



FABRICATION ADDITIVE: UNE TECHNOLOGIE DE POINTE POUR APPUYER L'AVENIR DU SECTEUR MANUFACTURIER À MONTRÉAL

Présenté à:



Développement
économique
Montréal

***La Commission sur le
développement économique et
urbain et l'habitation***

Présenté par les membres suivants du Réseau Québec – 3D:

Monsieur Vladimir Brailovski, Titulaire de la Chaire de recherche de l'ÉTS

Madame Julie Paquin, présidente, PRO-Gestion

Madame Béatrice Guay Pepper, Coordinatrice du Réseau Québec – 3D, CRIQ

SEPTEMBRE 2016

PRÉFACE

Interpellé par la consultation de la *Commission sur le développement économique et urbain et l'habitation de Montréal* visant à appuyer le secteur manufacturier de la Ville, le Réseau Québec – 3D souhaite présenter les perspectives de la fabrication additive et ses enjeux.

Cette analyse repose sur les travaux des quatre comités consultatifs du Réseau en ce qui concerne le niveau d'avancement de la fabrication additive au Québec et les défis à franchir pour favoriser le virage 3D. De ce constat, il a été possible d'identifier certaines caractéristiques reliées à l'avenir du secteur manufacturier à Montréal.

La fabrication additive

On identifie la fabrication additive (FA), ou impression 3D, comme une technologie émergente dont l'impact d'innovation révolutionne les meilleures pratiques industrielles. Ce qui implique que toutes les étapes de production d'une pièce sont revues afin d'optimiser les qualités recherchées de ladite pièce, de son nouveau design à son évaluation de conformité.

Ainsi, une quarantaine d'intervenants en FA, membres des comités consultatifs du Réseau, ont contribué à une étude de « cas ouvert » québécois portant sur le *développement d'une pièce métallique en fabrication additive du secteur aéronautique*. La valeur de l'étude repose non seulement sur la mise en commun des diverses spécialités, mais également sur le partage de l'expérience de R & D avec une entreprise qui n'a pas hésité à dévoiler ce projet de recherche.

Une invitation à découvrir

Tout en permettant des retombées sur l'ensemble du Québec, les activités de la FA pourraient devenir un axe incontournable à l'innovation industrielle de Montréal et ainsi dynamiser le milieu manufacturier alors que des secteurs comme l'aéronautique et la santé sont déjà très actifs dans le domaine.

Pour bénéficier de l'apport d'une telle technologie innovante, les gouvernements, la recherche et les industriels doivent faire équipe afin de faire face à cet enjeu concurrentiel mondial.

Le Réseau Québec – 3D est heureux de présenter le profil de la fabrication additive aux membres de la Commission sur le développement économique et urbain et l'habitation et leur assure sa collaboration.

Bonne lecture,

TABLE DES MATIÈRES

1. BENCHMARKING INTERNATIONAL	3
Présentation.....	3
Technologies disponibles.....	3
Recommandations du comité.....	4
2. MISE EN PLACE DE LA CHAÎNE DE VALEUR.....	5
Présentation.....	5
Constats et recommandations du comité.....	6
3. FORMATION D’UNE MAIN-D’ŒUVRE HAUTEMENT SPÉCIALISÉE	7
Présentation.....	7
Formation au Québec.....	7
Recommandations du comité.....	7
4. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT : ÉTUDE DE CAS OUVERT	9
Objectif de l’étude	9
Processus.....	9
Préparation de poudre	9
Conception.....	10
Fabrication	11
Pressage isostatique à chaud et inspection.....	12
Électropolissage.....	12
Analyse microstructurale	13
Analyse dimensionnelle et géométrique	13
Coûts de production	14
Conclusions de l’étude de cas	14
5. CONSTATS ET PERSPECTIVES DE LA FABRICATION ADDITIVE	15
ANNEXE	18

1. BENCHMARKING INTERNATIONAL

Présentation

Afin de situer la position du Québec face à la fabrication additive, il importe que les organismes de recherche, les entreprises de produits et services offrant la technologie de fabrication additive ainsi que les sociétés intéressées à l'intégrer à leur plan d'affaires et à y recourir aient accès à un état de situation au Québec, au Canada et dans le monde. Les travaux du comité *Benchmarking* international ont consisté à recueillir un ensemble de connaissances issues des découvertes récentes, des solutions technologiques et des succès de la technologie.

Les secteurs de l'aérospatiale et du médical ainsi que les équipements d'impression, de design, de matériaux et autres ont été étudiés.

L'étude du processus de *Benchmarking* a permis au comité d'établir des points de comparaison et des indicateurs de performance afin de favoriser l'appropriation et l'utilisation de la fabrication additive. Ces travaux permettront de connaître le positionnement de Montréal en fabrication additive et, conséquemment, son avantage concurrentiel pour ses entreprises.

Technologies disponibles

La Norme internationale ISO/ASTM 52900 : 2015 normalise la terminologie relative à la fabrication additive et la définit comme toutes technologies de mise en forme par ajout de matière à partir d'un modèle 3D, par opposition aux technologies par enlèvement ou déformation de matière. Le but de cette normalisation de la terminologie est de faciliter la compréhension entre les personnes concernées par ce domaine technologique dans le monde entier. Plusieurs synonymes à la FA ont été proposés par la norme : technologies additives, fabrication par couche, procédés additifs, impression 3D, etc. On remarque également que l'impression 3D est souvent associée aux équipements de fabrication additive d'entrée de gamme, peu importe le procédé de mise en forme.

La norme regroupe les différentes technologies de fabrication additive en sept catégories [ISO/ASTM 52900:2015] et ce Tableau présente les principales sociétés de fabrication d'imprimantes 3D et leurs chiffres d'affaires en 2014 et 2015.

Compagnies	Unités vendues depuis 1990	Revenus (USD Million \$)		
		2014	2015	2016
Stratasys	41869	750	696	714
3D Systems	17792	654	666	678
EnvisioTech	5878	≈ 100	Non disponible	Non disponible
EOS	1762	195	296	Non disponible

