

Sous la direction scientifique de
Nathalie de Marcellis-Warin – Benoit Dostie
Sous la coordination de
Genevieve Dufour

Le Québec **9** économique

**Perspectives et défis
de la transformation
numérique**

Chapitre 18

**L'ÉROSPATIALE NUMÉRIQUE
AU QUÉBEC : UN ÉCOSYSTÈME INNOVANT
AU CŒUR DES ENJEUX DE LA SOCIÉTÉ**

**FABIANO ARMELLINI, CATHERINE BEAUDRY,
MARIO BOURGALT, PATRICK COHENDET,
LAURENT SIMON, LAURENCE SOLAR-PELLETIER,
NASRIN SULTANA, EKATERINA TURKINA**

Chapitre 18

L'AÉROSPATIALE NUMÉRIQUE AU QUÉBEC

Un écosystème innovant au cœur des enjeux de la société

Fabiano Armellini

Professeur agrégé à Polytechnique Montréal

Mario Bourgault

Professeur titulaire à Polytechnique Montréal et titulaire de la Chaire de recherche industrielle Pomerleau sur l'innovation et la gouvernance des projets de construction

Laurent Simon

Professeur titulaire à HEC Montréal

Nasrin Sultana

Assistante de recherche à HEC Montréal

Catherine Beaudry

Professeure titulaire à Polytechnique Montréal, titulaire de la Chaire de recherche du Canada sur la création, le développement et la commercialisation de l'innovation, et chercheuse et fellow au CIRANO

Patrick Cohendet

Professeur titulaire à HEC Montréal, et chercheur fellow au CIRANO

Laurence Solar-Pelletier

Gestionnaire de projet pour la Chaire Innovation et le Groupe de recherche en gestion et mondialisation de la technologie à Polytechnique Montréal

Ekaterina Turkina

Professeure agrégée à HEC Montréal, chercheuse et fellow au CIRANO

Résumé

L'industrie aéronautique poursuit sa croissance de façon très marquée avec près de 7,8 milliards de passagers annuels attendus d'ici 2036, par rapport à 4,3 milliards en 2018 (International Air Transport Association, 2016; International Civil Aviation Organization, 2019). Cette industrie, qui avait des perspectives favorables avant la pandémie de COVID-19, fait et fait toujours face à d'importants défis, tels que le besoin de limiter son impact environnemental et de maîtriser les coûts énergétiques, l'augmentation des exigences de sécurité de même que la difficile anticipation des

besoins et des standards de consommation des futures générations de consommateurs. Le virage numérique en cours est porteur d'immenses occasions de répondre à ces défis, non seulement par sa capacité d'accroître la productivité et de mettre en œuvre de nouvelles manières de travailler, mais surtout pour son potentiel considérable d'innovations de rupture. Ce chapitre¹ propose une revue des tendances actuelles de transformation numérique en aérospatiale ainsi qu'un aperçu de la façon dont l'écosystème de l'aérospatiale québécois s'adapte à ce nouveau contexte technologique.

Introduction

Par la complexité des produits qu'elles conçoivent et produisent, les entreprises de l'industrie aérospatiale œuvrent dans un environnement marqué par un niveau très élevé de risque et d'incertitude. S'ajoutent à cela des facteurs contextuels comme une demande croissante, des délais de plus en plus courts, des valeurs sociétales changeantes (l'environnement, la consommation, etc.). Pour réussir dans ces circonstances, les entreprises du secteur de l'aérospatiale sont plus que jamais convaincues de l'importance d'innover. Toutefois, les innovations résultent de moins en moins d'une seule bonne idée, mais plutôt celui d'activités imbriquées qui émergent de la collaboration d'un ensemble d'acteurs : concepteurs, producteurs, fournisseurs, clients, usagers finaux, et même des concurrents. Certes, ce modèle d'innovation axée sur les réseaux (*network-driven innovation*) existe depuis longtemps, mais la vague actuelle de transformation numérique semble ouvrir la voie à une intensification de la collaboration au sein de l'industrie.

