

FABRICATION ADDITIVE, CHÂÎNES D'APPROVISIONNEMENT ET EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE par René Poirier, 8 mai 2022¹

Rendre plus flexibles les chaînes d'approvisionnement et réduire l'empreinte environnementale sont deux enjeux majeurs auxquels sont confrontées nos entreprises. La fabrication additive (FA) fait partie de la solution.

L'enjeu des chaînes d'approvisionnementⁱ

La guerre en Ukraine, la COVID-19, le canal de Suez obstrué, la pénurie de conteneurs, les feux de forêt en Colombie-Britannique et les tarifs douaniers américains sur l'acier et l'aluminium canadiens ont révélé la complexité et la vulnérabilité de nos chaînes d'approvisionnement face aux pandémies, conflits armés, mesures protectionnistes, accidents logistiques et aux catastrophes engendrées par les événements climatiques extrêmes.

Pour mitiger ces risques, des experts suggèrent aux entreprises de diversifier leurs sources d'approvisionnement, de prioriser les fournisseurs locaux ou provenant de pays alliés (*near-shoring, ally-shoring*) de rendre leur gestion des chaînes d'approvisionnement plus «intelligente» et d'accroître la flexibilité de leur production.ⁱⁱ Dans ce contexte, la fabrication additive devient alors encore plus stratégique, comme le soulignait récemment le World Economic Forum.ⁱⁱⁱ

La FA est un processus manufacturier de bout en bout qui produit des objets physiques à partir de modèles numériques 3D. L'impression s'effectue par l'ajout de matières en couches successives (plastiques, métaux, céramiques, etc.) permettant de fabriquer rapidement et à coûts unitaires stables des pièces uniques personnalisées ou des petites séries aux géométries allégées et complexes (*low volume high mix parts*).^{iv}

La FA permet donc de concevoir un produit avec plus de liberté, en lien avec une performance attendue et non en fonction de contraintes d'usinage ou d'assemblage. Les produits en résultant comportent moins de matières, d'éléments constituant chaque pièce et d'étapes d'assemblage. Les impacts d'éventuelles hausses de prix, pénuries ou problèmes logistiques sont ainsi atténués. Cette optimisation offre souvent une meilleure performance du produit final et un cycle de vie allongé.

La rapidité du passage de la conception à la production (short lead times) de pièces et d'outillage et/ou pour procéder à des changements d'outillage est un atout majeur. Contrairement au moulage sous pression (die-casting), la création et fabrication d'une pièce pourrait être l'affaire de quelques jours. Le design, le prototypage, l'affinage et la reconfiguration d'un produit se font dans un temps réduit sans avoir à investir beaucoup de temps et argent pour réaliser des itérations de design qui auraient nécessité des mois avec des procédés plus traditionnels d'usinage ou qui auraient

¹ L'auteur est membre du comité de pilotage du CQFA et économiste principal, Innovation, Sciences et Développement économique Canada (ISDE). Il remercie le Carrefour québécois de la fabrication additive (CQFA), PRIMA Québec et Denis Akzam (Systèmes P4BUS) pour leurs commentaires.

obligé à fabriquer des moules, comme pour l'injection par moulage.^v Des gains en efficacité sont ainsi obtenus en procédant avec une plateforme unique qui raccourcit de ce fait la chaîne d'approvisionnement. Et parce que la FA procède de modèles numériques, les designs et les données peuvent être partagés et transmis à des imprimantes 3D décentralisées ou localisées à proximité des utilisateurs. L'entreprise est donc moins vulnérable aux délais de livraison de fournisseurs éloignés.

La meilleure illustration de cette rapidité de conception et de production a été faite au début de la pandémie. Partout dans le monde, les entreprises, les milieux académiques et professionnels se sont mobilisés pour concevoir et produire du matériel et des équipements médicaux, en utilisant la FA. En peu de temps, des masques, visières, respirateurs, ont été conçus et livrés. Au Québec, plusieurs entreprises se sont inscrites dans ce mouvement planétaire : Aon3D, AscensionX, Bodycad, CAE, Concepts 3DG, Dyze Design, eLab extrusion, Fablab, FZ Engineering, Gf3D Prototype, Innovscan, Labo3D, MDA, Mekanisk, MI Integration, Nanogrande, OCX, Panthera Dental, Polycontrols, Safran, Spaceshift 3D, Tak Design, TechnoLaser, Voxel Factory, Zimmer Biomet et autres.