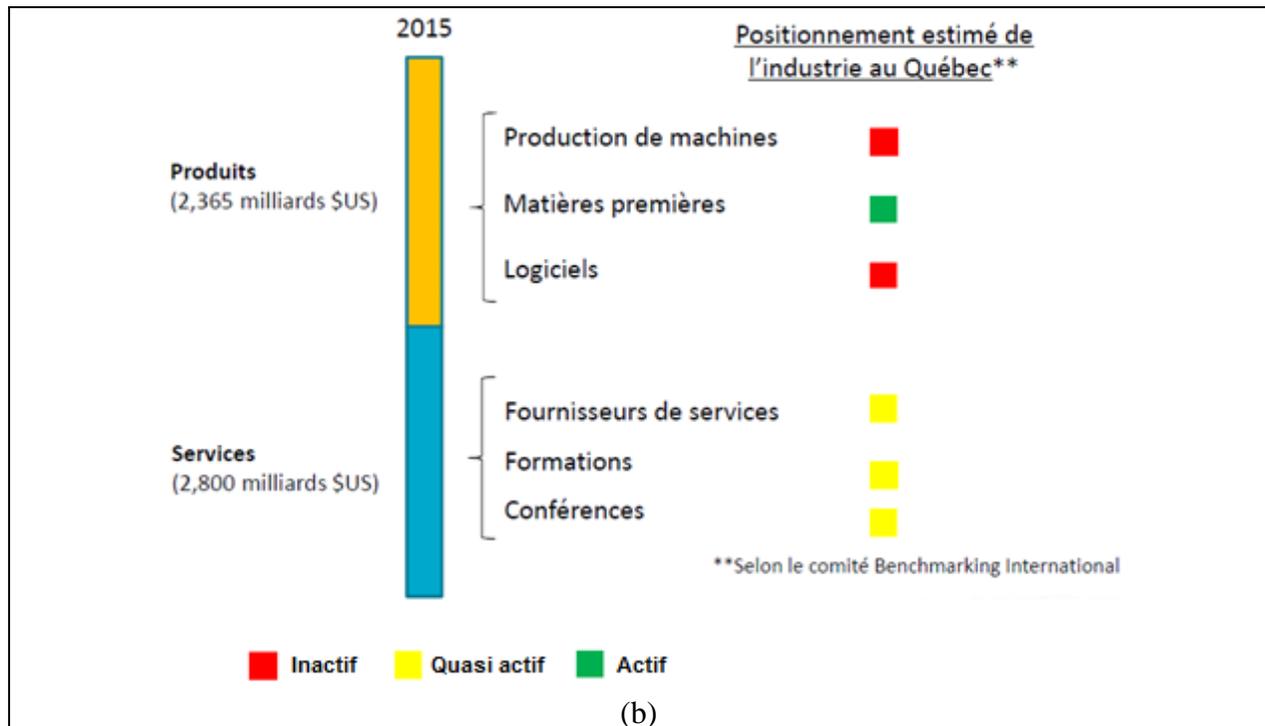
Technologies et principaux manufacturiers disponibles en fabrication additive [ISO/ASTM 52900]

Mentionnons que le Secrétariat canadien du comité de normalisation sur la FA a été confié au Bureau de normalisation du Québec (BNQ) qui relève du CRIQ; le président du Comité provient d'une entreprise aéronautique de Montréal. Le Comité participe ainsi à la table internationale d'ISO.

Positionnement du Québec par rapport au contexte mondial

Selon le rapport Wohler's 2016, une ressource en fabrication additive mondialement reconnue, le Canada compte environ 1,9 % des équipements comparativement à 38, 1% aux États-Unis. D'autre part, 17 % des industries au Canada utilisent des imprimantes 3D (Réf : La Presse affaire, 8 avril 2016).

Il est à noter que les données au Québec sont inexistantes!



*Executive summary of the Wohler's Report 2016. Fort Collins, Colorado: Wohler's)-
Positionnement estimé de l'industrie en FA au Québec*

Recommandations du comité

- Développer un portrait plus complet de la fabrication additive au Québec. La source des informations n'est pas assez locale et provient essentiellement des données américaines ou mondiales.
- Le site du Réseau Québec - 3D devrait identifier les fournisseurs locaux et les distinguer des fournisseurs externes à la province.
- Corriger les idées préconçues concernant l'impression 3D «d'entrée de gamme» versus la FA «de qualité».
- Favoriser l'excellence en FA auprès des industriels québécois souhaitant s'approprier la technologie, notamment par l'acquisition d'équipements pour leurs besoins internes de R & D ou dans leur processus d'approvisionnement de biens et services.

2. MISE EN PLACE DE LA CHAÎNE DE VALEUR

Présentation

Les travaux du comité ont porté sur l'identification de la chaîne de valeur en FA pour les entreprises québécoises tout en tenant compte des diverses étapes de production d'une pièce selon le processus de fabrication additive. La FA mobilise une chaîne de valeur industrielle complète au Québec : des fournisseurs de matière première, des fabricants de pièces, des techniciens, ingénieurs et concepteurs ainsi que des fournisseurs de services du post-traitement des pièces, du contrôle de la qualité, des essais fonctionnels et de plusieurs types d'analyses. La fabrication additive s'impose également dans les organismes publics de recherche ainsi que dans les centres de recherche universitaire et les centres collégiaux de transfert technologique. Or, il ressort que la majorité des organisations identifiées dans le processus de la chaîne de valeur en fabrication additive se situent dans la grande région de Montréal. Une enquête non exhaustive a permis de constater ce qui suit.

Chaîne de valeur de FA		Description	Offre de services à Montréal
1	Ingénierie de conception	Concevoir (modéliser) des pièces spécifiques en utilisant un logiciel CAO.	7
	Numérisation 3D	Utiliser un <i>scanner</i> 3D pour obtenir un modèle 3D d'une pièce existante.	
	Base de données de produit	Obtenir un modèle 3D à partir de modèles 3D disponibles d'une base de données.	
2	Modélisation	Modélisation 3D et simulation (propriétés mécaniques, transfert de chaleur, etc.).	7
	Optimisation de produit	Optimisation du produit dans le but d'améliorer ses propriétés globales.	
3	Matières premières; Recherche des sources	Définir le type de matériau utilisé pour la fabrication additive (plastique, métaux, alliages, etc.). Une qualité spécifique est requise selon l'application.	2
4	Équipement 3D	Équipement de fabrication additive. Seulement de l'impression 3D ou de l'équipement avec post-traitement intégré, caractérisation et métrologie	0
	Recherche des sources	Fait référence à un nombre de pratiques d'approvisionnement, visant à trouver, évaluer et engager les fournisseurs pour l'acquisition de biens et service.	
5	Prototypage	Réalisation d'un échantillon précoce ou modèle d'un produit construit pour tester un concept/procédé. Ce modèle sera répliqué ou utilisé pour apprendre et faire évoluer le produit.	5
	Optimisation de processus	Cyclée avec le prototypage, la modélisation et les étapes d'optimisation des produits, l'optimisation des processus vise à améliorer la qualité de la pièce et la fiabilité du processus de	

Chaîne de valeur de FA	Description	Offre de services à Montréal
	production. Les objectifs les plus courants sont de minimiser les coûts tout en maximisant le débit et/ou l'efficacité.	
6	Fabrication 3D Production de la ou des pièces	4
7	Traitement thermique Frittage, pressage isostatique à chaud (HIP), durcissement	4
	Usinage En utilisant les normes (pas spécifiquement liées à la 3D) des processus d'usinage comme le fraisage, le ponçage et le moulage. Les pièces sont usinées pour répondre aux exigences (dimensions, finition de surface, etc.)	6
	Traitement de surface Chimiquement ou physiquement	2
8	Métrologie Toutes méthodes impliquant des mesures théoriques et/ou pratiques, tolérancement, inspection et contrôle qualité	2
	Analyse non-destructive Faire une représentation de la forme (Rayon X, tomographie, microscopie, etc.).	6
	Essais fonctionnels Résistance des matériaux (résistance à la traction, la résistance en fatigue, la dureté, la ténacité, etc.).	10
9	Utilisation du client et entretien Utilisation standard des pièces produites et la maintenance éventuelle si nécessaire.	
10	Disposition; Recyclage Il n'y a pas vraiment de solution de traitement ou de recyclage pour des pièces provenant d'impression 3D, alors le procédé serait le même que pour des pièces machinées.	