Comme toutes celles qui se sont succédé depuis près de 50 ans, la génération actuelle des technologies numériques (comprenant notamment la science des données massives, l'intelligence artificielle et l'Internet des objets) offre de multiples occasions d'accroître la productivité et de mettre en œuvre de nouvelles manières de travailler. Tout comme le furent l'introduction de l'ordinateur ou l'arrivée d'Internet à d'autres époques, on peut sans doute affirmer que la vague actuelle présente un potentiel considérable

d'innovations de rupture, tant sur les plans technique (nouveaux systèmes) ou industriel (nouvelles façons de structurer la chaîne de valeur) que commercial (nouveaux modèles d'affaires).

Par ailleurs, les technologies numériques émergentes présentent l'avantage de se combiner assez naturellement entre elles, contribuant à amplifier leur impact industriel et économique, tout en facilitant la collaboration intra- et extra-organisationnelle par le partage de données. Afin de pouvoir bénéficier de ces avantages technologiques, les entreprises doivent adopter de nouvelles formes d'organisation industrielle. L'OCDE (2019a) a souligné, par exemple, l'impact des plateformes en ligne qui contribuent à la collaboration facilitant les échanges entre les particuliers (pair à pair, P2P) ou entre les entreprises (entreprise à entreprise, B2B), réduisant les frictions et contribuant à la structuration des écosystèmes.

Il semble donc acquis que l'adoption des nouvelles technologies numériques génère une possibilité, voire une obligation, de repenser les écosystèmes d'innovation par les organisations, et le secteur aérospatial n'y fait pas exception. Afin d'alimenter cette réflexion, ce chapitre se divise en deux grandes parties. Dans un premier temps, les éléments du virage numérique dans le secteur aérospatial et les tendances spécifiquement observées au Québec sont analysés. Ensuite, une approche écosystémique est proposée pour l'analyse du secteur. Finalement, une analyse critique ainsi que des recommandations sont présentées en guise de conclusion.

Le virage numérique dans le secteur de l'aérospatiale

La numérisation et l'intégration des chaînes d'approvisionnement (horizontalement et verticalement) par l'utilisation des technologies numériques offrent aux entreprises de l'industrie aérospatiale des occasions considérables d'augmenter leur productivité et d'optimiser leurs procédés manufacturiers. De même, les applications du numérique contribuent à réduire les cycles de développement des produits aérospatiaux. Surtout, bien au-delà des gains de productivité et d'efficacité dans la production et la conception, cette nouvelle vague de transformation numérique, caractérisée par l'utilisation de données massives, induit un changement profond dans la façon de développer des modèles d'affaires et d'élargir l'offre de produits et services. De la sorte, les entreprises ont besoin d'intégrer leurs

produits, leurs services et leurs procédés à des plateformes technologiques, et ce, afin de bénéficier de l'émergence des continuités numériques (*digital threads*) et des jumeaux numériques (*digital twins*).

Une continuité numérique est un cadre de communication qui connecte numériquement les actifs des processus de fabrication, les attributs d'un produit et les actifs d'autres parties prenantes pour fournir une vue intégrée de tout le cycle de vie d'un produit ou d'un service (Helu, Hedberg et Feeney, 2017). La continuité numérique permet la traçabilité d'un produit « du berceau au tombeau » grâce à la numérisation intensive de la chaîne d'approvisionnement, des procédés de fabrication, des pièces, des conditions d'utilisation et du service offert par l'entreprise. Des données sont saisies tout au long du cycle de vie du produit et analysées afin de réduire les coûts d'outillage et les délais d'exécution, tout en améliorant l'efficacité et en favorisant l'innovation. Un exemple illustrant cette innovation que constitue le modèle d'affaires axé sur le cycle de vie se voit dans la tendance, chez certaines entreprises manufacturières, à se tourner vers la « servitisation » : dans ce cas, l'entreprise remplace la vente de ses produits par une nouvelle offre qui consiste en une prestation continue de services. L'acheteur n'achète pas un produit, il paie pour son utilisation. C'est ce que Rolls-Royce fait, par exemple, dans son approche de « conception pour le service » en offrant des heures d'utilisation de ses turbines plutôt que leur vente (Wong, Scanlan et Eres, 2009). L'analyse du cycle de vie est un outil puissant au potentiel énorme dans cette transformation, car elle permet aux entreprises de bien estimer les coûts et les risques d'un tel changement.

