



JUMEUX NUMÉRIQUES DANS LE SECTEUR DE LA FABRICATION :  
**Leçons de fabricants et fournisseurs de technologie canadiens**

# Table des matières

I. Avant-propos	03
II. Introduction	04
III. Jumeaux numériques: Définition, histoire, types et technologies habilitantes	05
IV. Applications et avantages pour le secteur de la fabrication	07
V. Moteurs, catalyseurs et obstacles	09
VI. Études de cas de fabricants canadiens	11
VII. Perspectives de fournisseurs de technologie et de partenaires de l'écosystème	18
VIII. Discussion et recommandations	22
IX. Conclusion	24
X. Notes en fin d'ouvrage	25

# Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les partenaires industriels participants pour leur coopération et leur soutien dans l'élaboration de ce rapport : Avcorp Group, CenterLine (Windsor) Limited, Laval International, Arvizio, EXO Insights, Hive Virtual Plant, Siemens, IBM, et le Invest WindsorEssex VR CAVE



# Avant-propos

Fabrication de prochaine génération Canada (NGen) se consacre à la mise en place de capacités de fabrication de pointe de calibre mondial au Canada. Le Trillium Network for Advanced Manufacturing vise à accroître la sensibilisation à l'écosystème de fabrication de pointe de l'Ontario dans le but de soutenir la croissance et la compétitivité. Ensemble, nos organisations ont cerné certains des défis auxquels font face des fabricants partout au Canada, notamment en ce qui concerne l'adoption de technologies de production nouvelles et de pointe. Nous avons aussi constaté qu'un nombre croissant de fabricants font d'importants investissements dans de telles technologies afin d'accroître leur compétitivité et d'atteindre des objectifs commerciaux, et nous souhaitons partager leur histoire.

Le présent rapport fait suite à des travaux antérieurs de NGen qui mettent l'accent sur les jumeaux numériques. Il fournit un important cadre de référence et des renseignements de base et présente des études de cas de trois entreprises manufacturières au Canada - Laval International, CenterLine (Windsor) Limited et Avcorp - qui ont récemment adopté des technologies de jumeau numérique. Il donne aussi les perspectives d'un certain nombre de fournisseurs de technologie qui appuient l'adoption de jumeaux numériques par les fabricants.

Le rapport vise à tirer des leçons de ces fabricants et fournisseurs de technologie afin d'en informer d'autres au sujet des avantages et applications des jumeaux numériques. Nous espérons que l'information recueillie encouragera et préparera les fabricants qui souhaitent adopter bientôt des technologies de jumeau numérique (et d'autres technologies de fabrication de pointe).

Nos deux organisations conviennent parfaitement que l'avenir de la fabrication canadienne dépend de la capacité des entreprises d'adopter ces technologies. Nous croyons que nous sommes près d'un point de bascule, où les entreprises qui sont disposées à investir dans des technologies de production de pointe - des technologies qui sont de plus en plus nécessaires pour soutenir la concurrence et atteindre les objectifs commerciaux - prospéreront, alors que celles qui accusent un retard ne prospéreront pas.

NGen et le Trillium Network ne sont que deux organisations à but non lucratif au Canada dont le mandat est de soutenir la croissance et la compétitivité de la fabrication de pointe. Nous continuerons, de concert avec nos partenaires des secteurs public et privé partout au pays, de collaborer à des initiatives liées à la mise au point et à l'adoption de technologies de production de pointe. Veuillez ne pas hésiter à communiquer avec nous pour en savoir plus.



Brendan Sweeney  
Directeur général

Trillium Network for  
Advanced Manufacturing



John Laughlin  
Directeur général de la technologie

Fabrication de prochaine  
génération Canada

# Introduction

L'industrie 4.0 est en train de révolutionner la fabrication. Rendues possibles grâce aux percées en matière de puissance de traitement et aux coûts moindres du stockage de données, les technologies liées à l'industrie 4.0 aident à intégrer les processus de production numériques et physiques. Les avantages potentiels des jumeaux numériques, une de ces technologies de base, ont été largement applaudis par ceux qui connaissent l'industrie 4.0, et même par ceux qui anticipent l'industrie 5.0.

Malgré ces avantages appréciables, les petites et moyennes entreprises du secteur de la fabrication au Canada et à l'étranger ont été réticentes à intégrer les jumeaux numériques dans leurs processus de production. Cette réticence est souvent liée aux coûts d'investissement initiaux élevés, à une perception que les jumeaux numériques sont pertinents avant tout pour les plus grands fabricants, à leur complexité présumée, à un manque de personnel qualifié et à un rendement du capital investi incertain. Par ailleurs, cette réticence ne concerne pas seulement les jumeaux numériques, mais aussi d'autres technologies de l'industrie 4.0.

Dans certains cas, les PME ne savent tout simplement pas par où commencer. Dans le présent rapport, nous abordons notamment ces questions. Pour ce faire, nous tirons parti de la documentation et de la recherche existantes, d'entrevues avec plusieurs fournisseurs de services et de technologies de jumeau numérique et d'études de cas de trois PME du secteur canadien de la fabrication qui ont intégré des jumeaux numériques dans leurs processus de production et de développement.

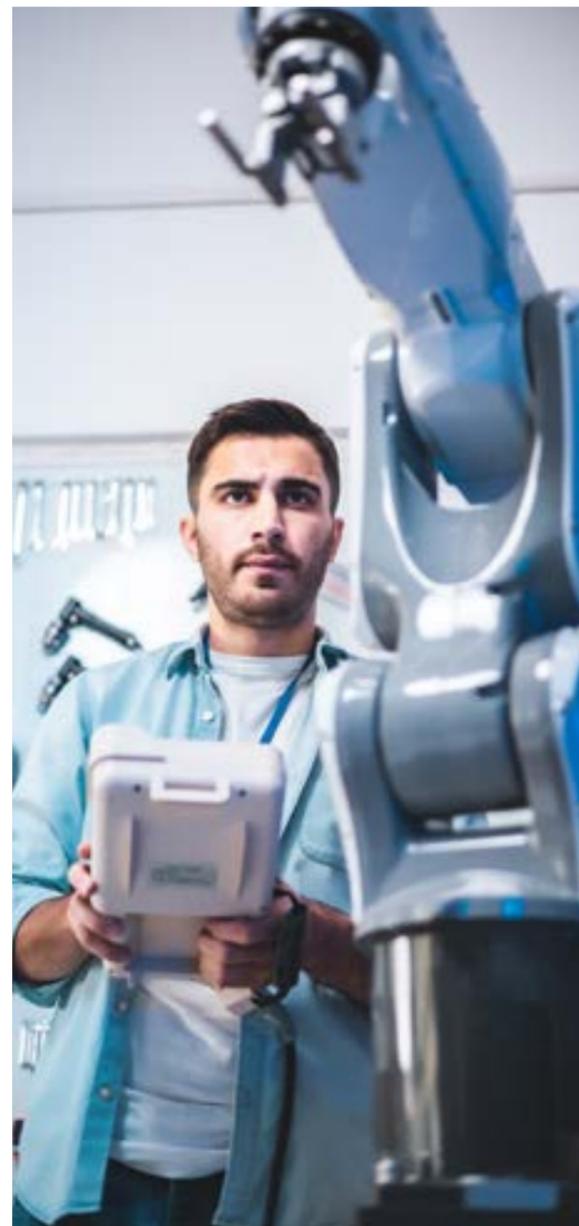
Le reste du rapport est organisé comme suit :

- La section 1 donne la définition des jumeaux numériques;
- La section 2 décrit les applications et les avantages des jumeaux numériques dans le secteur de la fabrication;
- La section 3 énonce les facteurs qui stimulent et favorisent l'adoption de jumeaux numériques dans le secteur de la fabrication ou qui constituent des obstacles à cette adoption;
- La section 4 présente trois études de cas de PME du secteur canadien de la fabrication qui ont adopté des jumeaux numériques : Avcorp, CenterLine et Laval In-

ternational;

- La section 5 donne les perspectives de fournisseurs de services et de technologie, dont Arvizio, EXO Insights, Hive Virtual Plant, Siemens Canada et la CAVE de RV d'Invest Windsor-Essex.

Le rapport se termine par un exposé de nos constatations et recommandations pour les intervenants qui souhaitent favoriser une plus vaste adoption des jumeaux numériques par les fabricants.



# Jumeaux numériques : Définition, histoire, types et technologies habilitantes

Un jumeau numérique est une réplique virtuelle réaliste d'un objet physique. Cet objet physique peut être un produit entièrement assemblé (p. ex. une voiture), une partie ou composante de ce produit (p. ex. une roue), un réseau ou un système (p. ex. une usine), une personne ou un processus. Le jumeau numérique contient des renseignements physiques, fonctionnels et opérationnels au sujet de l'objet qu'il représente. Ces renseignements sont utilisés pour produire une réplique virtuelle de l'état actuel de l'objet ou simuler les états futurs possibles de cet objet.

Alors qu'il était à l'Université du Michigan, le professeur Michael Grieves a d'abord conçu des jumeaux numériques en 2002 dans le cadre d'un exposé devant l'industrie (M. Grieves est maintenant le vice-président directeur des Opérations à l'Institut de technologie de Floride). En 2012, l'Administration nationale de l'aérospatiale (NASA) a publié une définition des jumeaux numériques dans une feuille de route technologique afin d'améliorer la performance de l'aviation. Dans cette feuille de route, ils ont qualifié les jumeaux numériques d'outil qui pourrait appuyer leur objectif d'améliorer la performance de façon générale, et qui pourrait notamment reproduire des conditions dans l'espace afin d'aider à réaliser des essais en vue de missions futures. En 2014, M. Grieves a publié le premier livre blanc consacré aux jumeaux numériques. Son ouvrage relate l'évolution des jumeaux numériques du concept à leurs applications au sein et au-delà du secteur de l'aérospatiale. L'intérêt à l'égard des jumeaux numériques ainsi que leurs applications et les technologies connexes n'ont cessé de croître rapidement depuis.

Les jumeaux numériques sont différents des modèles de conception assistée par ordinateur (CAO) et d'ingénierie assistée par ordinateur (IAO) et sont plus évolués que ceux-ci. Ce qui les distingue avant tout des technologies de CAO et d'IAO est leur capacité de communiquer de façon continue ou périodique avec leurs pendants physiques.

Un jumeau numérique peut être développé avant ou après la création de l'objet physique. Dans les deux cas, les ob-

jets numérique et physique doivent être connectés d'une manière qui permet l'échange fluide de données. Cet échange de données peut se faire de façon continue ou périodique. Cette connexion permet au jumeau numérique de recueillir des données de l'objet physique et d'évoluer de façon dynamique en parallèle. Le jumeau numérique peut ensuite traiter de nouvelles informations au moyen de l'analytique avancée, de l'intelligence artificielle (IA) et d'autres outils de simulation afin d'obtenir des précisions sur les capacités et les limites de l'objet physique associé.

