiques courants dans le secteur automobile comprennent le prototypage rapide¹³⁰, l'outillage¹³¹, l'optimisation des modèles¹³², et la fabrication de pièces de rechange¹³³. Cependant, la réticence à adopter la technologie à plus grande échelle est considérable, en particulier pour les pièces finales essentielles sur le plan de la structure dans la production de masse.



Dans l'industrie automobile, tout est une question de quantité et de production. Cette technologie de la FA n'est pas encore adaptée à la production de masse. [traduction]

– Spécialise de la FA, secteur de l'automatisation, Québec

¹²⁵ Fabrication de pointe : Situation actuelle du secteur et perspectives d'avenir, Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2017, [https://www.ic.gc.ca/eic/site/098.nsf/vwapj/ISED_C_Table_FP.pdf/\\$file/ISED_C_Table_FP.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/098.nsf/vwapj/ISED_C_Table_FP.pdf/$file/ISED_C_Table_FP.pdf)

¹²⁶ Ibid.

¹²⁷ Fabrication de pointe, Investir au Canada, 2020, <https://www.investircanada.ca/secteurs/fabrication-de-pointe>.

¹²⁸ Alexandra Czok et coll., If 3D printing has changes the industries of tomorrow, how can your organization get ready today?, EY, 2016, https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/advisory/ey-if-3d-printing-has-changed-the-industries-of-tomorrow-how-can-your-organization-get-ready-today.pdf

¹²⁹ Ibid.

¹³⁰ Kevin Quinn, Driving differentiated value with additive manufacturing, Deloitte Insights, 2020, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/automotive/additive-manufacturing-for-automotive.html>

¹³¹ Producing tire moulds using additive manufacturing, GE, 2020, <https://www.ge.com/additive/industry/automotive/tire-mold>

¹³² HRE Wheels is revolutionizing the wheel with additive manufacturing, GE, 2019, <https://www.ge.com/additive/stories/hre-wheels-revolutionizing-wheel-additive-manufacturing>

¹³³ Automotive and 3D printing: The Complete Guide to the 3D printed car!, Sculpteo, 2020, <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/applications-of-3d-printing/3d-printed-car/>



Aérospatiale

Alors que les pièces haute performance extrêmement complexes sont habituellement produites en plus petites quantités et à un coût élevé, le secteur de l'aérospatiale a été l'un des premiers à adopter la technologie de pointe de la FA sur polymère et métal. Le prototypage demeurant le cas pratique le plus populaire dans le secteur, selon une enquête de la société de services manufacturiers Jabil, d'autres cas pratiques courants comprennent les réparations et la production de pièces de rechange, la production de pièces finales, l'outillage et la production transitoire¹³⁴. L'optimisation du poids et des modèles facilitée par la FA est un domaine de développement prometteur pour le secteur¹³⁵. Chaque kilogramme de poids économisé dans l'industrie aérospatiale peut permettre d'économiser entre 1 200 et 25 000 \$ US¹³⁶. La FA permet aussi de réduire le nombre de composants en fabriquant des modèles complexes qu'il n'était pas possible de construire auparavant par des méthodes soustractives, réduisant ainsi les temps et les coûts de production¹³⁷. Ces concepts, associés à la flexibilité des propriétés mécaniques que permettent les procédés de FA sur métal, peuvent offrir de meilleures caractéristiques opérationnelles et une efficacité accrue¹³⁸. Le fait que la plupart des avions contiennent de nombreuses pièces importantes, complexes et coûteuses favorise également l'utilisation de la FA pour produire des pièces de rechange, réduisant ainsi les coûts d'inventaire.



Au Québec, nous sommes très engagés dans le domaine de l'aérospatiale. L'aéronautique et l'aérospatiale sont des chefs de file de la recherche et du développement au Québec. Vous pouvez modifier complètement le design, éliminer des matériaux pour réduire le poids, un aspect très souhaitable dans l'industrie aérospatiale. Vous pouvez aussi ajouter des fonctionnalités. Dans le procédé de dépôt, vous pouvez construire des pièces à l'aide de différents composants pour varier les propriétés. Par exemple, vous pouvez l'utiliser pour améliorer les propriétés de surface et accroître la durée de vie des outils. Il peut être utilisé pour l'extrusion, la double extrusion et d'autres tâches semblables. Mais si vous voulez remplacer une pièce qui est fondamentalement la même, ce sera généralement moins cher de la remplacer à l'aide d'une technologie traditionnelle. [traduction]

– Gestionnaire de projet, secteur de la recherche, Québec

L'aspect innovant de la FA est ce qui nous intéresse le plus. Vous pouvez l'utiliser pour produire des pièces qu'il serait impossible de produire autrement. Vous pouvez l'utiliser pour produire de faibles quantités de pièces rapidement et à un coût relativement bas. Le secteur de l'aérospatiale est mieux placé pour faire face à des coûts ponctuels importants que le secteur de l'automobile ou des produits de consommation. [traduction]

– Directeur, secteur de l'aérospatiale, Canada atlantique

¹³⁴ Aerospace and Defense Manufacturing Trends, Jabil, 2019, <https://www.jabil.com/dam/jcr:1ede553e-5588-4dc0-9eb4-bab7f8d889b8/defense-and-aerospace-survey-report-v3.pdf>

¹³⁵ Canada Makes, Burloak and MDA team up to create innovative satellite antenna parts, Canada Makes, 2020, <http://canadamakes.ca/canada-makes-burloak-and-md-a-team-up-to-create-innovative-satellite-antenna-parts/>

¹³⁶ « 3D printing transforms the economics of manufacturing », The Economist, 2017, <https://www.economist.com/briefing/2017/07/01/3d-printing-transforms-the-economics-of-manufacturing>

¹³⁷ Robert Carter et coll., Additive Manufacturing of Aerospace Propulsion Components, NASA, 2015, <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150023067.pdf>

¹³⁸ For the ready. Take to the skies with proven metal additive solutions, GE, 2020, https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-09/GE_Aerospace_Brochure_8.5x11_R5.pdf



Outillage et autres applications manufacturières

L'outillage, une industrie qui sert des dizaines de secteurs manufacturiers, cadre bien avec les avantages de la FA, en particulier sa capacité de prototyper, de personnaliser et de créer rapidement des objets très complexes^{139,140}. L'outillage robotique (un aspect de la technologie robotique faisant référence à l'équipement qui interagit avec les pièces et les composants) est un cas pratique particulièrement intéressant pour les chaînes de production et de montage robotisées.^{141,142}



Pour une grande partie de l'outillage que nous faisons, la fabrication traditionnelle ne permettrait pas de produire des outils de façon rentable. Un grand nombre de nos pièces sont fabriquées sur mesure en petites quantités. Même pour des quantités importantes, les géométries de plusieurs de ces pièces sont trop complexes pour que le fraisage CNC soit efficace. C'est davantage une question de complexité des pièces que de volume. [traduction]

– Responsable de la FA, secteur de l'aérospatiale, Canada atlantique



Produits de consommation

Les produits de consommation représentent un autre sous-secteur de la fabrication de pointe ayant adopté la technologie de la FA. La capacité de la FA à réaliser rapidement des prototypes, à faciliter la personnalisation de masse, et à répondre à l'évolution des goûts des consommateurs fait partie des principaux moteurs de croissance de la FA dans ce sous-secteur. Ces atouts sont particulièrement souhaitables dans les marchés dynamiques comme la mode, les accessoires, les articles de fantaisie et les produits portables.¹⁴³



Nous fabriquons beaucoup de produits liés aux arts. Nous utilisons la FA pour la sculpture. Par exemple, nous pourrions créer une sculpture en cubes de 24 pouces en ce moment même. L'échelle de l'objet n'est pas un problème. Il est très facile d'utiliser des composants multiples. Nous utilisons cette technologie surtout pour les produits de ventilateurs. [traduction]

– Cadre, cabinet-conseil en FA, Ontario

¹³⁹ Chapter 5 – Industrial Goods, AMFG, 2020,

<https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimate-guide/#tab-con-15>

¹⁴⁰ Anton Alveflo et coll., *Production Tools Made by Additive Manufacturing Through Laser-based Powder Bed Fusion*, Berg Huettenmaenn Monatsh, 2020, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-020-00961-8>.

¹⁴¹ Kip Hanson, « Additive Manufacturing and End Of Arm Tooling », *Assembly Magazine*, 2016, <https://www.assemblymag.com/articles/93472-additive-manufacturing-and-end-of-arm-tooling>

¹⁴² *The future of manufacturing for the energy sector is being redefined*, *Canada Makes*, 2020, <http://canadamakes.ca/future-manufacturing-energy-sector-redefined/>

¹⁴³ Czok et coll., loc. cit.



Sciences de la santé et sciences biologiques

Le secteur des sciences biologiques et de la santé fait aussi partie des premiers adeptes de la technologie de la FA. Les solutions fondées sur la FA peuvent répondre à certains des plus grands défis dans ce domaine. La bio-impression de membres bioniques, d'organes de remplacement et de systèmes d'administration pharmaceutique avancés capables de répondre à des stimuli externes pourrait engendrer de nouvelles possibilités en matière d'implants et de dispositifs médicaux intelligents¹⁴⁴. Bien que bon nombre de ces applications médicales soient encore en phase de recherche et de développement exploratoire, il existe déjà plusieurs cas pratiques de FA dans le secteur des sciences biologiques et de la santé qui sont commercialement viables et actuellement en usage¹⁴⁵.

Les solutions d'impression 3D peuvent aider les praticiens et les administrateurs du secteur de la santé à visualiser et à planifier des interventions complexes, à créer des dispositifs et des implants personnalisés comportant des structures internes et externes complexes en utilisant des matériaux biocompatibles, à rationaliser les chaînes d'approvisionnement, et à réduire les coûts¹⁴⁶. Les applications cliniques actuelles de la FA incluent la création de modèles anatomiques, d'implants et d'appareils dentaires personnalisés, de guides, d'outils et d'instruments chirurgicaux, de prothèses et d'applications dentaires comme les prothèses, les gouttières et les implants¹⁴⁷. La bio-impression, c'est-à-dire l'impression 3D de matériaux biocompatibles, de cellules ou de composants de soutien dans des tissus vivants fonctionnels complexes en 3D¹⁴⁸, est un domaine de recherche et de développement passionnant qui a fait plusieurs percées impressionnantes ces dernières années^{149,150,151}.

Le leadership canadien dans le domaine de la FA en soins de santé s'étend aux universités et aux laboratoires de recherche^{152,153,154}, aux hôpitaux^{155,156}, aux organisations sans but lucratif¹⁵⁷, et aux partenariats avec le secteur privé^{158,159,160}.

- 144 Ida Emilie Steinmark et Neil Goalby, *4D printing: the next dimension*, Royal Society of Chemistry, 2020, <https://edu.rsc.org/feature/4d-printing-the-next-dimension-in-healthcare/4011689.article>
- 145 Emman Combella et coll., *20 – The commercial 3D bioprinting industry*, *3D Bioprinting for Reconstructive Surgery*, 2018, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101103-4.00029-6>
- 146 Jeff Mason et coll., « An Overview of Clinical Applications of 3-D Printing and Bioprinting », CADTH, 2019, https://www.cadth.ca/sites/default/files/hs-eh/eh0072_3DPrinting.pdf
- 147 Ibid.
- 148 Sean Murphy et Anthony Atala, « 3D Bioprinting of tissues and organs », *Nature Biotechnology*, Nature, 2014, <https://www.nature.com/articles/nbt.2958>
- 149 Kate Yandell, « Organs on Demand », *The Scientist*, 2013, <https://www.the-scientist.com/features/organs-on-demand-38787>
- 150 Mark Crawford, *Creating Valve Tissue Using 3-D Bioprinting*, *American Society of Mechanical Engineers*, 2013, <https://www.asme.org/topics-resources/content/creating-valve-tissue-using-3d-bioprinting>
- 151 Nadav Noor et coll., « 3D Printing of Personalized Thick and Perfusable Cardiac Patches and Hearts », *Advanced Science*, 2019, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.201900344>
- 152 *3D Bioprinting generates encouraging future for healthcare*, Faculté des sciences appliquées de l'Université de la Colombie-Britannique, 2020, <https://apsc.ubc.ca/spotlight/research/3d-bioprinting-generates-encouraging-future-for-healthcare>
- 153 *About Us*, Kinsella Lab, 2020, <http://kinsella.lab.mcgill.ca/>
- 154 *Services d'impression 3D pour la recherche clinique*, Institut de recherche du Centre universitaire de santé McGill, 2020, <https://rimuhc.ca/clinical-research/3d-printing>
- 155 Jodie Vanasse, *3D printing our way to better health care*, Hôpital d'Ottawa, 2017, <https://www.ottawahospital.on.ca/en/uncategorized/3d-printing-our-way-to-better-health-care/>
- 156 *Who We Are*, Institute for Reconstructive Sciences in Medicine, 2020, <https://irsmyeg.ca/services/>
- 157 *The Project*, Victoria Hand Project, 2019, <https://www.victoriahandproject.com/>
- 158 *Soutenir la croissance et la compétitivité des entreprises novatrices de la Colombie-Britannique, Diversification de l'économie de l'Ouest Canada*, 2018, <https://www.canada.ca/fr/diversification-economie-ouest/nouvelles/2018/11/soutenir-la-croissance-et-la-competitivite-des-entreprises-novatrices-de-la-colombie-britannique.html>
- 159 « London researchers revamping jawbone surgery with 3D printing technology », *CBC News*, 2018, <https://www.cbc.ca/news/canada/london/3d-printing-adeiss-surgery-1.4806787>
- 160 Isabell Kirkwood, « Two Research Projects Receive Combined \$448,000 from Innovate BC », *Betaki*, 2019, <https://betakit.com/two-research-projects-receive-combined-448000-from-innovate-bc/>

Les entreprises de biotechnologie par FA récemment financées au Canada comprennent des projets visant à améliorer la fabrication d'implants orthopédiques personnalisés¹⁶¹ et à utiliser la bio-impression pour élaborer de nouvelles stratégies de traitement des maladies du cerveau.¹⁶²

Bien que la FA ait facilité plusieurs améliorations dans les soins aux patients et la prestation de soins de santé, il reste encore plusieurs défis techniques, juridiques et réglementaires à relever¹⁶³. Cela dit, l'impression 3D et la bio-impression sont parmi les axes de développement les plus prometteurs dans le secteur des soins de santé, alors que plusieurs grands essais cliniques¹⁶⁴, examens systématiques¹⁶⁵ et études de recherche sont en cours¹⁶⁶.



L'industrie aérospatiale s'y intéresse grandement. Nous faisons beaucoup de recherche et développement à Toronto et Montréal. Nous avons quatre ou cinq projets en cours et pouvons compter sur de nombreux partenaires dans l'industrie aérospatiale. Ce n'est pas encore une technologie mature. Elle n'a pas encore été totalement acceptée. Mais nous sommes en train de prouver qu'elle peut fonctionner et de trouver les bonnes applications. Le domaine biomédical s'y intéresse aussi. Il utilise la technologie à une échelle beaucoup plus petite pour fabriquer des produits comme des implants. L'idée est que les normes et la précision sont similaires. [traduction]

– Spécialiste de la FA, secteur manufacturier, Québec

Nous vendons partout dans le monde entier, mais les États-Unis représentent probablement notre plus grand marché. En ce qui concerne les segments verticaux de l'industrie, nous sommes dans l'aérospatiale, la défense et le militaire. Ce groupe entier est une part importante de notre clientèle. Certains des cas pratiques les plus intéressants que nous observons visent des fins biomédicales. Mais en raison de la nature de cette industrie, il faudra plus de temps pour que ces applications se développent et prennent de l'ampleur. [traduction]

– Cadre, FEO, Québec

L'industrie aérospatiale était l'un des principaux moteurs d'innovation et d'adoption de la FA. Et maintenant que tous les avions sont cloués au sol, nous ne construisons plus de moteurs, et nous ne pouvons plus compter sur le secteur pour soutenir la recherche et l'adoption massive de la FA. En même temps, oui, la médecine et les soins de santé pourraient être un nouveau secteur chef de file. Ces secteurs étaient déjà très actifs dans le domaine, mais ils le seront encore peut-être davantage maintenant. [traduction]

– Responsable technique, secteur public, Québec

¹⁶¹ « Canada's Manufacturing Supercluster and industry partners \$28.8 million in new and emerging technologies ». nGen, Intrado, 2020, <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/07/08/2059487/0/en/Canada-s-Manufacturing-Supercluster-and-industry-partners-invest-28-8-million-in-new-and-emerging-technologies.html>

¹⁶² De nouveaux modèles 3D de la barrière hémato-encéphalique pourraient mener à des traitements améliorés contre la maladie d'Alzheimer, la sclérose latérale amyotrophique et d'autres maladies du système nerveux central. Conseil national de recherches du Canada, 2019, <https://www.canada.ca/fr/conseil-national-recherches/nouvelles/2019/02/le-conseil-national-de-recherches-du-canada-et-aspect-biosystems-emploient-a-trouver-de-nouvelles-facons-dadministrer-des-traitements-au-cerveau-l.html>

¹⁶³ Witold Jamroz et coll., « 3D Printing in Pharmaceutical and Medical Applications – Recent Achievements and Challenges », Pharmaceutical Research, 2018, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6061505/>

¹⁶⁴ International Clinical Trials Registry Platform, Organisation mondiale de la Santé, 2020, <https://apps.who.int/trialsearch/>. Mot clé : « 3D printing », consulté le 10 novembre 2020.

¹⁶⁵ National Institute for Healthcare Research, <https://www.crd.york.ac.uk/prospero/#searchadvanced>. Mots clés : « 3D printing », consulté le 10 novembre 2020.

¹⁶⁶ Wei Sun et coll., « The bioprinting roadmap », IOP Science, 2020, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1758-5090/ab5158>



Technologies propres

Le secteur de l'énergie utilise souvent de grandes machines complexes qui tendent à avoir une longue durée de vie utile, généralement mesurée en décennies. La FA, grâce à ses avantages inhérents en matière de complexité des concepts, d'optimisation du poids, ainsi que de gestion des stocks et des pièces de rechange, permet d'apporter plusieurs améliorations aux concepts et procédés actuels dans le domaine des technologies propres, ce qui se traduit par une diminution des déchets et du gaspillage énergétique, une hausse de l'efficacité, et une atténuation des impacts environnementaux.

L'impression additive sur métal sert à produire des turbines à gaz offrant des concepts plus efficaces sur le plan énergétique qu'il n'aurait été possible de réaliser auparavant par la fabrication traditionnelle. Ces concepts (également utilisés dans l'industrie aérospatiale) réduisent considérablement la quantité de liquide de refroidissement nécessaire aux pièces, entraînant une amélioration du rendement et engendrant des économies potentielles de plusieurs millions de dollars par année¹⁶⁷. Le département étasunien de l'énergie a récemment mis au point un autre concept écoénergétique¹⁶⁸. Les chercheurs du Oak Ridge National Laboratory peaufinent et testent présentement le cœur d'un réacteur nucléaire imprimé en 3D. Le nouveau concept devrait améliorer l'efficacité énergétique du réacteur et permettre l'utilisation de capteurs intégrés, ce qui fournira des informations précieuses sur les conditions internes du cœur pendant les essais et son fonctionnement¹⁶⁹. De plus, la FA permet également d'accélérer les délais d'exécution lorsque des concepts doivent être modifiés et, surtout, de réduire considérablement le nombre de composants nécessaires à la fabrication de la pièce. En plus de la grande quantité de données recueillies par les capteurs intégrés, cette méthode devrait contribuer à réduire considérablement le temps et les dépenses nécessaires pour certifier le réacteur nucléaire en vue de son exploitation.¹⁷⁰

L'impression en 3D de cellules solaires représente un autre domaine de développement récent de la FA dans le secteur des technologies propres¹⁷¹. Les solutions d'impression 3D peuvent aider à produire des panneaux solaires légers et flexibles pouvant être intégrés dans divers facteurs de forme (un aspect de la conception de matériel qui définit et édicte la taille, la forme et d'autres spécifications matérielles des composants) et fournir des solutions d'alimentation portable pour les communautés éloignées¹⁷². Un récent projet de recherche a également mené à la mise au point d'un système imprimé en 3D qui permet de tester beaucoup plus rapidement les modèles de cellules solaires et d'évaluer le rendement et le potentiel commercial des nouveaux composés utilisés dans ces cellules¹⁷³.

¹⁶⁷ *The Future of Additive Manufacturing*, General Electric, 2018,

<https://www.ge.com/power/about/insights/articles/2018/07/additive-manufacturing>

¹⁶⁸ *3D-printed nuclear reactor promises faster, more economical path to nuclear energy*, Oak Ridge National Laboratory, 2020,

<https://www.ornl.gov/news/3d-printed-nuclear-reactor-promises-faster-more-economical-path-nuclear-energy>

¹⁶⁹ Oberhaus, loc. cit.

¹⁷⁰ Ibid.

¹⁷¹ Vishal R. Mehta et Nuggehali M. Ravindra, « Screen Printing to 3D Printing of Solar Cells – An Overview », *Research Gate*, 2020,

https://www.researchgate.net/publication/339234419_Screen_Printing_to_3D_Printing_of_Solar_Cells-An_Overview

¹⁷² *Printable solar cells for lightweight energy*, CSIRO, 2020,

<https://www.csiro.au/en/Research/MF/Areas/Innovation/Flex-Electronics/Printed-Solar-Cells>

¹⁷³ *3D-printed system speeds up solar cell testing from hours to minutes*, Exciton Science, 2020,

<https://excitonscience.com/news/3d-printed-system-speeds-solar-cell-testing-hours-minutes>

Le secteur canadien des technologies propres inclut Equispheres, un fabricant de poudres métalliques par FA ayant reçu un financement de 8 millions de dollars de Technologies du développement durable Canada en janvier 2020 pour augmenter la production de ses poudres métalliques exclusives¹⁷⁴. Sa poudre d'aluminium a été optimisée pour la FA dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatiale afin de réduire le poids et, par extension, son empreinte carbone¹⁷⁵. Ce dernier développement s'inscrit dans une tendance de croissance de l'expertise canadienne en matière de développement de poudres métalliques¹⁷⁶. Deux entreprises de la Colombie-Britannique figurent parmi les autres entreprises canadiennes de technologies propres : S&S Turbine Services, qui utilise la FA pour concevoir, tester et produire des pièces de rechange pour des modèles de turbine plus anciens¹⁷⁷, et Advanced BioCarbon 3D, qui convertit les rémanents (biomasse indésirable des sites d'exploitation forestière, comme les branches et les petits feuillus qui sont coupés mais non récoltés) en polymères bioplastiques destinés à être utilisés dans des imprimantes 3D¹⁷⁸.

