

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

Le Québec économique 9

**Perspectives et défis
de la transformation
numérique**



Avec la collaboration de
FABIANO ARMELLINI
BENOIT AUBERT
CATHERINE BEAUDRY
CONRAD BOTON
SIMON BOURDEAU
MARIO BOURGALT
BRYAN CAMPBELL
PIERRE CLÉROUX
JEAN-CLAUDE CLOUTIER
PATRICK COHENDET
MARIE CONNOLLY
CHRISTOPHE DANJOU
NATHALIE DE MARCELLIS-WARIN
BENOIT DOSTIE
GENEVIEVE DUFOUR
DANIEL FORGUES
LUC GODBOUT
PIERRE HADAYA
BEN HADJ
CATHERINE HAECK
GEORGES HAGE
IVANKA IORDANOVA
DANIEL J. CARON
CAROLYN J. HATCH
LAURENT JOBLLOT
MICHEL MAGNAN
PHILIPPE MARCHILDON
ROBERT NORMAND
INGRID PEIGNIER
ROBERT PELLERIN
NATHALIE PERRIER
GIULIA PIANTONI
ÉRIK POIRIER
LOUIS RIVEST
MICHAËL ROBERT-ANGERS
ANNIE ROYER
LAURENT SIMON
LAURENCE SOLAR-PELLETIER
DALIBOR STEVANOVIC
NASRIN SULTANA
EKATERINA TURKINA
LUC VINET
THIERRY WARIN
MAJLINDA ZHEGU

Le Québec économique 9

**Perspectives et défis
de la transformation
numérique**

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

Le Québec économique 9

**Perspectives et défis
de la transformation
numérique**



Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations

cirano.qc.ca

qe.cirano.qc.ca

Le CIRANO collabore avec de nombreux centres et chaires de recherche universitaires dont on peut consulter la liste sur son site Web.

© CIRANO, 2020

Tous droits réservés. Reproduction partielle permise avec une référence au document source, incluant les noms des auteurs et des autrices dont le texte est reproduit ou cité, et une mention du copyright.

Les idées et les opinions émises dans cette publication sont sous l'unique responsabilité des auteurs et des autrices et ne représentent pas nécessairement les positions du CIRANO ou de ses partenaires.

ISBN : 978-2-89609-010-5

ISBN PDF : 978-2-89609-011-2

ISBN EPUB : 978-2-89609-012-9

Livre CIRANO : 2020LI-01

www.cirano.qc.ca

Conception graphique, révision et mise en pages : Mardigrafe inc.

Illustration de la couverture : © iStock

Table des matières

LE QUÉBEC ÉCONOMIQUE 9 PERSPECTIVES ET DÉFIS DE LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE

Conventions, symboles et sigles utilisés dans ce livre 9

Introduction

Changer, transformer, innover

par Nathalie de Marcellis-Warin, Benoit Dostie et Genevieve Dufour 11

Partie 1 : Le Québec en perspective¹

CHAPITRE 1

La pandémie freine une économie en pleine croissance

par Pierre Cléroux 25

CHAPITRE 2

**L'immigration comme solution aux effets du ralentissement
démographique au Québec**

Enjeux et pistes de solution découlant du Congrès 2019
de l'Association des économistes québécois

par Jean-Claude Cloutier 49

Partie 2 : Transformation numérique et politiques publiques innovantes

Section 2.1 : La transformation numérique

CHAPITRE 3

**L'intelligence artificielle : un puissant levier
de développement économique pour le Québec**

par Ben Hadj 77

1. Les chapitres de cette partie reviennent à chaque édition du *Québec économique*.

CHAPITRE 4

**Les technologies et les politiques publiques en appui
à l'essor de l'intelligence artificielle**

par Catherine Beaudry, Georges Hage, Giulia Piantoni
et Laurence Solar-Pelletier 113

CHAPITRE 5

Projets de transformation numérique

Bénéfices, enjeux et quelques bonnes pratiques
par Simon Bourdeau, Pierre Hadaya et Philippe Marchildon 149

CHAPITRE 6

**Collaboration et innovation : comment la transformation
numérique change la donne**

par Laurence Solar-Pelletier, Catherine Beaudry
et Majlinda Zhegu 171

**Section 2.2 : Le marché du travail et la formation
face à la transformation numérique**

CHAPITRE 7

Point de vue

**L'importance des mathématiques et de la numératie
pour le Québec**

par Luc Vinet 205

CHAPITRE 8

Transformation numérique et formation continue

par Benoit Dostie et Genevieve Dufour 221

CHAPITRE 9

**Changements technologiques et polarisation
des salaires au Québec**

par Benoit Dostie 247

Section 2.3 : Les données et la transformation numérique

CHAPITRE 10

Point de vue

L'accessibilité aux données des administrations publiques

par Catherine Haeck et Marie Connolly 269

CHAPITRE 11

Science des données, réseaux sociaux et politiques publiques

par Benoit Aubert, Nathalie de Marcellis-Warin et Thierry Warin 285

CHAPITRE 12

Prévision macroéconomique dans l'ère des données massives et de l'apprentissage automatique

par Dalibor Stevanovic 315

Section 2.4 : L'État et la transformation numérique

CHAPITRE 13

Point de vue

Les défis fiscaux associés au commerce électronique

par Luc Godbout et Michaël Robert-Angers 355

CHAPITRE 14

Technologies numériques et efficacité organisationnelle

Repenser l'organisation publique selon ses flux informationnels

par Daniel J. Caron 373

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

CHAPITRE 15

Les enjeux de la transformation numérique pour le secteur financier

par Michel Magnan, Robert Normand et Bryan Campbell 399

CHAPITRE 16

La révolution numérique appliquée à l'agriculture au Québec

par Annie Royer, Nathalie de Marcellis-Warin,
Ingrid Peignier et Thierry Warin 417