L'augmentation rapide de l'intérêt à l'égard des jumeaux numériques s'est produite en même temps que des percées dans d'autres technologies connexes. Ces percées comprennent l'infonuagique, l'analyse avancée des données, les technologies de l'internet des objets (IdO) et les percées en technologie des capteurs, qui permettent toutes des applications pratiques des jumeaux numériques. Le développement et la promotion de telles technologies par des entreprises de fabrication et de technologie bien connues comme General Electric, IBM, Siemens, Airbus, Bosch et Rolls-Royce ont aussi accéléré la croissance des jumeaux numériques.

Aujourd'hui, les jumeaux numériques diffèrent sur le plan de la complexité et du type d'entité physique qu'ils représentent. Certains classent les jumeaux numériques comme des répliques virtuelles d'un élément particulier, d'un actif (deux éléments ou plus), d'un système (deux actifs ou plus) ou d'un processus (deux systèmes ou plus). D'autres se concentrent davantage sur deux grandes catégories : produit et processus. Mais ce qui importe avant tout est que le jumeau numérique peut reproduire un objet physique ou un processus - qu'il s'agisse d'un produit complexe comportant des centaines de pièces différentes ou d'un processus comportant de multiples éléments dynamiques - et produit des renseignements utiles à partir de cette réplique.

Les universitaires ont approfondi la compréhension conceptuelle des jumeaux numériques en les caractérisant en fonction du nombre de dimensions impliquées. Les modè-

les tridimensionnels comprennent un objet physique, une entité virtuelle et une connexion entre les deux. Les modèles à cinq dimensions comptent deux autres éléments : des données et des services .

Le premier élément des caractérisations à trois et à cinq dimensions est l'objet physique. Le deuxième élément est l'entité virtuelle, qui doit avoir 1) des mesures du monde réel (p. ex. dimension, forme, caractéristiques de la surface, propriétés matérielles) et 2) des propriétés géométriques, physiques, comportementales et fondées sur des règles qui reproduisent l'entité physique et ses attributs (c. à d. ses pièces mobiles). Pour obtenir les données nécessaires au premier aspect du deuxième élément, un jumeau numérique fait appel à des capteurs et d'autres technologies cognitives.

Le troisième élément des deux modèles est la connexion entre l'objet physique et l'entité virtuelle. Il s'agit ici des technologies et protocoles de réseautage et de communication qui permettent d'établir la connexion entre le physique et le virtuel. Cela inclut les technologies liées à la cybersécurité, qui sont essentielles à la mise en place de toutes les technologies liées à l'industrie 4.0.

Les quatrième et cinquième éléments (des modèles à cinq dimensions) concernent les outils de gestion des données et les services de tiers. Les jumeaux numériques nécessitent des outils permettant la collecte, la transmission, le stockage, le traitement, l'agrégation et la visualisation des données. Ils nécessitent également des services qui vont au-delà des compétences de base des fabricants et qui sont fournis par des tiers, comme la cybersécurité.

Les jumeaux numériques sont une technologie relativement nouvelle qui est actuellement déployée par les fabricants sans normes uniformes. Ce manque d'uniformité est considéré comme une contrainte à l'utilisation plus répandue par les fabricants. Pour surmonter cette contrainte, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) élabore une nouvelle certification (ISO 23247) pour orienter le déploiement de jumeaux numériques dans des usines de fabrication. Cette certification en est à l'étape de l'approbation et constitue un pas important vers l'adoption généralisée d'une technologie perçue par plusieurs comme étant un catalyseur pour le développement futur de l'industrie 4.0 plus globalement.



## Applications et avantages pour le secteur de la fabrication

Les jumeaux numériques ont plusieurs applications dans le secteur de la fabrication. Celles-ci comprennent la conception, le développement et l'évaluation des produits, la surveillance, la détection des défaillances, la maintenance prédictive, la performance du système, l'ordonnancement de la production, l'aménagement de l'usine, la formation, l'expérience client, la consommation d'énergie et la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Les jumeaux numériques reposent essentiellement sur la collecte de renseignements de grande qualité, qui peuvent être utilisés pour accroître l'efficacité et la productivité, optimiser les processus et chaînes d'approvisionnement et faciliter la prise de décisions fondées sur des données.

### Conception, développement et évaluation de produits

La conception et le développement de produits peuvent être coûteux. Les coûts liés au développement de prototypes physiques peuvent être particulièrement élevés. La capacité de développer des prototypes numériques peut entraîner des économies de coûts considérables. Les coûts environnementaux et monétaires liés aux matériaux sont également négligeables lorsque des jumeaux numériques sont utilisés pour le développement de prototypes. En outre, les jumeaux numériques permettent d'expérimenter davantage avec les paramètres de conception, ce qui aide les fabricants à définir de façon plus rentable les configurations de produit optimales, et peuvent être utilisés pour simuler la performance dans des conditions extrêmes qu'il serait difficile ou impossible de reproduire en laboratoire. Enfin, les jumeaux numériques exigent la participation des équipes tant de conception que de production dès les premières étapes du développement des produits, ce qui aide à réduire le cloisonnement des services qui cause des pertes d'efficacité opérationnelle. Bref, les jumeaux numériques peuvent permettre de réduire les délais et les coûts liés à la conception, au développement et à l'évaluation des produits.

ElectraMeccanica , GSK et Gastrops offrent des exemples de la façon dont les jumeaux numériques peuvent être utili-

sés en conception et développement de produits.

### Surveillance en temps réel et détection des défaillances

Un jumeau numérique recueille en continu des renseignements au sujet de son pendant physique au moyen de capteurs et d'autres technologies cognitives. Ces données sont ensuite utilisées pour surveiller la performance en temps réel de produits, de pièces d'équipement ou de processus. Grâce à l'analytique avancée et aux algorithmes, les jumeaux numériques peuvent détecter les anomalies avant que des défaillances ne surviennent et permettent de les corriger de façon proactive. Ceci aide à réduire les coûts liés au temps d'indisponibilité et aux pannes.

Par exemple, STEP Tools, une entreprise basée à New York, connecte des machines-outils à des serveurs de simulation qui permettent une analyse et la correction en temps réel des résultats d'usinage. Selon l'entreprise, cette façon de faire accroît de 15 pour cent l'efficacité des processus d'usinage grâce à une réduction de l'usure des outils et à une augmentation de la productivité . L'entreprise Racer Machinery basée à Cambridge déploie la plateforme Sinumerik One de Siemens de façon semblable .

### Maintenance prédictive

Les jumeaux numériques font appel à des algorithmes et à d'autres outils prédictifs pour établir des modèles de calendriers de maintenance et la santé générale de machines et de pièces d'équipement intégrées dans une chaîne de production, une usine ou un réseau entier d'usines. Cette façon de faire est souvent jugée plus rentable que la maintenance préventive de routine ou périodique, puisque les tâches connexes ne sont effectuées que lorsqu'elles sont nécessaires. Par ailleurs, certaines activités de maintenance peuvent être réalisées à distance au moyen du jumeau numérique. Selon la société Gartner, la maintenance prédictive faisant appel à des jumeaux numériques pourrait permettre aux entreprises d'économiser plus d'un milliard de dollars par année .

### Performance du système

Les jumeaux numériques peuvent aider à évaluer, à prédire et à optimiser le processus de fabrication et la performance du système. L'analytique avancée qui repose sur les données provenant des jumeaux numériques peut aider les fabricants à relever les goulots d'étranglement et simuler des solutions de rechange pour améliorer l'efficacité.

### Ordonnancement dynamique et flexible de la production

Les jumeaux numériques peuvent utiliser les données historiques pour aider à ordonnancer la production dans des environnements dynamiques où la souplesse est importante. Ceci peut être particulièrement utile lorsque de nouvelles contraintes ont été relevées ou lorsque de nouveaux produits et processus sont adoptés. Les conséquences de ces changements peuvent faire l'objet d'essais virtuels aux côtés de l'équipement de production. Lorsqu'ils sont combinés aux technologies d'intelligence artificielle, les jumeaux numériques peuvent fournir une visibilité opérationnelle complète pour aider les usines et les entreprises à s'organiser elles-mêmes. Ils peuvent aussi aider à prédire de façon plus précise les besoins futurs en ressources.

### Aménagement de l'usine

Les jumeaux numériques peuvent reproduire de façon virtuelle l'aménagement d'une usine selon différents niveaux de détails. Ceci permet aux fabricants de faire l'essai d'aménagements de rechange sans avoir à déplacer l'équipement existant ou à installer de nouveaux équipements. En plus d'aider à améliorer l'efficacité de la production, ceci peut aussi aider à réduire les risques pour la santé et la sécurité.

### Formation des employés

Des jumeaux numériques peuvent être déployés pour concevoir des expériences de formation immersives et interactives pour les employés afin de soutenir le perfectionnement des compétences ou la familiarisation avec de nouveaux équipements de production et de nouvelles technologies. En plus de la formation liée aux tâches courantes et de routine, ils peuvent permettre aux entreprises de fournir une formation plus rentable relativement à des scénarios d'urgence rares mais dangereux et coûteux. Une telle formation peut être personnalisée en fonction d'emp-

loyés particuliers et peut être donnée sur place ou à distance. Ce genre de formation convient bien aux tendances d'apprentissage des plus jeunes générations et des personnes qui connaissent les technologies de réalité virtuelle et augmentée.

### Expérience client

Les jumeaux numériques peuvent rehausser l'expérience client. Dans l'industrie de l'automobile, les jumeaux numériques peuvent améliorer le traçage des pièces et processus, ce qui donne lieu à des rappels plus efficaces et efficaces. Une identité numérique peut être attribuée aux pièces et composantes et combinée aux technologies de jumeau numérique et de chaîne de blocs pour permettre aux clients d'avoir accès à des renseignements historiques concernant les dommages, le remplacement de pièces ou les garanties (ce qui peut être particulièrement utile pour les marchés de revente de voitures et de gros appareils ménagers). Dans d'autres industries, les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour permettre aux clients de faire l'essai de configurations de produits sur mesure, leur offrant ainsi des expériences plus riches et personnalisées.

### Consommation d'énergie

En plus d'aider à améliorer l'efficacité de la production et à réduire les risques pour la santé et la sécurité, les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour simuler et essayer des processus et des aménagements d'usine qui sont plus écoénergétiques. Par exemple, la société Braskem, un des chefs de file mondiaux de la production de biopolymères, a réduit sa consommation d'énergie de 2,1 pour cent grâce à des jumeaux numériques.