Le concept des jumeaux numériques va de pair avec celui de continuité numérique. Il s'agit de représentations numériques complètes d'un produit ou d'un système, qui sont des copies du produit ou du système réel si exactes qu'elles permettent l'exécution de modèles de simulation, et qui utilisent les données du monde réel pour raffiner et mettre à jour le modèle virtuel (Ganguli et Adhikari, 2020). Un jumeau numérique permet la prédiction en temps réel d'un système physique par la simulation de plusieurs scénarios différents virtuellement. Cette fonctionnalité peut, par exemple, renforcer des services tels que la surveillance de la structure et la maintenance prédictive. La méthode d'essai non destructif proposée par Bielefeldt, Hochhalter et Hartl (2015) pour les ailes d'avion ou le modèle dynamique de prédiction de fatigue pour les hélices de turbine basé sur l'analyse de données en temps réel proposé par Baž levs *et al.* (2015) sont deux exemples dans le domaine aérospatial. Lorsque des données fiables

et en volume raisonnable l'appuient, un jumeau numérique peut, entre autres, venir en aide aux systèmes de navigation, rendre possible l'essai d'un produit dans des conditions difficiles (voire impossibles) à reproduire en laboratoire, et ainsi permettre d'agir de façon beaucoup plus préventive en anticipant fautes et problèmes et en appliquant les correctifs qui s'imposent en amont de la chaîne de production plutôt qu'en aval (Tao, Zhang, Liu et Nee, 2018).

Néanmoins, l'accès aux continuités numériques ou aux jumeaux numériques reste limité à des applications de niche en raison d'une quantité ou d'une qualité insuffisantes des données, de leur sous-utilisation ou de l'incapacité à les traiter en temps réel. Face à ces limites, il est essentiel que les entreprises adoptent des technologies de détection plus intelligentes et connectées (c'est-à-dire qu'elles utilisent l'Internet des objets [IdO ou, en anglais, *IoT* pour *Internet of Things*]) et se familiarisent avec les techniques de traitement massif de données et d'apprentissage machine issues de l'intelligence artificielle (IA).

Selon une enquête menée par Statistique Canada en 2015 sur l'utilisation de technologies de pointe ou émergentes (voir le tableau 18-1), l'industrie aérospatiale au Québec semblait être bien au-dessus de la moyenne nationale de tous les secteurs d'activité pour ce qui est de l'adoption de la majorité des technologies de pointe (73,9 % contre 42,8 % pour l'ensemble des secteurs au Canada) et des technologies émergentes (37,2 % contre 18,9 % pour l'ensemble des secteurs au Canada). Les entreprises de l'industrie aérospatiale québécoise se démarquent notamment quant à l'adoption de l'IA (17,2 %) et de l'IdO (20,1 %) ainsi qu'à l'utilisation de technologies de pointe en traitement et fabrication (57,6 %), en conception ou contrôle de l'information (36,8 %) et, en raison des exigences environnementales, en technologies vertes (24 %). Ces entreprises ne se démarquent pas seulement par rapport à leurs consœurs de l'aérospatiale en Ontario et ailleurs au Canada, mais également par rapport aux entreprises en général dans l'ensemble du pays.