Chaîne de valeur en FA : description et entreprises de la grande région de Montréal

Constats et recommandations du comité

Bien que l'offre en FA soit présente majoritairement dans la région Montréal, un appui est nécessaire:

Éléments positifs

- Un nombre important d'entreprises manufacturières, secteur transport et santé souhaitent un approvisionnement local en produits et services FA
- La diversité des services offerts à une entreprise voulant se procurer une pièce fabriquée en 3D est présente au Québec pour tous les types de fabrication; une concentration de ces entreprises de produits et services a été observée à Montréal
- Au plan du contrôle de la qualité, Montréal accueille une grande part des expertises : des CCTT, les centres de recherche universitaire – McGill, Université de Montréal, ÉTS, Concordia et les organismes publics de recherche appliquée – CRIQ, IREQ, CNRC PARI (bureaux du Québec).

Éléments négatifs

- L'offre relative aux travaux de finition et de traitement de surface n'est pas abondante.
- Le Québec n'est pas actif dans le développement d'imprimantes 3D.

3. FORMATION D'UNE MAIN-D'ŒUVRE HAUTEMENT SPÉCIALISÉE

Présentation

Les travaux du comité ont consisté à recueillir la liste des formations offertes des 3 niveaux d'enseignement ainsi que les programmes de perfectionnement pour les travailleurs en recherche d'emploi et voulant acquérir les connaissances nécessaires pour œuvrer dans le domaine de la FA soit :

- Les mesures de formation de la main-d'œuvre.
- Le soutien à l'adéquation formation-emploi dans les centres urbains et régionaux.
- La nécessité d'exiger que les intervenants individuels et organisationnels soient qualifiés en FA pour s'exécuter dans le domaine.
- La reconnaissance des compétences (certification, diplôme, etc.).
- Les formateurs.

Formation au Québec

Le comité a recensé les offres actuelles de formation de la main d'œuvre hautement spécialisée en FA métallique en les synchronisant avec le schéma scolaire du Québec à partir du troisième niveau d'enseignement collégial. L'information recueillie a été intégrée au niveau collégial (préuniversitaire et technique), aux niveaux universitaires (1^{er}, 2^e et 3^e cycles) ainsi qu'à la formation continue (service de perfectionnement offert par les établissements accrédités) ou encore à celle offerte par des entreprises/organisations du domaine.

Les résultats ont permis de constater que Montréal prédomine dans la formation FA.

Recommandations du comité

- Créer, développer, modifier et mettre à jour des cours de conception et de procédés de fabrication pour inclure la FA. À titre d'exemple, les cours doivent comprendre les avantages, les limites, la capacité, la productivité, l'analyse du cycle de vie incluant les coûts, les aspects environnementaux, les aspects éthiques de cette technologie.
- Faire connaître la FA et favoriser la publication des « *bons coups* » et des « *études de cas* » auprès des industriels!
- Concevoir et publier un guide pour les *bonnes pratiques* (ex. Guide du concepteur). Ce point nécessite un partage de l'information entre tous les intervenants (conférences, colloques, journée ouverte, etc.).
- Promouvoir la formation continue pour tenir à jour tous les intervenants (fournisseur, fabricant), sur :
 - ✓ Conception pour FA (produit, prototype et outillage);
 - ✓ Réparation et retouche en utilisant la FA;
 - ✓ Les post-procédés liés à la FA;
 - ✓ Méthodes de contrôle et caractérisation;
 - ✓ Sécurité et normes.
- Évaluer la création d'un nouveau programme de formation. Une réflexion doit être menée par les collèges, les universités et le MEES.

Chaîne de valeur de l'impression additive		Statut de la formation au Québec		À titre d'exemples									
		C : Cégep	U : Université										
		FC : Formation continue	E : Entreprise										
1	Ingénierie de conception	<table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>U</th> <th>FC</th> <th>E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-</td> <td>★</td> <td>-</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	C	U	FC	E	-	★	-		ÉTS : SYS862 McGill : MECH 548, MECH 465 UL : GML-6004		
	C		U	FC	E								
	-		★	-									
Numérisation 3D													
Base de données de produit													
2	Modélisation												
	Optimisation de produit												
3	Matières premières; Recherche des sources	Manutention des poudres : Cela inclut les règles de sécurité, SIMDUT, etc. Formation généralement fournie par le fabricant de l'équipement		Source : Wohlers report 2016									
	Équipement 3D	Procédé FA – 101 : Démystification, tour d'horizon, les avantages, les inconvénients, etc.		CRIQ - Mohawk College CMQ: La fabrication additive décortiquée ÉTS : MEC627 et ETS-Perfectionnement: FA: principes et technologies McGill : MIME645 UL : GML-4250									
4	Recherche des sources	<table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>U</th> <th>FC</th> <th>E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-</td> <td>★★ ★</td> <td>★★</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		C	U	FC	E	-	★★ ★	★★			
	C	U	FC	E									
-	★★ ★	★★											
Prototypage													
5	Optimisation de processus	Recherche niveau TRL 2 - 4+		<ul style="list-style-type: none"> • CARIC MANU-710 <i>Aerospace Additive Manufacturing Initiative</i> (McGill, Université Laval, ÉTS, Polytechnique) • Chaire de recherche sur l'ingénierie des procédés, des matériaux et des structures pour la FA (ÉTS) • <i>Electrochemical Green Engineering Group</i> (Concordia university) • <i>Innovative Design and Manufacturing</i> (ADML @ McGill) • <i>Powder Processing and AM of Advanced Materials</i> (McGill P2[AM]2) • Aussi, formation de stagiaires: Ex. le CMQ et Programme coopératif en génie métallurgique: prototypage avec équipement ExONE (projection de liant) et de la LENS (dépôt de métal sous énergie concentrée) 									
	Fabrication 3D	Suivi du procédé Encore une fois, une partie est fournie par l'équipementier, sinon, c'est de la recherche.											

Résultats de l'évaluation (avant post-procédés)

4. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT : ÉTUDE DE CAS OUVERT

Objectif de l'étude: Cette étude de « cas ouvert » a pour objectif d'illustrer les étapes essentielles de la démarche d'application de la chaîne de valeur de la FA en commençant par l'identification d'une pièce appropriée jusqu'à sa fabrication, et ce, dans un but d'information et de partage des connaissances avec la communauté industrielle et le public, en général. Le projet a permis également d'identifier les éléments à améliorer en ce qui a trait à la formation et au Benchmarking, facilitant ainsi l'implantation des technologies de la FA métallique dans l'industrie québécoise. La FA métallique a été choisie comme procédé permettant la fabrication de produits à haute valeur ajoutée tout en offrant un nombre appréciable de défis technologiques.