### Chaînes d'approvisionnement

Les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour schématiser l'ensemble d'une chaîne d'approvisionnement. Ceci permet aux fabricants et aux entreprises de logistique de surveiller et de simuler des événements qui peuvent affecter la chaîne d'approvisionnement (p. ex. catastrophes naturelles, conflits de travail) afin d'aider à trouver des solutions de façon proactive. Produits Kruger, un des plus importants fabricants intégrés de produits forestiers au Canada, a récemment créé un jumeau numérique de sa chaîne d'approvisionnement pour stimuler la souplesse et l'efficacité opérationnelle.

# Moteurs, catalyseurs et obstacles

La présente section décrit les travaux de Neto et al. (2020) [voir la note en fin d'ouvrage (iii)] afin de mieux comprendre les facteurs qui stimulent et favorisent l'adoption et la mise en œuvre de jumeaux numériques dans le secteur de la fabrication ou qui constituent des obstacles à cette adoption et à cette mise en œuvre. Cette étude a été choisie en raison de son accent spécifique sur la fabrication et de ses renseignements provenant de fabricants, de fournisseurs de solutions et d'experts-conseils, ainsi que de la documentation du domaine. Ces constatations sont aussi utilisées ultérieurement pour compléter les renseignements recueillis dans le cadre de nos entrevues.

### Moteurs

Trois grands moteurs externes incitent les fabricants à mettre en œuvre des jumeaux numériques. Le premier est lié à la souplesse de la production afin de répondre à la demande du marché. La souplesse peut désigner la capacité de réviser de façon dynamique le calendrier de production afin d'accroître la capacité de production et d'optimiser l'utilisation du capital industriel et des ressources. Elle peut aussi désigner la capacité de développer un portefeuille de produits avec différentes variantes afin de permettre la personnalisation de masse.

Le deuxième moteur externe est lié aux forces de la concurrence et au besoin d'améliorer le rapport coût-efficacité, la qualité et la productivité. Ceci est réalisé en mettant en place des jumeaux numériques pour la détection et la prévention des défaillances, la maintenance prédictive, l'amélioration de la conception et des essais et l'optimisation des processus en général.

Le troisième moteur concerne le taux d'adoption des jumeaux numériques. Plus les jumeaux numériques deviennent omniprésents, plus les fabricants seront obligés d'investir dans ces technologies pour rester à jour.

Des facteurs internes stimulent aussi l'adoption de jumeaux numériques. D'abord, les jumeaux numériques sont souvent mis en place dans le cadre d'une initiative à l'échelle d'une usine ou d'une entreprise visant à optimiser les processus, à réduire les coûts, à accroître la productivité et à

améliorer la qualité des produits. Deuxièmement, les jumeaux numériques de produits (par opposition aux processus) peuvent être déployés dans le cadre d'une stratégie visant à réduire le temps de mise sur le marché, à améliorer l'expérience client ou à prédire (et réduire) les réclamations au titre des garanties. Troisièmement, la direction peut considérer les jumeaux numériques comme un outil pour soutenir la formation et le perfectionnement des employés et pour améliorer les résultats en matière de santé et de sécurité. Ceci est de plus en plus important en période de pénurie de main-d'œuvre. Quatrièmement, les fabricants peuvent vouloir accroître la transparence des processus et opérations.

La valeur des jumeaux numériques peut varier en fonction des entreprises et des secteurs. Les entreprises les mieux placées pour tirer profit des jumeaux numériques sont :

- Celles qui investissent beaucoup dans des prototypes physiques et qui mettent leurs produits à l'épreuve dans des conditions extrêmes qui ne peuvent être réalisées en laboratoire.
- Celles qui se concentrent sur la production de masse où les problèmes de qualité peuvent entraîner des pertes importantes.
- Celles qui ont subi des pertes en raison de milieux de travail dangereux ou dont les actifs sont dispersés à de multiples endroits et qui dépensent davantage pour les opérations que pour le capital, manquent de transparence et engagent d'importants frais d'entretien imprévus.

### Catalyseurs

Alors que les moteurs internes et externes peuvent convaincre les fabricants d'investir dans des jumeaux numériques, plusieurs autres facteurs augmentent la probabilité d'un rendement suffisant du capital investi. Ces facteurs comprennent les technologies et processus existants, la compétence de la main-d'œuvre et la culture et la stratégie organisationnelles.

D'abord, la possibilité pour un fabricant de tirer profit des

capacités liées à la simulation, à l'IdO et aux outils et logiciels d'analytique avancée est essentielle à la réussite de tout investissement dans des jumeaux numériques. Une cybersécurité et une infrastructure de stockage de données robustes sont également importants pour la réussite. Deuxièmement, un important facteur habilitant est la capacité d'un fabricant de dresser un plan de mise en œuvre bien défini et des processus pour corriger et gérer les données de façon précise. Troisièmement, les connaissances et les compétences des employés relativement aux technologies numériques favorisent une adoption et une mise en œuvre réussies. Quatrièmement, des cadres qui ont un engagement envers les projets à plus long terme et qui veillent à ce qu'il y ait des ressources suffisantes pour soutenir les investissements dans les jumeaux numériques sont essentiels à la réussite.

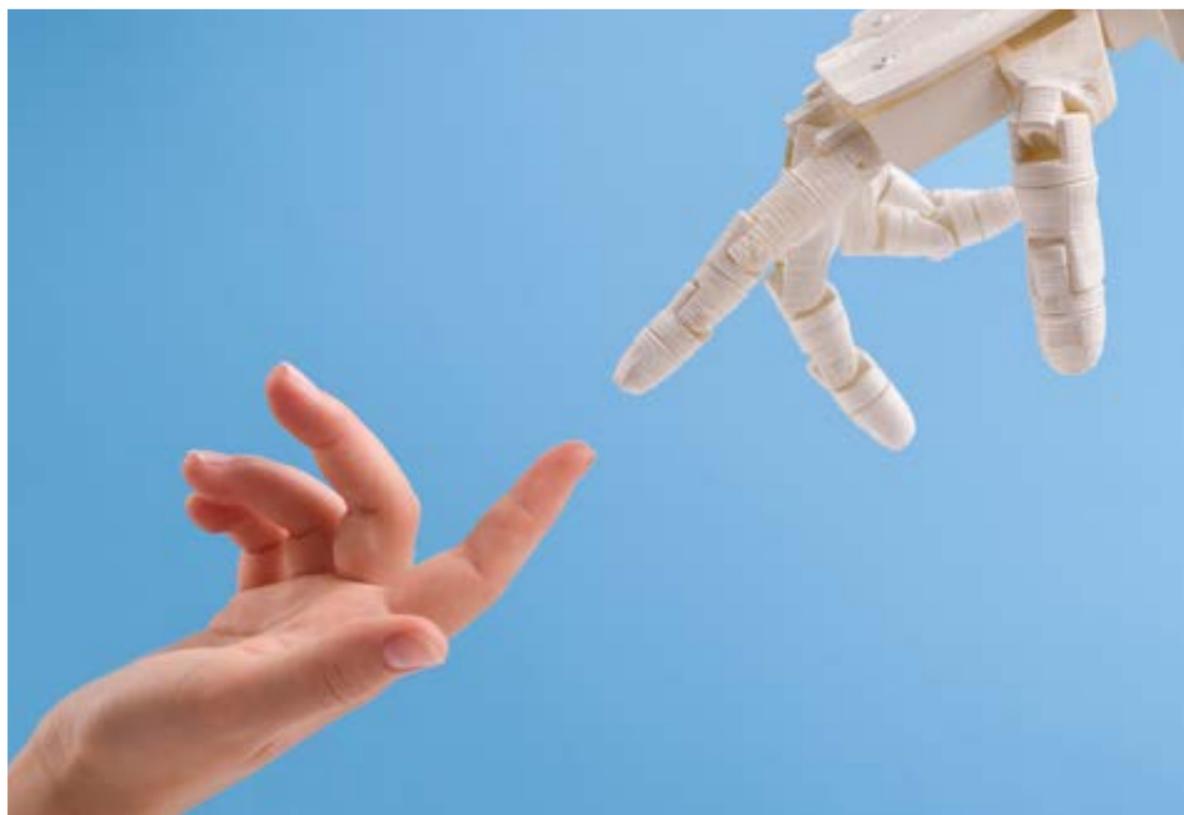
### Obstacles

Plusieurs facteurs représentent des obstacles à une mise en œuvre réussie. Le manque de maturité de certaines techniques et de certains outils liés aux jumeaux numériques peut empêcher les entreprises de tirer pleinement profit de leurs investissements. Ceci est particulièrement vrai pour les outils plus complexes et perfectionnés qui

sont nécessaires pour créer des réponses prédictives et autonomes. Dans le cas des petites et moyennes entreprises du secteur de la fabrication, la méconnaissance des principales technologies et principaux outils liés aux jumeaux numériques constitue un important obstacle à l'adoption. L'absence d'une infrastructure de TI robuste et bien administrée peut également nuire à la réussite.

Les difficultés liées à l'intégration de processus dans de multiples services ou divisions, à la présence de processus qui ne sont pas normalisés et à l'absence d'une feuille de route ou d'un plan de mise en œuvre clair peuvent rendre l'adoption plus difficile. Ces difficultés concernent particulièrement les fabricants qui comptent plusieurs divisions et qui considèrent chaque usine comme un « centre de profit » dont le directeur bénéficie d'une grande autonomie.

La résistance au changement et le manque de compétences du personnel créent aussi des obstacles. La même chose vaut pour les organisations dont les opérations sont cloisonnées, qui ont une aversion au risque ou qui sont incapables de quantifier les avantages liés aux jumeaux numériques ou l'éventuel rendement du capital investi dans des jumeaux numériques.



## Études de cas de fabricants canadiens

Cette section présente les études de cas de trois fabricants canadiens qui ont réussi la mise en œuvre de jumeaux numériques. Les études de cas sont fondées sur des entrevues menées auprès du personnel des entreprises en 2021 et d'autres renseignements publics fournis par ces entreprises.

### Avcorp

Le groupe Avcorp conçoit et fabrique des composantes et assemblages d'aérostructures composites, métalliques et hybrides. Ceux-ci sont intégrés dans les cellules d'aéronefs (p. ex. ailes, fuselage). Les produits d'Avcorp sont utilisés dans les avions commerciaux et militaires développés par plusieurs des plus grands fabricants de l'industrie aérospatiale mondiale, y compris BAE Systems, Boeing, Bombardier, Lockheed Martin et Subaru. L'entreprise emploie quelque 550 personnes à trois endroits (Burlington, en Ontario, Delta, en Colombie-Britannique et Gardena, en Californie).