Adoption des technologies de pointe ou émergentes (% des entreprises par secteur et région)	Adoption des technologies de pointe ou émergentes								
	Canada			Ontario			Québec		
	Tous les secteurs	Fabrication transport	Fabrication aérospatiale	Tous les secteurs	Fabrication transport	Fabrication aérospatiale	Tous les secteurs	Fabrication transport	Fabrication aérospatiale
Utilisation de technologies de pointe	42,8	58,9	72,5	42,9	63,5	67,4	42,4	56,4	73,9
Manutention du matériel, chaîne d'approvisionnement ou logistique	12,7	22,1	23,9	12,0	26,0	19,8	12,5	20,6	30,3
Conception ou contrôle d'information	17,7	27,6	40,8	17,6	29,7	39,9	18,7	25,4	36,8
Traitement et fabrication	12,2	40,8	56,2	11,9	45,1	52,5	13,0	35,4	57,6
Technologies de pointe vertes	10,0	14,5	13,5	10,2	17,2	10,1	9,0	12,1	24,0
Systèmes de sécurité ou d'authentification évolués	13,5	12,6	15,6	13,8	16,0	15,0	14,4	13,9	13,8
Technologies de veille stratégique	22,5	20,9	25,9	25,1	21,8	27,3	17,9	19,9	20,4
Autres types de technologies de pointe	8,5	6,5	11,9	8,4	7,2	9,7	8,3	8,8	20,0
Utilisation de technologies émergentes	18,9	15,9	29,6	21,1	14,3	20,0	21,7	19,7	37,2
Nanotechnologie	1,1	2,6	2,4	1,1	3,4	0,0	1,3	3,5	6,5
Biotechnologie	1,6	1,2	1,3	1,8	2,0	0,0	1,9	0,9	3,4
Géomatique ou géospatiale	3,7	3,2	4,9	3,2	3,5	2,5	4,4	3,6	7,0
Intelligence artificielle (IA)	4,0	4,4	11,0	4,8	5,0	7,5	5,4	4,5	17,2
Systèmes intégrés d'Internet des objets (IdO)	12,2	9,4	15,5	13,8	9,6	15,0	14,3	8,8	20,1
Technologies de chaînes de blocs	1,4	0,2	0,0	1,3	0,5	0,0	3,1	0,0	0,0
Autres types de technologies émergentes	4,4	4,4	10,5	5,2	3,1	2,5	4,7	7,2	13,6
N'importe quelle utilisation de technologies de pointe ou émergentes	46,1	59,1	73,7	46,6	63,5	67,4	46,7	57,3	77,2

Tableau t/2020-c18-1

Source des données : Statistique Canada, Enquête sur l'utilisation de technologies de pointe ou émergentes, 2017.

Il reste que l'adoption des technologies numériques de pointe constitue un défi de taille pour toute entreprise, et les firmes de l'aérospatiale n'y échappent pas, même si ces données semblent leur accorder une position avantageuse. L'un des facteurs favorisant l'adoption est la capacité des entreprises à établir des collaborations avec des partenaires stratégiques, notamment ceux provenant précisément du secteur où l'on développe les technologies numériques. Or, on note que les entreprises québécoises de l'aérospatiale œuvrent souvent selon un modèle d'innovation ouverte, mais que ce dernier est limité à un groupe restreint d'entreprises du même secteur, normalement par un lien de fournisseur à client ; autrement dit, il s'agit d'un modèle d'innovation ouverte, mais « ouverte dans une boîte » (Armellini, Beaudry et Kaminski, 2016).

Penser l'aérospatiale numérique signifie donc réfléchir plus largement au développement d'un écosystème d'innovation qui redéfinit les frontières du secteur tel qu'entendu traditionnellement. Dans ce contexte, l'écosystème de l'aérospatiale a tout intérêt à développer d'étroites collaborations avec celui des technologies de l'information et des communications (TIC), incluant l'IA.

Une approche écosystémique pour l'aérospatiale numérique

Dans un article récent, les chercheurs Ihrig et MacMillan (2017) soutiennent que, dans des secteurs tels que l'aérospatiale ou l'informatique, même des innovations de produits simples deviennent compliquées à cause de la complexité de l'environnement dans lequel évoluent les organisations. Selon ces auteurs, les entreprises doivent se doter de « propositions de valeur² auxquelles d'autres parties prenantes pourront adhérer – ce qui complique fortement le processus d'identification des innovations efficaces » (Ihrig et MacMillan, 2017). Pour cette raison, de plus en plus d'organisations sont amenées à travailler ensemble selon un nouveau mode collaboratif intersectoriel et intercommunautaire ouvert sur son environnement géographique et social ; ce qui est désigné par le terme *écosystèmes d'innovation*. Ces derniers ont en effet la particularité d'intégrer des parties prenantes hors de la chaîne de valeur traditionnelle (gouvernements, associations,

juristes, consommateurs indirects, universités et autres) et, par le fait même, de créer de la valeur à partir de données extraites de processus riches et multiples.

Examinons maintenant le potentiel de cette approche écosystémique appliquée à l'aérospatiale numérique.

Le secteur aérospatial est l'un des plus développés au Québec. Il est régulièrement évoqué comme étant prioritaire par les différents gouvernements qui se succèdent et, de ce fait, il a une forte visibilité dans la population en général. Cependant, l'« aérospatiale numérique » n'est pas aussi familière, car ses frontières dépassent les frontières habituelles de l'aérospatiale pour inclure aussi les entreprises normalement rattachées au secteur des TIC. Un bref survol de cet écosystème permet d'entrevoir de multiples possibilités de développement de collaborations.