Architecture et construction

La FA est considérée comme une solution potentielle à plusieurs problèmes qui touchent actuellement l'ensemble du secteur du logement et de la construction dans les pays développés¹⁷⁹ et en développement¹⁸⁰. Elle a même été proposée comme solution potentielle aux problèmes de logement et de construction dans le Nord canadien¹⁸¹ ou comme un moyen rentable de lutter contre l'itinérance¹⁸². La construction fondée sur la FA pourrait offrir plusieurs avantages par rapport aux procédés de construction conventionnels, y compris une construction complexe et personnalisée, une réduction des délais de réalisation des projets et des déchets de matériaux, ainsi qu'une diminution des coûts.¹⁸³

¹⁷⁴ « Equispheres receives \$8 million in cleantech funding to scale metal powder production », *Metal AM Magazine*, 2020, <https://www.metal-am.com/equispheres-receives-8-million-in-cleantech-funding-to-scale-metal-powder-production/>

¹⁷⁵ « Cleantech Fund Accelerates Efficiencies in Automotive and Aerospace Industries with Metal Powder Innovation Investment », *Businesswire*, 2020, <https://www.businesswire.com/news/home/20200115005803/en/>

¹⁷⁶ Tomas Kellner, *Atomize This: Metal Powder From This Canadian Plant Will Fire Up The 3D Printing Revolution*, *General Electric*, 2017, <https://www.ge.com/news/reports/atomize-metal-powder-canadian-plant-will-fire-3d-printing-revolution>

¹⁷⁷ *3D Printing/Additive Manufacturing*, S&S Turbine Services Ltd, 2019, <https://www.ssturbine.com/3d-printing-additive-manufacturing>

¹⁷⁸ Bois transparent, *impression 3D et technologie furtive*, *Ressources naturelles Canada*, 2019, <https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/forets-foresterie/etat-des-forets-au-canada-rappo/articles/bois-transparent-impression-3d-technologie-furtive/22289>

¹⁷⁹ Sterling Archer, *Additive Manufacturing: Potential Solution to the Labor Shortage in Construction*, *Harvard Business School*, 2018, <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/additive-manufacturing-potential-solution-to-the-labor-shortage-in-construction/>

¹⁸⁰ Christina Zdanowicz, « 3D-printed neighborhood being built in Mexico for families living on US\$3 a day », *CTV News*, 2019, <https://www.ctvnews.ca/sci-tech/3d-printed-neighborhood-being-built-in-mexico-for-families-living-on-us-3-a-day-1.4728362>

¹⁸¹ Ken Coates et Carin Holroyd, *Revolutionary Building for the North: 3D Printing Construction*, *Conference Board of Canada*, 2018, <https://www.conferenceboard.ca/e-library/abstract.aspx?did=9949>

¹⁸² « An Austin startup can 3D-print tiny homes in 24 hours for a fraction of the cost of traditional homebuilding – here's how Icon could revolutionize affordable housing », *Business Insider*, 2020, <https://www.businessinsider.com/icon-3d-printer-tiny-home-austin-photos-2019-10>

¹⁸³ Sterling Archer, *Additive Manufacturing: Potential Solution to the Labor Shortage in Construction*, *Harvard Business School*, 2018, <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/additive-manufacturing-potential-solution-to-the-labor-shortage-in-construction/>



Un mur R-6 coûte le même prix qu'un mur R-20 (valeurs d'isolation thermique), ce qui nous permet de réaliser des bâtiments à l'aide de différents niveaux d'isolation sans frais supplémentaires. Nous rendons simplement l'espace entre les couches intérieure et extérieure aussi épais ou mince que nécessaire. Il n'est pas nécessaire de modifier la procédure d'une autre manière. Il n'y a pas de coffrage. Nous faisons des impressions personnalisées de tout ce que les gens veulent. Il est possible d'imprimer deux maisons côte à côte sans avoir à reconfigurer l'installation de l'imprimante, et vous pourriez imprimer un étage toutes les huit heures. Théoriquement, il n'y a pas de limite au nombre d'étages qui pourraient être créés. [traduction]

- Directeur de l'ingénierie, secteur de la construction, Québec



En ce qui concerne les coûts, la FA est beaucoup moins chère, surtout lorsqu'il s'agit de produire à grande échelle. Par exemple, si vous imprimez un seul objet en métal, en plastique ou en béton, ce n'est pas rentable. Mais si vous le faites à grande échelle, par exemple 100 ou 1 000 maisons, c'est alors logique parce que vous payez la technologie et le matériel une fois et que le matériel est habituellement local. Vous n'importez pas de grandes quantités de matériel. C'est pour cette raison que nous l'avons essayée : il y a une grande pénurie de logements dans le monde. Nous nous intéressons aux pays en guerre afin d'essayer de construire des infrastructures le plus rapidement possible lorsque les gens rentrent dans leur pays. Nous essayons aussi de remédier à la pénurie de logements dans les pays pauvres. [traduction]

- Consultant, secteur de la construction, Ontario

Des travaux ont récemment commencé sur le plus grand immeuble résidentiel imprimé en 3D en Europe. Situé en Bavière, en Allemagne, le projet utilisera l'imprimante de construction 3D la plus rapide sur le marché pour construire cinq appartements sur une surface totale de plus de 4 000 pieds carrés en 6 semaines.¹⁸⁴

Malgré la promesse de la FA pour certaines applications de construction, le Canada a vu très peu de commercialisation de cette technologie jusqu'à présent. Seulement une poignée de petites entreprises travaillent avec la FA en construction au Canada, et elles en sont principalement au stade de la recherche et du développement^{185,186,187}. Selon des spécialistes de l'industrie interrogés dans le cadre de la présente étude, le principal défi de cette application de la FA au Canada est de communiquer la proposition de valeur à un secteur qui ne connaît pas la technologie et qui hésite à investir dans les machines coûteuses nécessaires.

¹⁸⁴ Peri Builds 3D Printed Apartment Building in Germany, Steel Guru, 2020,

<https://www.steelguru.com/infrastructure/peri-builds-3d-printed-apartment-building-in-germany>

¹⁸⁵ Eva Uguen-Csenge, « New 3D printer can build home in days, says B.C. scientist », CBC News, 2019,

<https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/new-3d-concrete-printer-build-home-days-scientist-1.5111890>

¹⁸⁶ Jeff Sawyer, « Innovative 3D Concrete Printing Start Up Takes Root in Procter, BC », The Nelson Daily, 2020,

<http://thenelsondaily.com/dose/innovative-3d-concrete-printing-start-takes-root-procter-bc>

¹⁸⁷ « 3D Printed Homes Corporation Will Print Houses in as Little as Two Days », Financial Post, 2019,

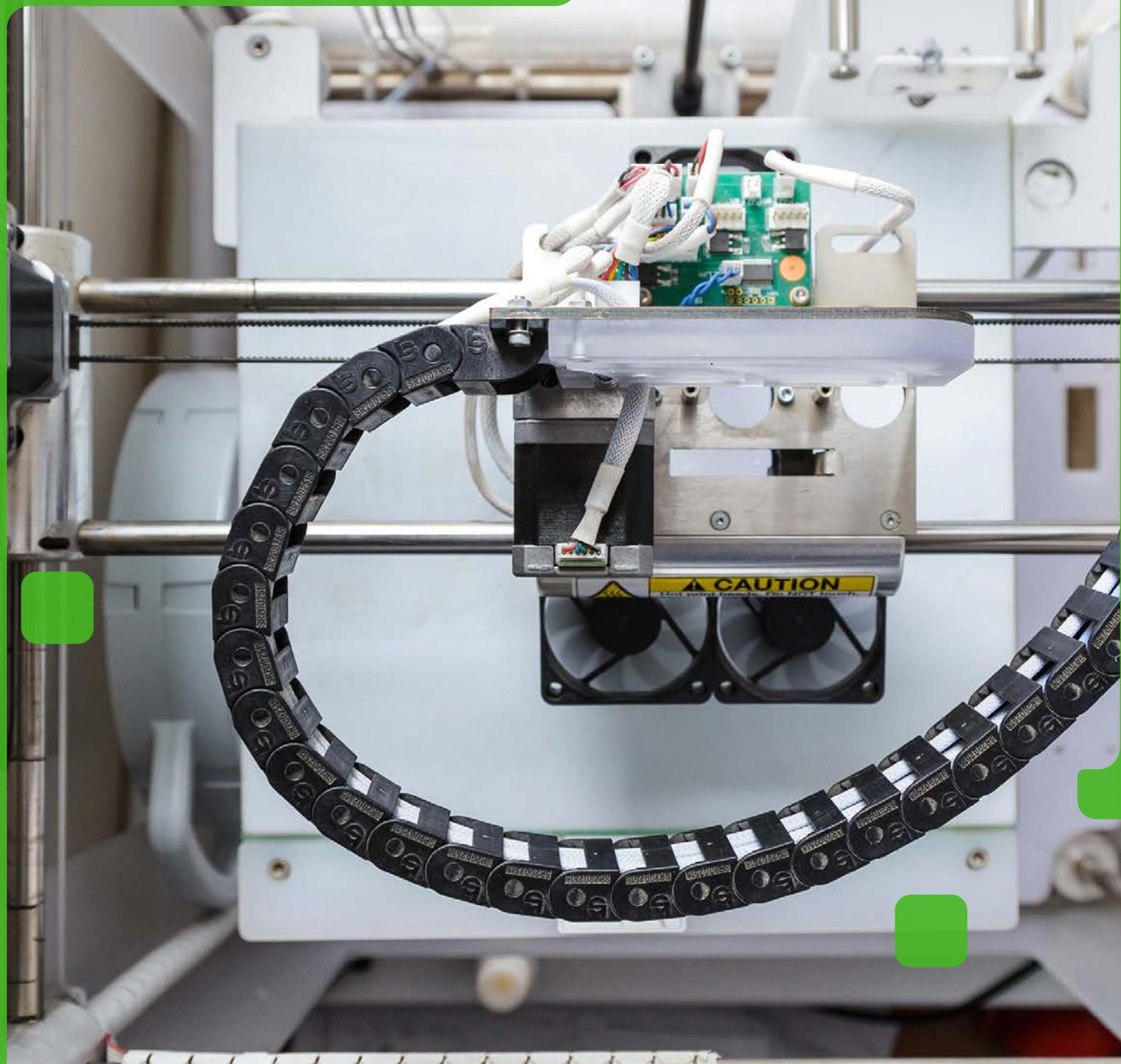
<https://financialpost.com/pmn/press-releases-pmn/business-wire-news-releases-pmn/3d-printed-homes-corporation-will-print-houses-in-as-little-as-two-days>



Nous pensions que l'industrie était arrivée à maturité, mais en réalité, l'échelle d'investissement requise est beaucoup plus importante. C'est même plus cher que la FA sur métal. Nous avons des imprimantes qui se vendent à 1,2 million de dollars. Beaucoup de gens sont arrivés au stade de la conception, mais il n'y a ensuite plus d'argent pour aller plus loin. Et tous ceux qui achètent la technologie doivent faire une nouvelle analyse de rentabilisation. Il ne s'agit pas d'une analyse de rentabilisation simple et préfaite. Vous devez prouver la technologie aux gens. Nous faisons beaucoup de produits de démonstration en ce moment. Les gens ne sont pas exposés à cette technologie actuellement. Ils ne savent littéralement pas ce que c'est. Nous imprimons seulement des produits pour que les gens puissent les toucher, les sentir et les manipuler. Un de nos concurrents offre des ateliers, mais ils coûtent de l'argent. Nous préférons montrer des choses gratuitement pour attirer plus de gens. [traduction]

- Directeur de l'ingénierie, secteur de la construction, Québec

Le paysage canadien de la FA

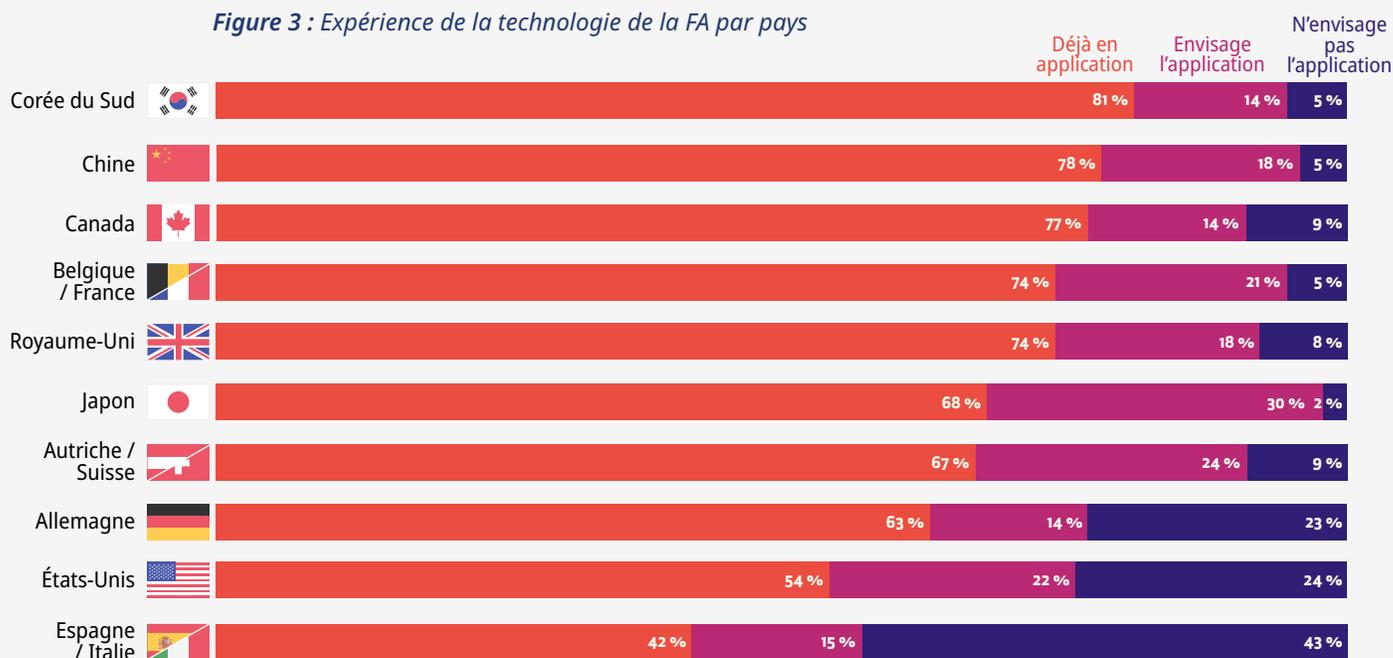


La place du Canada dans l'écosystème mondial de la FA

Mondialement, la FA est surtout centralisée en Europe et aux États-Unis. L'Europe compte plus de la moitié (55 %) des entreprises de FA du monde, suivie des Amériques à 32 % et de l'Asie à 13 %. Les États-Unis comptent la plus forte proportion d'entreprises, soit 29 % de toutes les entreprises de FA, alors que l'Allemagne arrive en deuxième position à 24 %¹⁸⁸. Les États-Unis sont de loin le joueur le plus dominant en Amérique du Nord, représentant 90 % du marché étasunien de la FA, tandis que l'Allemagne représente un peu moins de la moitié du marché européen¹⁸⁹. Ensemble, les États-Unis et l'Europe représentent cinq sixièmes du marché mondial de la FA.

Au cours des trois dernières années, une importante hausse de la sensibilisation aux technologies de la FA et de leur utilisation dans différents secteurs. À l'échelle mondiale, le pourcentage d'entreprises interrogées par EY ayant essayé la technologie de la FA est passé de 24 % en 2016 à 65 % en 2019¹⁹⁰. Selon l'enquête EY Global sur l'impression 3D, l'expérience des technologies de la FA était la plus grande parmi les entreprises asiatiques, en particulier celles de la Corée du Sud (88 %) et de la Chine (78 %). Le Canada est arrivé en troisième position sur les 13 pays étudiés¹⁹¹. Sur les 47 entreprises canadiennes interrogées, 77 % d'entre elles avaient déjà appliqué la technologie de la FA, 14 % envisageaient de le faire, et seulement 9 % n'avaient pas encore envisagé de le faire.¹⁹²

Figure 3 : Expérience de la technologie de la FA par pays



Source: Enquête de EY Global sur l'impression 3D, avril 2019¹⁹³

¹⁸⁸ Karevska et coll., loc. cit.

¹⁸⁹ Ibid.

¹⁹⁰ Ibid.

¹⁹¹ Ce chiffre pourrait être le résultat d'une croissance de la FA, d'une baisse de la fabrication traditionnelle ou d'une combinaison des deux.

¹⁹² Karevska et coll., loc. cit.

¹⁹³ Ibid.

Le Canada représente environ 2 % de l'écosystème mondial de la FA¹⁹⁴, ce qui est relativement peu comparativement à des pays chefs de file dans ce domaine comme les États-Unis, l'Allemagne et la Chine. Toutefois, l'écosystème canadien de la FA est relativement diversifié et dispose, dans de nombreux secteurs liés à la FA, d'une chaîne de valeur bien intégrée (comme dans la fabrication de poudres), d'une grande expertise (en robotique, intelligence artificielle, gestion de fichiers CAO, fabrication d'imprimantes), ou a été largement adopté (en aérospatiale et dans le secteur biomédical). Certaines parties de l'écosystème canadien de la FA ont déjà un profil mondial. Par exemple, la province de Québec est un chef de file dans la recherche sur la FA sur métal et le développement de poudres. La société Precision ADM de Winnipeg a été le plus grand fabricant canadien de dispositifs médicaux imprimés en 3D pendant la pandémie de COVID-19^{195,196}.

Bien que les entreprises manufacturières canadiennes aient une expérience significative de la FA, les participants à l'étude ont également mentionné que l'adoption de la FA au Canada est répandue, mais aussi largement superficielle. Bon nombre d'entre eux ont décrit le secteur manufacturier canadien comme étant conservateur, réticent à essayer de nouvelles technologies, et désireux de poursuivre ce qui a fonctionné jusqu'à présent.

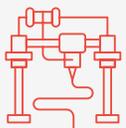
Bien que l'écosystème canadien de la FA soit petit, la concurrence parmi les entreprises est féroce. Bien que la concurrence soit largement considérée comme un élément d'une économie dynamique, plusieurs des participants à l'étude ont décrit l'écosystème de la FA comme combinant (a) une culture de concurrence pour les ressources (talents ou investissements); (b) une fragmentation de l'écosystème; et (c) nécessitant des investissements majeurs de capitaux. Les participants à l'étude ont estimé que cette combinaison d'éléments constituait un obstacle majeur à la croissance de l'écosystème canadien de la FA. Comme la FA est un secteur qui évolue rapidement et dont les coûts sont élevés, la création de valeur signifie souvent des investissements substantiels en recherche. Une fois que des développements qui permettent de réduire les coûts ou de créer de la valeur sont réalisés, les entreprises pourraient vouloir en faire un avantage concurrentiel, ce qui ne ferait que retarder leur adoption dans le reste du secteur et pourrait entraîner une duplication coûteuse des travaux dans les entreprises pour élaborer des procédés similaires. Les participants à l'étude étaient massivement convaincus que les coûts élevés de l'adoption de la technologie FA favorisent les grandes organisations bien établies plutôt que les PME.

La concurrence internationale dans l'écosystème de la FA est intense. Bien que la FA puisse en théorie permettre la fabrication distribuée, les coûts de production sont affectés par les économies d'échelle. Les grandes entreprises possédant de 50 à 100 machines peuvent réaliser de grands projets en moins de temps et pour un coût unitaire moins élevé que les petits producteurs ne le peuvent. Il existe très peu d'endroits, et aucun au Canada, où la demande est suffisante pour justifier la création de tels « bureaux de service » de FA à grande échelle (alias « parcs d'impression ») pour réaliser ces avantages en matière de coûts. En raison de la petite taille du marché canadien, d'autres éléments clés de la chaîne de valeur de la FA sont également sous-développés par rapport aux États-Unis (comme la fabrication de machines de qualité industrielle) ou absents au Canada (comme la production de filaments).

¹⁹⁴ Wohlers Report 2019, Wohlers Associates, 2019, <https://wohlersassociates.com/2019report.htm>

¹⁹⁵ How Precision ADM Became the Largest Producer of 3D Printed Medical Devices, FormLabs, 2020, <https://formlabs.com/blog/precision-adm-3d-printed-medical-devices/>

¹⁹⁶ David Sali, « Gatineau plant aiming to produce up to eight million COVID-19 test swabs a month », Ottawa Business Journal, 2020, <https://obj.ca/article/techopia/gatineau-plant-aiming-produce-eight-million-covid-19-test-swabs-month>



Je considère que l'industrie de la FA au Canada en est à ses débuts. Je pense qu'il serait difficile de trouver 100 entreprises axées sur la fabrication additive au Canada. Seulement 20 à 30 d'entre elles se situent vaguement à l'échelle industrielle. Il y a probablement moins de 1 000 personnes au Canada qui connaissent vraiment la fabrication additive. [traduction]

- Cadre, cabinet-conseil en FA, Ontario

Au départ, les gens pensaient que la fabrication additive permettrait d'égaliser les coûts de production partout, mais ce n'est pas le cas. Il y a beaucoup d'économies d'échelle à faire en ayant 50 ou 100 machines. Personne ne peut justifier un investissement de 50 à 100 millions de dollars au Canada pour créer un centre d'impression massif. Le marché n'est tout simplement pas rendu là. [traduction]

- Directeur, entreprise de logiciels de FA, Québec

Soutien à la FA au Canada

Le rôle du gouvernement

En général, les participants à l'étude considéraient le gouvernement fédéral comme l'ordre de gouvernement le plus important pour soutenir la croissance de l'écosystème de la FA au Canada (à l'exception du Québec, où le gouvernement provincial était considéré comme un acteur plus important).