Avcorp construit présentement un jumeau numérique d'une de ses chaînes de production qui fabrique des composantes complexes pour Boeing. Le but de ce projet est d'élaborer une validation de principe pour mettre en œuvre des jumeaux numériques à plus grande échelle dans la fabrication de composantes aérospatiales et en évaluer la réussite. En bout de ligne, Avcorp espère utiliser des jumeaux numériques pour détecter plus rapidement les problèmes, prédire de façon plus précise l'effet de changements de processus et fabriquer des composantes plus légères, plus solides, plus durables et plus écoénergétiques. Le budget du projet, qui compte plusieurs partenaires, se chiffre à 4,8 millions de dollars, y compris une contribution de 2,1 millions de dollars de la Supergrappe des technologies numériques.

Pour mener le projet, Avcorp s'est associé à Convergent Manufacturing Technologies, à AMPD Technologies et à LlamaZOO Interactive. Chacune de ces entreprises a une expertise particulière soit en aménagement de l'espace, en suivi des éléments d'actif ou en simulations de processus numériques. Des étudiants et des chercheurs de l'Université de la Colombie-Britannique fournissent aussi des services d'analyse de données et de développement de jumeaux numériques.

Le segment de la chaîne de production qui est reproduit

comprend des adhésifs structuraux pour coller plusieurs couches d'aluminium. Ce processus de collage permet d'éliminer le recours à des attaches, ce qui réduit le poids. Puisqu'il s'agit d'un processus rapide, les améliorations mineures de l'efficacité réduisent considérablement les coûts de production. On ne tolère toutefois que très peu les défauts de qualité. Plusieurs contraintes doivent être surmontées avant d'ajuster le processus de production. Un jumeau numérique offre à Avcorp un outil extrêmement utile pour mieux comprendre le processus et le modifier d'une manière qui générera des gains d'efficacité sans compromettre la qualité.

Plusieurs autres facteurs incitent Avcorp à adopter des jumeaux numériques. D'abord, les jumeaux numériques offrent une occasion d'informer plus efficacement les cadres au sujet des processus en atelier. Ceci favorise une meilleure prise de décisions par la direction. Deuxièmement, la création d'un jumeau numérique facilite la numérisation d'autres processus, comme l'enregistrement des données. Troisièmement, les jumeaux numériques peuvent aider l'entreprise à améliorer sa compréhension du temps d'écoulement et de la gestion de la capacité.

Avant de créer son jumeau numérique, Avcorp a amélioré sa capacité de recueillir des données en atelier. Ceci a consisté en l'installation de capteurs IdO pour automatiser la collecte de données qui était auparavant faite sur papier. Cependant, une partie de l'équipement de production n'était pas compatible avec l'IdO. Par conséquent, l'entreprise a mis en place de nouveaux processus d'enregistrement et de communication des données pour améliorer l'exactitude des données recueillies manuellement. Ceci a exigé un effort considérable des employés et des cadres de première ligne pour veiller à ce que les nouveaux processus soient mis en œuvre correctement.

Une fois le nouveau système de collecte de données en place, l'entreprise a mis en œuvre de nouveaux outils logiciels pour améliorer les capacités de simulation. Cette étape du projet comprenait l'élaboration de logiciels, dont bon nombre visaient l'agrégation des données recueillies de différents pôles de production. Elle comprenait aussi le réglage

des capteurs IdO pour améliorer la collecte et l'exportation des données. Même si ces mises au point ont causé des retards, elles ont été effectuées de façon satisfaisante par le personnel d'Avcorp et d'autres partenaires du projet.

Les phases futures du projet pourraient inclure l'intégration de la collecte et de la communication des données afin que l'entreprise puisse plus rapidement apporter des changements à la production en temps réel.

Un des objectifs généraux du projet est d'évaluer les avantages potentiels des jumeaux numériques dans tous les aspects des activités d'Avcorp. Les avantages immédiats se rattachent principalement aux améliorations quant à la collecte, au traitement et au stockage des données. Celles-ci sont essentielles à l'industrie de l'aérospatiale, qui donne la priorité à la traçabilité des produits. La réduction de la collecte manuelle des données permet de sauver du temps et de réduire les coûts. Il s'agit là, pour des entreprises comme Avcorp, d'incitatifs naturels pour adopter des jumeaux numériques.

Un autre avantage est une meilleure efficacité lorsque l'on change la cadence de production. En l'absence d'un jumeau numérique, le personnel d'Avcorp consacre un temps considérable à mettre à jour les plans de production au moyen de feuilles de calcul électroniques chaque fois qu'un changement est nécessaire. En faisant des simulations au moyen du jumeau numérique, les ingénieurs d'Avcorp peuvent établir les changements opérationnels optimaux avant leur mise en œuvre.

L'entreprise voit d'autres avantages potentiels à l'utilisation des jumeaux numériques. Ceux-ci comprennent l'essai d'autres aménagements d'usine avant le lancement de nouveaux produits, ce qui arrive au moins une fois par année dans chaque usine. Les gains d'efficacité ainsi réalisés permettent au personnel de consacrer du temps à d'autres tâches productives de recettes, ce qui est de plus en plus important en période de pénurie de main-d'œuvre.

Le principal défi à l'adoption future est lié à la difficulté de quantifier le RCI. La fabrication aérospatiale exige une importante production non normalisée et à faible volume. Cela fait en sorte qu'il est difficile de faire une estimation du RCI au niveau de l'usine. Un autre défi se rattache à la confidentialité des données. Avcorp est lié par des ententes

de confidentialité avec ses clients. Ces ententes limitent sa capacité de partager des données avec des partenaires de projet et d'autres tiers et obligent l'entreprise à augmenter la quantité de ressources qu'elle consacre à la surveillance de toute activité liée aux données.

Avcorp a relevé plusieurs leçons apprises dans le cadre de ce projet :

1. Définir les critères de réussite avant de mettre en œuvre un jumeau numérique. Les meilleurs projets comportent des critères robustes et mesurables pour déterminer la réussite. Ceux-ci peuvent comprendre des critères quantitatifs et qualitatifs. Il est important de les établir avant la mise en œuvre.
2. Réduire au minimum le cloisonnement des services. L'établissement de bonnes relations de travail entre les employés de la TI, du génie et de la production était essentiel à la réussite du projet. L'installation de capteurs IdO et l'adoption d'autres améliorations technologiques liées à la collecte des données ont exigé une étroite collaboration entre le service de TI et le personnel d'atelier.
3. Un effectif multidisciplinaire est un atout. Il est essentiel d'avoir un effectif doté d'une combinaison de connaissances des processus et logiciels de production. Dans le cas d'Avcorp, les membres de l'équipe qui avaient des connaissances en mécanique ont joué un rôle crucial en raison de leur connaissance des systèmes physiques et numériques.
4. Le ralliement des parties prenantes internes est essentiel. Une équipe de direction solidaire est essentielle. Dans le cas d'Avcorp, ceci comprenait le soutien des cadres de l'entreprise et du directeur général de l'usine.

#### CenterLine (Windsor) Limited

Fondée en 1957, CenterLine est une entreprise familiale qui fabrique et intègre des chaînes de soudage et de montage automatisées et dont le siège social est à Windsor, en Ontario. L'entreprise se spécialise dans les processus d'automatisation avancée et les technologies d'assemblage pour le soudage par résistance, le formage des métaux et la projection à froid. Ses autres produits comprennent des produits consommables pour le soudage et des composants d'équi-



pement. CenterLine emploie près de 1 000 personnes dans neuf installations de fabrication et quatre installations de service et de soutien à Windsor, aux États-Unis, au Mexique, au Brésil, en Allemagne, en Roumanie, en Inde et en Chine. Environ 700 de ses employés sont au Canada.

Les principaux clients de CenterLine comprennent des fabricants d'équipement d'origine (FEO) de l'industrie automobile et des fournisseurs et entreprises des industries du transport en commun, de l'aérospatiale et de la défense. Ces clients font face à d'importantes pressions concurrentielles. Ils comptent sur les produits d'automatisation de CenterLine pour réduire les coûts, maximiser la productivité et réduire le temps de mise sur le marché. Le recours à des simulations et à des jumeaux numériques a aidé CenterLine à répondre aux demandes ambitieuses de ses clients.

Au cours de la dernière décennie, deux importantes tendances ont poussé CenterLine à accroître davantage ses capacités en matière de simulations et de jumeaux numériques. D'abord, les clients de CenterLine ont dû s'adapter à des échéanciers de projet plus courts et se sont attendus à ce que leurs fournisseurs fassent de même. Deuxièmement, alors que les clients de CenterLine assumaient auparavant la responsabilité de la majorité des travaux de simulation, ils ont graduellement transféré cette responsabilité à leurs fournisseurs.

Pour s'adapter à ces changements et demeurer concurrentielle, CenterLine a dû accroître ses capacités en matière de simulations et de jumeaux numériques. En mettant en œuvre des mises à niveau incrémentielles sur une période de dix ans, l'entreprise a graduellement intégré l'utilisation de simulations et de jumeaux numériques dans ses proces-

sus. En plus de développer ses solutions, l'entreprise a aussi investi dans le logiciel de simulation et de fabrication numérique DELMIA de Dassault Systèmes pour soutenir cette transformation.

La principale application des simulations et jumeaux numériques chez CenterLine concerne la conception, la fabrication et l'essai de robots de soudage. En 2008, avant l'adoption de ces techniques dans ses processus, un projet type de CenterLine comprenait au plus 10 robots. L'entreprise faisait appel au dessin 3D, à la mise en plan 2D et à une simulation limitée pour réaliser ses projets.

Ces approches comportaient plusieurs contraintes. D'abord, il était difficile de prédire des temps de cycle exacts pour les projets. Généralement, jusqu'à 85 pour cent de la durée d'un projet se rattachait à des processus précédant toute fabrication et intégration. Les retards découlant des prédictions inexactes lors des premières étapes avaient pour effet de comprimer le temps nécessaire à la fabrication, à l'intégration et à l'essai des systèmes. Deuxièmement, les capacités de visualisation étaient limitées et moins perfectionnées, empêchant les clients de comprendre comment le système fonctionnerait une fois construit. Il était aussi impossible pour CenterLine et ses clients de déterminer précisément si la cellule robotisée finie pourrait être intégrée à l'atelier et aux processus du client et s'il y aurait des problèmes de sécurité.

Ces contraintes ont donné lieu à des défauts de conception qui n'ont été constatés qu'après qu'un système n'ait été construit comme tel. Il a donc fallu faire d'importants ajustements aux systèmes construits et déplacer de l'équipement coûteux et sensible à différents endroits dans l'atelier, ce

qui a entraîné une augmentation des coûts et une baisse de la satisfaction des clients.