Montréal est reconnue pour accueillir plusieurs pôles de haute technologie innovants avec un fort quotient de localisation (LQ), qui est essentiellement un ratio comparant une caractéristique particulière d'une région avec celle d'une région de référence plus grande. Cette mesure est un moyen précieux pour quantifier la concentration d'un écosystème particulier dans un périmètre donné (par exemple une ville) par rapport à un plus grand territoire (par exemple un pays). Dans le cas présent, les écosystèmes des TIC et de l'aérospatiale de Montréal obtiennent un quotient de localisation élevé, ce qui signifie que Montréal a une concentration plus élevée de ces secteurs que la moyenne nationale. La grappe de l'aérospatiale de Montréal a même le quotient de localisation le plus élevé au Canada, et il s'agit du troisième regroupement aérospatial en importance au monde, après ceux de Seattle et de Toulouse. Aéro Montréal, l'association des entreprises de la grappe aérospatiale québécoise, regroupe plus de 300 membres, y compris d'importantes sociétés d'origine telles que Bombardier, ainsi que les principaux intégrateurs de systèmes au monde et des fournisseurs spécialisés.

Par ailleurs, l'écosystème montréalais des TIC occupe le troisième rang national après ceux de l'Ontario et de la Colombie-Britannique, avec plus de 93 000 travailleurs et environ 5 000 organisations en 2016, ce qui place également la ville parmi les principaux pôles mondiaux des TIC pour la concentration d'emplois – au 8^e rang en Amérique du Nord. Parallèlement, le nouveau segment de l'écosystème des TIC, à savoir l'IA, connaît une

croissance exponentielle avec de nombreuses entreprises en démarrage (*start-ups*) et la présence locale de filiales de très grandes firmes telles que Amazon, Facebook, Google et Deepmind.

Un facteur important contribuant à l'émergence de Montréal en tant qu'écosystème de l'IA de classe mondiale est la disponibilité d'une main-d'œuvre hautement qualifiée (avec ses universités et ses programmes avancés en génie informatique et électrique, en recherche opérationnelle et en sciences de la décision). Selon l'Institut de valorisation des données (IVADO) de Montréal, il y a plus de 150 chercheurs dans ces domaines au sein des universités montréalaises. À l'échelle nationale, d'autres centres importants d'intelligence artificielle se développent à Toronto, à Edmonton et à Vancouver, faisant du Canada un centre mondial important de l'IA (OCDE, 2019b).

Tandis que le développement régional, tant en aérospatiale qu'en numérique, semble considérable, la question qu'on se pose concerne le niveau d'intégration des deux écosystèmes. Pour répondre à cette question, le Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec (CRIAQ) a commandité une étude, le projet CRIAQ-1642, dont l'un des buts était précisément de comprendre la structure du pôle aérospatial et de celui des TIC de Montréal et, en particulier, la structure des liens entre ces deux pôles afin de déterminer les défis et les occasions potentielles.

En utilisant la méthodologie de l'analyse des réseaux sociaux développée par Turkina, Van Assche et Kali (2016) pour cartographier les réseaux des deux écosystèmes et les liens entre eux, les acteurs de l'écosystème ont pu être nommés et leurs liens formels établis. Cette analyse a permis d'identifier les acteurs centraux d'un réseau ainsi que leur niveau d'intégration. Le but était d'analyser les liens inter-écosystèmes, différenciant les liens entre les acheteurs et leurs fournisseurs et les liens partenariaux. Une base de données unique rassemblant 3000 entreprises de l'aérospatiale et des TIC à Montréal a été créée dans le cadre de cette étude. Elle comprend également des entreprises faisant des affaires à Montréal et très liées aux entreprises des deux écosystèmes étudiés. Elle compte 246 entreprises aérospatiales, le reste étant des entreprises des TIC. Finalement, les institutions de recherche (y compris les universités), les organisations financières et les associations d'industrie, compte tenu de leur importance dans le développement de leur secteur, ont été incluses dans la base de données.