Processus: Cette étude débute par la rédaction d'un cahier des charges qui comprend la sélection d'une pièce candidate pour la FA, les chargements qui devront y être appliqués, le matériau visé et les autres exigences. La deuxième étape est l'optimisation et la modélisation de la pièce permettant de diminuer sa masse tout en s'assurant de sa résistance mécanique adéquate. Une fois le modèle terminé, la pièce est fabriquée en utilisant les technologies de FA métallique qui sont accessibles au Québec. Ensuite, le produit subit un traitement thermique, un traitement de pression isostatique à chaud et les traitements de finition comme l'usinage et l'électropolissage. L'étude se termine par l'analyse microstructurale de la pièce, le contrôle non destructif de son intégrité, l'analyse métrologique et l'analyse de coûts (Figure 1).

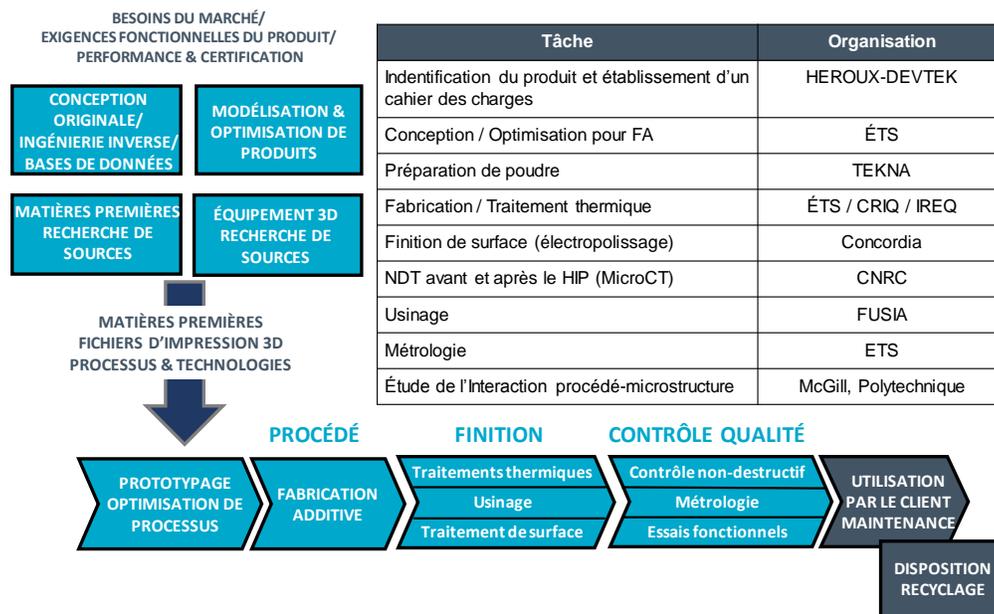


Figure 1: Chaîne de valeur en fabrication additive de l'étude de cas ouvert

Préparation de poudre: Les technologies de FA disponibles commercialement pour la production de composants métalliques utilisent presque exclusivement des poudres comme matière première. Pour qu'une poudre puisse être qualifiée dans un procédé de FA, elle doit répondre à de hauts standards de qualité non seulement en termes de composition chimique des particules, mais aussi en termes de distribution de taille, de morphologie et de densité. Ce sont les poudres sphériques qui sont préférées aux procédés de FA, car elles permettent d'améliorer les performances en service (minimisation de défauts de

fabrication) et les performances de procédé (réduction du nombre de rejets), tout en favorisant la reproductibilité des résultats d'une pièce à l'autre. La Figure 2 montre des images typiques obtenues par MEB de la poudre sphérique de Ti-6Al-4V produite par Tekna et employée dans ce projet.

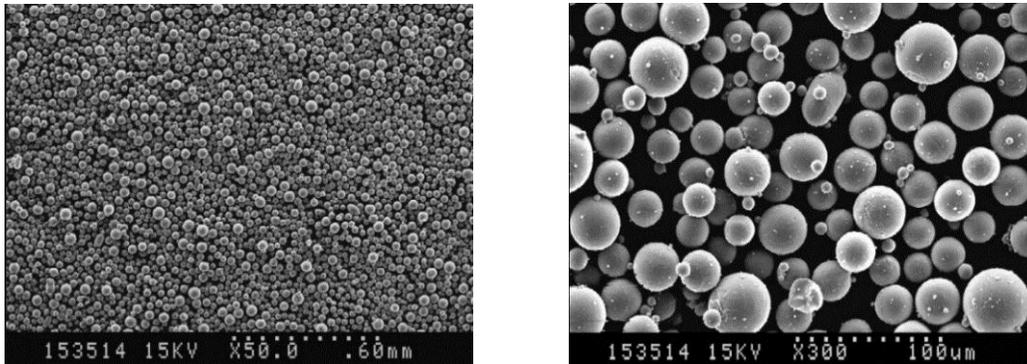


Figure 2: Morphologie de la poudre de Ti-6Al-4V utilisée dans le cadre de l'étude de cas (R. Dolbec, Tekna)

Conception: Héroux-Devtek, une compagnie qui se spécialise dans la conception, la mise au point, la fabrication ainsi que la réparation et l'entretien de systèmes et de composants de trains d'atterrissage a proposé une pièce de train d'atterrissage pour l'étude. La pièce initialement produite en aluminium devait être adaptée pour la fabrication additive par fusion sur lit de poudre en utilisant l'alliage de titane qui possède des propriétés mécaniques plus intéressantes.

Dans le cadre de cette étude de cas, un effort a été fait pour concevoir et fabriquer une pièce plus légère tout en offrant la résistance mécanique et la rigidité adéquates. Une optimisation topologique sur l'enveloppe de conception suggérée par Héroux-Devtek a été réalisée. Cette étape a permis d'identifier les endroits où il était nécessaire de conserver du matériau et où il était possible d'en retirer. Suite à l'optimisation topologique, des étapes supplémentaires ont été nécessaires pour concevoir une pièce qui respecte le cahier des charges défini. En effet, les cinq étapes présentées à la Figure 3 ont permis d'optimiser la résistance de la pièce tout en offrant une réduction de masse de 7%.

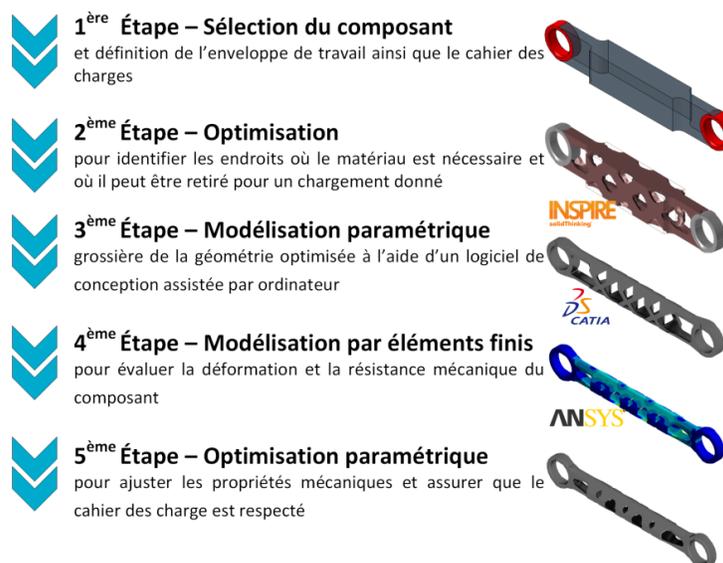
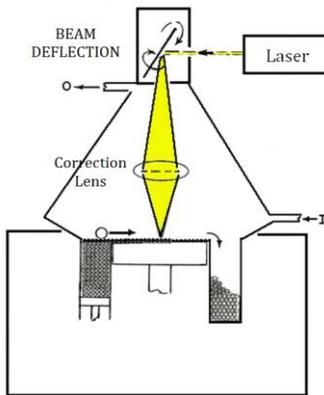