En 2018, le gouvernement fédéral s'est engagé à investir jusqu'à 230 millions de dollars dans la Supergrappe de la Fabrication de Pointe du Canada (NGen), « un regroupement d'entreprises, d'établissements postsecondaires et d'organismes sans but lucratif qui conjuguent leurs efforts pour faire du Canada un chef de file mondial dans le secteur de la fabrication de pointe¹⁹⁷ ». L'objectif de la Supergrappe est d'accélérer le développement, l'adoption et l'accroissement des capacités de classe mondiale dans le secteur manufacturier canadien¹⁹⁸. À l'heure actuelle, la Supergrappe considère la FA comme l'une des quatre technologies clés¹⁹⁹ et remplit une gamme de fonctions, notamment la mise en réseau d'entreprises de fabrication de pointe, l'octroi de fonds pour la réalisation de projets pilotes, la réalisation d'études de faisabilité, la création de grappes, et la mise en marché de technologies. Selon la nature du projet, la capacité de financement de la Supergrappe varie de 50 000 \$ à 20 millions de dollars²⁰⁰. En juillet 2020, la Supergrappe a annoncé un effort de financement collaboratif de 28,8 millions de dollars pour 9 projets de fabrication, y compris un consortium pour développer des applications fondées sur la FA afin d'améliorer le bilan environnemental du secteur de l'énergie. Le consortium est dirigé par Exergy Solutions et comprend le géant pétrolier Suncor Energy ainsi que Precision ADM, une entreprise canadienne de pointe dans le domaine de la FA.²⁰¹

¹⁹⁷ La Supergrappe de la fabrication de prochaine génération passe à la vitesse supérieure, Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2018, <https://www.canada.ca/fr/innovation-sciences-developpement-economique/nouvelles/2018/11/la-supergrappe-de-la-fabrication-de-prochaine-generation-passe-a-la-vitesse-superieure.html>

¹⁹⁸ Supergrappe de la fabrication de pointe – Stratégie quinquennale, nGen, 2020, https://www.ngen.ca/hubfs/Documents/NGenFiveYearStrategy_FR_V1.0.pdf

¹⁹⁹ Supergrappe de la fabrication de prochaine génération du Canada, Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2020, <https://www.ic.gc.ca/eic/site/O93.nsf/fra/00010.html>

²⁰⁰ Supercluster Projects, nGen, 2020, <https://www.ngen.ca/supercluster-projects>

²⁰¹ Canada's Manufacturing Supercluster and industry partners invest \$28.8 million in new and emerging technologies, nGen, 2020, https://f.hubspotusercontent20.net/hubfs/5005023/July%208%20Project%20Announcement/ENG%20FULL%20Supercluster%20Projects%20.pdf?utm_content=134055286&utm_medium=social&utm_source=linkedin&hss_channel=lcp-11478705

Le gouvernement fédéral investit également, par le biais du Conseil national de recherches du Canada (CNRC), dans la recherche et l'adoption de la FA dans le but de relever les défis qui se présentent dans divers secteurs de l'économie. Au sein du CNRC, le Programme d'aide à la recherche industrielle (PARI) offre une gamme de services de conseil, de réseautage et de soutien financier aux PME qui cherchent à croître grâce à la recherche ou à l'adoption de technologies²⁰². Le PARI-CNRC comprend le programme de démonstration additive sur métal, lequel est géré par Canada Makes et offre aux organisations intéressées des subventions pouvant aller jusqu'à 5 000 \$ par projet pour mener des études de faisabilité sur la FA sur métal ou jusqu'à 10 000 \$ pour embaucher un fournisseur de services qualifié afin de concevoir et de fabriquer un prototype de FA sur métal. Il a pour objectif d'aider les entreprises canadiennes à adopter la FA en les sensibilisant davantage et en réduisant les risques lors du procédé de mise à l'essai²⁰³.

Le gouvernement a également réalisé des investissements ambitieux dans certains établissements d'enseignement. Par exemple, en novembre 2020, il a annoncé un investissement de 2,6 millions de dollars pour aider l'Université de Waterloo à acheter des équipements pour développer et qualifier des poudres et des pièces métalliques de FA. Ce projet de recherche collaboratif entre le milieu universitaire et les scientifiques fédéraux canadiens du CNRC vise à recenser des solutions novatrices conçues pour améliorer la qualité des matières premières utilisées pour la FA et en réduire les coûts²⁰⁴. En outre, l'appel à l'aide lancé par le gouvernement fédéral concernant la COVID-19 a permis de tirer parti des capacités de la FA dans la production d'EPI et est considéré comme utile pour faire connaître l'importance de l'industrie de la FA dans la production locale de biens. L'expansion de la production nationale est désormais une initiative du gouvernement afin que les entreprises canadiennes ne soient pas obligées de s'approvisionner de nouveau à l'étranger si le besoin s'en fait sentir à l'avenir²⁰⁵.

Les participants à l'étude ont attribué au gouvernement le mérite d'avoir gardé à l'esprit l'industrie de la FA par ces actions. Ils ont félicité la Supergrappe et le PARI d'avoir incité les organisations à expérimenter la FA, même pendant la pandémie de COVID-19. Ils ont déclaré que l'investissement dans la technologie FA et les programmes éducatifs était crucial pour la croissance du secteur. Ils ont également félicité le CNRC d'avoir mobilisé une grande communauté de chercheurs en FA. Cependant, les participants ont rarement mentionné des programmes précis et ceux qui l'ont fait estimaient généralement que ces programmes fédéraux n'avaient eu qu'un impact modeste sur la croissance de la FA au Canada. Seule une poignée d'entrepreneurs en FA ont mentionné avoir traité directement avec la Supergrappe ou le PARI eux-mêmes. Le gouvernement pourrait envisager une stratégie afin de mieux faire connaître ses programmes de soutien à l'écosystème de la FA.

202 Soutien à l'innovation technologique, Conseil national de recherches Canada, 2020, <https://nrc.canada.ca/fr/soutien-linnovation-technologique>

203 NRC-IRAP Metal Additive Program, Manufacturiers et Exportateurs du Canada, 2020, [https://cme-mec.ca/blog/innovation/nrc-irap-metal-additive-program/#:~:text=The%20Metal%20Additive%20Manufacturing%20\(AM,additive%20manufacturing%20\(AM\)%20technology](https://cme-mec.ca/blog/innovation/nrc-irap-metal-additive-program/#:~:text=The%20Metal%20Additive%20Manufacturing%20(AM,additive%20manufacturing%20(AM)%20technology)

204 Le gouvernement du Canada investit dans la recherche en collaboration pour accélérer les découvertes et l'innovation, Conseil national de recherches du Canada, 2020, <https://www.canada.ca/fr/conseil-national-recherches/nouvelles/2020/10/le-gouvernement-du-canada-investit-dans-la-recherche-en-collaboration-pour-acceler-les-decouvertes-et-linnovation.html>

205 L'Ontario aide les fabricants à augmenter leur production d'équipement de protection individuelle, Gouvernement de l'Ontario, 2020, <https://news.ontario.ca/fr/release/57092/ontario-aide-les-fabricants-a-augmenter-leur-production-dequipement-de-protection-individuelle>



Les participants à l'étude ont indiqué que l'élaboration d'une stratégie nationale pour la FA (comme cela a été fait dans plusieurs pays, comme le Royaume-Uni²⁰⁶ et les États-Unis²⁰⁷) faisait partie des possibilités de croissance du secteur. Ils ont laissé entendre que l'élaboration et la mise en œuvre de cette stratégie fonctionnent mieux dans le cadre d'un effort conjoint entre le gouvernement fédéral et l'industrie. Les partisans d'une stratégie ciblée ont estimé qu'il était nécessaire de rester concurrentiel par rapport aux pays qui avaient déjà adopté de telles stratégies et bénéficiaient d'avantages au chapitre des économies d'échelle. D'autres préféraient que le gouvernement se concentre sur la promotion des capacités du Canada en matière de FA à l'étranger dans l'espoir d'attirer au pays des investissements axés sur la FA.



Il serait important que le gouvernement travaille sur la perception du public. Le public estime que l'impression 3D ne sert qu'au prototypage et ne peut pas produire de pièces finales. Le gouvernement peut contribuer à faire passer le mot : la FA offre beaucoup plus de capacités que ce que les gens croient. [traduction]

- Cadre, jeune entreprise en FA, Ontario

Les incitatifs financiers et la réglementation accélérée ont également reçu un soutien important de la part des participants à l'étude. En ce qui concerne le soutien financier, de nombreuses idées ont été formulées sur la façon d'administrer les fonds ainsi que sur les bénéficiaires de ces fonds. L'octroi de subventions aux établissements d'enseignement pour l'achat d'équipement de FA et l'élaboration de programmes a été l'une des suggestions les plus populaires. Certains ont suggéré d'augmenter les fonds disponibles aux organisations par le biais de la Supergrappe et du PARI-CNRC, ainsi que de rationaliser le processus d'acquisition de ces fonds et de promouvoir ces programmes. Les participants estimaient que l'intégration de la FA dans certains secteurs (notamment l'aérospatiale, l'automobile et la construction) peut être accélérée au moyen de cadres réglementaires afin de créer un plus grand nombre de cas pratiques.



Il existe des programmes de développement d'entreprise dans le cadre du PARI CNRC. Ils existent, mais à mon avis, certaines entreprises ont besoin d'un meilleur soutien pour les inciter à les utiliser. J'aimerais qu'il y ait une plus grande communauté en FA au Canada. J'aimerais qu'il y ait plus de visibilité pour la FA, comme dans les foires commerciales. Il faut que davantage d'entreprises soient exposées à la technologie. [traduction]

- Gestionnaire de programme, secteur de l'aérospatiale, Canada atlantique

Je pense que nous avons besoin d'une stratégie globale pour que le pays puisse avancer ensemble et collaborer. En disant simplement que nous avons besoin de plus d'équipement, il est facile de dépenser beaucoup d'argent seulement pour en acheter, et je pense que certains étudiants y auront accès. Mais au bout du compte, quel sera le résultat? Il est si coûteux de le faire fonctionner que nous ne pouvons tout simplement pas laisser des étudiants travailler avec l'équipement sans l'utiliser à d'autres fins. Nous avons besoin d'une stratégie pour tirer le meilleur parti de chaque dollar que le pays dépensera en la matière parce que la concurrence a plus de ressources, plus de chercheurs, plus d'argent et plus d'équipement. [traduction]

- Cadre, cabinet-conseil en FA (sur plastique), Ontario



Le rôle des établissements postsecondaires

Un vaste réseau d'établissements d'enseignement et de recherche est à la disposition de ceux qui s'intéressent à la FA. En général, les participants ont fait l'éloge des établissements d'enseignement du Canada pour avoir formé des étudiants intelligents, capables de s'adapter, qui travaillent dur et qui désirent adopter les technologies. Un degré général de satisfaction a été exprimé quant à la qualité des programmes d'études supérieures et des talents qu'ils produisent. De plus, les participants à l'étude provenant d'établissements d'enseignement étaient généralement d'accord pour dire que la demande de cours en FA augmentait, que la FA était devenue de plus en plus tangible dans les universités, et que les établissements d'enseignement cherchaient à accroître leur engagement à l'égard de la technologie.



Nous accueillons de 20 à 30 étudiants de différents programmes chaque semestre (60 à 90 par année). Certains étudiants en sciences des matériaux suivent le cours de FA. Le cours présente les bases fondamentales de l'ingénierie en FA et offre une expérience pratique ainsi que des connaissances industrielles. Le cours attire les gens. La demande est croissante. Nous l'avons offert seulement deux fois l'an dernier, et maintenant, nous l'offrons trois fois par année. [traduction]

– Boursier postdoctoral, secteur de l'éducation, Ontario

Les participants étaient généralement d'accord pour dire que les établissements d'enseignement offraient de bonnes possibilités d'exposition à la FA. À la fin de 2020, des laboratoires équipés de matériel de FA étaient établis dans au moins un établissement d'enseignement supérieur dans chaque province canadienne.

Tableau 2 : Établissements postsecondaires offrant des ressources ou des programmes en FA

Colombie-Britannique

- Université de la Colombie-Britannique²⁰⁸
- Université Simon Fraser²⁰⁹
- Université d'art et de design Emily-Carr²¹⁰
- Collège Camosun²¹¹

Alberta

- Université de l'Alberta²¹²
- Université de Calgary²¹³
- Institut de technologie du Sud de l'Alberta²¹⁴
- Institut de technologie du Nord de l'Alberta²¹⁵

Saskatchewan

- Université de la Saskatchewan²¹⁶

Manitoba

- Université du Manitoba²¹⁷

Ontario

- Université de Toronto²¹⁸
- Université de Waterloo²¹⁹
- Université Ryerson^{220,221}
- Université de Guelph²²²
- Université McMaster²²³
- Université York²²⁴
- Université de Windsor²²⁵
- Université Carleton²²⁶
- Université d'Ottawa²²⁷
- Collège Sheridan²²⁸

- Université Western²²⁹
- Collège Mohawk²³⁰
- Collège Conestoga²³¹
- Collège St. Clair²³²
- Institut universitaire de technologie de l'Ontario²³³

Quebec

- Université McGill²³⁴
- Université Laval²³⁵
- Polytechnique Montréal²³⁶
- Université de Montréal²³⁷
- École de technologie supérieure²³⁸

Nouveau-Brunswick

- Université du Nouveau-Brunswick²³⁹
- Collège communautaire du Nouveau-Brunswick²⁴⁰

Île-du-Prince-Édouard

- Université de l'Île-du-Prince-Édouard^{241,242}

Nouvelle-Écosse

- Université Dalhousie²⁴³
- Collège communautaire de la Nouvelle-Écosse²⁴⁴

Terre-Neuve-et-Labrador

- Université Memorial de Terre-Neuve²⁴⁵

²⁰⁸ Tess Boissonneault, UBC becomes first Canadian university to install GE Additive EBM Q20plus 3D printer, 3D Printing Media Network, 2019, <https://www.3dprintingmedia.network/ubc-canadian-install-ge-additive-q20plus-3d-printer/>

²⁰⁹ SFU Additive Manufacturing Library, Université Simon Fraser, 2020, http://www.sfu.ca/~woosook/About_PL.html

²¹⁰ Material Matters, Université d'art et de design Emily-Carr, 2020, <https://research.ecuad.ca/materialmatters/>

²¹¹ Camosun Innovates Face Shield Design Files, Camosun College, 2020, <http://camosun.ca/innovates/>

²¹² Laboratory of Intelligent Manufacturing, Design, and Automation (LIMDA), Université de l'Alberta, 2020, <https://sites.ualberta.ca/~rafiq1/aboutus.html>

²¹³ Overview, Laboratory of Engineering Materials de l'Université de Calgary, 2020, <https://live-ucalgary.ucalgary.ca/labs/engineering-materials/home>

²¹⁴ Our Services, Institut de technologie du Sud de l'Alberta, 2020, <https://www.sait.ca/research-and-innovation/our-services>

²¹⁵ Makerspace, Institut de technologie du Nord de l'Alberta, 2020, <https://student.nait.ca/student-services/academic-experience/library-services/makerspace>

- 216 USask engineering team designing 3D-printed N95 masks to help combat COVID-19, Université de la Saskatchewan, 2020, <https://news.usask.ca/articles/research/2020/usask-engineering-team-designing-3d-printed-n95-masks-to-help-combat-covid-19.php>
- 217 3D Printing/3D Scanning, Université du Manitoba, 2020, <https://umanitoba.ca/faculties/architecture/fablab/3DPrinting3Dscanning.html>
- 218 Our Research, Toronto Institute for Advanced Manufacturing, 2020, <https://tiam.engineering.utoronto.ca/research/>.
- 219 Additive Manufacturing Research, Université de Waterloo, 2020, <https://uwaterloo.ca/additive-manufacturing-research/>
- 220 Research, Département de recherche en génie mécanique et industriel de l'Université Ryerson, 2020, <https://www.ryerson.ca/mechanical-industrial/research/>
- 221 Ryerson University – Fabrication de pointe, Universités Canada, 2020, <https://www.univcan.ca/fr/universites/partenariats-de-recherche-universites-industrie/ryerson-university-advanced-manufacturing/>
- 222 Advanced Manufacturing Laboratory, Université de Guelph, 2020, <https://www.uoguelph.ca/engineering/ideiab/home>.
- 223 Additive Manufacturing Group, Université McMaster, 2020, <https://www.eng.mcmaster.ca/sept/practice/amg>
- 224 New program will prepare students to develop specialized 3D printing technologies for industry, Université York, 2020, <https://yfile.news.yorku.ca/2020/06/03/new-program-will-prepare-students-to-develop-specialized-3d-printing-technologies-for-industry/>
- 225 Advanced Production and Design Lab, Université de Windsor, 2020, <https://www.uwindsor.ca/engineering/research/382/advanced-production-and-design-lab>
- 226 Advanced Manufacturing Lab, Université Carleton, 2020, <https://carleton.ca/aml/>
- 227 L'Atelier Makerspace Richard-L'Abbé uOttawa, Université d'Ottawa, 2020, <https://genie.uottawa.ca/cgce/espaces-conception/makerspace>
- 228 Centre for Advanced Manufacturing and Design Technologies (CAMDT), Collège Sheridan, 2020, <https://www.sheridancollege.ca/research/centres/advanced-manufacturing-design>
- 229 Western University, Ontario Advanced Manufacturing Consortium, 2020, <https://www.amconsortiumontario.ca/capabilities/western-university/>
- 230 Additive Manufacturing and 3D Printing, Mohawk Continuing Education, 2020, <https://www.mohawkcollege.ca/ce/programs/technology-and-skills/additive-manufacturing-and-3d-printing>
- 231 Conestoga opens new Centre for Smart Manufacturing, Academica Group, 2015, <https://www.academica.ca/top-ten/conestoga-opens-new-centre-smart-manufacturing>
- 232 Solution for Startup Discovered Through Applied Research's 3D Printer, Collège St. Clair, 2019, <https://www.stclaircollege.ca/news/2019/solution-startup-discovered-through-applied-researchs-3d-printer>
- 233 Research – Manufacturing, Institut universitaire de technologie de l'Ontario, 2020, <https://nuclear.ontariotechu.ca/piro/research/manufacturing.php>
- 234 Welcome to the Additive Design and Manufacturing Lab, Additive Design and Manufacturing Lab, 2020, <https://adml.lab.mcgill.ca/>
- 235 GML-3010 Matériaux pour la fabrication additive, Université Laval, 2020, <https://www.ulaval.ca/les-etudes/cours/repertoire/detailsCours/gml-3010-materiaux-pour-la-fabrication-additive.html>
- 236 Infrastructure de fabrication additive, Polytechnique Montréal, 2020, <https://www.polymtl.ca/lm2/visites-virtuelles-du-laboratoire/infrastructure-de-fabrication-additive>
- 237 Martin Lasalle, « De Disney Research à l'UdeM: le parcours enchanté de Bernhard Thomaszewski », Udem Nouvelles, 2018, <https://nouvelles.umontreal.ca/article/2018/04/19/de-disney-research-a-l-udem-le-parcours-enchante-de-bernhard-thomaszewski/>
- 238 MEC627 Technologies de fabrication additive, École de technologie supérieure, 2020, <https://www.etsmtl.ca/etudes/cours/MEC627>
- 239 About the Marine Additive Manufacturing Centre of Excellence, Université du Nouveau-Brunswick, 2020, <https://www.unb.ca/mamce/about.html>
- 240 3D Printing Technology and Applications, Collège communautaire du Nouveau-Brunswick, 2020 : <https://hbcc.ca/applied-research/research-projects/3d-printing-technology-and-applications>
- 241 3D Printing, Université de l'Île-du-Prince-Édouard – Robertson Library, 2020, <https://library.upei.ca/3dprinting>
- 242 Facilities, Université de l'Île-du-Prince-Édouard – Sustainable Design Engineering, 2020, <https://www.upei.ca/programs/engineering/facilities>
- 243 Advanced Manufacturing Hub, Université Dalhousie, 2020, <https://www.dal.ca/faculty/engineering/idea-project/advanced-manufacturing-hub.html>
- 244 Renishaw helps develop ocean turbine parts using metal Additive Manufacturing, Metal AM, 2020, <https://www.metal-am.com/renishaw-helps-develop-ocean-turbine-parts-using-metal-additive-manufacturing/>
- 245 Jeff Green, « Passionate researchers use 3D printing technology to advance health care », Memorial University News, 2018, <https://www.mun.ca/research/news.php?id=11679&type=news>

De l'équipement dans les écoles

Les importants progrès technologiques réalisés au cours des 20 dernières années ont considérablement réduit le prix des imprimantes 3D et permis leur adoption à grande échelle dans les écoles, les bibliothèques et les PME et chez les particuliers. Les établissements d'enseignement primaire du Canada appréciant déjà le potentiel de la FA pour les élèves de la maternelle à la 12^e année et continuent d'investir dans les technologies de FA. En outre, les entreprises manufacturières comme General Electric (GE) contribuent à équiper les écoles de matériel d'impression 3D ainsi qu'à donner accès à la technologie de FA et au programme d'études pour soutenir l'apprentissage de la FA. Le programme d'éducation sur la FA de GE fournit des imprimantes 3D sur polymère aux écoles primaires et secondaires et des imprimantes 3D sur métal aux collèges et universités²⁴⁶. Chaque imprimante inclut le matériel, les logiciels et le programme d'études STIAM (science, technologie, ingénierie, arts et mathématiques). Le programme a pour objectif d'accélérer la sensibilisation et l'éducation des étudiants à l'impression 3D et de constituer un bassin de talents qui comprennent la conception et l'impression 3D²⁴⁷. En 2020, presque toutes les écoles du Canada disposaient d'au moins une imprimante 3D²⁴⁸. Plusieurs organisations canadiennes, comme Tinkerine, se concentrent sur la fabrication d'imprimantes 3D pour les établissements d'enseignement primaire et secondaire ainsi que sur la prestation de services connexes comme l'élaboration de programmes d'études²⁴⁹. Pour surmonter les difficultés relatives à l'adoption de la technologie dans les écoles, telles que la réticence des enseignants qui ne connaissent pas la technologie, Tinkerine propose un ensemble de mesures d'apprentissage spéciales pour aider les parents, les élèves et les enseignants, par le biais d'activités d'apprentissage de l'impression 3D, à mobiliser et à sensibiliser les élèves de la maternelle à la 12^e année.²⁵⁰



Nous donnons aux élèves et aux enseignants accès à des imprimantes 3D et leur présentons des défis de conception. Ces activités amènent les élèves à réfléchir aux principes de base de l'ingénierie. Ils pourront ensuite appliquer les principes de la conception. L'impression 3D est considérée comme un outil dans ce procédé. Nous élaborons des programmes d'études en collaboration avec des enseignants spécialisés dans les technologies, en mettant l'accent sur les compétences pratiques et les technologies appliquées de conception. Nos imprimantes sont utilisées de la maternelle à la 12^e année dans toute la Colombie-Britannique. Nous sommes également présents en Alberta, au Québec et en Ontario. Les écoles ont doté tous leurs laboratoires de nos produits. Étonnamment, l'accès à la technologie n'était pas un problème. Nous avons constaté que de nombreux éducateurs n'étaient pas à l'aise avec la technologie au début. Environ 75 % des enseignants et des bibliothécaires ne savaient même pas comment aborder la technologie. Même si elle se trouvait dans leur classe, ils n'étaient pas à l'aise de l'utiliser. Le transfert de la base de connaissances aux enseignants a été une étape clé. Nous avons maintenant des modules en ligne pour les enseignants. [traduction]

– Cadre, FEO, Colombie Britannique

²⁴⁶ GE Additive Education Program open for entries from primary and secondary schools, GE Additive, mars 2019, <https://www.ge.com/additive/press-releases/ge-additive-education-program-open-entries-primary-and-secondary-schools>

²⁴⁷ Ibid.