Étant donné l'adoption à plus grande échelle des simulations et jumeaux numériques depuis 2008, CenterLine a surmonté ces difficultés. Aujourd'hui, CenterLine fait une simulation de chaque robot, processus et pièce d'équipement avant que la production et l'intégration de la cellule robotisée ne commencent. Ainsi, grâce aux nombreux avantages importants découlant du recours accru aux simulations et aux jumeaux numériques, l'entreprise peut maintenant livrer des projets qui comprennent jusqu'à 200 robots.

L'entreprise a beaucoup réduit les échéanciers de projet. Le délai de livraison des grands travaux est passé de deux ans à moins de 50 semaines en moyenne. Des économies de temps ont été réalisées à chaque étape de la conception à la production et à la livraison. Par exemple, les simulations ont aidé les concepteurs à obtenir la configuration de système optimale beaucoup plus rapidement à l'étape de la conception. En collaboration avec les équipes de production, les problèmes potentiels sont traités plus tôt.

De plus, si des clients demandent à CenterLine de respecter de nouvelles contraintes qui exigent que des modifications soient apportées à la conception, les mises à jour peuvent être faites rapidement. Dans d'autres cas, de meilleures capacités de visualisation aident CenterLine à travailler avec ses clients pour confirmer que les conceptions répondront à leurs besoins. Enfin, CenterLine peut simuler et analyser les conséquences en matière de sécurité de ses systèmes avant leur livraison. Ceci n'était pas possible sans le recours aux nouvelles technologies, qui permettent à CenterLine

d'éviter les rejets des clients en raison de préoccupations liées à la sécurité ou les modifications de système coûteuses aux étapes tardives des projets.

Lors de la phase de production, la capacité de CenterLine d'évaluer les temps de cycle de façon précise (exactitude de 90 à 95 %) lui a permis de faire des gains d'efficacité dans l'ordonnancement, la planification de la production et la gestion de projets. Ceci a eu pour effet d'améliorer le rendement budgétaire des projets et le taux de livraisons à temps. D'importantes économies de temps ont été réalisées en éliminant la nécessité de reprendre un système après son assemblage physique. Les temps d'enseignement des robots ont chuté de 75 pour cent grâce à la programmation hors ligne. Par ailleurs, puisque l'entreprise peut maintenant simuler des processus complets avant la production et l'intégration, elle se concentre sur les processus plutôt que sur l'outillage. Les outils sont développés en gardant à l'esprit le processus complet du client, ce qui élimine le besoin de modifier le système après la production. L'entreprise a obtenu un taux de zéro déplacement de robot après installation ou après des changements d'outillage depuis l'adoption à plus grande échelle des simulations et des jumeaux numériques.

La fonctionnalité est allée au-delà des phases de conception, d'ingénierie et de production. CenterLine utilise les simulations et les jumeaux numériques pour fournir des soumissions plus exactes à ses clients potentiels. En outre, l'entreprise a davantage confiance en ses capacités et sait ce qu'elle peut réaliser avant la signature d'un contrat. Ceci a aidé CenterLine à renforcer ses relations avec ses clients.



Les simulations et les jumeaux numériques ont aidé CenterLine à générer une valeur opérationnelle significative en comprimant les échéanciers de projet, en augmentant la qualité de ses produits finaux et en répondant mieux aux besoins des clients. Ils ont permis de quadrupler les ventes en transformant les capacités de CenterLine depuis 2008.

Même si elle a été très avantageuse pour l'entreprise, l'adoption des simulations et des jumeaux numériques a pris beaucoup de temps. Les efforts de CenterLine se sont étendus sur une décennie. Selon Allan Parks, le directeur de l'ingénierie, « la mise en œuvre est un long parcours, et CenterLine déplace lentement vers l'avant les pièces de l'échiquier de l'industrie 4.0 ». Il fait remarquer que l'entreprise a commencé avec des dessins 2D, est passée à des dessins 3D, puis a mis des modèles 3D à la disposition du personnel d'assemblage dans l'atelier.

Ce n'est qu'après avoir franchi ces étapes que CenterLine a pu commencer à utiliser des simulations de façon efficace pour comprendre à quoi ressemble le produit final. M. Parks souligne que même si l'entreprise se rapproche de l'élaboration d'un jumeau numérique complet, il reste tout de même certaines entraves. Par exemple, à l'heure actuelle, certaines pièces mineures des cellules robotisées ne sont pas reproduites numériquement. L'entreprise prévoit ajouter ces éléments bientôt.

Une équipe de direction avant-gardiste était un atout déterminant. En comprenant dès le début les avantages potentiels de ces technologies, l'équipe a pu graduellement accroître les capacités et faire des investissements progressifs. La formation du personnel sur la façon de mettre ces technologies en place dans l'ensemble de l'entreprise était fondamentale. Au fil du temps, l'effectif de CenterLine a appris à bien connaître ces technologies.

La mise en œuvre n'a pas été sans défis. Les premières années, le logiciel particulier acheté par CenterLine avait une compatibilité limitée et était utilisé avec l'équipement et les logiciels existants. Cette expérience a obligé l'entreprise à chercher des solutions compatibles avec un plus large éventail d'outils existants - elle a finalement décidé d'utiliser DELMIA. Néanmoins, certaines des fonctionnalités dont CenterLine a besoin ne sont tout simplement pas immédiatement disponibles. Par conséquent, l'entreprise a dû embaucher des spécialistes et développer à l'interne certains logiciels accessoires. Par exemple, les ingénieurs

de CenterLine ont dû créer les outils pour exporter les résultats de la CAO au système de gestion du cycle de vie des produits (GCVP) de l'entreprise, dans le format voulu. Initialement, l'entreprise a envisagé d'externaliser une partie de ce travail, mais l'absence d'un grand bassin de personnes compétentes l'a obligée à accroître ses capacités internes. Aujourd'hui, l'entreprise compte 12 employés à plein temps et plusieurs employés contractuels dans ses installations de Windsor et de Roumanie pour s'occuper des projets de simulation et de jumeau numérique.

Tout comme certains de ses pairs, CenterLine trouve qu'il est difficile de calculer le RCI de ces projets. Des avantages sont obtenus dans de nombreux domaines différents, ce qui les rend difficiles à agréger. Cependant, pour chaque mise à niveau incrémentielle, les investissements ont été justifiés à l'interne. Les projets ont été approuvés parce que la direction prévoyait tirer des avantages importants de ses investissements totaux antérieurs. Même si les avantages sont difficiles à agréger, les dépenses liées aux investissements sont davantage concrétisées. Les coûts liés au personnel ne représentent qu'une partie des investissements de CenterLine. D'autres coûts se rattachent aux licences de logiciels, aux serveurs, à l'installation et à l'entretien du nouveau matériel et à la formation des employés. L'entreprise estime avoir investi des millions de dollars au total sur une décennie pour accroître ses capacités liées aux simulations et aux jumeaux numériques.

À l'avenir, CenterLine continuera de faire des mises à niveau incrémentielles de ses capacités en matière de simulations et de jumeaux numériques. Ces efforts se poursuivront en même temps que les autres projets de l'entreprise visant la transformation numérique et l'adoption de l'industrie 4.0. À court terme, l'entreprise prévoit intégrer d'autres pièces et composants dans ses répliques virtuelles pour les jumeaux numériques. Par ailleurs, l'entreprise envisage d'utiliser des jumeaux numériques pour surveiller et optimiser son équipement de production (p. ex. centres d'usinage à commande numérique par ordinateur). Pour faciliter cette transition, l'entreprise s'assure que les nouvelles machines dans lesquelles elle investit sont compatibles avec son matériel et ses logiciels existants. CenterLine reconnaît que de tels investissements sont essentiels pour soutenir la concurrence. Comme le souligne M. Parks, « les clients s'attendent à cela, et si vous ne gardez pas une longueur d'avance sur vos concurrents, vous commencez à vous démenager pour les rattraper ».

CenterLine a appris plusieurs grandes leçons :

1. Commencez petit et faites des mises à niveau incrémentielles. L'adoption des technologies de l'industrie 4.0 se fait mieux si l'on a une stratégie à long terme et si l'on suit une approche par étapes. La mise en œuvre de projets multiples en même temps n'est pas pratique. Les cadres ont besoin de temps pour leur formation et celle de leurs employés en fonction de chaque nouvelle mise à niveau. Dans le cas de CenterLine, la nécessité de justifier chaque mise à niveau a aussi aidé l'entreprise à examiner ses objectifs, à fixer des buts atteignables et à apprendre de chaque étape du processus.
2. Faites attention aux limites des solutions prêtes à l'emploi. Les solutions prêtes à l'emploi peuvent être limitées ou ne pas être compatibles avec les systèmes existants. CenterLine a dû investir dans les talents pour concevoir des logiciels à l'interne et combler les lacunes des offres sur le marché. Ses efforts n'ont eu du succès que grâce aux ingénieurs en logiciels et développeurs de l'entreprise. Cependant, le manque de personnel qualifié était l'un des plus importants obstacles de ce processus.
3. Un effectif multidisciplinaire et des capacités en analyse des données sont importants. Le personnel chargé de mettre en œuvre ces technologies doit inclure des personnes qui comprennent le matériel, les logiciels, l'élaboration des applications, l'administration des réseaux (PRE, GCVP) et la gestion des données. Les personnes qui ont une expertise dans différents langages logiciels sont souvent nécessaires à l'élaboration de logiciels à l'interne en raison des différences des systèmes (p. ex. certains utilisent Java, d'autres C++).

#### Laval International

Fondé en 1975 et situé à Oldcastle, en Ontario (près de Windsor), Laval International fabrique des moules, de l'outillage et des pièces composites prêts pour la production pour un éventail d'industries, y compris l'automobile, l'agriculture, les camions lourds, les véhicules récréatifs et les sciences de la vie. Laval International offre également des services d'ingénierie et de prototypage. L'entreprise emploie 60 personnes, dont la majorité sont des gens de métier. Environ 90 pour cent de la production de Laval International

est exportée, principalement aux États-Unis.

Jonathan Azzopardi est devenu le président et chef de la direction de Laval International en 2009. Sous sa direction, Laval International a diversifié ses marchés tout en investissant beaucoup en R & D pour conserver sa position de leader de l'industrie. L'entreprise a investi entre 10 et 15 pour cent de ses recettes dans des projets de R & D.

Un des projets de R & D actuels de Laval International concerne la mise en œuvre de jumeaux numériques pour soutenir les capacités de fabrication flexible de l'entreprise. M. Azzopardi est d'avis que la fabrication flexible donne aux fabricants canadiens une occasion de se distinguer de leurs concurrents des pays où les coûts sont moins élevés, qui misent sur l'échelle.