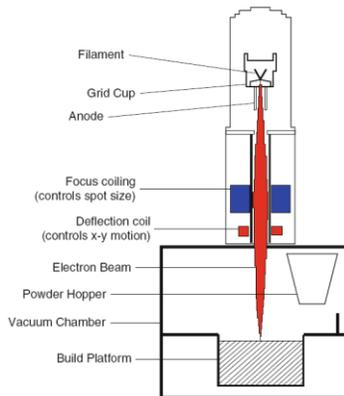
Figure 3: Processus de conception (A. Divialle, C. Trudel (Heroux-Devtek), M. Dumas, A. Timercan (ETS))

Fabrication: Un certain nombre d'équipements de FA sont disponibles au Québec, dans les centres de recherche industriels et universitaires, ainsi que dans l'industrie : le procédé de fusion laser sur lit de poudre (*Selective Laser Melting* ou SLM), le procédé de fusion par balayage d'électrons (*Electron Beam Melting* ou EBM) et le procédé de fabrication par dépôt sous énergie concentrée (*Direct Energy Deposition*, DED) (Figure 4). Les documents numériques contenant la représentation 3D de la pièce à fabriquer ont été envoyés à chacun des intervenants, soit l'ÉTS, le CRIQ, l'IREQ et le CMQ. A titre d'exemple, la pièce fabriquée par le procédé SLM est présentée à la Figure 5)

SLM (EOS M280-M290)



EBM (Arcam)



DED (Optomec)

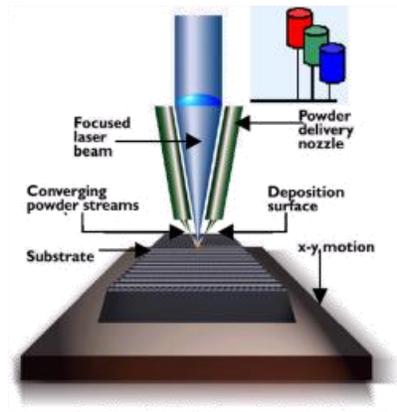


Figure 4 : Les équipements utilisés dans le cadre de l'étude: a) SLM: EOS M280 (C. Simoneau, ETS), EOS M290 (D. Lepine, CRIQ); b) EBM: Arcam A2X (E. Lavoie, IREQ); c) DED: Optomec LENS 450 (A. Bois-Brochu, CMQ)



Figure 5: La pièce fabriquée par le procédé DED (A. Bois-Brochu, CMQ)

Pressage isostatique à chaud et inspection: Le pressage isostatique à chaud, communément appelé HIP (*Hot Isostatic Pressing*), et la microtomographie à rayons-X (μ CT) sont deux techniques très utiles pour le conditionnement et l'analyse de pièces produits par FA. Le HIP permet de refermer les cavités internes et les microporosités en plus des effets habituels d'un traitement thermique standard, améliorant grandement la résistance en fatigue de la pièce. La microtomographie à rayons-X, tant à elle, permet d'analyser la structure d'un échantillon et reconstituer une image en trois dimensions. La Figure 6 présente une reconstruction 3D de la zone inspectée par μ CT (Figure 6 a) et une représentation des pores présents (Figure 6 b). La Figure 6 montre la porosité et la distribution de pores dans la zone inspectée pour les trois technologies utilisées, avant et après HIP. Dans l'ensemble, les taux de porosité obtenus pour les trois pièces avant HIP sont tous inférieurs à 0.1%. Après avoir traité les trois pièces au HIP, la porosité totale a systématiquement diminuée ($< 0.01\%$).

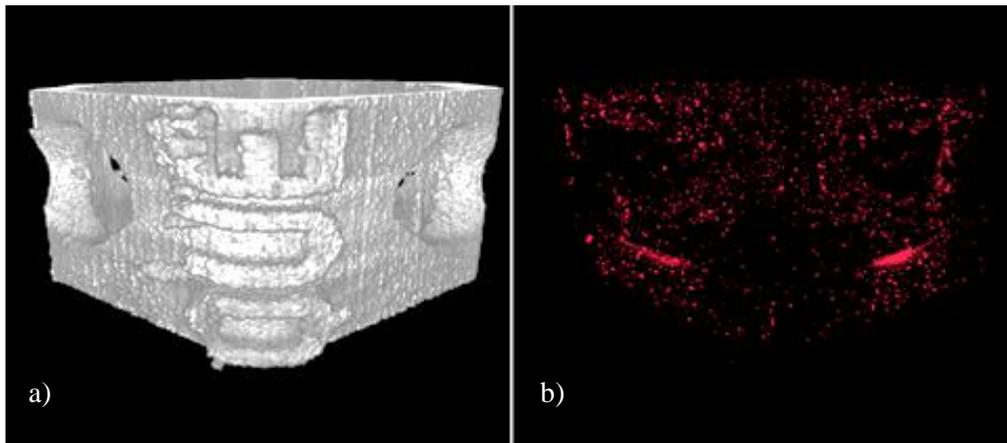


Figure 6: a) Représentation en 3D de la zone inspectée par microtomographie au rayons-X pour la pièce fabriquée par EBM (Arcam); b) reconstitution de la porosité détectée dans cette zone (M. Martin, NRC Canada).

Électropolissage: Un des défis limitant l'adoption de la fabrication additive est le fini de surface généré sur les pièces fabriquées qui peut affecter les propriétés mécaniques de celles-ci. Dans le cadre de l'étude de cas, l'électropolissage, dont le procédé est schématiquement présenté à la Figure 7 a), a été utilisé comme stratégie pour améliorer le fini de surface (diminuer la rugosité) des pièces fabriquées par SLM ou EBM. La Figure 7b) présente la rugosité de a de la pièce avant et après électropolissage.