²⁴⁸ Tyler Fleming, « Ottawa school board uses 3D printers to help make supplies for frontline workers », CTV News, 2020, <https://ottawa.ctvnews.ca/ottawa-school-board-uses-3d-printers-to-help-make-supplies-for-frontline-workers-1.4905714>

²⁴⁹ Our Vision, Tinkerine, 2020, <https://www.tinkerine.com/about>

²⁵⁰ « Tinkerine Studios offers "Design at Home" to assist parents, students & teachers during COVID-19 crisis », Canadian Insider, 2020, <https://www.canadianinsider.com/tinkerine-studios-offers-design-at-home-to-assist-parents-students-teachers-during-covid-19-crisis>

Cependant, malgré ces progrès, les participants à l'étude estimaient que de nombreux domaines du système éducatif actuel de la FA pouvaient être améliorés. Certains ont qualifié l'approvisionnement d'équipement de FA dans les universités et les collèges comme « minimal », faisant défaut à la fois au chapitre de la quantité et de la variété. Les établissements d'enseignement ont parfois été critiqués pour ne pas avoir donné aux étudiants un accès suffisant aux équipements de FA.



Nos établissements d'enseignement souffrent d'un manque important d'équipement. Je travaille avec des collèges et des universités dans la région sud ouest de l'Ontario qui ont moins de matériel que certaines personnes en ont dans leur salon. Comment ces étudiants sont-ils censés suivre une formation s'ils n'ont même pas l'équipement le plus rudimentaire? [traduction]

- Cadre, cabinet-conseil en FA, Ontario

Certaines écoles disposent d'un équipement sophistiqué, mais il est réservé aux professeurs qui font de la recherche. [traduction]

- Consultant en FA à la pîge, Colombie-Britannique

Commencer tôt l'éducation à la FA

Les participants considèrent que les programmes éducatifs en FA ont une portée limitée, même dans les « grands » établissements d'enseignement supérieur, qu'ils considèrent comme davantage axés sur la recherche. Par exemple, l'Université McMaster, bien que décrite comme l'un des principaux établissements postsecondaires dans le domaine de la recherche en FA par les participants à l'étude, offre un seul cours de FA aux étudiants en génie de cycle supérieur et ne propose aucun cours de FA au baccalauréat.



Malheureusement, aucune université canadienne n'offre de programme solide en la matière. Des cours sont offerts ici et là. Par exemple, l'Université McMaster fait beaucoup de recherche, mais n'offre qu'un seul cours. [traduction]

- Boursier postdoctoral, secteur de l'éducation, Ontario

Les participants à l'étude considéraient comme superficielle l'exposition aux technologies de la FA chez les étudiants de premier cycle : ces établissements n'offrent qu'un cours ou deux ou encore un module de base est abordé à la fin du programme de diplôme ou de certificat. Ils estimaient que ces programmes offrent une certaine exposition à la technologie, plutôt que des compétences, et qu'ils ne suffisent pas à eux seuls pour former des professionnels de la FA prêts à travailler. De nombreux participants ont souligné la nécessité d'intégrer la FA de façon plus systématique dans les programmes d'études sur la fabrication. Parallèlement, ils ont reconnu que la FA est un domaine dynamique comportant de nombreux procédés et matériaux différents, et qu'il n'est donc pas réaliste de s'attendre à ce qu'un programme de formation professionnelle offre aux étudiants toute la préparation nécessaire pour travailler dans le domaine de la FA.



La FA n'est pas une spécialité à ce stade. Personne n'obtient de diplôme en FA. Peut-elle faire partie du programme d'études? Oui, elle peut y être intégrée, et je vois de plus en plus d'enseignants qui intègrent la FA aux exigences de leur diplôme. Mais je sais que le cégep [le premier niveau d'enseignement postsecondaire au Québec] ne la présente pas en profondeur. Ces écoles offrent une seule session sur le sujet dans l'ensemble du programme. [traduction]

– Ingénieur, secteur de l'aérospatiale, Québec

« Les étudiants ne peuvent tout simplement pas sortir du collège ou de l'université en étant prêts à 100 %. Il n'y a tout simplement pas assez de temps pour développer ces compétences tout en bénéficiant d'une éducation complète. Mais je vais vous dire ce qui ne fonctionne pas : depuis plusieurs années maintenant, je réalise des projets de conception de base en ingénierie des matériaux et mécanique de premier cycle. Et même si j'indique que les étudiants doivent utiliser la fabrication additive comme outil pour résoudre un problème de conception, ils ne peuvent pas le faire. Ils n'ont pas les outils nécessaires pour penser de cette façon. Ils ne comprennent pas la métallurgie. Ils ne comprennent pas la conception. Donc, même si vous les forcez à le faire au cours de la quatrième année, ils n'en sont pas capables. Ces outils doivent donc être intégrés à l'ensemble du programme et ne pas seulement être confinés à un projet de conception structuré. Ils ne peuvent pas le comprendre à ce point précis dans le temps. [traduction]

– Gestionnaire, secteur de l'éducation, Alberta

Même si la main-d'œuvre canadienne devient plus instruite²⁵¹, certains participants à l'étude se sont dits inquiets du nombre démesurément élevé de doctorants, d'étudiants à la maîtrise et de chercheurs postdoctoraux formés par le système d'éducation qui ont eu de la difficulté à intégrer le marché du travail. Plus précisément, les participants estimaient que ces talents instruits étaient surqualifiés, trop spécialisés, trop chers ou pas assez utiles pour bon nombre des rôles offerts au sein de l'industrie canadienne de la FA. Ils ont mentionné que l'industrie, en particulier la FA sur métal, manque de personnel qualifié comme des techniciens, des technologues et des opérateurs de machine. Les organisations appliquent différentes façons de faire face à l'inadéquation relative entre les besoins en main-d'œuvre et les compétences disponibles. Certains participants ont fait remarquer que les diplômés en FA titulaires d'un doctorat travaillent comme techniciens et que certains titulaires de doctorat proposent même de faire des stages gratuitement.



J'essaie d'embaucher un doctorant, et environ 10 d'entre eux me présentent chaque semaine leur curriculum vitae pour faire un stage gratuitement ici, ce que je n'offre pas puisque nous sommes une très petite entreprise. [traduction]

– Cadre, cabinet-conseil en FA, Ontario

Embaucher un doctorant ou un étudiant au niveau postdoctoral n'est pas très intéressant pour le moment en FA et pour faire fonctionner les machines parce que nous pouvons simplement former un technicien ayant des compétences en conception qui peut faire le travail correctement. [traduction]

– Professeur, secteur de l'éducation, Canada atlantique

²⁵¹ La scolarité au Canada : faits saillants du Recensement de 2016, Statistique Canada, 2016, <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/171129/dq171129a-fra.htm>

Lorsqu'ils ont été questionnés sur la façon dont le système d'éducation canadien pouvait être amélioré, les participants ont exprimé un large éventail d'opinions. En ce qui concerne les programmes de FA, les participants préconisaient généralement une hausse de la variété et de la disponibilité des cours de FA dans les établissements d'enseignement. Ils ont aussi souligné l'importance de l'expérience pratique des imprimantes et mentionné que d'accroître la quantité, la variété et l'accès à l'équipement de FA dans les établissements d'enseignement devait être une priorité clé à tous les niveaux du système d'éducation. Les participants ont également suggéré que les établissements d'enseignement augmentent le nombre de stages, de placements coopératifs, de formations d'apprenti, ainsi que de programmes de perfectionnement et de transition de carrière, lesquels sont importants pour former des talents dans le domaine de la FA. L'augmentation des possibilités de formation des techniciens pour l'opération des systèmes de FA était considérée comme une priorité particulièrement urgente, étant donné la pénurie de talents dans ce secteur. L'Allemagne a été citée par plusieurs participants comme étant un pays disposant de programmes de formation professionnelle qui méritent d'être reproduits.

Les entreprises canadiennes de FA

Les personnes interrogées ont indiqué que la majorité des entreprises canadiennes du secteur de la FA sont de petites entreprises, ce qui reflète la structure de l'économie canadienne élargie²⁵². Bien qu'il n'existe aucune statistique exacte sur le nombre d'entreprises spécialisées en FA au Canada, Tracxn, une plateforme virtuelle mondiale permettant de suivre la trace des entreprises novatrices dans tous les secteurs technologiques du monde, estime qu'il y avait 64 jeunes entreprises de FA au Canada en avril 2020.²⁵³

Les participants à l'étude estimaient que les entreprises canadiennes du secteur de la FA présentent une grande diversité, tout en démontrant le potentiel d'englober un large éventail de modèles opérationnels et de servir divers secteurs. Le secteur canadien de la FA est représenté par des FEO, des « parcs d'impression », des RPVA et d'autres modèles opérationnels. L'industrie de la FA comprend également des entreprises de logiciels qui vendent des outils de simulation ou des logiciels pour les machines de FA. La plupart des organisations canadiennes spécialisées en FA disposent également d'au moins trois ou quatre sources de revenus distinctes. Les services généralement combinés comprennent la revente d'imprimantes, la personnalisation d'imprimantes, l'exploitation de « parcs d'impression », des cours de formation, ainsi que des services de consultation en matière de prototypage et de conception.

²⁵² "Key Small Business Statistics – January 2019," Innovation, Science and Economic Development Canada, 2019. https://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/eng/h_03090.html

²⁵³ "3D Printing Startups in Canada," Tracxn, 2020. <https://tracxn.com/explore/3D-Printing-Startups-in-Canada>

Tableau 3 : Types d'entreprises du secteur de la FA au Canada

TYPE D'ENTREPRISE	ACTIVITÉS	EXEMPLES
Fabricants d'équipement d'origine	<p>Produisent et vendent des imprimantes 3D, du matériel et des logiciels aux RPVA ou à des clients industriels</p> <p>Relativement rares au Canada</p> <p>Taille qui varie grandement, de moyenne à très grande entreprise (« très grande » désignant habituellement les multinationales étasuniennes)</p>	<p>Island Additive 3D Additive Fabrication Precision ADM Exergy Solutions</p>
Parcs d'impression (bureaux de service, imprimeries)	<p>Fournissent des installations d'impression et des spécialistes de la FA aux organisations ou particuliers intéressés pour passer de la conception assistée par ordinateur à l'impression finie de grande qualité</p> <p>Les capacités de ces entreprises sont habituellement moindres que les grands bureaux de service étasuniens.</p>	<p>Burloak Technologies FusiA (Intl) Solaxis Voestalpine (Intl) Promation, Exergy Solutions Nova Product Development Proto3000 Anubis 3D Industrial Solutions Axis Prototypes Objex Unlimited Javelin Technologies</p>
RPVA	<p>Vendent des produits axés sur la FA, y compris du matériel (incluant parfois des imprimantes personnalisées) et des logiciels aux utilisateurs finaux</p> <p>Peuvent offrir des services à valeur ajoutée, comme des cours sur l'utilisation des imprimantes ou la conception assistée par ordinateur</p> <p>Peuvent offrir des centres d'expérience où les gens peuvent voir de près la technologie</p> <p>Peuvent combiner des services de FA à d'autres technologies de fabrication de pointe</p> <p>Peuvent offrir des capacités de parcs d'impression à petite échelle</p>	<p>CAD MicroSolutions DesignFusion Wave of the Future 3D</p>

TYPE D'ENTREPRISE

ACTIVITÉS

EXEMPLES

Cabinets-conseils en FA

Souvent des sociétés d'ingénierie à petite échelle dans lesquelles le consultant, habituellement un expert ayant plusieurs années d'expérience en FA, aide les organisations à intégrer la FA dans leur flux de travail pour accroître la productivité et les bénéfices nets; popularisent aussi les avantages de la technologie de la FA

Parfois, un bureau de service s'occupera de cette tâche.

Les services consultatifs incluent notamment aider un client à passer du stade de la conception (assumant qu'il ne connaît pas SolidWorks ou d'autres logiciels de CAO) au produit fini.

Reçoivent la majeure partie de leurs revenus des services de conception et de prototypage rapide

Island Additive
3D Additive Fabrication
Precision ADM
Exergy Solutions

Entrepreneurs de FA artisanale

Petits fabricants qui se spécialisent dans un modèle opérationnel artisanal, utilisant souvent la FA comme passe-temps pour générer des revenus supplémentaires

Modèle opérationnel qui fait la transition vers celui de conseiller en FA ou qui le chevauche

CAD MicroSolutions
DesignFusion
Wave of the Future 3D

Jeunes entreprises d'impression

Modèle opérationnel qui se situe souvent entre le bureau de service et le RPVA; génèrent leurs revenus en vendant des imprimantes et des produits aux clients.

Généralement à petite échelle et très axées sur l'application de pointe de l'impression 3D, que ce soit pour un secteur précis (comme l'architecture) ou une application de FA précise (comme la bio-impression, la fabrication numérique ou la FA en grandes quantités)

Twente Additive Manufacturing
3DQue
Pep Corp
Aspect Biosystems

TYPE D'ENTREPRISE

ACTIVITÉS

EXEMPLES

Adoptants industriels

Organisations établies qui appliquent la technologie de FA existante pour améliorer leur modèle opérationnel ou celui de leurs clients

En raison de leur taille et de leur établissement dans l'industrie, ils sont d'importants contributeurs à l'élaboration de normes et de la propriété intellectuelle.

De tous les joueurs dans le secteur de la FA, ils sont les mieux placés pour mobiliser des investissements en capitaux en vue de l'adoption de nouvelles technologies.

Au Canada, ils sont habituellement axés sur l'aérospatiale, l'outillage, l'ingénierie et l'automatisation.

Au sein des organisations, les professionnels de la FA représentent habituellement un petit pourcentage de la main-d'œuvre totale.

Bell Textron (International)
Pratt & Whitney (International)
MDS Coating Technologies
ATS Automation
Liburdi Automation
Tronosjet
Advantage Engineering
HP (International)

Producteurs de matières premières

Produisent les matières premières utilisées dans les procédés de FA

Au Canada, généralement regroupés au Québec et axés sur la production de poudre pour la FA sur métal

Souvent achetés par des entreprises internationales

Tekna (International)
GE Advanced Powders & Coatings (International)
RioTinto (International)
Equispheres
Pyrogenesis

Source: CTIC, 2020

Les forces du Canada en matière de FA

Interrogés de manière générale sur les avantages du Canada dans le domaine de la FA, les participants à l'étude ont formulé une grande variété d'opinions, certains mentionnant que le Canada possède de nombreux avantages dans le domaine et d'autres indiquant qu'il n'en a aucun. De nombreux participants à l'étude ont fait l'éloge de l'industrie canadienne de la poudre métallique pour la FA, qui est d'ailleurs très active au Québec et qui touche de grandes entreprises internationales, dont GE. La FA médicale a également été mentionnée comme un domaine de réalisations importantes et à fort potentiel de croissance, bénéficiant d'un important engagement de la part des universités et de l'industrie. Par exemple, l'Université Western et Renishaw PLC ont annoncé en 2017 un partenariat de 6,8 millions de dollars pour créer l'Additive Design in Surgical Solutions, un nouveau centre de recherche, de développement et de commercialisation axé sur la FA médicale²⁵⁴.

Le gouvernement a été félicité pour certains programmes, notamment le PARI du CNRC, lequel emploie un grand nombre de chercheurs en FA et a apporté des innovations à un *procédé de consolidation au laser* qui permet de produire des composants métalliques sans avoir à usiner des surfaces²⁵⁵. Après avoir testé avec succès la technologie de consolidation au laser et avoir créé un prototype, elle a été cédée sous licence à Burloak Technologies d'Oakville, un chef de file mondial de la FA²⁵⁶. Le PARI du CNRC²⁵⁷ a également été félicité pour son travail louable de promotion du secteur et de financement d'organisations méritantes.

Défis pour la FA canadienne

Bien que les participants à l'étude aient généralement exprimé leur optimisme quant à l'avenir de la FA au Canada, ils ont relevé de nombreux défis quant à la croissance de l'écosystème national de la FA. Ces difficultés étaient de nature diverse, englobant les caractéristiques structurelles de l'industrie elle-même, les tendances inquiétantes du marché de la FA, la concurrence avec les pays étrangers et la dépendance à leur égard, ainsi que les caractéristiques idiosyncrasiques de la culture et des institutions commerciales canadiennes. Les participants estimaient généralement que le Canada accusait un retard par rapport à ses concurrents en Europe, en Asie ou aux États-Unis en ce qui concerne l'adoption des technologies de la FA. Plusieurs ont décrit l'adoption de la FA au Canada comme ayant une décennie de retard par rapport aux États-Unis et à l'Europe.

Tolérance au risque

Les participants à l'étude estimaient que les organisations canadiennes démontrent beaucoup d'intérêt pour la FA et une volonté de l'adopter pour certains cas pratiques superficiels (comme le prototypage). Toutefois, ils considéraient que le taux d'adoption est lent pour les cas pratiques plus coûteux.²⁵⁸

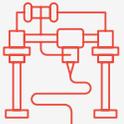
²⁵⁴ London to become North American leader in 3D printing for medical and surgical solutions, *Relations avec les médias en Ontario de l'Université Western*, 2017, <https://mediarelations.uwo.ca/2017/04/21/london-become-north-american-leader-3d-printing-medical-surgical-solutions/>

²⁵⁵ Une innovation de la finesse du laser : les chercheurs du CNRC atteignent un nouveau sommet dans le domaine de la fabrication additive, *Conseil national de recherches Canada*, 2020, <https://nrc.canada.ca/fr/histoires/innovation-finesse-laser-chercheurs-cnrc-atteignent-nouveau-sommet-domaine-fabrication-additive>

²⁵⁶ Ibid.

²⁵⁷ Soutien à l'innovation technologique, *Conseil national de recherches Canada*, 2020, <https://nrc.canada.ca/fr/soutien-linnovation-technologique>

²⁵⁸ Grant Cameron, « Adopting additive: the benefits of 3D printing for small manufacturers », *Manufacturing Automation*, 2020, <https://www.automationmag.com/adopting-additive-the-benefits-of-3d-printing-for-small-manufacturers/>



Plusieurs participants attribuaient cette lenteur à une culture d'entreprise réticente à prendre des risques au Canada par rapport aux États-Unis, qu'ils ont trouvée particulièrement appréciable chez les organisations manufacturières, les institutions financières et les investisseurs. Ils considéraient que les entreprises canadiennes avaient une attitude « attentiste », ne voulant pas trop investir dans la technologie avant d'avoir vu une autre entreprise le faire avec succès. Cette aversion au risque est particulièrement marquée dans le domaine de la FA sur métal, où l'équipement est invariablement coûteux et les cas pratiques sont fréquents dans les secteurs de l'aérospatiale et de l'automobile (et où les problèmes d'anisotropie et de quantité variable de pièces peuvent être particulièrement difficile à surmonter). Les participants estimaient que le faible nombre de cas pratiques réussis et connus amenait les décideurs à faire preuve de réticence lorsque vient le temps d'essayer la technologie.

Il y a un manque de projets ayant la visibilité nécessaire pour inciter les gens à vouloir adopter la FA : ils pensent que c'est une toute nouvelle babiole ou alors ils ne voient pas vraiment comment elle peut transformer leur entreprise. Nous avons donc besoin de ces études de cas qui montrent ce que peut faire la FA dans des exemples réels. Nous avons besoin de voir les pièces réelles. Mais nous avons également besoin de gens qui vendent et parlent de ce produit parce que les connaissances de l'industrie dans mon secteur sont très limitées. Ils pensent qu'il s'agit simplement de têtes de Yoda en plastique que tout le monde a vues sur Internet. Mais en réalité, nous sommes capables de recréer des pièces métalliques qui peuvent être intégrées aux machines. [traduction]

– Ingénieur, secteur de l'énergie, Alberta

Difficultés au chapitre du contrôle de la qualité, de la certification et de la normalisation

Comme mentionné précédemment dans le présent rapport, le comité technique conjoint²⁵⁹ de l'ISO et d'ASTM International a publié 19 normes internationales²⁶⁰. Toutefois, elles sont principalement axées sur les principes généraux de la FA et la conception des pièces. Bien que 28 autres normes soient en cours d'élaboration²⁶¹, stimuler l'adoption de la FA et les investissements chez une base élargie d'utilisateurs nécessitera une hausse du nombre de normes industrielles acceptées à l'échelle mondiale et axées sur les essais de produits, l'assurance de la qualité et la qualification.

Les participants à l'étude ont mentionné l'incapacité de certifier rapidement les pièces de FA comme étant un obstacle majeur à l'adoption généralisée de la FA dans le monde entier, surtout au Canada. Ils étaient d'accord pour dire que les questions de certification favorisent les grandes organisations sur les grands marchés de la FA, alors que les petites entreprises considèrent généralement que le coût des tests de qualité des pièces est prohibitif.