La technologie des jumeaux numériques a été portée à l'attention de M. Azzopardi par la CAVE de RV de la Société de développement économique de Windsor-Essex (SDEWE). La CAVE de RV est un environnement public de réalité virtuelle qui sert d'installation d'enseignement, de formation et de recherche à l'appui de fabricants et de partenaires partout en Ontario. Le programme des jumeaux numériques de Windsor-Essex, une collaboration entre la SDEWE, le Collège St. Clair, l'Association canadienne des fabricants de moules (CAMM) et Automate Canada, se trouve au même endroit.

Le personnel de Laval International et de la CAVE de RV a collaboré à un projet pilote pour démontrer le potentiel des technologies des jumeaux numériques et de la réalité virtuelle à d'autres fabricants locaux. Ce projet comprenait la création d'une réplique numérique d'une des perceuses de Laval International utilisée pour fabriquer des moules à compression et à injection. Le résultat a été une représentation entièrement immersive, interactive et réaliste de la perceuse qui se comporte exactement comme son pendant physique.

Alors que le projet pilote était la première étape, l'objectif à moyen terme de Laval International est de développer des cellules de fabrication flexible qui consistent en plusieurs robots interconnectés. Laval International travaille sur plusieurs moules sur commande en même temps, ce qui exige que le personnel consacre beaucoup de temps au réglage des machines, à la programmation, au chargement, au

changement d'outils et au nettoyage. La cellule de fabrication flexible envisagée automatiserait plusieurs de ces activités, réduisant le temps de mise sur le marché et rationalisant les processus de production. Un jumeau numérique de cette cellule permettrait à Laval International de produire un moule pendant qu'elle en conçoit et essaie un autre virtuellement, ce qui entraînerait des économies de coûts et de temps et permettrait à l'entreprise de rivaliser plus efficacement avec ses concurrents à l'étranger.

Laval International suit une approche par étapes à l'égard des jumeaux numériques. Au cours des prochains six à douze mois, l'entreprise espère développer un jumeau numérique d'une cellule robotisée et élaborer des algorithmes pour déceler de façon proactive les éventuels problèmes de qualité. Après cela, l'entreprise prévoit construire des jumeaux numériques de cellules robotisées multiples et les relier, créant une cellule de fabrication flexible complète. Ceci permettra l'optimisation des flux de travaux et processus en fonction de différentes cellules robotisées. L'entreprise déploiera des capteurs IdO, des systèmes de reconnaissance visuels et des algorithmes personnalisés pour bâtir ce système interconnecté. On s'attend à ce que le jumeau numérique de ce système aide à accroître la productivité en rationalisant l'ordonnancement de la production et en réduisant le temps d'indisponibilité de l'équipement.

Ces projets pourraient exiger que Laval International investisse jusqu'à 500 000 \$. Par contre, les gains de productivité et économies de coûts prévus dépassent de loin ces coûts. Selon M. Azzopardi, ce risque en vaut la peine parce que cela aide l'entreprise à acquérir des avantages concurrentiels à long terme liés à la fabrication flexible.

Même si Laval International en est aux premières étapes, l'entreprise a déjà relevé quelques importantes leçons :

1. Engagez des talents avec des compétences compatibles. Même si les connaissances du personnel en place sont importantes, Laval International compte aussi sur les nouveaux diplômés dotés des compétences particulières nécessaires pour mettre en œuvre des jumeaux numériques dans un laps de temps relativement court. L'entreprise a embauché deux ingénieurs ayant de l'expérience en conception et en logiciels pour travailler exclusivement sur les jumeaux numériques.

2. Les jumeaux numériques offrent des avantages aux petites et moyennes entreprises du secteur de la fabrication. M. Azzopardi affirme que de nombreux petits fabricants croient que les jumeaux numériques ne sont pertinents que pour les plus grandes entreprises. Il n'est pas d'accord, soulignant qu'il y a plusieurs programmes financés par l'État qui rendent la technologie pertinente pour les fabricants et montrent qu'elle n'est pas hors de leur portée. Il donne comme exemple la collaboration de son entreprise avec la CAVE de RV.
3. Commencez petit et prenez des risques mesurés. Les dirigeants d'entreprise doivent être disposés à prendre des risques lorsqu'ils se lancent dans des projets qui concernent des technologies émergentes. Il peut être difficile de prévoir les coûts lorsque la courbe d'apprentissage est abrupte. Les projets pilotes et une mise en œuvre par étapes peuvent aider à gérer les risques et les coûts, et fournir de précieuses expériences d'apprentissage.



# Perspectives de fournisseurs de technologie et de partenaires de l'écosystème

## Arvizio

Arvizio est un leader technologique en logiciels de réalité augmentée (RA) pour entreprises visant la collaboration en temps réel d'utilisateurs multiples grâce à des modèles 3D à grande échelle et au guidage en RA au moyen de jumeaux numériques. L'entreprise optimise les modèles 3D existants des clients, en fait le balayage ou en établit des jumeaux numériques et les utilise dans des applications logicielles de RA. Les logiciels d'Arvizio permettent que des répliques numériques 3D d'objets physiques, comme l'équipement de production, soient partagées au moyen d'applications de vidéoconférence. Des équipes travaillant à différents endroits peuvent utiliser ces répliques numériques pour réaliser de la formation ou de la maintenance à distance ou pour faire l'essai d'autres aménagements d'usine avant d'installer ou de retirer de l'équipement.

Les logiciels d'Arvizio prennent en charge un large éventail de dispositifs de réalité augmentée et mixte comme HoloLens 2 de Microsoft, Magic Leap et la RA mobile (iOS et Android). Récemment, l'entreprise a lancé un nouveau produit qui fournit des instructions et une formation guidées par RA dans le secteur de la fabrication. Cet « instructeur en RA » permet la création et l'utilisation d'instructions étapes par étapes et guidées en RA, superposées à une machine physique dans une usine pour accélérer la formation et les travaux de maintenance. Il est ainsi possible d'utiliser des jumeaux numériques lors de la création des flux de travaux, dans le but de réduire les erreurs et d'accroître la sécurité grâce à des instructions visuelles faciles à comprendre qui se superposent au monde réel.

L'entreprise fait remarquer que la majorité de l'intérêt qu'elle a suscité jusqu'à maintenant provient des clients nord-américains. Elle a toutefois constaté un intérêt récent de la part de fabricants de l'Europe et de l'Asie-Pacifique en raison de la pandémie de COVID 19 et des tendances technologiques mondiales.

Arvizio croit que les jeunes préfèrent apprendre et travailler avec les technologies numériques interactives (plutôt que les médias imprimés). L'entreprise souligne que ses produits aident à combler l'écart des savoirs entre les professionnels en début de carrière et ceux qui approchent de la retraite. La solution logicielle d'Arvizio peut être déployée sur les réseaux de télécommunication existants, y compris le Wi-Fi, sans qu'il soit nécessaire de faire d'autres investissements dans les infrastructures.

## EXO Insights

EXO Insights est une entreprise établie à Waterloo qui développe des jumeaux numériques et des simulations d'environnements critiques à risque élevé où la sécurité et la précision sont cruciales, en utilisant des technologies de réalité augmentée et virtuelle. L'entreprise dessert avant tout l'industrie nucléaire et l'industrie de la défense. Une des applications de sa technologie consiste à reproduire numériquement des salles de commande de réacteur nucléaire et à créer des simulations immersives qui sont utilisées pour former le personnel pour des situations qu'il n'est pas possible de reproduire en raison de préoccupations liées à la sécurité. EXO Insights crée également des jumeaux numériques d'humains en utilisant des capteurs biométriques. Ces jumeaux numériques mesurent des facteurs comme la fatigue et la vivacité intellectuelle pour créer des modèles afin d'analyser le rendement, de cerner les sources d'erreurs et d'améliorer la perception spatiale.

EXO Insights constate que de nombreux fabricants ont des systèmes existants qui, au fil du temps, deviennent moins compatibles avec les technologies émergentes. Les jumeaux numériques peuvent venir compléter ces systèmes existants, qui peuvent toutefois devoir faire l'objet de mises à niveau matérielles, comme des capteurs IdO, pour être efficaces.

La stratégie d'EXO Insights consiste à approcher des entre-

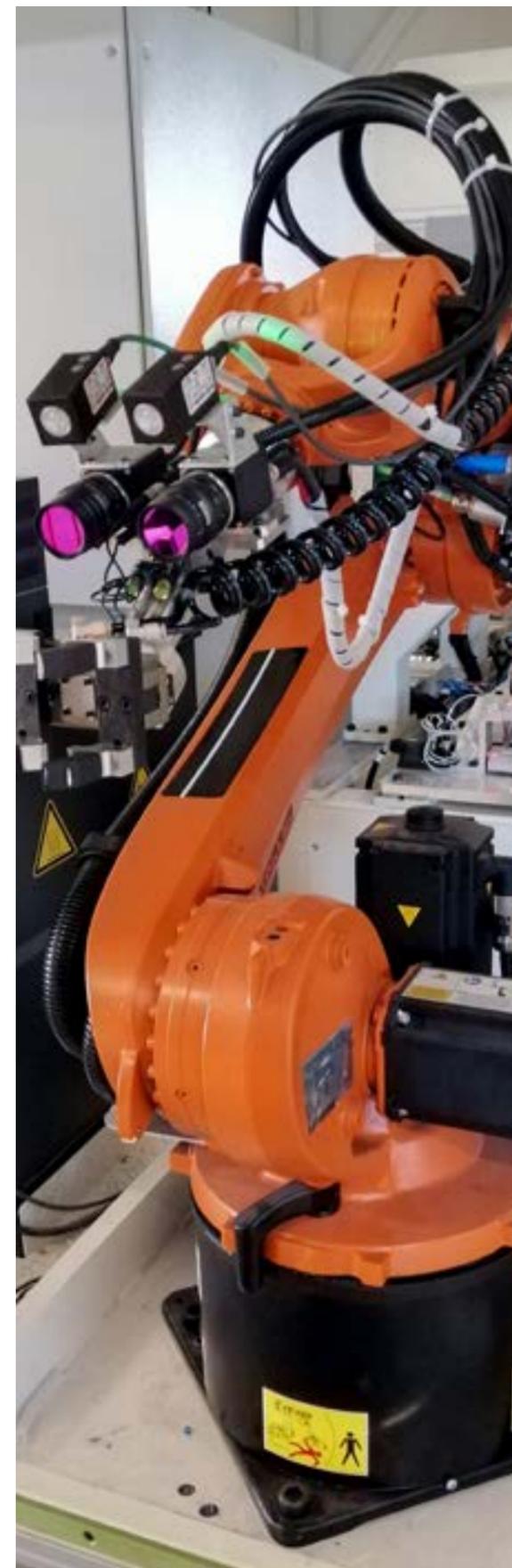
prises avec des programmes de transformation numérique spécialisés et du personnel. À mesure que le dossier de décision des jumeaux numériques devient plus solide, l'intérêt de l'industrie aéronautique, de l'industrie des dispositifs médicaux et de l'industrie pharmaceutique augmente. Selon EXO Insights, les entreprises qui s'intéressent le plus aux jumeaux numériques font partie surtout des industries où les coûts financiers et humains des erreurs sont élevés, et les entreprises dont les dirigeants ont un réel intérêt dans la transformation numérique.