Deux sous-réseaux d'interactions ont été construits, dont le résultat est illustré dans la figure 18-1. Le premier, représenté en bleu, montre les relations entre fournisseurs et clients ; le deuxième, en rouge, illustre plutôt des partenariats. Les nœuds représentent les acteurs de l'écosystème et leur couleur change en fonction de leur rôle : vert pour les entreprises en TIC en général, rose pour les entreprises en IA, bleu pour les sociétés ou les agents aérospatiaux, noir pour les intermédiaires tels que les associations, les instituts de recherche et les universités, les intermédiaires financiers et les laboratoires de recherche.

Section 2.5 : La transformation numérique à l'œuvre dans plusieurs secteurs

Superposition des réseaux d'interactions et de partenariats entre les écosystèmes de l'aérospatiale, des TIC et de l'IA

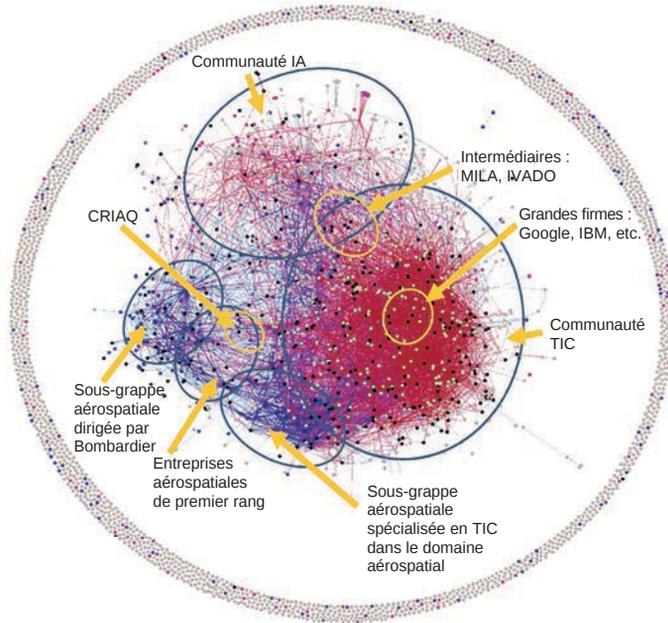


Figure f/2020-c18-1

Source : Turkina, Van Assche et Doloreux, 2019.

L'analyse de la figure indique que beaucoup d'entreprises, majoritairement en TIC, apparaissent sur l'anneau extérieur du diagramme. Si elles semblent déconnectées des autres, c'est qu'elles se concentrent sur d'autres marchés, qu'ils soient régionaux ou internationaux, ou qu'elles sont en relation avec des entreprises locales n'ayant pas de liens avec le réseau principal. Elles forment ainsi de petits îlots d'activités interconnectées.

Du côté aérospatial, trois communautés sont clairement représentées : l'une gravite autour de Bombardier (la plus à gauche dans la figure) ; une autre (au centre) rassemble les autres entreprises de premier niveau du secteur, c'est-à-dire les maîtres d'œuvre et les équipementiers (notamment Bell Textron, Pratt et Whitney Canada et Thales), qui partagent un réseau de fournisseurs et de partenaires similaire ; et la troisième (plus à droite, à côté de la communauté des TIC) est constituée d'entreprises spécialisées en électronique et en logiciels pour des fins aérospatiales.

Du côté numérique, il y a deux grandes communautés, la plus large (à droite) pour les entreprises en TIC (et non en IA) et l'autre (en haut) pour les entreprises en IA. À noter que les géants majeurs de l'IA que sont Google et Amazon sont au cœur de la communauté des TIC. Cependant, ils ont des liens étroits avec l'écosystème de l'IA, ce qui entraîne un chevauchement important entre les deux écosystèmes. La communauté des TIC est plus proche de l'écosystème de l'aérospatiale, mais cela est majoritairement dû à des relations entre fournisseurs et clients. En effet, le diagramme indique clairement que les écosystèmes des TIC et de l'IA établissent davantage des liens de partenariat, tandis que celui de l'aérospatiale est largement lié, partout dans l'écosystème, aux rapports verticaux entre fournisseurs et clients.