²⁵⁹ ISO/TC 261 – Chairman Statement, ISO, 2021, <https://committee.iso.org/home/tc261>

²⁶⁰ Normes du ISO/TC 261 : Normes publiées, ISO, 2021, <https://www.iso.org/fr/committee/629086/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>

²⁶¹ Normes du ISO/TC 261: Projets de normes, ISO, 2021, <https://www.iso.org/fr/committee/629086/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>



Le principal problème est la certification. Nous devons prouver que les pièces que nous utilisons fonctionnent vraiment. Il existe tellement de variations dans les matériaux et les procédés de la FA sur métal. En général, dans l'aérospatiale, toutes les pièces sont testées à l'aide d'ultrasons, de rayons X, d'un contrôle magnétoscopique, etc., mais aucune de ces techniques ne convient à la FA. [traduction]

- Ingénieur, secteur de l'aérospatiale, Québec

Fragmentation des écosystèmes

Les participants ont souligné la fragmentation et le manque de communication entre les principaux joueurs de l'industrie de la FA comme étant une faiblesse majeure de l'écosystème au Canada. Cette fragmentation a été décrite comme étant à la fois géographique (est et ouest) et linguistique (Canada anglais et français) et se situant entre différents groupes de joueurs (milieu universitaire, industrie et gouvernement). Parmi les participants, bon nombre n'ont pas réussi à nommer plus de deux ou trois organisations canadiennes (en plus de la leur) axées sur la FA. La sensibilisation aux activités de recherche précises en FA dans les universités est également faible. Ils étaient nombreux à considérer que les acteurs de l'industrie ne collaborent pas autant qu'ils le devraient, ce qui peut engendrer des inefficacités et un chevauchement des tâches. Ils croyaient également que cette fragmentation avait empêché l'écosystème canadien de la FA de prendre conscience de ses propres réussites et était en partie responsable des idées fausses sur la technologie ainsi que des taux d'adoption plus faibles.



Les conférences étasuniennes et les experts internationaux en FA sont mes principales sources d'information au sujet des réalisations canadiennes en matière de FA. Ils semblent mieux informés sur l'excellence de la FA au Canada que la plupart des Canadiens. [traduction]

- Member, AM Association, Ontario

Nous faisons partie du réseau d'innovation globale en fabrication additive. Il comprend, je crois, plus de cinq grandes universités canadiennes. Nos laboratoires sont dotés de machines de très haute technologie, d'une gamme très diversifiée de technologies de FA, allant du lit de poudre à faisceaux d'électrons au laser, de divers types de fusion sélective au laser, et de différents polymères, céramiques et composites. Je crois que ce qui manque ici, c'est peut-être la communication. Nous devons simplement créer ce lien pour faire savoir à la population que le Canada dispose de ce type d'installations. Les gens n'en sont pas tous conscients. [traduction]

- Directeur de programme, secteur de l'éducation, Colombie-Britannique

Les petites chaînes d'approvisionnement au service de l'écosystème

Les participants à l'étude comparaient souvent l'écosystème de la FA du Canada à celui des États-Unis et le décrivaient comme étant relativement petit et fortement dépendant des États-Unis (et dans une moindre mesure de l'Europe et de la Chine). Le Canada est considéré comme dépendant des chaînes d'approvisionnement étrangères pour une grande variété de biens et de services liés à la FA, notamment les imprimantes, les pièces de rechange pour les imprimantes, les conseils techniques liés aux imprimantes (comme l'installation et la maintenance) et les producteurs de polymères. Certains participants estimaient que la dépendance de l'écosystème canadien de la FA à l'égard des chaînes d'approvisionnement étrangères est l'une des plus grandes faiblesses du pays, faiblesse que la pandémie de COVID-19 a mise en évidence.



Il est contraignant de ne pas avoir une base manufacturière locale pour les machines de FA au Canada. Il y a bien quelques machines qui sont fabriquées au Canada, notamment les machines à dépôt de filament fondu, mais la plupart sont fabriquées en dehors du Canada, ce qui fait en sorte que les petites entreprises doivent payer des droits de douane élevés sur les nouvelles machines. Aussi, j'ai utilisé des machines qui sont tombées en panne : nous avons dû attendre des semaines pour les réparer parce qu'il n'y avait qu'une seule entreprise dans tout le Canada qui assurait le service pour ces machines. Ce sont là certains des plus importants obstacles. [traduction]

– Spécialiste de l'impression 3D, secteur de l'ingénierie, Ontario

C'est la Chine qui a eu le plus grand impact sur nos chaînes d'approvisionnement. Nos imprimantes sur résine et les fournitures connexes sont fabriquées en Chine. Lorsque la pandémie a frappé, toutes les installations ont arrêté leurs activités. Il était impossible d'obtenir de la résine, des imprimantes ou des pièces de rechange. Nous avons dû improviser des solutions auprès de fournisseurs locaux parce qu'il était impossible de commander. [traduction]

– Directeur, RPVA, Saskatchewan

Les chaînes d'approvisionnement en FA sont devenues compliquées parce que nous sommes vraiment loin du pouvoir d'achat. Si vous fabriquez des visières, il était impossible de trouver une feuille d'acrylique nulle part. Tout vient de Chine, et dès que vous la commandez et que la pièce arrivait à Seattle, elle partait quelque part aux États-Unis. Impossible d'en avoir! Il n'y a aucun centre de service au Canada. Il n'y a aucun fabricant de gros équipements au Canada. Il n'y a aucune extrudeuse de polymères au Canada. [traduction]

– Directeur, secteur de l'éducation, Alberta



Étude de cas

la FA en Allemagne

Le voisin du sud du Canada, les États-Unis, partage avec l'Allemagne une position dominante dans l'écosystème de la FA. L'Allemagne parvient à concurrencer efficacement les États-Unis en la matière même si son économie ne représente qu'un cinquième de la taille de celle des États-Unis. Pour que le Canada puisse rivaliser efficacement dans l'écosystème mondial de la FA, un certain nombre de politiques semblables à celles de l'Allemagne peuvent être envisagées.

L'écosystème de la FA en Allemagne

L'Allemagne est largement reconnue comme l'un des principaux marchés de FA dans le monde et rivalise vigoureusement les États-Unis, un pays beaucoup plus peuplé. En 2019, le marché allemand de l'impression 3D était considéré comme le plus important au monde à 1,28 milliard de dollars étasuniens, dépassant de peu le marché étasunien à 1,23 milliard de dollars étasuniens. En revanche, sur cette même liste, le marché canadien de la FA était estimé à 236,2 millions de dollars étasuniens et se classait au 13e rang, derrière la Turquie et devant la Russie^{262,263}. L'Allemagne était la source de 19,1 % de toutes les demandes de brevets en FA de 2010 à 2018, dépassée seulement par les États-Unis²⁶⁴. Des 20 organisations ayant déposé le plus grand nombre de brevets en FA auprès de l'Office européen des brevets, 11 étaient étasuniennes et 5 étaient allemandes²⁶⁵. L'écosystème allemand de la FA est considéré comme l'un des meilleurs au monde. Kearney, une société de conseil en gestion, a classé l'écosystème allemand de la FA au deuxième rang mondial après celui des États-Unis en se fondant sur 6 critères. L'étude a également dévoilé que l'Allemagne défiait les États-Unis, qui risquaient de perdre leur première place²⁶⁶.

L'écosystème allemand de la FA est très diversifié et comprend certains des plus importants FEO mondiaux en FA, y compris EOS, Kolb et BASF 3D Printing Solutions²⁶⁷. Les organisations en dehors de l'Allemagne ont depuis longtemps reconnu la domination de l'Allemagne dans le secteur de la FA, certaines ayant même établi des activités de FA en Allemagne ou racheté des positions dans des entreprises allemandes.

²⁶² Pawel Slusarczyk, *Top 20 countries investing the most in additive technologies*, 3D Printing Centre, 2020, <https://3dprintingcenter.net/top-20-countries-investing-the-most-in-additive-technologies/>

²⁶³ *2019 Additive Manufacturing Market Growth Surpassed \$10B Worldwide*, SmarTech Analysis, 2020, <https://www.smartechanalysis.com/news/2019-additive-manufacturing-market-growth/>

²⁶⁴ Majja Palmer, « Europe's 3D printing industry booms », Sifted, 2020, <https://sifted.eu/articles/europes-3d-printing-boom/>

²⁶⁵ Ibid.

²⁶⁶ *3D printing: disrupting the \$12 trillion manufacturing sector*, Kearney, 2020, <https://www.de.kearney.com/operations-performance-transformation/article/?a/3d-printing-disrupting-the-12-trillion-manufacturing-sector>

²⁶⁷ Carolin Werthmann, *Additive Fertigung in Deutschland – 5 Firmen, von denen man gehört haben sollte*, Redshift, 2020, <https://redshift.autodesk.de/3d-druck-deutschland/>



GE a établi son premier centre de FA en Allemagne en 2019²⁶⁸ après avoir acquis une part de 75 % de Concept Laser (un fabricant de machines de FA à laser) en 2016²⁶⁹.

Non seulement la base nationale allemande d'organisations axées sur la FA est très forte, mais la pénétration de la FA est grande dans l'ensemble de l'industrie manufacturière allemande. Une étude de Bitkom réalisée en 2018 a révélé que 27 % des entreprises industrielles allemandes utilisaient la FA, soit 8 % de plus que 2 ans plus tôt. En outre, 14 % des personnes interrogées n'utilisaient pas la FA, mais prévoient le faire à l'avenir. La FA était l'une des technologies de pointe les plus utilisées par les entreprises industrielles allemandes, surpassées seulement par l'infonuagique, les « applications de l'Industrie 4.0 » et les analyses des données massives. Les organisations utilisaient la FA pour un large éventail de fonctions, notamment la fabrication de moules et d'outils (34 % des utilisateurs), de pièces de rechange (32 %), de modèles visuels (23 %), de modèles opérationnels (12 %) et de dispositifs d'assemblage ou de produits sur mesure (8 %)²⁷⁰. La pandémie de COVID-19 a de nouveau facilité la croissance de la FA industrielle en Allemagne. Une enquête menée en 2020 auprès de décideurs allemands en matière de conception, de production et de technologie a révélé que 86 % d'entre eux prévoient augmenter leurs investissements dans la FA et que 43 % étaient directement motivés à le faire en raison des problèmes liés à la COVID-19 (p. ex., problèmes de chaîne d'approvisionnement, pertes commerciales, hausses des coûts et retards).²⁷¹

Les racines du succès allemand en FA

Le succès de l'Allemagne dans le secteur de la FA comporte une série de facteurs qui se recoupent, notamment des actions de la part de l'industrie, du gouvernement et des entreprises, ainsi qu'une culture sous-jacente d'innovation et d'ouverture à la technologie.

Engagement du gouvernement

Les mesures prises par le gouvernement à tous les niveaux ont soutenu la croissance de l'écosystème de FA en Allemagne. Le gouvernement fédéral allemand a inventé l'expression « Industrie 4.0 » en 2011 et s'est engagé à investir dans les technologies de fabrication de pointe²⁷². Les investissements annuels ont commencé après la mise au point du plan en 2013, passant de 320 millions d'euros en 2013 à 2,6 milliards d'euros en 2020²⁷³. Une partie de ces fonds est destinée au programme *Digital Jetzt*²⁷⁴ (« Digital Now »), qui permet d'accorder des subventions allant jusqu'à 65 % du coût total d'achat d'une imprimante 3D (jusqu'à un maximum de 50 000 euros pour une seule imprimante et de 100 000 euros pour une chaîne de valeur fondée sur la FA). Ces subventions sont renouvelables et réservées aux PME.²⁷⁵

Alors que le gouvernement fédéral allemand gère directement la majeure partie du financement directement dans l'Industrie 4.0, d'autres ordres de gouvernement en Allemagne ont précisément encouragé l'investissement dans l'Industrie 4.0. Par exemple, le land de Saxe-Anhalt considère la FA comme une technologie clé de l'Industrie 4.0 pour son avenir et encourage les réalisations locales en matière d'écosystème de la FA²⁷⁶.

²⁷⁰ Nina Paulsen, *Mehr als jedes vierte Industrieunternehmen setzt auf 3D-Druck*, bitkom, 2018, <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Mehr-als-jedes-vierte-Industrieunternehmen-setzt-auf-3D-Druck.html>

²⁷¹ Katharina Juschkat, *Über 40% wollen wegen Corona in 3D-Druck investieren*, Konstruktions Praxis, 2020, <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/ueber-40-wollen-wegen-corona-in-3d-druck-investieren-a-947230/>

²⁷² Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas et Wolfgang Wahlster, *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution*, VDI Nachrichten, 2011, <https://web.archive.org/web/20130304101009/http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Industrie-4-0-Mit-dem-Internet-der-Dinge-auf-dem-Weg-zur-4-industriellen-Revolution/52570/1>.

²⁷³ *Investments in Industry 4.0 in Germany from 2013 to 2020 (in billion euros)*, Statista, 2020, <https://www.statista.com/statistics/668780/industry-40-investments-in-germany/>

²⁷⁴ *Digital Jetzt Förderung*, Digital Jetzt, 2020, <https://www.digitaljetzt-portal.de/>

²⁷⁵ *Wichtige Fragen und Antworten rund um die Förderung mit 'Digital Jetzt'*, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/FAQ/Digital-Jetzt/faq-digital-jetzt.html>

²⁷⁶ *Industry 4.0 in Saxony-Anhalt, Invest in Saxony Anhalt*, 2020, <https://www.invest-in-saxony-anhalt.com/industry-4-0>



Le land du Bade-Wurtemberg aide les PME à numériser leurs activités grâce à un financement allant jusqu'à 120 000 euros²⁷⁷. Le gouvernement de Berlin a défini la FA comme une technologie de croissance clé et a introduit deux actions politiques majeures : l'ouverture d'un carrefour industriel de FA de 360 000 mètres carrés dans le Marienpark en octobre 2020 pour soutenir la croissance de l'écosystème local de FA²⁷⁸, et la décision d'accueillir le forum sur la FA en 2021 pour renforcer l'image de la ville comme carrefour mondial de FA²⁷⁹.

Acceptation par l'industrie

De grands chefs de file de l'industrie ont également favorisé l'acceptation et l'adoption de la FA en Allemagne. En 2018, Siemens a investi 30 millions d'euros dans une nouvelle installation d'impression 3D au Royaume-Uni²⁸⁰. En 2018, BASF Venture Capital a fait son premier investissement dans une société chinoise (Prismalab, un des principaux fournisseurs de services et de machines 3D en Chine)²⁸¹. En 2020, BMW a ouvert un campus de FA pour consolider son expertise en la matière en un seul lieu.²⁸²

Recherche et éducation dynamiques

Les instituts de recherche en Allemagne ont contribué à l'innovation dans le domaine de la FA tout en dispensant un enseignement. En 2018, on estimait que 148 instituts de recherche touchaient au domaine de la FA en Allemagne²⁸³.

L'écosystème de recherche allemand est diversifié et comprend l'Institut Fraunhofer, l'Association Helmholtz, l'Association Leibniz, la société Max Planck Gesellschaft, l'Académie des sciences, des institutions de recherche fédérales, des institutions de recherche publiques (les États fédéraux allemands sont analogues aux provinces canadiennes), des institutions de recherche industrielle privées, des associations de recherche industrielles, des réseaux et des grappes. Alors que les institutions fédérales, les académies et la société Max Planck Gesellschaft tendent à se concentrer sur la recherche fondamentale et sont pour la plupart financées par des fonds publics, les associations de recherche industrielle, les réseaux et les grappes se concentrent davantage sur le financement privé et font davantage de recherche appliquée²⁸⁴.

Étant donné la nature multidisciplinaire de la FA, l'engagement généralement important du gouvernement allemand en matière de recherche et développement dans l'ensemble des secteurs a probablement joué un rôle dans l'écosystème de la FA en Allemagne. En 2018, les dépenses intérieures brutes de l'Allemagne en matière de recherche et développement sont passées de 2,4 à 3,1 % du produit intérieur brut (PIB) total.

²⁷⁷ Digitalisierungsprämie Plus, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, und Wohnungsbau Baden-Württemberg, 2020, <https://wm.baden-wuerttemberg.de/de/service/foerderprogramme-und-auftrufe/liste-foerderprogramme/digitalisierungspraemie/>

²⁷⁸ Projekte im Masterplan Industriestadt Berlin 2018-2021, Industriestadt Berlin, 2020, <https://www.berlin.de/industriestadt/masterplan-industriestadt-berlin-2018-2021/projekte/index.php/detail/139>

²⁷⁹ Projekte im Masterplan Industriestadt Berlin 2018-2021, Industriestadt Berlin, 2020, <https://www.berlin.de/industriestadt/masterplan-industriestadt-berlin-2018-2021/projekte/index.php/detail/268>

²⁸⁰ Kai Tubbesing, Siemens in building a new 3D printing factory in Worcester, Hannover Messe, 2018, <https://www.hannovermesse.de/en/news/news-articles/siemens-is-building-a-new-3d-printing-factory-in-worcester>

²⁸¹ Christian Müller, BASF invests in 3D printing specialist Prismalab, BASF, 2018, https://www.basf.com/global/de/who-we-are/organization/group-companies/BASF_New-Business-GmbH/news/press-releases/2018/p-18-367.html

²⁸² New technology campus for 3D printing goes on stream: BMW Group builds on additive manufacturing, with skills consolidated at single site, BMW Group, 2020, <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/TO309872EN/new-technology-campus-for-3d-printing-goes-on-stream:-bmw-group-builds-on-additive-manufacturing-with-skills-consolidated-at-single-site?language=en>

²⁸³ Neue Studie: Lehrangebot zur Additiven Fertigung in Deutschland, Bundesministerium fuer Bildung und Forschung, 2018, <https://www.photonikforschung.de/service/nachrichten/detailansicht/neue-studie-lehrangebot-zur-additiven-fertigung-in-deutschland.html>

²⁸⁴ Research performing organizations, Research in Germany, 2020, <https://www.research-in-germany.org/en/research-landscape/research-organisations.html>



Cette même année, l'Allemagne avait l'une des économies les plus intensives en recherche au monde et n'était surpassée que par Israël, la République de Corée, Taïwan, la Suède et le Japon. En revanche, les dépenses intérieures brutes du Canada en recherche et développement ont chuté de 1,9 à 1,6 % du PIB total entre 2000 et 2018²⁸⁵. Le Canada est arrivé sous la moyenne de l'OCDE pour cette mesure chaque année depuis 19 ans. En 2014, les dépenses en recherche et développement par habitant au Canada arrivaient au 22^e rang mondial, alors que celles de l'Allemagne occupaient le 6^e rang²⁸⁶. Cet engagement en faveur de la recherche est partagé par le gouvernement et le secteur privé. L'investissement industriel en recherche et développement représente plus des deux tiers de l'ensemble du financement de la recherche et du développement en Allemagne²⁸⁷.

Collaboration

Un autre atout de l'écosystème allemand de la FA réside non seulement dans les forces individuelles des entreprises et de la recherche, mais aussi dans la collaboration très ciblée de ces forces entre elles. Par exemple, en 2019, Siemens a commencé à travailler avec le ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche sur un projet de subventions appelé IDEA. Ce projet triennal vise à réduire d'environ de moitié les délais de développement et de production de la FA sur poudre ainsi qu'à permettre la production en série grâce à la FA. Les subventions en lien avec cette initiative s'élèvent à 14 millions d'euros. Les partenaires du projet comprennent des fournisseurs de logiciels, des fabricants d'imprimantes industrielles et d'autres entreprises. Il est soutenu par deux instituts Fraunhofer et l'Université RWTH d'Aix-la-Chapelle.²⁸⁸

Une culture d'entreprise prudente mais évolutive

Le succès de l'économie allemande en matière de FA est soutenu par une culture d'entreprise qui concilie la prudence et la bureaucratie avec le consensus économique libéral, le progressisme et une vaste acceptation du commerce international.

L'idée du Mittelstand est un concept clé de la culture d'entreprise allemande, qui ne se traduit pas parfaitement en français. Essentiellement, il désigne les PME en Allemagne et les caractéristiques qui les différencient des PME d'autres pays, notamment les structures de gestion intergénérationnelles et l'accent mis sur le savoir-faire, la spécialisation et l'exportation²⁸⁹. Les entreprises Mittelstand se concentrent surtout dans les secteurs des machines, des pièces d'automobile, des produits chimiques et de l'équipement électrique. Elles exercent un poids politique important et sont considérées comme faisant partie intégrante du moteur économique allemand²⁹⁰. Une culture de valeurs partagées entre les entreprises allemandes peut contribuer à un sentiment de confiance et à une coordination de l'industrie qui permettent une adoption plus efficace des nouvelles technologies.

²⁸⁵ Gross domestic spending on R&D, OCDE, 2020, <https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm>

²⁸⁶ Dépenses en recherche et développement (% du PIB), Banque mondiale, 2020, <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/GB.XPD.RSDV.GD.ZS>

²⁸⁷ Companies & industrial research, Research in Germany, 2020, <https://www.research-in-germany.org/en/research-landscape/research-organisations/companies-industrial-research.html>

²⁸⁸ Siemens to lead Germany's Industrial Additive Manufacturing Plan, 3D Printing Industry, 2019, <https://3dprintingindustry.com/news/siemens-to-lead-germanys-industrial-additive-manufacturing-plan-159051/>

²⁸⁹ Karan Girotra et Serguei Netessine, « Extreme Focus and the Success of Germany's Mittelstand », Harvard Business Review, 2020, <https://hbr.org/2013/02/good-old-focused-strategy>

²⁹⁰ Jana Radow et Aaron Kirchfeld, « Germany's Mittelstand Still Thrives », Bloomberg Businessweek, 2010, https://web.archive.org/web/20101009040157/http://www.businessweek.com/globalbiz/content/sep2010/gb20100929_905740_page_2.htm



L'attitude des entreprises allemandes à l'égard du changement technologique est un autre atout pour la croissance de la FA. L'adoption de la FA en Allemagne est motivée par une attitude généralement positive à l'égard de la numérisation et de l'Industrie 4.0. Par exemple, l'Allemagne compte plus de 220 000 robots industriels, contre seulement 28 600 au Canada²⁹¹.

L'Allemagne est considérée comme l'un des meilleurs pays au monde au chapitre de l'entrepreneuriat²⁹² et de l'innovation²⁹³ et se classe presque au même rang que le Canada quant à la facilité d'y faire des affaires²⁹⁴.

Leçons pour le Canada

L'exemple de l'Allemagne montre que les petites économies axées sur la recherche et le développement peuvent développer divers écosystèmes de FA et concurrencer efficacement les grands pays.

Les mesures clés suivantes, fondées sur l'exemple de l'Allemagne, peuvent servir de modèle au Canada pour construire un écosystème de FA solide. La plupart de ces mesures pourraient également profiter à l'économie canadienne dans tous les secteurs en raison de l'impact perturbateur de la FA et, plus généralement, de l'Industrie 4.0.