## Hive Virtual Plant

Le Hive Virtual Plant, une entreprise de Georgetown, en Ontario, construit des répliques virtuelles d'usines et d'équipement de production afin d'appuyer l'installation et le retrait d'équipement. Le Hive Virtual Plant utilise des scanners LiDAR pour générer des répliques physiques 3D. En plus de l'installation et du retrait d'équipement, la technologie de l'entreprise numérise la documentation liée à l'équipement de production (p. ex. schémas, historique de maintenance) de manière à ce qu'il soit possible d'accéder à ces documents virtuellement. L'entreprise a mis en œuvre un petit nombre de projets pour des fabricants jusqu'à maintenant, mais s'efforce généralement de générer de nouvelles affaires dans le secteur. Cela est dû, selon l'entreprise, au fait que les fabricants connaissent mal les technologies numériques et les appréhendent.

## Siemens

Siemens est un pionnier des technologies des jumeaux numériques et de l'intelligence artificielle (IA) pour le secteur de la fabrication. Gorve Rekhi, de la société Digital Enterprise de Siemens Canada, souligne que la technologie des jumeaux numériques est bien établie et que son application a donné lieu à de nombreux avantages dans différentes industries. Cependant, il indique également que l'application des jumeaux numériques requiert un changement de mentalité au sein des entreprises et même au sein d'industries dans leur ensemble. L'application des jumeaux numériques exige une étroite collaboration entre le partenaire technologique et le client parce que chaque client a ses propres objectifs et défis. Les entreprises doivent donc aborder les jumeaux numériques différemment d'autres technologies d'automatisation traditionnelles (p. ex. automates programmables).





Les jumeaux numériques sont utilisés depuis assez longtemps, mais leurs capacités et applications ont évolué au fil des ans. Par le passé, ils ont été déployés pour différentes applications en conception et en production. Étant donné l'émergence de l'internet des objets (IdO) industriel et de l'IA appliquée, qui permettent la saisie de données de terrain et leur utilisation pour l'apprentissage machine, les jumeaux numériques ont été étendus à l'ensemble du cycle de vie des produits. Les fabricants utilisent des jumeaux numériques pour confirmer dès le départ le rendement d'un produit qu'ils sont en train de développer. Ils s'en servent aussi pour construire une représentation virtuelle complète de la façon dont un produit ou un processus fonctionne dans la vraie vie afin d'obtenir un vrai jumeau numérique en boucle fermée. Les jumeaux numériques peuvent ensuite être étendus pour générer davantage de données pour les algorithmes d'apprentissage machine ou être utilisés pour prédire les défaillances de composants essentiels.

Le degré d'adoption des jumeaux numériques dans l'ensemble du cycle de vie varie au sein de l'industrie selon le niveau de maturité technologique du client et le secteur de l'entreprise qu'il souhaite améliorer.

L'exigence de base pour les jumeaux numériques en boucle fermée est d'avoir la capacité de représenter virtuellement un produit ou un processus et d'avoir des données de terrain exactes et exhaustives. L'objectif est alors de continuellement fournir des données au jumeau numérique pour avoir une boucle d'amélioration constante. Les fabricants sont de plus en plus conscients de ce qu'il est possible de faire avec les données qu'ils recueillent. Cependant, ils peuvent ne pas être au courant de tout l'éventail d'outils qui existent pour les aider à optimiser les processus.

Les jumeaux numériques offrent des avantages considérables aux entreprises dans les industries à base de processus comme l'industrie des aliments et boissons, l'industrie pétrolière et gazière et l'industrie de la fabrication de produits chimiques, selon M. Rekhi. Bon nombre de ces entreprises ont déjà investi en R & D pour optimiser leurs processus, et les jumeaux numériques et l'intelligence artificielle représentent des étapes naturelles dans l'évolution des technologies de production de ces entreprises. En ce qui concerne le travail en discontinu, des fabricants des industries de l'automobile, de l'aérospatiale et de la machinerie ont aussi démontré un intérêt considérable à l'égard des

jumeaux numériques. Par exemple, les fabricants d'automobiles peuvent tirer parti des simulations multi-physiques pour faire l'essai de nouveaux matériaux composites ou utiliser des jumeaux numériques pour confirmer le rendement d'une nouvelle architecture de véhicule électrique.

Ces technologies deviennent de plus en plus abordables et accessibles aux petites et moyennes entreprises (PME). Selon M. Rekhi, les PME sont généralement assez ouvertes et flexibles, et elles devraient être encouragées et soutenues dans l'adoption de technologies novatrices pour leur donner un avantage concurrentiel. Cependant, le manque de ressources internes, comme une équipe de TI dédiée, peut constituer un obstacle pour les plus petites entreprises. Dans de tels cas, les PME peuvent entrer en contact avec des partenaires externes pour obtenir du soutien dans les domaines où elles n'ont pas l'expertise voulue. Par contre, c'est un défi en soi que d'étudier l'ensemble complexe des fournisseurs, développeurs et solutions et de trouver l'offre qui convient le mieux.

M. Rekhi recommande que les PME mettent en œuvre des jumeaux numériques de façon progressive dans le cadre de projets pilotes à plus petite échelle pour en confirmer la valeur. Les jumeaux numériques sont à géométrie variable et offrent l'occasion d'analyser d'importants aspects des activités commerciales tout au long du processus de mise en œuvre. Ceci peut aider à personnaliser la forme des jumeaux numériques.

Le RCI varie d'un projet à l'autre, et il est donc essentiel de définir ce que le succès signifie pour un projet donné (réduction des coûts, réduction des déchets, meilleur flux du matériel, etc.). Il convient d'utiliser des références portant sur des cas pratiques semblables pour déterminer les attentes.

Finalement, M. Rekhi indique que la mise en œuvre des technologies des jumeaux numériques et d'intelligence artificielle exige le soutien de multiples intervenants et doit être fait dans un esprit de collaboration. Ces investissements peuvent prendre du temps, mais ils sont de plus en plus importants pour aider à transformer les entreprises et les préparer pour l'avenir.

#### CAVE DE RV

La CAVE de réalité virtuelle (Virtual Reality Cave Automa-

tic Virtual Environment - VR CAVE) est le plus important environnement de réalité virtuelle accessible au public au Canada; il a été mis en place par l'entremise du Réseau d'innovation pour les véhicules automatisés (RIVA) de la province de l'Ontario, administré par le Centre d'innovation de l'Ontario (CIO). La CAVE de RV a été conçue pour soutenir les essais de simulation de PME basées en Ontario qui travaillent avec les technologies des véhicules connectés et autonomes (VCA); le nombre de cas pratiques ayant augmenté, elle soutient maintenant également le secteur de la fabrication de pointe de la province. La CAVE de RV sert de ressource d'enseignement, de formation, de recherche et d'essai pour les fabricants et autres partenaires de l'écosystème.

Jusqu'à maintenant, la CAVE de RV a collaboré avec différents fabricants de la région pour élaborer des cas pratiques et des projets pilotes faisant appel à des jumeaux numériques. Les membres de l'équipe de simulation de la CAVE de RV font la promotion de l'utilisation de jumeaux numériques pour la formation ainsi que pour la simulation et l'essai de produits et de processus, d'aménagements d'usine et de revues de conception, et pour améliorer l'expérience client.

Le centre utilise les données DAO/FAO d'entreprises collaboratrices et de partenaires pour construire des répliques virtuelles et des jumeaux numériques. Certains des premiers défis auxquels était confronté le personnel de la CAVE de RV étaient liés aux capacités en matière de logiciels et de langages de programmation. Selon l'équipe de simulation de la CAVE de RV, l'élaboration d'un jumeau numérique de base peut prendre entre trois et quatre semaines, alors qu'une application plus complexe et interactive peut exiger de six mois à un an. Le programme pilote mené en partenariat avec le Collège St. Clair a permis d'apprendre beaucoup, et l'intérêt a continué à croître. Le programme en est maintenant à la deuxième phase, où l'équipe de Recherche et Développement du Collège St. Clair, avec le soutien de l'équipe de la CAVE de RV, aidera des fabricants de pointe à tirer profit des avantages des jumeaux numériques.

# Discussion et recommandations

Les jumeaux numériques sont une composante importante de l'industrie 4.0 et de l'avenir de la fabrication de pointe. Même si leurs applications, leurs coûts et leurs avantages varient selon les fabricants et les industries, les motivations, les défis et les stratégies de mise en œuvre des entreprises ont plusieurs points en commun.

Chaque fabricant avec lequel nous avons parlé était au courant de la capacité des jumeaux numériques (et de l'industrie 4.0 de façon générale) de transformer la fabrication. De plus, les fabricants sont d'avis que les jumeaux numériques sont un point tournant vers l'adoption d'autres technologies de l'industrie 4.0 et technologies de production numérique. Ils étaient donc disposés à prendre certains risques et à engager des ressources pour adopter et mettre en œuvre des jumeaux numériques. Les trois entreprises mises de l'avant dans le présent rapport avaient en commun le fait qu'elles étaient conscientes des avantages, qu'elles étaient disposées à passer à l'action et qu'elles ont élaboré un plan de mise en œuvre.

Les forces qui ont mené à la mise en œuvre des jumeaux numériques étaient tant internes qu'externes. Dans le cas d'Avcorp, la meilleure compréhension d'un processus de fabrication grâce à des jumeaux numériques a entraîné des gains d'efficacité de la production, une augmentation de la qualité des produits et une réduction des coûts. Dans le cas de CenterLine, les facteurs les plus importants étaient des facteurs externes, comme la réduction du temps de mise sur le marché pour répondre aux attentes des clients et la réduction de la reprise après installation afin d'améliorer la satisfaction des clients et de réduire les coûts au minimum. Chez Laval International, des facteurs tant internes qu'externes se sont avérés importants. L'entreprise souhaitait améliorer l'efficacité de ses opérations et en accroître la flexibilité en raison d'une concurrence accrue de l'étranger. Le fil conducteur reliant les trois entreprises était que les jumeaux numériques étaient une condition préalable de leur réussite et compétitivité futures.