La FA offre la possibilité de produire sur demande, sans avoir à satisfaire des exigences élevées de quantité minimale contrairement aux procédés traditionnels. Cela permet ainsi de diminuer d'autant les besoins et frais d'entreposage des pièces ou des produits finaux. On optera aussi pour la FA lorsque l'obsolescence des produits finaux est plus rapide dans un marché donné.

Finalement, l'ajout de capacités en FA donne plus de flexibilité à la production d'une entreprise, même si elle utilise régulièrement des procédés plus traditionnels comme le moulage sous pression pour les contrats demandant plusieurs exemplaires d'un même produit normalisé ou la production de pièces de grande dimension. L'entreprise peut aussi utiliser pour certaines pièces une approche hybride combinant FA et machine à contrôle numérique (CNC), afin de réduire les coûts de matières, de fabrication et de finition. Par exemple, des pièces peuvent être produites par impression 3D, puis leur fini de surface être amené aux niveaux de tolérance désirés par une machine CNC. On peut aussi fabriquer la pièce de façon soustractive, puis lui ajouter, grâce à l'impression 3D, des insertions qui auraient nécessité autrement une complexe programmation et des heures de planification pour une machine CNC. Une turbine serait un bon exemple : la majeure partie de la pièce est fabriquée avec la machine CNC, puis les ailettes et lames en FA avec une finition assurée par la CNC. Certaines machines aussi sont dites hybrides, combinant les deux types de procédés, soustractif et additif, en un même équipement.^{vi}

L'enjeu de l'empreinte environnementale^{vii}

L'Organisation des Nations-Unies (ONU) définit le développement durable comme étant un développement qui satisfait les besoins présents sans compromettre l'habileté des générations futures à répondre à leurs propres besoins. Pour mesurer l'usage que nous faisons de la nature en la comparant à sa capacité à se régénérer, plusieurs mesures peuvent être employées, dont les empreintes environnementales, écologiques, climatiques ou carbone. Moins une entreprise utilise de ressources

naturelles et crée de déchets, plus faible sera son empreinte environnementale et plus durable sera son développement.^{viii} À l'ère des changements climatiques, de la transition énergétique et des stratégies nationales pour atteindre la carboneutralité, les procédés de fabrication et chaînes d'approvisionnement se doivent d'être plus « verts ».

La FA optimise topologiquement les produits qu'elle imprime. Ils ont donc des formes plus allégées (*light-weighting*) et comportent moins de pièces, ce qui réduit leur poids et la quantité de matières requise. Comme l'approche est additive, l'impression ne génère pas ou peu de déchets (autres que parfois des structures de support), contrairement aux machines CNC ou au moulage sous pression. En outre, le produit en résultant ne comporte souvent moins de surfaces exigeant des reprises et une finition par usinage.

Le surplus non utilisé des poudres métalliques ou des résines autour de la pièce imprimée peut être réutilisé un nombre significatif de fois puis recyclé jusqu'à 100 %. Et dans le cas de pièces médicales, cette poudre résiduelle peut être recyclée sans qu'il ne soit nécessaire d'enlever de contaminants, si on travaille avec des matières à haut degré de pureté, comme le tungstène. Cette récupération économise matières, énergie et temps.^{ix}

Le ratio buy-to-fly utilisé en aérospatiale mesure l'économie de matières. Les pièces imprimées tendent vers 1,5:1 (poids des matières utilisées/poids de la pièce finale), alors que celles fabriquées par des méthodes plus conventionnelles sont souvent supérieures à 10:1. Moins de matières, de pièces et des produits allégés signifient aussi moins d'énergie consommée et de CO2 émis pour les produire, les transporter et maintenir des inventaires de pièces de rechange qui souvent s'abîment et perdent de la valeur avec le temps. Par ailleurs, la fabrication de pièces allégées crée des produits finaux demandant moins d'énergie (souvent des hydrocarbures) pour les utiliser tout au long de leur vie utile, par exemple dans le matériel de transport.

La FA peut ainsi contribuer à prolonger la vie des produits finaux, dont les pièces de rechange ne sont plus disponibles, parce que les inventaires de surplus sont coûteux à maintenir quand la production en série réalisée avec les procédés traditionnels est terminée. Il suffit d'imprimer des designs à partir de l'inventaire de fichiers numériques 3D pour réparer ou remplacer. Ce sont des étapes essentielles pour s'insérer dans une logique d'économie circulaire.