Dans l'ensemble, le diagramme révèle un chevauchement entre les écosystèmes de l'aérospatiale et des TIC, mais il montre aussi qu'un grand vide structurel existe entre le segment de l'IA et celui de l'aérospatiale. Certaines entreprises des TIC et intermédiaires comme l'Université McGill ou le MILA, l'institut québécois d'intelligence artificielle, ou encore des acteurs financiers font de l'intermédiation entre les deux communautés, mais une collaboration et un rapprochement plus poussés sont visiblement nécessaires.

Il reste que la communauté des TIC interagit déjà de façon non négligeable avec la communauté aérospatiale. En revanche, pour revenir à la littérature (Torre et Zimmermann, 2015 ; Turkina *et al.*, 2016), nous constatons que ces écosystèmes sont de types différents : tandis que l'écosystème de l'aérospatiale au Québec fonctionne largement comme un complexe industriel vertical et hiérarchique, les segments des TIC et de l'IA font plutôt office de plateformes de partenariat cohésives et représentent davantage un écosystème de type « réseau social ». Or, ceci peut créer de sérieuses frictions et des enjeux non négligeables en ce qui a trait aux collaborations potentielles entre les deux écosystèmes, puisque le secteur de l'aérospatiale, dans sa structure traditionnelle, aura de la difficulté à profiter de façon optimale du dynamisme des entreprises des TIC et de l'IA.

Là où il y a un réel manque de coopération étroite, c'est entre les secteurs de l'aérospatiale et de l'IA. Les deux écosystèmes (TIC et IA d'un côté, aérospatiale de l'autre) peuvent être considérés comme mondiaux en raison de la présence d'acteurs internationaux tels que Bombardier, Pratt et Whitney, Amazon et Google. Ces entreprises, qui servent de pipelines de connaissances à l'échelle planétaire, offrent d'importantes occasions de transfert de connaissances de l'étranger vers la communauté locale de Montréal. En même temps, en ce qui concerne la structure purement locale de l'écosystème de l'industrie aérospatiale, faire progresser les partenariats entre les entreprises au sein du secteur est primordial, de même qu'intégrer les IA dans les chaînes de valeurs aérospatiales et établir des partenariats créatifs entre les nœuds IA et aérospatiaux.

Conclusion

Ce chapitre a esquissé un portrait de l'adoption des technologies numériques de nouvelle génération dans l'industrie aérospatiale. S'il est relativement optimiste du point de vue de l'adoption de technologies de pointe, des défis importants se présentent du côté de l'organisation industrielle et d'une approche véritablement écosystémique incluant des acteurs qui ne sont pas traditionnellement dans le secteur aérospatial. Il importe notamment d'assurer une plus grande coopération entre les entreprises de ce secteur afin d'ajouter des collaborations de type horizontal, c'est-à-dire des partenariats. Jusqu'à présent, l'écosystème de l'aérospatiale a surtout fonctionné tel un complexe industriel traditionnel, au sein duquel la collaboration se fait essentiellement par des liens formels de fournisseur à client.

Il faut maintenant adopter une autre stratégie d'ensemble, notamment en privilégiant davantage de projets communs de R-D, des plateformes d'innovation ouverte et des projets intégrant des PME.

Pour ce qui est de l'intégration avec les écosystèmes numériques, il importe de nourrir des relations plus fortes entre le secteur de l'aérospatiale et les acteurs pertinents du numérique (notamment ceux de l'intelligence artificielle) afin de soutenir des collaborations fécondes. Bien que les différents intermédiaires tels que le CRIAQ, IVADO et le MILA, le soient déjà bien positionnés dans leurs communautés respectives, il reste à renforcer les liens entre eux ; ces acteurs doivent aussi valoriser leur position de médiation (de courtage) intersectorielle. En agissant collectivement de façon plus concertée, tous ces acteurs du réseau ont la capacité de créer un milieu favorable à l'innovation.