CHAPITRE 17

Transformer le secteur de la construction par le numérique

Un chantier ambitieux et nécessaire

par Mario Bourgault, Christophe Danjou, Robert Pellerin,
Nathalie Perrier, Conrad Botton, Daniel Forgues,
Ivanka Iordanova, Érik Poirier, Louis Rivest et Laurent Joblot 433

CHAPITRE 18

L'aérospatiale numérique au Québec

Un écosystème innovant au cœur des enjeux de la société

par Fabiano Armellini, Catherine Beaudry, Mario Bourgault,
Patrick Cohendet, Laurent Simon, Laurence Solar-Pelletier,
Nasrin Sultana et Ekaterina Turkina 457

CHAPITRE 19

**La mobilité intégrée : une perspective
d'écosystème d'innovation**

par Carolyn J. Hatch, Patrick Cohendet
et Laurent Simon 471

Conclusion

**La pandémie de COVID-19 : catalyseur inattendu
de la transformation numérique**

par Nathalie de Marcellis-Warin, Benoit Dostie
et Genevieve Dufour..... 485

Conventions, symboles et sigles

nb	nombre
n.d.	donnée non disponible
n.f.	donnée non fiable
s.d.	sans date
km	kilomètre
\$k	millier de dollars
M\$	millions de dollars
G\$	milliards de dollars
pt de %	point de pourcentage
x	donnée confidentielle
–	donnée infime
-	néant ou zéro
ERP	Progiciel de gestion intégré (pour <i>enterprise resource planning</i> , en anglais)
ISQ	Institut de la statistique du Québec
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
PIB	Produit intérieur brut
R-D	Recherche et développement
TPS	Taxe sur les produits et services
TVQ	Taxe de vente du Québec
UE	Union européenne
3D	Trois dimensions
5G	Cinquième génération
Alb.	Alberta
Atl.	Atlantique
Ont.	Ontario
Qc	Québec
RDC	Reste du Canada

Dans l'ensemble de l'ouvrage, en raison de l'arrondissement des données, le total ne correspond pas nécessairement à la somme des parties.

Dans cet ouvrage, à moins d'indication contraire, le genre masculin désigne à la fois les hommes et les femmes.

Site Web complémentaire

Le site Web qe.cirano.qc.ca constitue une mine d'informations sur l'économie du Québec. Il présente entre autres des chiffres clés pour décrypter les grandes tendances de l'économie québécoise. Les indicateurs les plus pertinents pour une cinquantaine de sujets, ainsi qu'un glossaire de notions du domaine économique, y sont présentés. Le site internet est sous la direction scientifique de Marcelin Joanis, chercheur et fellow au CIRANO.



Introduction

CHANGER, TRANSFORMER, INNOVER

Nathalie de Marcellis-Warin

Professeure titulaire à Polytechnique
Montréal et présidente-directrice
générale du CIRANO

Genevieve Dufour

Directrice des grands projets
de collaboration au CIRANO
et coordonnatrice du livre
Le Québec économique 9

Benoit Dostie

Professeur titulaire à HEC Montréal,
chercheur et fellow au CIRANO, et
directeur académique au Centre
interuniversitaire québécois de
statistiques sociales (CIQSS)

De la numérisation de données à leur valorisation, la transformation numérique a évolué ces dernières années, nécessitant des besoins croissants en technologies, en capacité de stockage et en puissance de calcul. Mais cette transformation doit s'accompagner à la fois d'un changement dans les opérations et d'un changement de culture pour s'assurer d'arriver à une création de valeur.

Cette nouvelle édition du *Québec économique* porte sur la transformation numérique, ses perspectives et ses défis, et inclut des illustrations concrètes dans de multiples secteurs de l'économie québécoise. L'analyse de l'impact des changements technologiques s'inscrit dans la planification stratégique du CIRANO avec les changements démographiques et les changements climatiques.

Le Québec économique 9 entre lui-même dans l'âge numérique en étant désormais, dès sa parution, disponible en ligne gratuitement. Nous souhaitons augmenter la visibilité et l'accessibilité à ce collectif de textes de vulgarisation économique qui présente les résultats de recherches récentes.