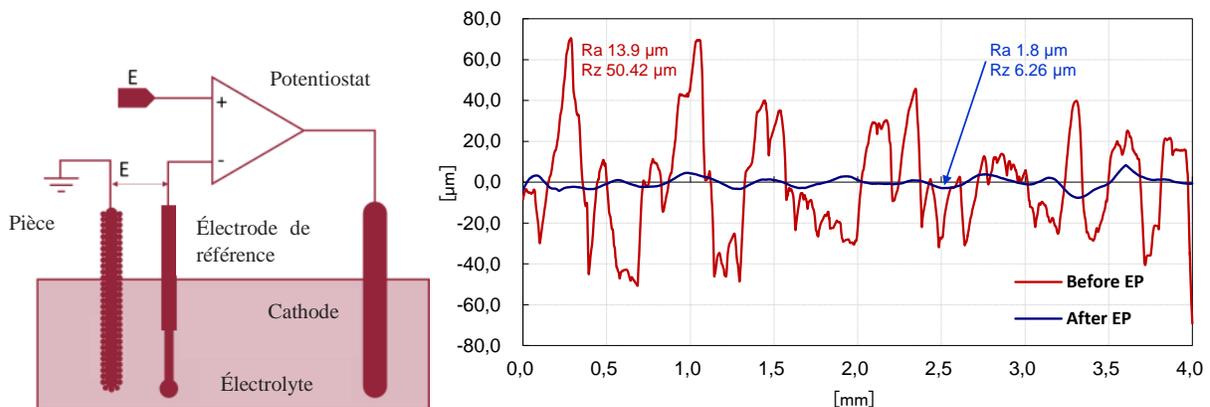


Figure 7: a) Schéma du procédé d'électropolissage b) résultats d'analyse de rugosité avant et après électropolissage de la pièce produite par SLM (R. Wulthrich, L. Hof, M. Rahman)

Analyse microstructurale: La microstructure des pièces produites par fabrication additive est fortement influencée par les conditions de déposition de matière associées à la fusion localisée de poudres métalliques par le faisceau laser (SLM). Quel que soit l’alliage utilisé, la formation des grains à l’échelle macroscopique répond à une structure typique qui conditionne les propriétés mécaniques. Dans la pièce partagée en commun par tous les membres de l’équipe à la base de la présente étude, les microstructures ont été observées en différents points de la pièce tel que montré à la Figure 8. La pièce a été produite avec un axe de croissance tel qu’indiqué par la flèche. On voit clairement la structure de grains allongés dans le sens de la croissance, quel que soit l’orientation de la surface qui délimite la pièce. Ces observations indiquent que l’orientation de la pièce lors de la FA influence sa microstructure et, par conséquent, ses propriétés mécaniques en service.

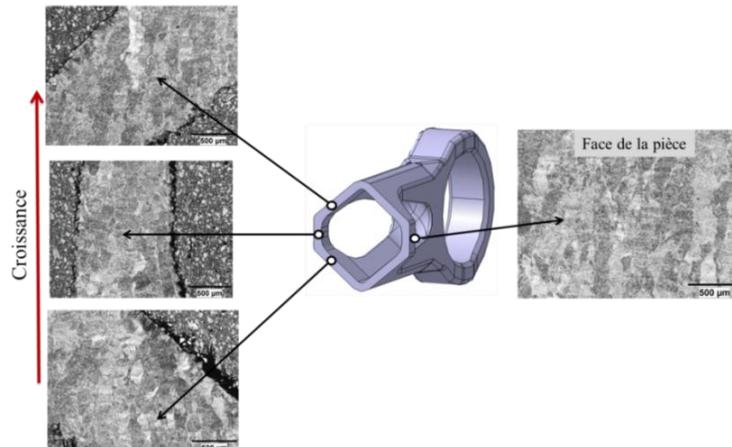


Figure 8: Microstructure observée à trois endroits de la pièce (M. Brochu, McGill et S. Turenne, Polytechnique)

Analyse dimensionnelle et géométrique: Dans le but d’assurer le contrôle métrologique (dimensionnel et géométrique) des pièces imprimées par les quatre fabricants de l’étude, une numérisation par scan de chacune des pièces, avant tout un procédé de finition, a été capturée à l’ÉTS. La Figure 9 montre les déviations en code de couleur entre le composant numérisé et le modèle initial. 96 % des points numérisés pour les pièces SLM sont à l’intérieur de $\pm 3\sigma = \pm 0.55$ mm du modèle CAD correspondant. 97 % des points numérisés pour la pièce DED sont à l’intérieur de $\pm 3\sigma = \pm 0.65$ mm du modèle CAD correspondant. 98 % des points numérisés pour la pièce EBM sont à l’intérieur de $\pm 3\sigma = \pm 0.34$ mm du modèle CAD correspondant.

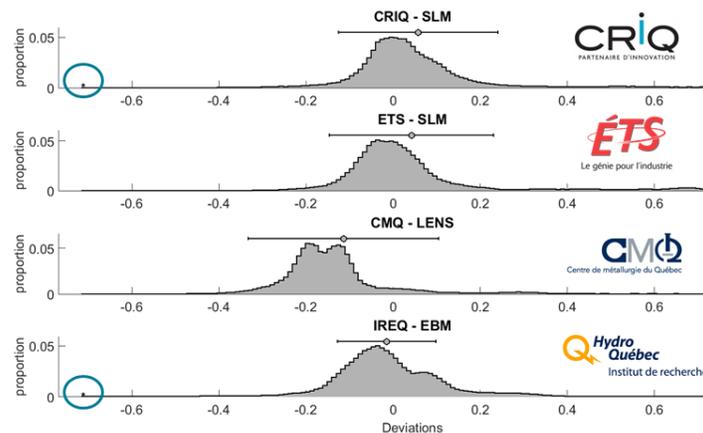


Figure 9: Histogramme des déviations – Dimensions en mm (A. Tahan et A. Aidibe, ETS)

Coûts de production: Dans le but d'évaluer le coût de ce composant de train d'atterrissage, une analyse des coûts a été effectuée en prenant en compte les divers paramètres de la fabrication additive (Figure 10). Le coût unitaire d'une pièce de train d'atterrissage a alors été évalué à 425\$. L'évaluation a été faite pour une plaque de fabrication comprenant huit pièces de train d'atterrissage. Notez que cette analyse a été effectuée en utilisant les données d'utilisation d'une machine EOS-M280 dans un milieu de recherche, ce qui n'est pas représentatif du milieu industriel où les équipements sont utilisés à pleine capacité afin de maximiser la productivité. En contrepartie, les coûts d'opérations dans un milieu industriel sont généralement plus élevés, compte tenu des coûts élevés de la main d'œuvre ainsi qu'aux coûts indirects (qualité, certification, etc).

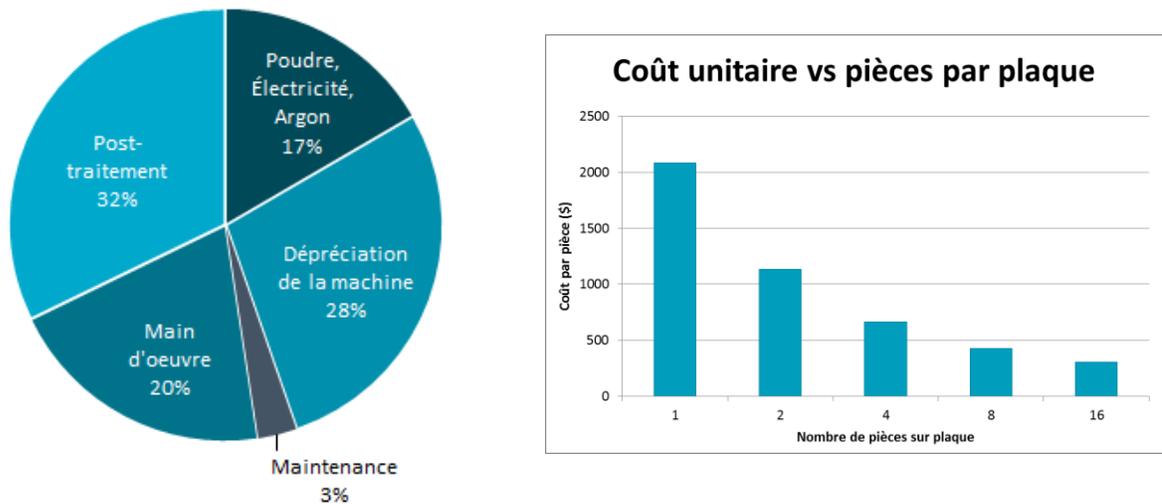


Figure 10: Structure des coûts (gauche); Coût unitaire en fonction du nombre de pièces sur la plaque (droite)