Plusieurs caractéristiques propres à chaque entreprise ont aidé même les fabricants les plus motivés à réussir la mise en œuvre des jumeaux numériques. Une bonne connaissance des capteurs IdO ainsi que de la collecte et de l'analyse

avancées des données était importante, tout comme l'étaient les capacités de l'effectif existant.

Une équipe de direction solidaire était également essentielle. Dans le cas de CenterLine, un engagement à long terme à l'égard des technologies de simulation a aidé l'entreprise à mettre en œuvre des jumeaux numériques en apportant une série de mises à niveau incrémentielles aux systèmes existants. En ce qui concerne Avcorp, en raison de l'importance de la traçabilité des pièces et processus dans l'industrie de l'aérospatiale, l'entreprise avait déjà dû mettre en place de robustes systèmes de collecte de données avant la mise en œuvre des jumeaux numériques. Dans le cas de Laval International, le plein appui du propriétaire et PDG de l'entreprise a garanti le soutien et les ressources nécessaires pour le projet, de sa conception à son achèvement.

La capacité et la volonté d'une entreprise d'investir des ressources pour mettre en œuvre des jumeaux numériques sont cruciales. Alors que CenterLine a financé la totalité de ses investissements dans les jumeaux numériques, les jumeaux numériques d'Avcorp et de Laval International ont été financés en partie par des programmes gouvernementaux. Dans le cas d'Avcorp, la Supergrappe des technologies numériques a fourni du financement. En ce qui concerne Laval International, son étroite relation de travail avec la CAVE de RV a aidé à sensibiliser l'entreprise aux avantages potentiels des jumeaux numériques et a facilité leur mise en œuvre initiale. Ces derniers cas démontrent l'importance d'un soutien financier et non financier de la part d'initiatives financées par l'État pour ce qui est de susciter l'intérêt et de renforcer les capacités qui encouragent les fabricants à investir dans des jumeaux numériques.

La difficulté de quantifier le RCI lié à la mise en œuvre de jumeaux numériques demeure un défi pour les fabricants. Les projets de jumeaux numériques comportent plusieurs postes budgétaires, y compris le matériel, les licences de logiciels, le développement de logiciels et le recrutement de nouveaux employés. Même si certains coûts peuvent être ventilés plus facilement (p. ex. achats de matériel), le coût total d'autres éléments est plus difficile à établir. Les investissements nécessaires pour bien mettre en œuvre des jumeaux numériques peuvent aussi évoluer à mesure que le

projet avance. Cela est particulièrement vrai dans le cas des logiciels. Cette part d'incertitude a ralenti l'adoption des jumeaux numériques par les fabricants.

La valeur monétaire des avantages liés aux jumeaux numériques est également difficile à déterminer. Il y a plusieurs raisons à cela. Il est difficile d'isoler les avantages obtenus des jumeaux numériques comparativement aux avantages obtenus des investissements plus larges dans la numérisation. La même chose vaut pour certains gains d'efficacité opérationnelle réalisés tout au long du processus de mise en œuvre. Ceux-ci peuvent comprendre la capacité améliorée des cadres de prendre des décisions en raison d'une meilleure compréhension des processus de production. Les améliorations apportées aux processus de collecte de données peuvent aussi procurer des avantages plus grands mais difficiles à quantifier.

Les jumeaux numériques sont précieux pour les fabricants. Cela étant dit, l'investissement dans les jumeaux numériques comporte certains risques. Pour réduire ces risques, les fabricants pourraient tenir compte des pratiques ci-après :

Avant la mise en œuvre :

- Cernez les besoins et les défis de l'entreprise, et assurez-vous que les jumeaux numériques peuvent y répondre.
- Fixez des buts, des objectifs et un échéancier réaliste (comportant préférentiellement plusieurs étapes intermédiaires).
- Faites une estimation d'un RCI prévu, ou du moins d'un RCI minimum nécessaire.
- Déterminez les risques liés aux besoins financiers et opérationnels.
- Déterminez les capacités qui existent à l'interne, celles qui peuvent être acquises à l'interne et celles pour lesquelles il convient de faire appel à des tiers.
- Si la mise en œuvre de jumeaux numériques est un but à moyen ou long terme (plutôt qu'à court terme), envisagez de faire des investissements dans le matériel et les logiciels qui sont compatibles avec les technologies des jumeaux numériques.
- Accroissez dès que possible la sensibilisation, l'intérêt et le soutien parmi les cadres et le personnel.
- Identifiez les partenaires de l'écosystème, comme les universités, les collèges ou d'autres organismes publics (p. ex. NGen, Supergrappe des technologies numéri-

ques, PARI, Conseil national de recherches, CAVE DE RV), qui connaissent le domaine et peuvent fournir du soutien à toute étape du projet.

Une fois qu'un fabricant a décidé de mettre en œuvre des jumeaux numériques :

- Commencez au début. Déterminez les projets pilotes potentiels. Passez aux étapes suivantes de façon progressive, en fonction de l'expérience acquise et des leçons apprises des projets pilotes.
- Cherchez à constamment améliorer les capacités de collecte et d'analyse des données, y compris celles qui semblent conceptuelles. Celles-ci seront essentielles à la mise en œuvre réussie.
- Recrutez les employés et assurez leur perfectionnement en gardant à l'esprit les jumeaux numériques.
- Encouragez la collaboration entre les principaux intervenants internes, surtout entre les services ou divisions (p. ex. TI et production ou opérations).
- Déterminez les capacités avec les fournisseurs, les clients et les collaborateurs existants.
- Formez le personnel en même temps que la mise en œuvre, et divisez le projet en phases pour aider à garder le rythme de la formation.

## Conclusion

Les fabricants de toutes tailles perçoivent de plus en plus les jumeaux numériques comme un outil important pour réaliser des gains de productivité. Les jumeaux numériques peuvent aider les fabricants reproduire un objet physique ou un processus et fournir des idées et des renseignements précieux. Bien conçus, les jumeaux numériques ont le potentiel de devenir une source unique de vérité et de permettre la traçabilité. Les PME qui osent prendre les devants en investissant dans les jumeaux numériques sont plus susceptibles de devancer la concurrence. Les études de cas présentées dans le présent rapport sont quelques exemples de façons dont des fabricants canadiens ont utilisé des jumeaux numériques dans leur parcours de transformation numérique.

Les organisations comme NGen et le Trillium Network voient les jumeaux numériques comme une occasion d'améliorer le secteur canadien de la fabrication. L'adoption accrue des jumeaux numériques peut aussi aider à hausser les taux d'adoption de l'IdO, de l'IA, de la RV, des chaînes de blocs et d'autres technologies de fabrication de pointe. Les investissements judicieux dans ces technologies peuvent aider les fabricants canadiens et nos entreprises spécialisées dans les technologies à collaborer et à accroître le rôle prépondérant du Canada en matière de fabrication de pointe.

Des études de Statistique Canada montrent que les entreprises canadiennes tiennent à optimiser leurs processus existants et à adopter de nouvelles technologies de processus. Comme l'indiquent les études de cas, les jumeaux numériques peuvent jouer un rôle déterminant dans ces efforts d'optimisation des processus. Les organisations comme NGen sont là pour accroître la sensibilisation, faciliter les collaborations et potentiellement fournir un soutien financier pour stimuler les percées dans les technologies de fabrication de pointe et faire croître le secteur canadien de la fabrication de pointe. Le réseau pancanadien de membres de NGen et son partenariat avec le Trillium Network peuvent être des ressources utiles pour trouver des partenaires dans le parcours de la transformation numérique.

Il est essentiel pour la réussite de toute initiative comportant des jumeaux numériques que l'attention voulue soit accordée à la confidentialité des données, à la sécurité des données et aux questions d'interopérabilité. Lorsque la mise

en œuvre de jumeaux numériques est envisagée, il est important de mettre l'accent sur une transformation à l'échelle de l'entreprise qui procure de grands avantages et un RCI potentiellement important. Plusieurs leaders d'opinion considèrent les jumeaux numériques comme le début du méta-vers industriel. Il est maintenant temps pour nous d'agir et d'être à l'avant plan du développement et de l'adoption de ces technologies de pointe, de l'optimisation de nos processus de fabrication et de la concrétisation de l'avenir de notre secteur de la fabrication.

## Notes en fin d'ouvrage

i Grieves, M. et Vickers, J. (2016). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems dans F.-J. Kahlen et al. (eds.) *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, p. 85-113. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)

ii Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., et Wang, L. (2010). DRAFT Modeling , Simulation , Information Technology & Processing Roadmap. National Aeronautics and Space Administration, p. 11-27. [https://www.nasa.gov/pdf/501321main\\_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf)

iii Neto, A. A., Deschamps, F., da Silva, E. R. et de Lima, E. P. (2020). Digital Twins in manufacturing: An assessment of drivers, enablers and barriers to implementation. *Procedia CIRP*, 93, p. 210-215. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.131>

iv Tao, F., Zhang, H., Liu, A. et Nee, A. Y. (2019). Digital Twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), p. 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>

v Shen, Z.-J. M., Wang, L. et Deng, T. (2021). Digital Twin: What it is, why do it, related challenges, and research opportunities for Operations Research. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3777695>

vi Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A. et Calinescu, A. (2020). Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions. *ArXiv Preprint*. <https://arxiv.org/abs/2011.02833>

vii Tao, F., Zhang, H., Liu, A. et Nee, A. Y. (2019). Digital Twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>

viii [https://www.mayahtt.com/success\\_story/Electra%20Meccanica%20-](https://www.mayahtt.com/success_story/Electra%20Meccanica%20-)

ix <https://bioprocessintl.com/bioprocess-insider/therapeutic-class/podcast-gsks-digital-twin-approach-to-vaccine-development/>

x <https://www.prnewswire.com/news-releases/gastops-to-support-uscg-ice-breaker-service-life-extension-with-propulsion-system-digital-twin-design-301316230.html>

xi Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H. et Xu, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>

xii <https://www.steptools.com/>

xiii <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/sinumerik-one/sinumerik-one-for-machine-users.html>

xiv [https://www.ey.com/en\\_ca/advanced-manufacturing/how-digital-twins-give-automotive-companies-a-real-world-advantage](https://www.ey.com/en_ca/advanced-manufacturing/how-digital-twins-give-automotive-companies-a-real-world-advantage)

xv <https://www.sme.org/technologies/articles/2021/april/braskems-use-of-digital-twin-exemplifies-society-5.0/>

xvi <https://www.kruger.com/news/25m-investment-to-implement-cutting-edge-ai-capabilities-at-kruger-products-sherbrooke-plant/>