Références

Armellini, F., Beaudry, C. et Kaminski, P. C. (2016). Open within a box: An analysis of open innovation patterns within Canadian aerospace companies. *Sinergie*, 34(101), 15-36. doi:10.7433/s101.2016.02

Bazilevs, Y., Deng, X., Korobenko, A., Lanza di Scalea, F. L., Todd, M. D. et Taylor, S. G. (2015). Isogeometric fatigue damage prediction in large-scale composite structures driven by dynamic sensor data. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 82(9), 91008-91012. doi:10.1115/1.4030795

Bielefeldt, B., Hochhalter, J. et Hartl, D. (2015). Computationally efficient analysis of SMA sensory particles embedded in complex aerostructures using a substructure approach. *Proceedings of the ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 1, 1-10. doi.org/10.1115/SMASIS2015-8975

Frow, P., McColl-Kennedy, J. R., Hilton, T., Davidson, A., Payne, A. et Brozovic, D. (2014). Value propositions: A service ecosystems perspective. *Managing Theory*, 14(3), 327-351. doi:10.1177/1470593114534346

Ganguli, R. et Adhikari, S. (2020). The digital twin of discrete dynamic systems: Initial approaches and future challenges. *Applied Mathematical Modelling*, 77(2), 1110-1128. doi:10.1016/j.apm.2019.09.036

Helu, M., Hedberg, T. et Feeney, A. B. (2017). Reference architecture to integrate heterogeneous manufacturing systems for the digital thread. *CIRP, Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 191-195. doi:10.1016/j.cirpj.2017.04.002

Ihrig, M. et MacMillan, I. (2017, mars-avril). How to get ecosystem buy-in. *Harvard Business Review*. Repéré à : <https://hbr.org/2017/03/how-to-get-ecosystem-buy-in>.

International Air Transport Association. (2016). *20-year Passenger Forecast*.

International Civil Aviation Organization. (2019). *Le monde du transport aérien en 2018*. Récupéré du site de l'auteur : <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/FR/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx>.

Lanning, M. et Michaels, E. (1988). A business is a value delivery system. *McKinsey Staff Paper*, 41.

OCDE. (2019a). Digital Innovation: Seizing Policy Opportunities. Éditions OCDE. doi.org/10.1787/a298dc87-en

OCDE. (2019b). The digital innovation policy landscape in 2019. *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, 71. doi.org/10.1787/23074957

Statistique Canada. (2017). Tableau 27-10-0367-01 Utilisation de technologies de pointe ou émergentes, par industrie et taille de l'entreprise. <https://doi.org/10.25318/2710036701-fra>

Tao, F., Zhang, H., Liu, A. et Nee, A. (2018). Digital twin in industry: State of the art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. [doi:10.1109/tii.2018.2873186](https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186)

Torre, A. et Zimmermann, J. B. (2015). Des clusters aux écosystèmes industriels locaux. *Revue d'économie industrielle*, 152, 13-38. [doi:10.4000/rei.6204](https://doi.org/10.4000/rei.6204)

Turkina, E., Van Assche, A. et Doloreux, D. (2019). How do co-located clusters interact. *Evidence from Greater Montreal*. Article en révision.

Turkina, E., Van Assche, A. et Kali, R. (2016). Structure and evolution of global cluster networks: Evidence from the aerospace industry. *Journal of Economic Geography*, 16(6), 1211-1234. [doi:10.1093/jeg/lbw020](https://doi.org/10.1093/jeg/lbw020)

Wong, S., Scanlan, J. P. et Eres, M. H. (2009). An integrated life cycle cost tool for aero-engines. *International Conference on Product Life Cycle Management 2009*, 669-678.

Notes

1. Ce chapitre a été rédigé avant la pandémie de COVID-19, qui a frappé de plein fouet l'industrie aérospatiale. Pour cette raison, le sujet n'est pas mentionné dans le texte. Il est trop tôt pour prédire l'avenir postpandémie de cette industrie, mais il est fort probable que le nouveau coronavirus contribuera à la transformation numérique décrite ici.
2. La « proposition de valeur » est un terme courant dans le milieu des affaires. Bien que très répandue, l'expression est pourtant rarement définie formellement. À l'origine, elle désignait la promesse de valeur (une combinaison de coûts et de bénéfices) qu'une entreprise propose à sa clientèle avec ses produits et services (Lanning et Michaels, 1988). Le concept a évolué ; il s'agit aujourd'hui plutôt d'un facteur stratégique pour les entreprises, qui détermine en fin de compte comment le flux de ressources au sein d'un écosystème se négocie (Frow *et al.*, 2014). Les mécanismes pour le transfert de valeur comprennent encore (et essentiellement) l'offre de produits et services, mais ils en comportent aussi d'autres, tels que le partage de données, d'expertise ou de positionnement sur le marché.