La comparaison entre les procédés additifs et soustractifs est plus difficile à faire au niveau de la consommation énergétique, puisqu'elle varie grandement d'une étape à l'autre de la chaîne de valeur ou du cycle de vie du produit. Les étapes de préfabrication et de fabrication sont plus énergivores pour l'atomisation des poudres (au plasma, au gaz, à l'eau) et pour l'impression 3D que pour la fonderie. Le temps d'impression 3D est aussi souvent plus long ; plusieurs heures par opposition à plusieurs secondes ou minutes par pièce pour le moulage par pression. Mais d'autres facteurs doivent être considérés, comme les économies d'énergie de la FA qui ne consomme que la matière requise et génère moins de déchets à gérer, l'énergie consommée pour produire les moules dans le cas du moulage sous pression, ainsi

que la possibilité de réduire le volume de production où les plus petites séries avantagent la FA.^x

Roland Berger a récemment démontré que la production de pièces imprimées en 3D pour des turbines au gaz, pour des autoclaves et pour des applications en aérospatiale exige davantage d'énergie que les procédés traditionnels, mais que l'économie d'énergie résultant de l'usage de ces produits par les utilisateurs finaux tout au long du cycle de vie du produit compense très largement l'énergie requise en amont pour fabriquer les matières pour la FA et imprimer les pièces.^{xi} Des chercheurs de l'Université de Purdue sont arrivés aux mêmes conclusions avec la réparation des auges de turbine.^{xii}

Des chercheurs américains des universités de l'Idaho et du Nord Dakota ont démontré pour leur part que la fabrication additive d'une pompe en acier inoxydable avec la méthode du dépôt de métal par laser (LMD) était moins nocive que la fonderie au niveau du potentiel de réchauffement climatique global (GWP), d'acidification (AP), d'écotoxicité des eaux douces (FAETP), de toxicité humaine (HTP) et de diminution de la couche d'ozone stratosphérique (ODP). Des chercheurs des universités d'Alabama et de Shandong arrivent à des conclusions similaires pour l'ensemble des procédés de FA métallique. Ils soulignent aussi l'importance de l'optimisation de l'utilisation du plateau et/ou de la chambre ou enceinte.^{xiii} Et cette empreinte environnementale est davantage réduite si on utilise, comme au Québec, des énergies propres comme l'hydroélectricité pour fabriquer les matériaux et imprimer en 3D.^{xiv}

La FA utilise des gaz à diverses étapes, de la fabrication des matières jusqu'à la post-fabrication, en passant par l'entreposage, la manipulation et le transport des poudres. Ces gaz sont l'azote, l'argon, l'hélium; l'hydrogène si l'atomisation est faite à l'eau. Il faut donc considérer le coût énergétique de production de ces intrants. Diverses mesures de sécurité encadrent ces opérations parce que les gaz et les particules émises peuvent être toxiques pour la peau, les yeux et le système respiratoire. Les risques sont minimisés par le port de masques, combinaisons et respirateurs pour la fabrication de poudres, par des locaux bien climatisés et par des imprimantes 3D à enceinte fermée. Certaines normes régissent la qualité du produit et son usage sécuritaire; par exemple l'ASTM/IS 52907 pour l'inertage des poudres.^{xv}

Le Carrefour québécois de la fabrication additive (CQFA)

Au cours des dernières années, les risques et coûts d'innovation, d'exploration, d'adoption et de maîtrise de la FA ont diminué.

Les technologies de la FA mûrent sans cesse. La vitesse de fabrication, la qualité et la taille des pièces produites s'améliorent. De nouveaux matériaux adaptés aux procédés de fabrication font leur apparition et ont été caractérisés. De plus en plus d'entreprises utilisent la FA pour personnaliser des produits et le nombre d'applications industrielles ou pouvant être produit en série continue d'augmenter. Des grands donneurs d'ordre tels que GE Aviation, Raytheon, Siemens Energy, Lockheed

Martin et Honeywell, sous-traitent une part accrue de leur production de pièces ou produits en FA pour développer leur réseau de PME fournisseuses au sein de leurs chaînes d'approvisionnement.^{xvi}

On peut aussi maintenant louer des imprimantes 3D ou payer des frais en fonction de l'utilisation faite ou du nombre de pièces produites, transformant en dépense d'opération (OPEX), ce qui aurait été une dépense d'investissement plus importante (CAPEX) si l'entreprise avait acheté.^{xvii}

De multiples aides gouvernementales sont disponibles, tant au niveau québécois que canadien, pour acquérir des équipements, moderniser des installations et perfectionner les compétences de la main-d'œuvre. Que ce soient l'Offensive de transformation numérique, Impulsion-Compétences, le programme de formations de courte durée (COUD), le programme canadien d'adoption numérique, l'Initiative pour le perfectionnement des compétences pour l'industrie (IPCI) et autres.