Mesures proposées pour le gouvernement

- Investir davantage dans l'Industrie 4.0 dans l'ensemble des applications et plus généralement dans l'innovation industrielle.
- Accroître les mesures incitant à adopter des technologies de rupture (y compris la FA en particulier) par les entreprises de toutes les tailles, surtout les PME. Le programme allemand Digital Jetzt peut servir de modèle de financement²⁹⁵.
- Augmenter les dépenses en recherche et développement du Canada comme pourcentage du PIB. À l'heure actuelle, le Canada n'est pas seulement en retard sur ces principaux concurrents dans le domaine de la FA, mais aussi sur la moyenne de l'Union européenne et de l'OCDE. Le gouvernement et les établissements d'enseignement peuvent le faire directement, alors que d'offrir indirectement des incitatifs encouragerait l'industrie à investir dans la recherche et le développement.
- Investir dans la sensibilisation accrue à la technologie de la FA et à ses applications auprès des entreprises et des établissements d'enseignement.
- Financer la création d'instituts de recherche scientifique spécialisés partout au Canada afin d'accélérer le développement d'applications industrielles de la FA et d'initier l'industrie et le milieu de l'éducation aux applications de pointe en la matière.

²⁹¹ Deutschland ist am stärksten automatisierte Volkswirtschaft der EU, *Industrie.die*, 2020, <https://industrie.de/arbeitswelt/deutschland-ist-am-staerksten-automatisierte-volkswirtschaft-der-eu/>

²⁹² « Best Countries from Entrepreneurs », *US News*, 2020, <https://www.usnews.com/news/best-countries/entrepreneurship-rankings>

²⁹³ Michelle Jamrisko et Wei Lu, « Germany Breaks Korea's Six-Year Streak as Most Innovative Nation », *Bloomberg*, 2020, <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/2018/unternehmenskultur.html>

²⁹⁴ Ease of Doing Business rankings, « Doing Business », Banque mondiale, 2020, <https://www.doingbusiness.org/en/rankings>

²⁹⁵ Pour de plus amples renseignements sur le programme Digital Jetzt : <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/FAQ/Digital-Jetzt/faq-digital-jetzt.html>



Étude de cas : la FA en Allemagne

- Continuer de promouvoir les accords de libre-échange (comme l'Accord économique et commercial global entre le Canada et l'Union européenne) et l'expertise spécifique de l'industrie canadienne de la FA dans des applications spécialisées dans le but de créer des partenariats avec des entreprises allemandes du secteur de la FA qui permettront des transferts de connaissances et d'expertise.
- Encourager et inciter les grandes entreprises nationales à voir « grand » et à adopter la FA et l'Industrie 4.0 afin de demeurer concurrentielles à long terme à l'échelle internationale.

Mesures pour les établissements d'enseignement et les instituts de recherche

- Favoriser les partenariats avec les États-Unis et l'Allemagne dans le domaine de la recherche sur la FA.
- Accroître les investissements dans la recherche sur la FA et, plus généralement, l'Industrie 4.0.

Mesures pour l'industrie

- Mobiliser et construire des relations plus solides.
- Entreprendre des projets plus ambitieux qui améliorent la visibilité de la FA au Canada.



La demande de talents en FA

Les talents hautement qualifiés constituent la clé de la croissance de la FA ainsi que de la capacité concurrentielle continue de l'ensemble du secteur manufacturier²⁹⁶. De même, l'offre relativement faible de professionnels compétents et qualifiés en FA a longtemps été considérée comme un défi majeur ayant un impact sur la capacité de la FA à se développer, même parmi les « chefs de file de la FA » comme les États-Unis²⁹⁷. En raison de la croissance et des progrès des technologies de la FA ainsi que du développement de nouveaux matériaux, la demande de professionnels de la FA a augmenté.

La littérature existante sur les talents en FA révèle que l'enseignement de la FA est mal intégré aux programmes de conception et d'ingénierie existants et que le problème est mondial. En outre, la baisse des coûts des imprimantes et l'exposition croissante à la technologie ne suffiront pas à elles seules à résoudre la pénurie de talents puisque les professionnels efficaces de la FA doivent posséder une combinaison de connaissances techniques, d'expérience de l'industrie et de compétences générales. Par exemple, une étude de Deloitte sur la demande en FA en 2019 a révélé que cinq attributs clés étaient souhaités par les employeurs et que chacun de ces attributs incluait diverses qualités spécialisées:²⁹⁸

- ▶ des connaissances multidisciplinaires (y compris en physique, logiciels et science des matériaux, ainsi qu'une connaissance spécialisée des technologies de la FA);
- ▶ des connaissances en matière de conception, en particulier la CFA;
- ▶ une grande créativité et une ouverture d'esprit en matière de conception (dans la mesure où un niveau élevé d'expérience dans la fabrication traditionnelle peut être indésirable);
- ▶ une connaissance de la fabrication traditionnelle et une compréhension des forces et des faiblesses comparatives de la FA dans le paysage concurrentiel des technologies de fabrication;
- ▶ un esprit d'entreprise (comprenant une connaissance de l'économie, des compétences commerciales, une expérience industrielle et des compétences générales) qui permet aux travailleurs de recenser les cas pratiques potentiels pour la FA, d'évaluer leur faisabilité et de « vendre » la proposition à leurs organisations.

Une expérience de travail limitée des imprimantes 3D ne suffit pas à assurer l'employabilité dans l'industrie. Un effort coordonné entre le milieu universitaire et l'industrie est donc essentiel pour répondre à la demande de talents en FA.

Les principales recherches du CTIC révèlent que les organisations canadiennes spécialisées en FA représentent un groupe diversifié, allant des jeunes entreprises d'une seule personne aux sociétés de plusieurs milliers de personnes. Le nombre de spécialistes de la FA employés par les organisations varie. Les plus grandes organisations ont tendance à employer moins de personnel dans des rôles liés à la FA puisqu'elles adoptent généralement des technologies de FA pour bonifier les procédés manufacturiers existants, plutôt que de développer une nouvelle activité fondée sur la FA.

²⁹⁶ *Experts In Demand: Growth in Metal AM Creates Need for Professionals*, SME, 2018, <https://www.sme.org/am3dmetalsjob/>

²⁹⁷ *3D opportunity for the talent gap*, « *Deloitte Insights* », Deloitte, 2016, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/3d-printing-talent-gap-workforce-development.html>

²⁹⁸ *3D opportunity for higher education*, « *Deloitte Insights* », Deloitte, 2019, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-higher-education-degree.html>

Les petites entreprises (moins de 100 employés), qui sont plus susceptibles de se concentrer sur la FA en tant que produit en soi ou comme base de leur activité, emploient une proportion plus élevée de spécialistes de la FA. De nombreux participants à l'étude provenant d'entreprises utilisant les technologies de la FA, sans égard à leur taille ou au nombre de spécialistes de la FA, ont constaté une hausse de la demande de talents en FA.



Il y a cinq ou six ans, on ne parlait presque pas d'emplois en FA alors qu'aujourd'hui, la FA est pratiquement un mot à la mode. [traduction]

– Spécialiste de la FA, secteur de l'automatisation, Québec

Figure 4 : Tendence d'affichage des postes en FA et impression 3D, novembre 2017 à décembre 2020



Source: Données d'Emsi, consultées en janvier 2021

La figure ci-dessus montre la tendance d'affichage des postes qui indiquent l'impression 3D ou la FA comme l'une des compétences requises. Les données sur les offres d'emploi ont été recueillies dans l'ensemble des industries du Canada. Elles couvrent la période de novembre 2017 à décembre 2020 (les données de juillet à décembre 2020 sont des prévisions). En général, les données sur les offres d'emploi constituent un outil de mesure commun et pertinent pour évaluer la demande pour certains rôles. Bien que bon nombre des participants à l'étude aient fait état d'une croissance de la demande de talents en FA au cours des dernières années, ces données montrent une fluctuation de la demande en 2019 et une baisse de la demande en 2020. Il convient toutefois de noter que le secteur manufacturier dans son ensemble, et plus particulièrement les entreprises travaillant avec les technologies de FA, s'appuie fortement sur des méthodes et des pratiques de recrutement informelles ou internes (par opposition à la publication d'offres d'emploi sur une plateforme de recherche d'emploi). Pour cette raison, les données de la figure ci-dessus ne rendent compte que partiellement de la demande de talents en FA.

Embauche anticipée

Interrogés sur leurs plans d'embauche pour les deux prochaines années, les participants à cette étude ont affirmé que l'embauche demeurerait modeste dans un avenir prévisible. Dans l'ensemble, la demande de talents ne devrait pas connaître une forte augmentation au cours des deux prochaines années. La plupart des participants à l'étude ont déclaré que leurs organisations prévoyaient rester à leur taille actuelle ou croître légèrement, tandis que plusieurs s'attendaient à un retard dans l'embauche en raison de la volatilité attribuable à la pandémie de COVID-19. Les plans d'embauche exhaustifs étaient plus courants dans les grandes organisations (alors que le nombre total d'embauches est plus important dans ces entreprises, les talents en FA représentent une plus petite partie de leur main d'œuvre).

Disponibilité des talents

En ce qui concerne la disponibilité des talents au Canada, les participants à l'étude ont fait savoir que, dans l'ensemble, le défi n'était pas d'ordre quantitatif mais qualitatif. En d'autres termes, bien que le volume total des talents nécessaires soit modeste à court terme, les employeurs éprouvent des difficultés à trouver des talents qualifiés pour doter les postes vacants. La plupart du temps, ces postes sont très techniques ou axés sur la CFA. Certains participants ont mentionné que l'intérêt général pour la FA s'est accru au fil des ans et que, par conséquent, les utilisateurs amateurs de FA postulent fréquemment des rôles en FA en pensant qu'ils répondent aux exigences en matière d'éducation ou d'expérience professionnelle.



Nous étions récemment à la recherche d'un technicien en impression 3D et avons affiché le poste sur la chaîne locale. En quelques jours, nous avons reçu plusieurs dizaines de candidatures, notamment d'amateurs, de doctorants, de dessinateurs, et j'en passe. Il y a donc beaucoup de gens qui pourraient facilement être formés pour ces rôles. [traduction]

– Directeur, secteur de l'éducation, Alberta

Toutefois, lorsqu'il a été question de trouver des talents en FA au Canada, les participants n'arrivaient pas à s'entendre sur la meilleure façon de faire. Pour les postes subalternes, de nombreuses organisations s'engagent souvent directement auprès des programmes universitaires ou collégiaux. Pour les postes de niveaux intermédiaire et supérieur, les organisations ont déclaré utiliser des méthodes de recrutement largement informelles, notamment en abordant des talents potentiels dans les foires commerciales et en ayant recours à leurs réseaux personnels. Par conséquent, les données relatives aux offres d'emploi ne reflètent qu'une partie de l'ensemble des embauches dans ce secteur.

Rôles recherchés

En raison de la prolifération des procédés et des matériaux de FA et de leur évolution, les besoins en main-d'œuvre de l'écosystème de la FA évoluent également. Selon les participants à l'étude, il n'existe pas de consensus sur ce qu'un « spécialiste de la FA » devrait être capable de faire.

Au contraire, les titres de postes spécifiques affichés varient considérablement et reflètent les besoins uniques d'une organisation. Par exemple, une entreprise faisant de la recherche en FA sur métal peut préférer un ingénieur en matériaux ou un ingénieur mécanique détenant un doctorat et une grande expérience de procédés précis de FA sur métal, alors qu'un bureau de service de FA peut préférer un ingénieur concepteur ayant une grande expérience en CAO pour la FA.

Tableau 4 : 15 principaux rôles techniques en FA

Ingénieurs en FA	Ingénieurs des procédés	Ingénieurs en conception de produits
Ingénieurs en fabrication	Ingénieurs de projet	Concepteurs
Ingénieurs en mécanique	Ingénieurs en logiciels	Techniciens en impression 3D/FA
Ingénieurs/scientifiques en matériaux	Développeurs de logiciels	Techniciens en ingénierie
Ingénieurs en applications	Ingénieurs concepteurs	Machinistes

Source : CTIC, 2020

Selon les informations recueillies lors des entrevues réalisées auprès d'entreprises clés et des membres du comité consultatif de l'industrie dans le cadre de la présente étude, près de 50 rôles sont communs à la FA. Alors que de nombreux emplois sont liés aux technologies de la FA, certains sont plus recherchés et plus difficiles à doter que d'autres. Selon les participants à l'étude, les rôles techniques les plus recherchés en FA incluent divers types de rôles d'ingénierie traditionnels, notamment les ingénieurs et scientifiques des matériaux, les ingénieurs en fabrication, les ingénieurs en mécanique, les ingénieurs en applications, les ingénieurs des procédés et les ingénieurs de projet. Viennent ensuite divers types de concepteurs ou d'ingénieurs concepteurs ainsi que divers rôles d'atelier, notamment les techniciens en impression 3D/FA, les techniciens en ingénierie et les machinistes. Les participants ont mentionné que les ingénieurs et les développeurs de logiciels assumaient un rôle en lien avec la FA, étant donné leur association avec le développement de matériel et de logiciels pour les imprimantes 3D. Les rôles liés à la FA mentionnés moins fréquemment incluaient les artistes du numérique, les responsables du matériel, les spécialistes des applications, les ingénieurs en robotique, les ingénieurs en mécatronique, et les spécialistes en géométrie computationnelle.



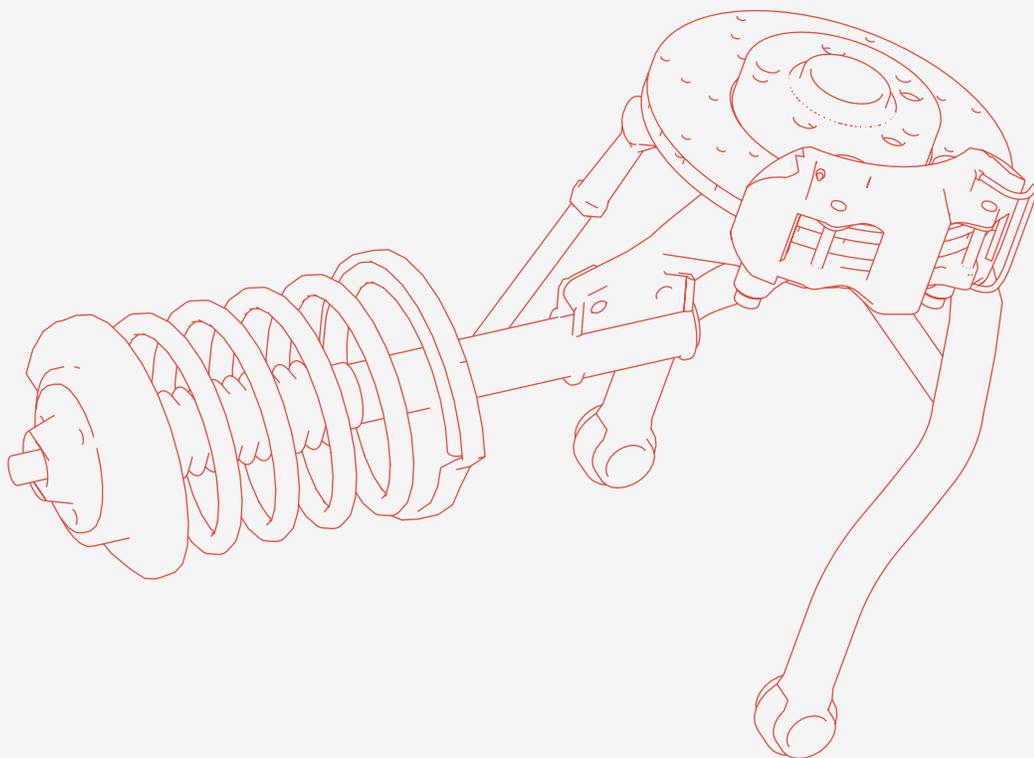
Je pense que nous avons en fait davantage besoin de gens qui travaillent dans l'atelier. Même si les étudiants au doctorat et à la maîtrise vont être très importants pour notre stratégie à long terme, ce ne sont pas les talents les plus recherchés aujourd'hui. Des amis de Toronto travaillent dans le secteur de la fabrication additive sur métaux et ils disent avoir du mal à trouver des talents ayant déjà utilisé une imprimante 3D pour faire fonctionner leurs six machines DMLS. Nous avons besoin de gens qui en ont au moins une connaissance de base. [traduction]

- Cadre, cabinet conseil en FA, Ontario

Compétences clés pour les rôles recherchés

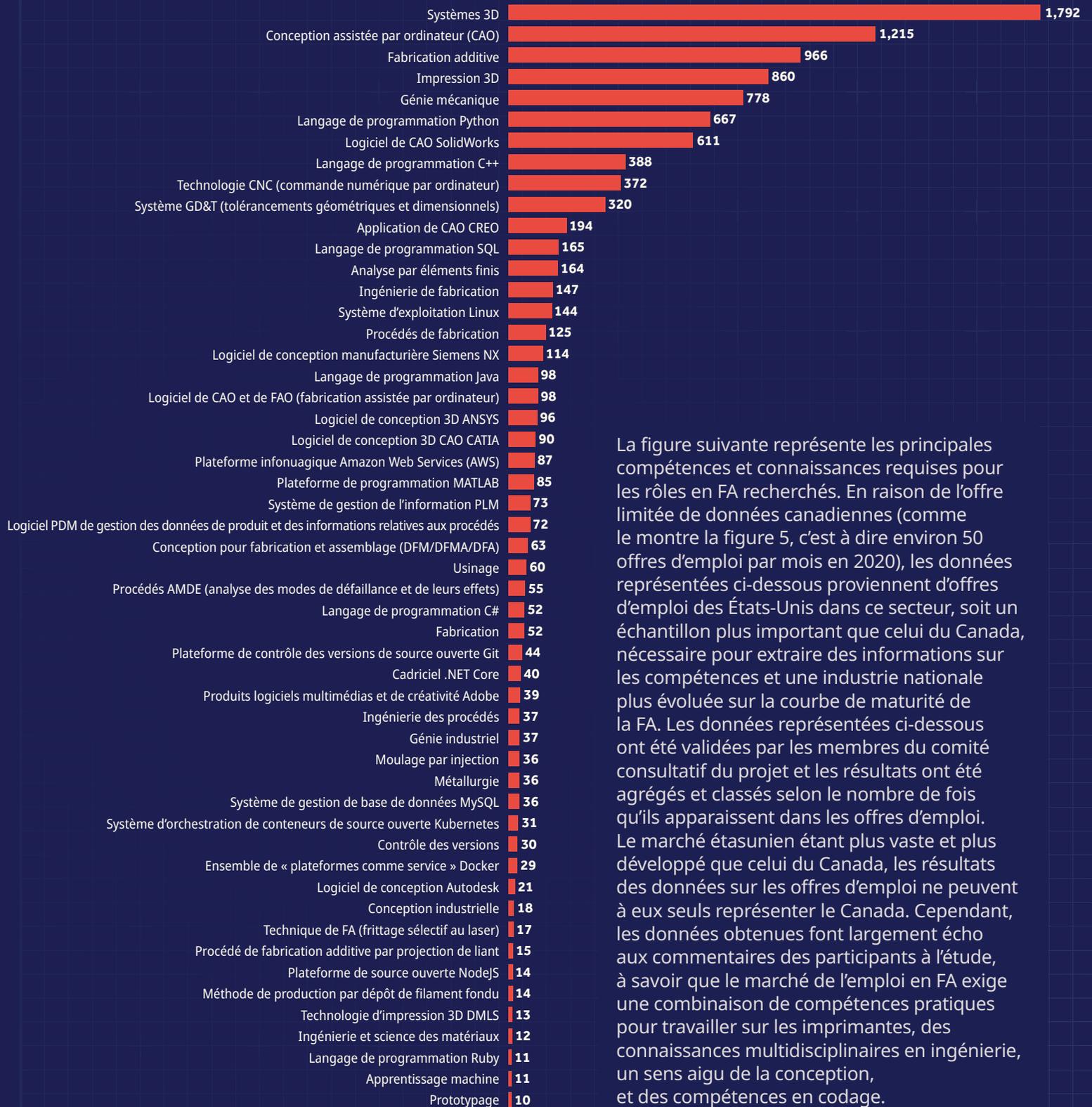
En général, les talents en FA doivent posséder une variété de compétences et de connaissances, lesquelles incluent une combinaison unique de compétences multidisciplinaires : des compétences en ingénierie, des compétences numériques, une connaissance des procédés de fabrication, de la science des matériaux, de la conception de produits, de la robotique et de l'analyse des données informatiques²⁹⁹, ainsi que des compétences générales, comme la créativité et l'esprit d'équipe. Certaines de ces compétences sont acquises à l'école, mais la plupart le sont par l'expérience professionnelle. Selon les commentaires des participants à l'étude, la plupart des professionnels de la FA dans le secteur ayant plus de cinq ans d'expérience ont commencé leur carrière dans la fabrication traditionnelle et sont progressivement passés à la FA.

Toutefois, les compétences et les connaissances précises nécessaires à chaque rôle varient et sont souvent liées aux technologies de la FA disponibles et aux matériaux utilisés. Par exemple, les talents en FA qui travaillent avec des plastiques n'ont pas nécessairement les compétences requises pour occuper des rôles en FA sur métal.



²⁹⁹ Training the manufacturing workforce for tomorrow, Waterloo News, 2020, <https://uwaterloo.ca/news/global-impact/training-manufacturing-workforce>

Figure 5: Principales compétences techniques recherchées pour les rôles en FA



La figure suivante représente les principales compétences et connaissances requises pour les rôles en FA recherchés. En raison de l'offre limitée de données canadiennes (comme le montre la figure 5, c'est à dire environ 50 offres d'emploi par mois en 2020), les données représentées ci-dessous proviennent d'offres d'emploi des États-Unis dans ce secteur, soit un échantillon plus important que celui du Canada, nécessaire pour extraire des informations sur les compétences et une industrie nationale plus évoluée sur la courbe de maturité de la FA. Les données représentées ci-dessous ont été validées par les membres du comité consultatif du projet et les résultats ont été agrégés et classés selon le nombre de fois qu'ils apparaissent dans les offres d'emploi. Le marché étasunien étant plus vaste et plus développé que celui du Canada, les résultats des données sur les offres d'emploi ne peuvent à eux seuls représenter le Canada. Cependant, les données obtenues font largement écho aux commentaires des participants à l'étude, à savoir que le marché de l'emploi en FA exige une combinaison de compétences pratiques pour travailler sur les imprimantes, des connaissances multidisciplinaires en ingénierie, un sens aigu de la conception, et des compétences en codage.