Conclusions de l'étude de cas: La présente étude de cas a démontré les étapes essentielles de l'application de la chaîne de valeur pour la FA. Au début, les propriétés essentielles d'une poudre servant à la FA ont d'abord été présentées. Un composant aéronautique bien adapté à la FA a été identifié et optimisé. S'en est suivi la description d'une approche d'o. Ensuite, la fabrication de la pièce a été réalisée par trois procédés de la FA: la fusion laser sur lit de poudre, la fusion par faisceau d'électrons ainsi que le dépôt sous énergie concentrée. Par la suite, le pressage isostatique à chaud a permis d'uniformiser et de réduire la porosité des pièces fabriquées par les différents procédés. L'électropolissage a permis, pour sa part, d'améliorer le fini de surface. Une analyse dimensionnelle et géométrique a ensuite permis d'évaluer que les déviations géométriques pour les pièces fabriquées par les trois procédés. À l'aide de l'analyse microstructurale, il a aussi été possible d'examiner la microstructure dans la pièce fabriquée par fusion laser sur lit de poudre. Finalement, une analyse des coûts a permis d'estimer le prix unitaire d'une pièce fabriquée par ce même procédé à 425 \$.

5. CONSTATS ET PERSPECTIVES DE LA FABRICATION ADDITIVE EN APPUI AU SECTEUR MANUFACTURIER DE MONTRÉAL

CONSTATS : FAITS SAILLANTS

	Observations des comités	Éléments nécessitant une amélioration
Principales parties prenantes de la FA	<p>Le Québec voit apparaître un ensemble d'intervenants intéressés par la mise en place de la fabrication additive (FA) tels que :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les entreprises en quête de solutions technologiques innovantes • les entreprises fournisseurs de produits et services • les unités de recherche et développement universitaires • les centres collégiaux de transfert de technologie • les centres publics de recherches et certains consortiums • les spécialistes de la technologie participant au développement de l'axe normatif (ISO) de la FA • les ministères visés • les journalistes spécialisés • le public en général 	<p>On note toutefois que les entreprises «clientes» à la recherche de solutions technologiques ne savent pas exactement où retrouver les sources d'information proposant des références ainsi que des produits et services fiables.</p>
Position du Québec en FA <i>Benchmarking</i>	<p>Le Québec et plus précisément Montréal affiche un marché croissant d'applications soutenant les technologies de la FA métallique, surtout dans le domaine aérospatial. Notons aussi un intérêt important dans les autres secteurs industriels : plasturgie (fabrication de moules et buses d'injection), mécanique générale (outillage), etc.</p>	<p>Le Québec affiche un retard comparativement au Canada alors que l'Ontario et la Colombie Britannique dominant actuellement le secteur. L'écart s'agrandit davantage face à l'avancement de la technologie aux États-Unis et surtout, en comparaison avec les pays de l'Union européenne.</p> <p>De façon générale, les sources d'information en FA ne sont pas québécoises; celles-ci proviennent essentiellement de données américaines ou mondiales.</p>

<p>Fournisseurs du Québec en FA</p> <p><i>Chaîne de valeur</i></p>	<p>Le Québec, notamment Montréal, abrite une grappe naissante de compagnies privées qui offrent déjà des produits et services en FA. Cette activité commerciale explique le processus actuel de mise en place d'une chaîne d'approvisionnement.</p>	<p>L'offre de produits et services québécois est insuffisante. Actuellement, des entreprises internationales provenant principalement des États-Unis et d'Europe assurent l'approvisionnement des entreprises québécoises ce qui comprend aussi l'achat d'équipements spécialisés en FA.</p> <p>Ainsi, la demande des entreprises québécoises et de Montréal est essentiellement orientée sur les marchés mondiaux.</p>
<p>Compétences en FA</p> <p><i>Formation</i></p>	<p>Il existe déjà une certaine offre de cours au niveau de la formation universitaire (1, 2, 3e cycles) et de la formation continue aux travailleurs déjà en poste.</p> <p>Ces cours visent l'acquisition des connaissances pour la réalisation de l'une ou l'autre des nombreuses étapes de production de la FA, du design d'une pièce à son post-traitement. Les enseignements en FA demeurent toutefois hautement spécialisés et leur contenu traduit la continuité des activités de la recherche et développement universitaire et collégial.</p> <p>La formation qui touche les étapes de post-procédés est assez couverte.</p>	<p>La formation s'avère l'un des piliers favorisant l'utilisation et l'appropriation de la FA par l'ensemble des parties prenantes.</p> <p>Malgré ces quelques percées réussies au collégial et à l'université, l'offre de formation est nettement insuffisante pour répondre aux besoins des entreprises souhaitant ajouter cette technologie à leurs stratégies de développement et prendre le virage de l'innovation.</p> <p>De surcroît, l'offre de formation est nettement insuffisante pour fournir une nouvelle main d'œuvre hautement spécialisée dans le domaine et pouvant contribuer à l'adoption et à l'adaptation des technologies émergentes de la FA par les entreprises.</p>
<p>La R & D pour l'industrie</p> <p><i>Recherche et développement</i></p>	<p>Les unités de R & D universitaires et collégiales ainsi que les centres publics de recherche se situent au centre de l'appropriation des connaissances et de l'expertise nécessaire afin de permettre l'intégration des technologies de la FA aux meilleures pratiques industrielles québécoises.</p> <p>L'ÉTS demeure la seule institution ayant créé une Chaire de recherche universitaire en fabrication additive.</p>	<p>Le secteur industriel, les instances gouvernementales ainsi que la population en général connaissent très peu les enjeux technologiques, économiques et environnementaux liés à la réussite de la mise en œuvre de la FA.</p> <p>Les partenariats de R & D réunissant le secteur industriel et la recherche sont essentiels : il importe d'en encourager la croissance.</p> <p>L'importance d'associer la R & D et les besoins en innovation des entreprises est largement documentée. Au Québec, il ressort que certains secteurs industriels comme celui de l'aéronautique ont réussi à établir des liens efficaces avec le milieu de la R & D.</p>

PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT DE LA FA

1. **Benchmarking**

Se doter d'un tableau de bord québécois dans le but d'améliorer la performance de l'ensemble des parties prenantes : suite à la réalisation d'un plan d'action, les résultats seront évalués selon des paramètres comparables à des marchés concurrents.