De nombreuses formations diplômantes ou qualifiantes sont apparues pour faciliter l'apprentissage de la FA au Québec. Et depuis le 1er juin 2022, le Carrefour québécois de la fabrication additive (CQFA) est entré en action avec pour objectifs de promouvoir les expertises des divers acteurs de la FA au Québec, de partager les connaissances et expériences au sein de l'écosystème, d'encourager les collaborations et stimuler les occasions d'affaires (www.cqfa.quebec).

ⁱ R. Poirier. L'écosystème de la fabrication additive au Québec, *Traitements et matériaux*, 5 mars 2021; <https://www.supplychainbrain.com/blogs/1-think-tank/post/34349-how-3d-printing-can-streamline-supply-chains>;

ⁱⁱ FMI- <https://blogs.imf.org/2022/04/12/global-trade-needs-more-supply-diversity-not-less/>; Brookings Institute - <https://www.brookings.edu/blog/the-avenue/2021/06/08/rebuilding-americas-economy-and-foreign-policy-with-ally-shoring/>; McKinsey - <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/succeeding-in-the-ai-supply-chain-revolution>; Forbes - <https://www.forbes.com/sites/markminevich/2021/11/05/can-artificial-intelligence-save-america-from-the-global-supply-chain-disaster/?sh=6e7b97d6b693>.

ⁱⁱⁱ World Economic Forum. *An Additive Manufacturing Breakthrough: A How-to Guide for Scaling and Overcoming Key Challenges. Whitepaper*, January 2022, <https://www.weforum.org/whitepapers/an-additive-manufacturing-breakthrough-a-how-to-guide-for-scaling-and-overcoming-key-challenges>

^{iv} Voir l'initiative américaine AM Forward : <https://www.astroa.org/amforward>.

^v <https://diecasting.com/blog/die-casting-vs-3d-printing/>;

^{vi} <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/cnc-machining-3d-printing/>.

^{vii} Additive Manufacturer Green Trade Association – amgta.org; <https://aml3d.com/low-carbon-metal-3d-printing-with-wam/>; <https://www.americanmicroinc.com/resources/cnc-machining-3d-printing/>; <https://www.additivemanufacturing.media/articles/wire-arc-additive-manufacturing-delivers-low-buy-to-fly-ratios>;

<https://replique.io/2022/03/10/sustainability-of-3d-printing-across-the-supply-chain/>;

<https://replique.io/2022/03/31/prolonging-product-lifecycles-through-3d-printing/>;

^{viii} <https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development/what-is-esd/sd>;

<https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>;

<https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smart-mining-minerals-for-climate-action>

^{ix} <https://24x7mag.com/market-trends/additive-manufacturing-sustainable-manufacturing/>

^x<https://www.ge.com/news/reports/atomize-metal-powder-canadian-plant-will-fire-3d-printing-revolution>; <https://2094793.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/2094793/Tekna%20ESG%20Report%202021%20vFF.pdf>

^{xi} Roland Berger. *Sustainability in Additive Manufacturing. Current status and roadmap to transparent AM. A fair comparison of AM vs. Conventional manufacturing*, 2022, <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Sustainability-Is-Additive-Manufacturing-a-green-deal.html>.

^{xii} Wilson, J.M. et al. (2014). **[Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis](#)**, Journal of Cleaner Production 80, pp. 170-178.

^{xiii} Liu, Z.Y. et al. (2018). **[Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts](#)**, ScienceDirect, Procedia Manufacturing 26, pp. 834-845

^{xiv} <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71511.pdf>

^{xv} <https://www.futura-sciences.com/tech/questions-reponses/impression-3d-fabrication-additive-metallique-role-gaz-11525/> ; <https://fr.airliquide.com/solutions/fabrication-additive-impression-3d/de-la-production-de-la-poudre-metallique-son-recyclage-dans-la-fabrication-additive>; <https://sn.astm.org/?q=features/making-additive-manufacturing-safer-.html>.

^{xvi} <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/06/fact-sheet-biden-administration-celebrates-launch-of-am-forward-and-calls-on-congress-to-pass-bipartisan-innovation-act/>

^{xvii} Roland Berger – *Additive manufacturing. A new AM customer journey. New business models and comprehensive product innovation*, Nov. 2020