Source: CITC, 2020

Les participants sont allés encore plus loin en suggérant que deux des compétences les plus recherchées pour des talents en FA (dans l'ensemble) touchaient la CFA et la CAO. Des compétences mécaniques ou techniques générales, une aisance à travailler avec des machines, des connaissances en métallurgie et programmation, ainsi que des compétences informatiques générales et de la modélisation 3D étaient également des compétences très recherchées.

Bien que des compétences techniques ou spécialisées soient requises, les aptitudes relationnelles étaient considérées comme tout aussi importantes par les participants de l'industrie. En plus de l'expérience de travail dans la vente, les participants ont souligné que les spécialistes de la FA doivent être créatifs, avoir un esprit novateur, être débrouillards, avoir la capacité de « sortir des sentiers battus », être centrés sur le client, et faire preuve d'un esprit d'entreprise pour comprendre l'étude de cas de la FA dans diverses situations³⁰⁰.

Formation exigée

Parmi les participants à l'étude, il y avait de nombreuses « écoles de pensée » contradictoires sur ce que devrait être le niveau de formation approprié pour un professionnel de la FA. Bien que de nombreux participants n'aient pu spécifier une exigence minimale formelle en matière d'éducation, tous les participants estimaient que le milieu universitaire ne permet pas aux étudiants d'acquérir toutes les compétences nécessaires, et qu'il y aura toujours une grande part d'apprentissage sur le terrain à faire pour mettre à niveau les jeunes talents. Presque tous les participants étaient d'accord pour dire que la FA est un domaine très particulier et qu'il n'existe pas de formation « parfaite » pour un professionnel de la FA. Cependant, comme indiqué précédemment, les participants estimaient qu'un doctorat était « excessif » pour de nombreux rôles, bien que les rôles en FA nécessitent une certaine forme d'éducation postsecondaire.

Figure 6 : Niveau de formation requis pour les 815 offres d'emploi en FA, novembre 2017 à juin 2020



Source : Données d'Emsi, consultées en janvier 2020

Likewise, an analysis of 815 unique job postings for roles related to AM (see results above) revealed that employers are primarily looking for specific skills and experience and are less concerned with specific educational credentials.

³⁰⁰ 3D opportunity for the Talent Gap, « Deloitte Insights », Deloitte, 2016, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/3d-printing-talent-gap-workforce-development.html>

Almost half (47%) of roles advertised from November 2017 to June 2020 did not specify a preferred level of education, 2% asked for an Associate's degree, 23% asked for a Bachelor's degree, 8% preferred a Master's degree, and another 18% requested a PhD. AM professionals with a PhD were primarily sought after by universities and colleges to teach various AM-related courses.



Le minimum dont je me contenterais est un diplôme en génie mécanique ou électrique. Je pourrais passer par-dessus, mais seulement s'ils ont une expérience avérée dans le domaine dont j'ai besoin. Au moins, le diplôme me donne une idée de leur niveau de confiance. S'ils ont l'expérience exacte dont j'ai besoin, le diplôme n'est pas nécessaire. [traduction]

– Responsable de la production, secteur du commerce de détail, Canada atlantique

Expérience de travail requise

Les participants s'entendaient pour dire que les travailleurs de la FA devraient, idéalement, connaître tant les techniques de la FA que de la fabrication traditionnelle (que ce soit par le travail ou l'éducation). Cependant, il était généralement reconnu que le nombre de professionnels de la FA réellement compétents est très faible et qu'il ne serait pas pratique, d'une perspective opérationnelle, que les entreprises se limitent à embaucher seulement au sein de ce groupe. Des talents extérieurs au domaine pourraient, si l'intérêt et l'engagement sont suffisants, devenir compétents dans ce domaine. Les participants convenaient également de l'importance de l'expérience pratique du travail avec des machines. Plusieurs participants estimaient qu'il faut environ un an à un an et demi de travail avec un ensemble précis de matériel et de procédés pour devenir un opérateur véritablement compétent de la technologie FA. Le travailleur idéal en FA est une personne capable de s'adapter rapidement et possédant une combinaison d'expérience à la fois de la FA et de la fabrication traditionnelle afin de « combler le fossé » entre les deux technologies.

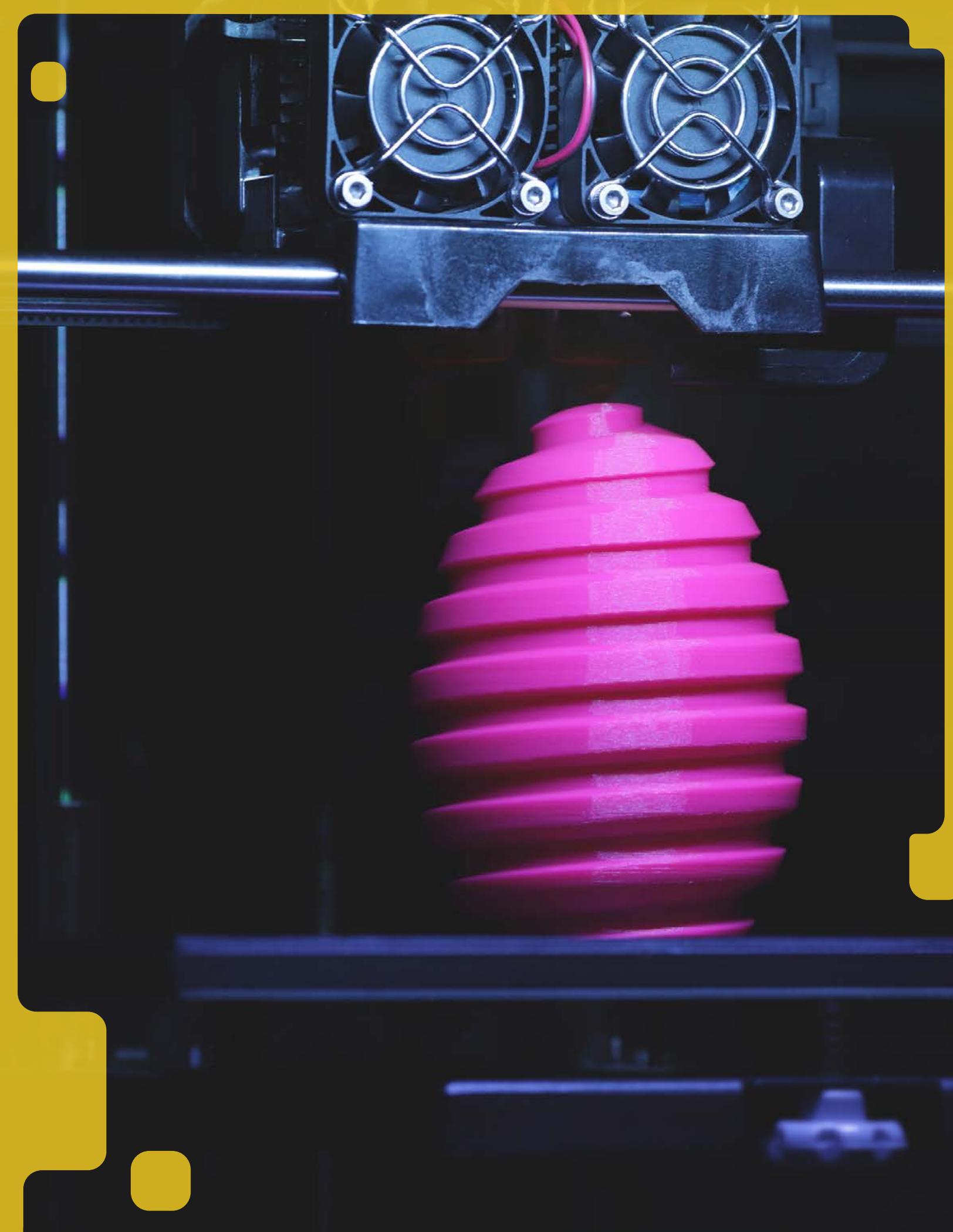


C'est presque pire d'être un spécialiste uniquement en FA que de ne rien connaître du tout au sujet de la technologie. Nous avons besoin de programmes qui enseignent à la fois la FA et la fabrication soustractive, et non d'un programme de fabrication soustractive qui inclut un cours sur la FA. Nous devons combler le fossé. [traduction]

– Boursier postdoctoral, secteur de l'éducation, Ontario

Il ne serait pas pratique d'embaucher uniquement des personnes ayant une expérience préalable de la FA. Les personnes ayant une grande expérience de la FA n'existent pas vraiment. Et si elles existent, elles coûtent probablement plus cher que ce que nous sommes prêts à dépenser, honnêtement. Vous n'avez pas besoin de ce type d'expérience pour ce que nous faisons. Au fur et à mesure que la FA se développe et évolue comme technologie, nous verrons plus de gens ayant plus d'expérience de l'industrie. Ceux que nous embauchons doivent avoir un esprit curieux et poser les questions nécessaires en matière de conception et de procédés, et être capables de repousser les limites de la technologie. [traduction]

– Responsable de la FA, secteur de l'aérospatiale, Canada atlantique





L'impact de la COVID-19 sur la FA

Le virus de la COVID-19, d'abord détecté en décembre 2019 et officiellement déclaré pandémie en mars 2020³⁰¹, a eu un grand impact sur l'industrie de la FA dans le monde entier. Dans l'ensemble, il est difficile de qualifier la pandémie de « bonne » ou de « mauvaise » pour le secteur puisque les expériences et les défis qui découlent de la pandémie varient considérablement d'une organisation à l'autre. En outre, de nombreux effets (comme une sensibilisation accrue) sont impossibles à quantifier ou ne sont pas nécessairement de nature durable.

Au départ, la pandémie de COVID-19 a remis en question les paradigmes de fabrication existants. Pour répondre à la demande de pièces de dispositifs médicaux, il a fallu procéder à une restructuration importante des capacités de production spécialisées. En outre, la demande de produits manufacturés moins complexes (p. ex. masques, attaches de masque, visière, écouvillons nasaux) a connu une hausse considérable. La pandémie a nécessité une production rapide de biens essentiels tout en perturbant les chaînes d'approvisionnement existantes. Il y avait de nombreuses raisons d'être optimiste quant aux capacités de la FA de contribuer à la lutte contre le virus. La FA est bien adaptée à la production de pièces complexes ou uniques à coût limité, ce qui la rend idéale pour la production à court préavis d'objets complexes comme des pièces de ventilateurs. Bien que la FA ne soit pas adaptée à long terme à la production de masse de produits manufacturés simples (comme les masques et les écouvillons), elle présente un avantage au chapitre de la rapidité par rapport à la fabrication traditionnelle. Elle pouvait donc être mobilisée rapidement pour « endiguer » la demande de certains biens avant que l'infrastructure de production de masse existante ne puisse être modifiée. Par exemple, en octobre 2020, Precision ADM a annoncé un investissement dans la production de 8 millions d'écouvillons nasopharyngés par mois pour le Canada³⁰². Aussi, la FA était un moyen de contourner la dépendance à l'égard des chaînes d'approvisionnement qui étaient perturbées. Le simple fait d'avoir accès au plastique et aux imprimantes pouvait permettre de produire rapidement de nombreux biens essentiels qui auraient autrement dû être expédiés.

Les produits médicaux fabriqués au moyen de la FA étaient utilisés dans un grand nombre de pays, dont la France³⁰³, l'Allemagne³⁰⁴, l'Irlande³⁰⁵, les États-Unis³⁰⁶ et le Royaume-Uni³⁰⁷. Plusieurs initiatives internationales en matière de FA ont été lancées, notamment l'initiative de réponse rapide en matière d'impression 3D du Forum économique mondial, qui a reçu le soutien de chefs de file mondiaux comme GE, EOS et HP³⁰⁸.

³⁰¹ Jamie Ducharme, « World Health Organization Declares COVID-19 a 'Pandemic.' Here's What That Means », *Time*, 2020, <https://time.com/5791661/who-coronavirus-pandemic-declaration/>

³⁰² Sali, loc. cit.

³⁰³ Covid-initiatives.org, Gouvernement de France, 2020, <https://www.data.gouv.fr/fr/reuses/covid-initiatives-org/>.

³⁰⁴ Schnelle Hilfe für Kliniken in der Corona-Krise, *Industrie.de*, 2020, <https://additive.industrie.de/news/schnelle-hilfe-fuer-kliniken-in-der-corona-krise/>

³⁰⁵ Chris Mills Rodrigo, « Irish health officials to review 3D-printed ventilator », *The Hill*, 2020, <https://thehill.com/policy/technology/488637-irish-health-officials-to-review-3d-printed-ventilator>

³⁰⁶ 3D Printing in FDA's Rapid Response to COVID-19, *US Food and Drug Administration*, 2020, <https://www.fda.gov/emergency-preparedness-and-response/coronavirus-disease-2019-covid-19/3d-printing-fdas-rapid-response-covid-19>

³⁰⁷ 3D Printing (additive manufacturing) of medical devices or component parts during the coronavirus (COVID-19) pandemic, *Gouvernement du Royaume-Uni*, 2020, <https://www.gov.uk/guidance/3d-printing-additive-manufacturing-of-medical-devices-or-component-parts-during-the-coronavirus-covid-19-pandemic>

³⁰⁸ 3D Printing COVID-19 Rapid Response Initiative, *Forum économique mondial*, 2020, <https://fr.weforum.org/platforms/covid-action-platform/projects/3d-printing-covid-19-rapid-response-initiative>



Le 11 mars 2020, le gouvernement du Canada a lancé un appel dans tout le pays pour la production d'une vaste gamme de produits, y compris des masques N95, des masques chirurgicaux, des gants en nitrile et des blouses d'hôpital. Le premier ministre Justin Trudeau a spécifiquement fait appel aux capacités d'impression 3D pour répondre à la demande de fournitures médicales³⁰⁹. De nombreuses organisations canadiennes chefs de file dans le domaine de la FA (dont Exergy Solutions³¹⁰, CAD MicroSolutions, Precision ADM, et Javelin Technologies³¹¹) se sont mobilisées pour soutenir cet effort, tout comme de nombreux petits producteurs et universités (y compris l'Université Simon Fraser³¹², l'Université de la Colombie-Britannique³¹³ et l'Université McGill³¹⁴). Cette mobilisation mondiale de la FA a été mentionnée dans de nombreuses publications du monde entier, notamment le Wall Street Journal³¹⁵, le Globe and Mail³¹⁶, le Financial Times³¹⁷, le USA Today³¹⁸, la BBC³¹⁹, Deutsche Welle³²⁰ et Le Monde³²¹. Certaines publications, comme le New York Times, ont même utilisé leur rayonnement pour transmettre des instructions sur la façon d'imprimer du matériel médical³²². La grande couverture médiatique des cas de réussite a donné à penser que la FA avait « atteint sa maturité » pendant la pandémie^{323,324,325}. Même parmi les organisations qui ne se concentraient pas sur la production d'équipements médicaux, la COVID-19 a permis de démontrer l'agilité des procédés de FA. Par exemple, Relativity Space (qui intègre largement la FA dans sa production de fusées pour les voyages spatiaux) a pu poursuivre sa production et même embaucher du personnel, et ses activités n'ont été que peu affectées par les confinements³²⁶.

- 309** Tess Boissonneault, *Canadian government calls for help for COVID-19 supplies*, 3D Printing Media Network, 2020, <https://www.3dprintingmedia.network/canadian-government-covid-19-supplies-help/>
- 310** Emily Mertz, « Coronavirus: Local companies make ventilators, face shields and donate them to Alberta Health Services », *Global News*, juin 2020, <https://globalnews.ca/news/7031253/alberta-health-services-face-shields-ppe-ventilators-exergy-solutions-coronavirus/>
- 311** Canadian AM community responds to COVID-19 crisis, *Design Engineering*, 2020, <https://www.design-engineering.com/canadian-am-community-responds-to-covid-19-crisis-1004034630/>
- 312** SFU Engineering students use 3D printing skills to develop COVID-19 supplies, *SFU News*, 2020, <https://www.sfu.ca/sfunews/stories/2020/04/sfu-engineering-students-use-3d-printing-skills-to-develop-covid.html>
- 313** Nataly El-Bittar, « UBC students 3D printing PPE to distribute to essential workers around Vancouver », *The Ubysey*, 2020, <https://www.ubyssey.ca/science/project-shield-vancouver/>
- 314** Kwabena Odura, « Coronavirus: McGill University students design 3D-printable masks for health-care workers », *Global News*, 2020, <https://globalnews.ca/news/6727301/coronavirus-mcgill-students-3d-face-masks/>
- 315** Daniel Michaels et Asa Fitch, « 3-D Companies Tackle Coronavirus Supply Shortages », *The Wall Street Journal*, 2020, <https://www.wsj.com/articles/3-d-companies-tackle-coronavirus-supply-shortages-11585832400>
- 316** Tom Cardoso, « Stuck in self-isolation, these Canadians are using their skills to make medical supplies », *The Globe and Mail*, 2020, <https://www.theglobeandmail.com/canada/article-canadians-use-crowdsourcing-to-produce-medical-supplies-for-health/>
- 317** « 3D Printing can be a real source for optimism », *Financial Times*, 2020, <https://www.ft.com/content/1c07fa6d-b92c-47d3-a70e-5e29d3109f0c>
- 318** Ryan Streeter, « From robots to 3D printing, how coronavirus can inspire waves of innovation », *USA Today*, 2020, <https://www.usatoday.com/story/opinion/2020/05/18/how-coronavirus-can-inspire-new-era-economic-innovation-column/5197093002/>
- 319** Zoe Kleinman, « Coronavirus: 3D printers save hospital with valves », *BBC*, 2020, <https://www.bbc.com/news/technology-51911070>
- 320** Kerstin Schweizer, « 3D printers offer thrilling opportunities to tackle the coronavirus », *Deutsche Welle*, 2020, <https://www.dw.com/en/3d-printers-offer-thrilling-opportunities-to-tackle-the-coronavirus/av-52935297>
- 321** Pierre Bouvier, « Respirateurs, protections pour les soignants ...: l'impression 3D mobilisée contre le coronavirus », *Le Monde*, 2020, https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/03/31/respirateurs-protections-pour-les-soignants-l-impression-3d-mobilisee-contre-le-coronavirus_6035086_3244.html
- 322** Signe Brewster, « Have a 3D printer? You can use it to make Face Shields for Medical Workers », *New York Times*, 2020, <https://www.nytimes.com/wirecutter/blog/3d-printer-coronavirus-face-shield/>
- 323** Aaron Rabinowitz, *3D Printing Comes of Age in the COVID-19 Crisis*, *IP Intelligence Report*, 2020, <https://www.ipintelligencereport.com/2020/04/02/3d-printing-comes-of-age-in-the-covid-19-crisis/>
- 324** Yu Ying Clarrissa Choong et coll., « The global rise of 3D printing during the COVID-19 pandemic », *Nature Review Materials*, *Nature*, 2020, <https://www.nature.com/articles/s41578-020-00234-3>
- 325** Brooke Sutherland, « 3D Printers Recast Virus-weary Supply Chains », *Bloomberg*, 2020, <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2020-04-09/coronavirus-3d-printers-remake-broken-supply-chains>
- 326** Michael Sheetz, « Space startup Relativity verified its 3D printing process works to build a rocket », *CNBC*, 2020, <https://www.cnn.com/2020/05/12/relativity-space-verifies-3d-printing-works-to-build-its-rocket.html>



La majorité des participants à cette étude estimaient que la COVID-19 avait permis de mieux faire connaître la FA, ainsi que d'accroître l'acceptation de la technologie pour la création de produits finis. Certains ont mentionné des « gains » dans l'écosystème canadien de la FA, comme le fait que la société Precision ADM de Winnipeg soit devenue le plus grand producteur mondial de dispositifs médicaux imprimés en 3D³²⁷.



Avant la COVID-19, la plupart des imprimantes de FA servaient davantage au prototypage. La COVID-19 les a réellement lancées dans la fabrication à grande échelle 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Trois de nos partenaires sont désormais certifiés ISO grâce à ce système. Je pense donc que l'expérience qu'ils acquièrent grâce à cette certification va leur permettre de se concentrer davantage sur les options de fabrication réelles plutôt que sur le prototypage puisque, honnêtement, ils vont gagner beaucoup plus d'argent. Ils ont six mois, peut-être même une année d'expérience supplémentaire, pour tout faire, soit embaucher les bonnes personnes, obtenir les bonnes ressources, former correctement leur personnel, fournir toutes les capacités de service dont ils ont besoin. [traduction]

– Cadre, secteur manufacturier, Ontario

Cependant, certains ont mentionné un aspect négatif de la publicité accrue entourant la FA. Ils estimaient que la couverture médiatique a dépeint de façon irréaliste la FA comme une solution « magique », engendrant des attentes irréalistes quant aux capacités de cette technologie. Certains croyaient même que la couverture médiatique avait créé une sorte de « frénésie » entourant la FA, la technologie étant rapidement adaptée sans tenir sérieusement compte de sa durabilité, de sa pertinence ou même de la sécurité des matériaux.



J'entends parler de cet engouement et de ces bonnes nouvelles sur l'utilisation de l'impression 3D pour la fabrication d'outils et d'EPI, mais d'autres types de fabrication sont bien plus adaptés à ce travail. Si vous voulez fabriquer 100 000 articles, vous ne les imprimez pas en 3D : vous mettez sur pied une chaîne de production. [traduction]

– Propriétaire d'entreprise, secteur de l'ingénierie, Colombie-Britannique

Beaucoup de gens n'ont pas tenu compte d'aspects comme la porosité des particules. Par exemple, pour le dépôt de filament fondu, les trous que le procédé laisse naturellement sont 10 fois plus grands que le virus de la COVID-19. Beaucoup de personnes travaillant dans le plastique n'avaient tout simplement pas les connaissances techniques nécessaires pour fabriquer des produits sûrs pour l'industrie de la santé. [traduction]

– Cadre, cabinet-conseil en FA, Ontario

Parmi les participants, un thème récurrent était soulevé : la pandémie de COVID-19 a illustré la faiblesse des chaînes d'approvisionnement en FA du Canada et la faible autosuffisance de son industrie de la FA. Bon nombre des personnes interrogées ont noté des retards importants dans la réception des pièces et des machines. Elles ont aussi fréquemment mentionné que les fabricants de filaments avaient été « submergés » par la demande et que les États-Unis avaient saisi tous les filaments, dont certains auraient pu être expédiés au Canada. D'autres ont mentionné que des machines étaient restées inactives parce qu'elles n'avaient pas pu bénéficier de l'aide de représentants techniques aux États-Unis.