2. **Chaîne de valeur**

Créer un portrait complet du potentiel de transformation que la fabrication additive peut offrir à l'industrie québécoise et identifier les principaux donneurs d'ordre, les fournisseurs de produits et services et les spécialistes dans le domaine.

3. **Formation**

Appuyer la continuité du développement de l'offre de formation à tous les niveaux d'enseignement:

- a. En favorisant un cursus ordonné en FA auprès des collèges, universités et MEES pour inclure les aspects technologiques, économiques, éthiques, normatifs, légaux et environnementaux qui sont en rapport avec la FA.
- b. En faisant la promotion de la formation continue afin que tous les intervenants de la FA, fournisseurs de service et donneurs d'ordre, maintiennent leurs connaissances à jour dans le domaine par des attestations reconnues de formation continue.

4. **Recherche et développement**

Créer le Pôle d'excellence en FA au Québec en encourageant les partenariats et les projets de recherche et développement entre les entreprises donneurs d'ordre, les entreprises-fournisseurs de produits et services et les universités/ CCTT/Centres publics de recherche:

- a. En instaurant la mise en commun de ressources professionnelles et matérielles déjà existantes ainsi que la création de bureaux de service locaux pour en faciliter la réalisation.
- b. En étant informé des sources de financement public en R & D provenant notamment des ministères visés et de consortiums de recherche périphériques à la FA.

5. **Réflexe innovation**

La fabrication additive ou impression 3D s'impose progressivement non seulement dans le manufacturier mais également en transport et dans la sphère médicale (chirurgie, prothèses, médecine dentaire, etc). Par ailleurs, il est fort probable que de nouveaux produits réalisés en FA permettront des avancées dans d'autres secteurs d'activités et s'avéreront d'intérêt pour tous:

- a. En assurant une veille permettant de développer une vision globale sur l'impact de la FA dans l'innovation industrielle.
- b. En étudiant l'aide financière possible de l'État dans l'acquisition d'équipements de la FA
- c. En évaluant les résultats souhaités de la FA dans une perspective de développement durable soit sous les angles économique, social et environnemental.

6. **Information**

Favoriser une diffusion stratégique de l'information sur la technologie FA, ses succès, etc.

7. **Mobilisation**

Encourager une mobilisation ordonnée des parties prenantes par une information interactive:

- a. En démystifiant la FA vis-à-vis les parties prenantes ainsi qu'auprès des jeunes et des travailleurs d'expérience à la recherche de nouveaux défis professionnels et de formation de pointe;
- b. En favorisant la diffusion des «bons coups», des «études de cas», des efforts de normalisation ainsi que des gains de performance en FA au Québec;
- c. En organisant des événements de partage de l'information : conférences, colloques, journées, etc.
- d. En développant et en faisant connaître les activités du Pôle d'excellence en FA au Québec.

ANNEXE

LES COMITÉS CONSULTATIFS DU RÉSEAU QUÉBEC – 3D :

Comité Benchmarking international

Éric Lavoie, chargé de projet, Institut de Recherche Hydro-Québec (HQ)

Comité Mise en place de la chaîne valeur

Julie Paquin, présidente, Pro Gestion

Comité Formation d'une main d'œuvre hautement spécialisée

Linda Neault, professeure, Cégep de Trois-Rivières; Antoine Tahan, professeur et Ali Aidibe, chercheur postdoctoral, ÉTS

Comité Recherche et Développement

Vladimir Brailovski, professeur et titulaire, Chaire en fabrication additive, ÉTS

Réseau Québec – 3D

Béatrice Guay Pepper, coordonnatrice - CRIQ

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons saluer la contribution de l'ÉTS et du CRIQ qui ont permis la production de la présente publication.

La réalisation du Rapport a été prise en charge par monsieur Vladimir Brailovski, Titulaire de la Chaire de recherche de l'ÉTS qui a été assisté dans ce travail par Messieurs A. Adibe, M. Dumas et A. Timercan également de l'ÉTS ainsi que par Béatrice Guay Pepper, coordonnatrice du Réseau Québec - 3D.

REMERCIEMENTS ET GRATITUDE À L'ÉGARD DES MEMBRES BÉNÉVOLES DES QUATRE COMITÉS CONSULTATIFS

Benchmarking International - Coordonnateur : Éric Lavoie, Institut de recherche HQ (IREQ)

Alexandre Bois-Brochu, ingénieur R&D	CMQ
Louis Brassard, conseiller, développement industriel	MESI
Jean-Philippe Carmona, co-fond. dir. opér.	Caboma
Cyrille Chanal, PDG	Fusia
Arnaud Divialle, chef d'équipe, R&T	Héroux-Devtek
Sylvie Doré, prof. génie mécanique	ÉTS
Martin Joncas, conseiller, développement industriel	MESI
Vincent Trépanier, D=dir. ventes	3DPRO

Mise en place de la Chaîne de valeur - Coordonnatrice : Julie Paquin, PRO-GESTION

Jean-François Audy, prof. École gestion	UQTR
Benoit Balmana, dir. général	Prima Québec

Richard Bruno, prés.	BIC Corp.
Hugo Contant, prototypage	Groupe A & A
Gabriel Doré, étudiant maîtrise	HEC
Mathieu Fagnan, coord. projet tech.	Pratt & Whitney Canada
Loick-Alexandre Gauthier, cons. tech & innovation	Prima Québec
Nicolas Giguère, dir. alliages avancés	CMQ
Steve Nadeau, dir. général	Moulexpert
Sylvain Poirier, design ind.	INEDI
Luis Antonio de Santa-Eulalia, prof. faculté administration	Université de Sherbrooke

Formation d'une main-d'œuvre spécialisée – Coordonnatrice : Linda Neault, Cégep, Trois-Rivières

Mathieu Bolduc, dir. régional	MACHINE TOOL SYSTEMS
Jacob Lavigne, étudiant – chirurgie expérimentale	Université MCGILL
Linda Neault, prof.	Cégep de Trois-Rivières
Danielle Pepin, coor. Section Métallurgie	MEIE, Trois-Rivières
Sophie Riendeau, présidente et dév.	Model3D
Antoine Tahan, prof. Titulaire	ÉTS
François Thibault, prés.	COFAMEK

Comité : Recherche et développement - Coordonnateur : Vladimir Brailovski, ÉTS

Eric Barnett, stagiaire post-doc. – génie mécanique	Université Laval
Mathieu Brochu, prof. - génie mécanique	Université McGill
Samuel Côté, président	Troadey
Richard Dolbec, dir. R & D	Tekna Plasma Systems
Lucas Hof, étudiant doctorat	Université Concordia - COO EGE Group
Gheorghe Marin, dir. général	CMQ
Cristina Marquez, cons. tech.et innovation	Prima Québec
Manuel Martin, agent de recherches	CNRC - Fabrication additive
François Richard, ing.de projets	Pratt & Whitney
Stéphane Rouillon, ag. dév. de partenariats	Centre de recherches mathém. (CRM) - Université de Montréal
Pieter Sijpkens, prof. associé	Faculté d'architecture - Université McGill
Patrick Terriault, prof. génie mécanique	ÉTS
Carl Trudel, ing.de projets R & T	projet - train d'atterrissage - Héroux Devtek