³²⁷ How Precision ADM became the Largest Producer of 3D Printed Medical Devices, Formlabs, 2020, <https://formlabs.com/blog/precision-adm-3d-printed-medical-devices/>



Dans l'ensemble, les participants à l'étude estimaient que la pandémie a mis en évidence la fragilité de l'écosystème canadien de la FA, lequel accuse un manque de grands fabricants d'équipements, d'extrudeuses de polymères, de fabricants de polymères, d'installations de post-traitement, de grands parcs d'impression, et dépend fortement des États-Unis pour les filaments.

Bien que cette opinion ne soit pas partagée par tous les participants, l'un d'entre eux a résumé succinctement la pandémie de COVID-19 comme étant un « baptême de sang ». Il a fait remarquer que si la pandémie avait exposé les faiblesses du Canada en matière de FA et peut-être même porté atteinte à la réputation du secteur à court terme, elle offrait tout de même des possibilités d'apprentissage, de croissance et de restructuration du secteur. Le point de vue le plus commun : à long terme, la pandémie offre une possibilité intéressante au secteur puisqu'elle va bouleverser les paradigmes existants, accroître la sensibilisation, éduquer la population, et donner à la technologie la chance de démontrer ses avantages et ses capacités.



Le seul risque : ne pas tenir les promesses que nous avons faites au marché. La technologie est très prometteuse, mais la vitesse à laquelle nous l'adopterons déterminera si nous progressons ou non. Il est possible que nous ne parvenions pas à tirer le meilleur parti de cette technologie. Mais pour le moment, des investissements sont réalisés, et des gens la demandent. Tout est prêt pour une croissance continue. [traduction]

– Spécialiste de la FA, secteur de l'automatisation, Québec

Conclusion

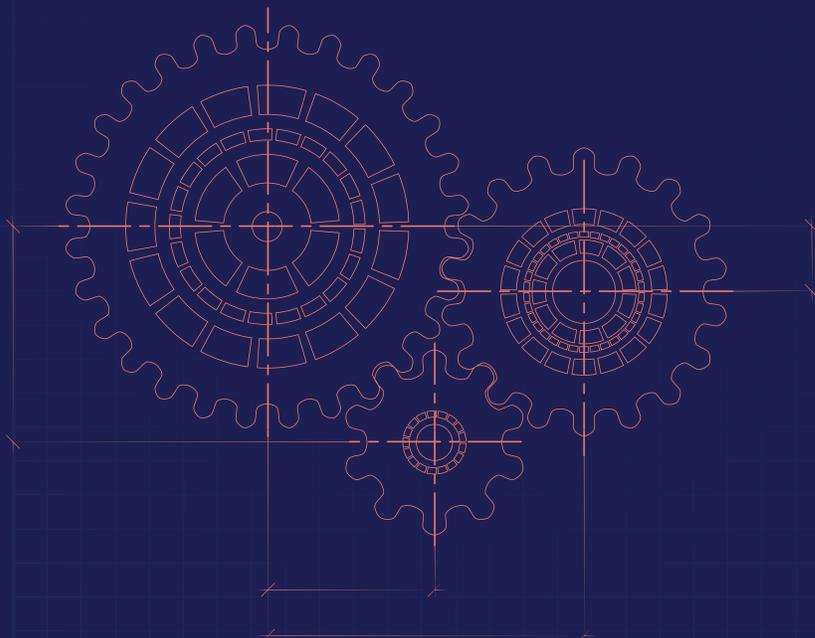
Les technologies de la FA représentent une petite partie, en croissance rapide, du paysage manufacturier mondial. Bien que la FA existe depuis les années 1980, plusieurs facteurs sont apparus au cours de la dernière décennie qui préparent le secteur de la FA à une croissance rapide et soutenue à l'avenir. La baisse des coûts des imprimantes et des matières premières a permis une adoption élargie dans les organisations, en particulier les PME. La diversité croissante des matériaux et des variantes de procédés a augmenté le nombre de cas pratiques potentiels. Aussi, les améliorations technologiques ont permis à la FA d'atténuer certaines de ses faiblesses tout en conservant ses avantages par rapport aux procédés de fabrication traditionnels. Grâce à des centaines de cas pratiques possibles, la FA peut avoir un impact rapide sur des secteurs comme l'automobile, l'aérospatiale, la fabrication industrielle, les technologies propres, la construction, le commerce de détail, ainsi que la santé et les biotechnologies.

Le Canada représente environ 2 % du marché mondial de la FA. Par rapport aux principaux joueurs internationaux (comme les États-Unis, la Chine et l'Allemagne), l'écosystème canadien de la FA présente de nombreuses faiblesses, outre sa petite taille. Bien que les organisations canadiennes utilisent souvent la FA pour réaliser des prototypes, un manque de sensibilisation, associé à des analyses de rentabilisation peu claires, peut entraîner une aversion au risque en matière d'investissement, retardant ainsi l'adoption de la FA pour d'autres utilisations. L'écosystème de la FA au Canada est relativement « cloisonné » entre les industries et les régions, ce qui entraîne une utilisation inefficace des ressources et une collaboration limitée. À l'exception notable de la poudre métallique, où il a développé une expertise considérable, le Canada compte peu de FEO ou de producteurs de matériaux, le rendant ainsi dépendant des chaînes d'approvisionnement internationales, ce qui contribue à augmenter les coûts des produits fabriqués au pays. Dans plusieurs secteurs, notamment l'aérospatiale et la construction, les organisations qui cherchent à produire des pièces finales par le biais de la FA ont été retardées par des certifications et des normes inachevées. En outre, l'enseignement actuel de la FA, à l'exception des programmes de doctorat, est superficiel, même dans les grands établissements. En conséquence, le marché du travail est devenu saturé de doctorants, même si les emplois en FA les plus recherchés sont des postes de techniciens qui pourraient être occupés par des diplômés collégiaux.

Cependant, le Canada est très concurrentiel dans plusieurs créneaux de la FA. Au Québec, il existe un écosystème dynamique et diversifié de FA sur métal, lequel a attiré des multinationales chefs de file comme GE, Siemens et Pratt & Whitney. Cet écosystème comprend des producteurs de matières premières, des adoptants industriels, des conseils de recherche et des établissements d'enseignement. Les applications biomédicales de la FA ont également fait l'objet d'une attention considérable de la part du gouvernement et de l'industrie nationale. Des laboratoires canadiens et des entreprises comme Precision ADM, établie au Manitoba, sont à l'avant-plan de la recherche et du développement en matière de FA biomédicale.

L'exemple de l'Allemagne prouve que les petites économies peuvent développer divers écosystèmes de FA et concurrencer efficacement des économies beaucoup plus grandes comme les États-Unis et la Chine. Faire des choix politiques similaires et audacieux peut contribuer à accroître la capacité concurrentielle de l'écosystème de la FA au Canada, comme accroître les investissements dans l'innovation industrielle et les campagnes de sensibilisation à la FA et à ses applications, encourager l'adoption des technologies de la FA, en particulier par les PME, et stimuler les investissements du Canada en recherche et développement sur la FA, que ce soit directement par des fonds supplémentaires aux universités et à l'industrie ou indirectement par des crédits d'impôt. Le secteur privé et le gouvernement peuvent tous deux promouvoir activement l'expertise canadienne en FA au Canada et à l'étranger, développer des partenariats avec des pays chefs de file dans la recherche en FA (p. ex. Allemagne, États-Unis, Chine), et renforcer les relations entre les joueurs clés de la FA au Canada afin d'encourager des projets plus ambitieux. L'organisation au Canada d'un plus grand nombre de conférences mondiales sur la FA serait un moyen particulièrement efficace de faire connaître l'expertise canadienne en la matière aux entreprises canadiennes et aux chefs de file mondiaux dans ce domaine.

La pandémie de COVID-19 provoque une perturbation sans précédent des paradigmes économiques existants, et représente une occasion de réorienter l'économie canadienne vers des industries à forte croissance. Dans une certaine mesure, la FA ressort de la pandémie comme un domaine de possibilités, alors que les applications sont nombreuses et que la trajectoire de croissance est prometteuse. Bien qu'il soit peu probable que l'écosystème canadien de la FA atteigne celui des États Unis ou de l'Allemagne, investir dans tous les atouts du Canada en matière de FA est une occasion de renforcer la capacité concurrentielle économique du pays.



Annexe

Méthodologie de recherche

La présente étude comprend des recherches primaires et secondaires.

Recherche secondaire

La recherche secondaire s'est appuyée sur une analyse exhaustive et solide de la documentation existante sur la FA, permettant de mieux comprendre la technologie de la FA qui façonne l'industrie. Les publications proviennent de l'industrie et du milieu universitaire, et certaines d'entre elles ont été fournies au CTIC par les participants aux entrevues et les membres du comité consultatif.

En plus de l'analyse documentaire, des sources de données secondaires ont été évaluées, y compris les données d'analyse de la main-d'œuvre d'Emsi, les données sur les offres d'emploi des principaux sites Web, et d'autres sources accessibles au public. Les sources de données secondaires ont été analysées afin de comprendre les tendances du marché en ce qui concerne les répercussions économiques, la croissance de l'emploi et la demande de talents qualifiés en FA.

Recherche primaire

Entrevues auprès de répondants clés

Entre juin et septembre 2020, le CTIC a réalisé 26 entrevues semi-structurées auprès d'experts en la matière provenant de l'industrie, d'associations industrielles, du gouvernement et du milieu universitaire. La taille (d'une jeune entreprise en solo à des entreprises de plusieurs milliers d'employés), la localisation, le niveau de maturité, le revenu, les besoins en matière d'emploi et le nombre de spécialistes de la FA qu'elles emploient variaient selon les organisations interrogées.

Les participants aux entrevues occupaient des postes de haut niveau au sein de leurs entreprises et organisations, notamment en tant que chef de file de la FA, consultant en FA, directeur de l'innovation, PDG, responsable du développement de produits et directeur de la fabrication. En menant ces entrevues, l'objectif du CTIC était de déterminer les tendances nationales de l'industrie de la FA en lien avec le paysage canadien de la FA, ses avantages et ses défis, ses possibilités et ses faiblesses, la disponibilité des talents et des compétences nécessaires, et l'impact de la COVID-19. Les répondants ont principalement été identifiés par le biais de LinkedIn, en fonction de leur titre de poste actuel et de la position de leur entreprise ou organisation dans l'industrie de la FA. Des entreprises et des participants diversifiés ont été choisis afin de garantir un large éventail de perspectives et de contributions pour le rapport.

Le CTIC a organisé trois réunions du comité consultatif, en plus des entrevues, pour discuter et valider les résultats de la recherche ainsi que recevoir les commentaires de l'industrie et du milieu universitaire.

Comité consultatif

Un comité consultatif de projet a été mis sur pied pour guider la présente étude et valider les résultats. Le comité consultatif était composé de 25 personnes issues de l'industrie, d'associations industrielles, du gouvernement et du milieu universitaire. Le comité s'est réuni trois fois au cours de cette étude pour évaluer les résultats ainsi que fournir une rétroaction et des conseils généraux sur la recherche. Il a également été mis à contribution pour la validation des emplois et des compétences recherchés en FA.

Moissonnage du Web pour la collecte de données sur les entreprises

L'équipe de collecte de données du CTIC a fait un moissonnage du Web afin de recueillir des données sur les principaux sites d'offres d'emploi et sites Web d'employeurs en vue d'extraire des données sur les emplois et les compétences requises. L'apprentissage machine a servi à recueillir les titres de postes affichés par une entreprise donnée, la date d'affichage du poste, le lieu et le nom de l'entreprise. Les emplois affichés en double sur les sites d'emploi ont été recensés et supprimés, et les données ont été agrégées en conséquence. Le moissonnage du Web a également permis d'extraire des informations précieuses sur la composition de l'offre de talents.

II Limites de la recherche

Bien que des efforts aient été faits pour atténuer les biais potentiels, des contraintes importantes se sont imposées quant au nombre d'entrevues possibles et la disponibilité des données. Certaines inexactitudes ont donc pu être négligées.

Entrevues clés

Comme mentionné, le CTIC a mené 26 entrevues auprès de personnes provenant d'entreprises de partout au Canada, un échantillon trop petit pour être considéré comme représentatif de l'ensemble de l'industrie de la FA.

Moissonnage du Web

Le CTIC a fait des efforts appréciables pour recueillir des données canadiennes sur les offres d'emploi et les compétences requises. Cependant, pour différentes raisons, notamment la situation économique actuelle, les données sur le marché du travail canadien étaient très limitées. Des données étasuniennes ont donc été recueillies et analysées. Par conséquent, la liste des rôles en FA les plus recherchés et celle des compétences clés en FA présentées dans le présent rapport ont été tirées des principaux sites d'affichage d'emploi étasuniens.

Données

Les données disponibles pour le marché canadien de la FA sont nettement insuffisantes, et la plupart des données existantes sont vagues et inexactes ou fournies sous forme agrégée en compagnie des données provenant des États-Unis. Bien que la situation soit en train de changer puisque l'industrie et les organisations commencent à publier des données et des rapports exhaustifs, le manque actuel de données doit être considéré comme une limite du présent rapport.

III Autres organisations du domaine de la FA au Canada

Centres de recherche

Plusieurs centres de recherche en FA bien connus sont financés par des universités et le gouvernement. En date de 2020, presque tous les établissements d'enseignement postsecondaire disposaient d'un centre d'innovation ou, plus précisément, d'un centre de recherche sur la FA au sein de leurs installations. Ces centres sont généralement axés sur la recherche et ont établi un certain lien avec l'industrie. Vous trouverez ci-dessous quelques exemples de ces centres de recherche sur la FA.

Le **Réseau stratégique pour l'innovation globale dans les procédés de fabrication additive du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (Réseau IG-FA CRSNG)** vise à créer des interactions de collaboration entre les partenaires et les chercheurs universitaires afin de développer et de commercialiser des matériaux, des procédés, des systèmes de contrôle et des produits nouveaux pour la FA sur métal. Le Réseau a été créé pour relever les défis qui empêchent l'adoption industrielle de la FA sur métal et préparer le Canada à l'ère de l'Industrie 4.0³²⁸. Il est hébergé par l'Université de Waterloo et réunit 19 chefs de file en FA de sept universités canadiennes.

Certaines institutions financées par le gouvernement offrent une gamme de services, notamment en matière de recherche et de développement en FA. Par exemple, le **Conseil de recherche industrielle du Québec (CRIQ)** (qui fait partie d'Investissement Québec depuis juin 2020) soutient les entreprises qui font une transition vers une fabrication novatrice³²⁹. Il offre des services spécialisés aux entreprises novatrices : recherche et développement (automatisation des procédés de fabrication, technologies environnementales, développement d'équipements industriels), essais de qualification et certification de produits, information industrielle et technologique, ainsi que normalisation, certification et enregistrement de systèmes ISO³³⁰. Autre exemple : le Centre de métallurgie du Québec soutient les entreprises qui travaillent dans le domaine de la FA sur métal par le biais d'activités de recherche et de développement, d'une assistance technique, et d'une formation spécialisée³³¹.

Le **Multi-Scale Additive Manufacturing Lab (MSAM)** est l'une des plus grandes installations de FA au monde axées sur la recherche et le développement. Hébergé à l'Université de Waterloo, le laboratoire se concentre sur les procédés de FA de prochaine génération. Il explore de nouvelles techniques pour développer des matériaux de pointe, des produits novateurs, des outils de modélisation et de simulation, des dispositifs de surveillance, des systèmes de contrôle en boucle fermée, des algorithmes d'assurance de la qualité, et des techniques de caractérisation holistiques in situ et ex situ.

³²⁸ About the NSERC HI-AM Network, NSERC NI-AM, 2020, <https://nserc-hi-am.ca/about-us/>

³²⁹ Soutien au développement de produits | Soutien à l'accroissement de la productivité – CRIQ, Investissement Québec-CRIQ, 2020, <https://www.criq.qc.ca/fr/>

³³⁰ Centre de recherche industrielle du Québec, Parc technologique du Québec métropolitain, 2020, <http://www.parctechno.com/fr/registre/?id=27>

³³¹ Historique, Centre de métallurgie du Québec, 2020, <http://cmqtr.qc.ca/mission-vision-et-valeurs/>

Le **Marine Additive Manufacturing Centre of Excellence (MAMCE)**, lancé en 2017, est le premier au Canada à utiliser l'impression 3D sur métal pour fabriquer des pièces certifiées pour l'industrie maritime. Le centre concentre ses recherches sur l'amélioration de la protection contre la corrosion, l'impression hybride, les pièces intelligentes, et la résistance aux explosions. Le centre, financé par des organisations industrielles, fédérales et provinciales, développe des méthodes, des procédures et des systèmes efficaces de formation de la main-d'œuvre³³².

L'**Additive Manufacturing Innovation Centre (AMIC)** du Collège Mohawk offre aux concepteurs et aux fabricants un environnement collaboratif de recherche appliquée pour explorer la technologie de la FA à l'échelle industrielle. L'objectif du centre est de soutenir l'adoption industrielle des technologies de fabrication de pointe et de l'Industrie 4.0 pour une efficacité accrue et une meilleure conception des produits³³³.

L'**Additive Design in Surgical Solutions Centre (ADSSC)** a été fondé en 2017 grâce à un partenariat entre l'Université Western, Renishaw PLC et le London Medical Network³³⁴. Le centre se concentre sur la recherche en FA, la conception, le développement et la commercialisation d'implants à base d'alliage, de dispositifs médicaux et d'instruments chirurgicaux destinés aux marchés orthopédique, dentaire et vétérinaire³³⁵. L'**Advanced Materials and Manufacturing Institute (AMMI)** de l'Université de la Colombie Britannique est un centre d'excellence en recherche dont la mission est de maintenir le Canada à l'avant-garde des industries de fabrication de pointe. Il a conclu des partenariats avec 160 entreprises dans divers secteurs, notamment l'énergie propre et les métaux primaires, et travaille avec les trois quarts des 20 plus grandes entreprises aérospatiales au monde. La FA est l'un des sept domaines d'intérêt de l'institut³³⁶.

Le **Centre for Advanced Manufacturing and Design Technologies (CAMDT)** du Collège Sheridan cherche à fournir un carrefour reliant l'industrie, les programmes d'études et la recherche appliquée. Le centre met en relation des entreprises de toutes les tailles avec l'expertise et les équipements de fabrication de pointe du Collège ainsi qu'avec ses professeurs et étudiants. La FA est l'un des principaux domaines de recherche du centre, lequel fournit l'expertise et les ressources nécessaires à la numérisation, au prototypage, à l'impression et à la finition des métaux et des plastiques de la FA, ainsi que des services de conception (CFA)³³⁷.

Organismes et associations sectoriels

Il existe de nombreux carrefours de FA de tailles diverses au Canada, les deux plus grands étant situés dans la région du Grand Toronto et à Montréal. De plus petits carrefours de FA se trouvent dans les villes de Vancouver, de Saskatoon, d'Edmonton et de Winnipeg.

³³² About Marine Additive Manufacturing Centre of Excellence, MAMCE, 2020, <https://www.unb.ca/mamce/about.html>

³³³ Additive Manufacturing Innovation Centre (AMIC), Collège Mohawk, 2020, <https://www.mohawkcollege.ca/ideaworks/additive-manufacturing-innovation-centre-amic>

³³⁴ Renishaw contributes to pioneering Canadian medical design centre, Renishaw, juin 2017, <https://www.renishaw.com/en/renishaw-contributes-to-pioneering-canadian-medical-design-centre--42106>

³³⁵ About, ADEISS, 2020, <https://adeiss.ca/about/>

³³⁶ What we Do, AMM, 2020 : <http://www.amminstitute.ca/>

³³⁷ Centre for Advanced Manufacturing and Design Technologies (CAMDT), Collège Sheridan, 2020, <https://www.sheridancollege.ca/research/centres/advanced-manufacturing-design>

Plusieurs organismes industriels se concentrent sur la promotion et le développement de la FA au Canada.

- ▶ **Canada Makes** est un réseau d'entités privées, publiques, universitaires et sans but lucratif qui se consacre à la promotion de l'adoption et du développement de la fabrication de pointe et de la FA au Canada. Le réseau couvre un large éventail de technologies de FA, notamment l'impression 3D, l'imagerie 3D par rétroingénierie, les implants médicaux, le remplacement des tissus humains, et l'impression 3D sur métal³³⁸.
- ▶ La **Supergrappe de la fabrication de pointe (NGen)** est un organisme sans but lucratif financé par le gouvernement du Canada. Il vise à renforcer la capacité concurrentielle du secteur manufacturier du Canada, à stimuler l'innovation et l'investissement dans les technologies de fabrication de pointe au Canada, à créer de nouveaux débouchés commerciaux pour les entreprises canadiennes sur les marchés mondiaux, à accroître le nombre d'entreprises canadiennes de grande envergure et de premier plan, et à développer une main-d'œuvre moderne et inclusive possédant les compétences requises pour exceller dans la fabrication de pointe, aujourd'hui et demain³³⁹.
- ▶ L'**Advanced Manufacturing Consortium (AMC)** vise à accélérer l'adoption de technologies de pointe et de solutions uniques aux défis en matière de fabrication en aidant l'industrie à déployer des technologies de fabrication de pointe, à les comprendre, à les évaluer, ainsi qu'à diminuer les risques en vue de faire croître leurs activités³⁴⁰.
- ▶ L'**Excellence in Manufacturing Consortium (EMC)** est un organisme sans but lucratif et le plus important consortium manufacturier du Canada. Il se consacre à aider les fabricants à croître et à devenir plus concurrentiels³⁴¹.

³³⁸ About Canada Makes, Canada Makes, 2020, <http://canadamakes.ca/about/>

³³⁹ Fabrication de prochaine génération Canada, 2020, <https://www.ngen.ca/fr/>

³⁴⁰ About Us, Ontario Advanced Manufacturing Consortium, 2020, <https://www.amconsortiumontario.ca/about/>

³⁴¹ About, Excellence in Manufacturing Consortium, 2020, <https://www.emccanada.org/about>