L'expression « transformation numérique » doit être ici comprise dans son sens le plus large. Les technologies considérées dans cet ouvrage sont multiples. Pour n'en nommer que quelques-unes, les auteurs parlent des nouvelles technologies dans le domaine de l'information et de la communication, de la robotisation, des nanotechnologies et des techniques liées à l'intelligence artificielle derrière de nombreux processus qui sous-tendent l'utilisation de ces nouvelles technologies.

Il est important de noter que plusieurs thèmes reviennent dans la plupart des chapitres :

- 1 - Le potentiel intrinsèque de développement de nouveaux outils est encore important ;
- 2 - Le déploiement des outils existants a aussi un grand potentiel ;
- 3 - Les effets que l'on mesure déjà iront en s'accéléralant dans les prochaines années.

De plus, cet ouvrage montre qu'il n'est pas suffisant de changer ou de transformer l'économie, il est primordial de saisir les occasions de revoir nos façons de faire et nos processus afin d'innover dans un souci d'améliorer notre niveau de vie, notamment en faisant la promotion d'une économie plus verte.

Pour ces raisons, bien que nous utilisions le terme d'usage commun *transformation numérique* dans le titre du livre, notre perspective en est une d'innovation numérique qui représente mieux, selon nous, une volonté d'amélioration continue, plutôt que la simple transformation numérique, et ce, dans une optique de changement vers le mieux ou de transformation positive. Innover, c'est faire la recherche constante d'améliorations, par contraste avec l'invention, qui vise (seulement!) à créer du nouveau (Wikipédia).

Les lecteurs trouveront dans cet ouvrage plusieurs exemples inspirants, qui vont au-delà du statut de mot à la mode souvent accolé au mot *innovation*. Les auteurs y présentent les façons dont les changements technologiques peuvent être utilisés pour une meilleure transformation, ou une meilleure innovation, ainsi que certains obstacles ou défis à relever pour favoriser la transformation numérique et en tirer les bénéfices.

Partie 1

Le Québec en perspective

Comme dans les éditions précédentes, la première partie du livre porte sur la conjoncture économique et sur la synthèse du congrès annuel de l'Association des économistes québécois.

- **Pierre Cléroux**, vice-président à la recherche et économiste en chef de la Banque de développement du Canada, présente une analyse de la performance économique récente du Québec et décrit comment l'économie a été affectée par la pandémie. Il note que malgré ce choc, on peut déjà déceler des indicateurs d'une reprise, et conclut, exemples à l'appui, qu'une relance réussie devra nécessairement s'appuyer sur les technologies numériques.
- Le congrès de l'Association des économistes québécois qui s'est tenu à Québec en mai 2019 avait pour thème « Démographie, immigration et marché du travail au Québec. Menaces ou opportunités ? ». Le compte rendu de **Jean-Claude Cloutier** fait ressortir une réponse claire à la question posée : (1) même si elle pose certains défis d'intégration, l'immigration représente certainement une opportunité, et (2) le vieillissement de la population au Québec pose problème, mais le congrès a certainement permis d'explicitier quelques pistes de solutions pour en mitiger les impacts négatifs.

Partie 2

Transformation numérique et politiques publiques innovantes

Section 1 : La transformation numérique

Les chapitres présentés dans cette section montrent comment l'innovation numérique pourrait grandement aider à la prise de décisions dans un contexte de politiques publiques. Les nouvelles technologies permettent, potentiellement, à ces dernières d'être à la fois mieux ciblées et plus efficaces, mais cette section illustre aussi que le défi se trouve dans l'implantation des innovations.

- Le chapitre écrit par [Ben Hadj](#) pour le ministère de l'Économie et de l'Innovation montre comment les politiques innovantes afin de soutenir le développement d'une industrie bâtie autour des technologies liées à l'intelligence artificielle (IA). On y constate cependant qu'il reste beaucoup de travail à faire pour que l'économie québécoise puisse tirer tous les avantages des techniques développées autour de cette industrie, notamment en matière d'adoption des technologies par les entreprises.
- L'équipe composée de [Catherine Beaudry](#), [Georges Hage](#), [Giulia Piantoni](#) et [Laurence Solar-Pelletier](#) discute de la stratégie gouvernementale fédérale en matière de création de supergrappes, en particulier celle des chaînes d'approvisionnement axées sur l'intelligence artificielle, Scale AI. Elle examine les défis liés à la commercialisation des technologies de l'IA et le rôle facilitant que joue Scale AI. Les défis posés par la transformation numérique nécessiteront une collaboration intersectorielle et interdisciplinaire plus large de la part des entreprises qui souhaitent bénéficier de tels changements.
- [Simon Bourdeau](#), [Pierre Hadaya](#) et [Philippe Marchildon](#) explicitent en détail les conditions gagnantes pour que les investissements en technologies de l'information (TI) puissent rapporter les bénéfices escomptés. Ils établissent 10 enjeux à considérer et un triumvirat de bonnes pratiques à mettre en œuvre qui assurent que ces bénéfices se matérialisent.

- Laurence Solar-Pelletier, Catherine Beaudry et Majlinda Zhegu montrent comment la transformation numérique vient faciliter la collaboration et font état de son importance accrue comme source d'innovation et d'innovation ouverte. Elles donnent, pour ce faire, de nombreux exemples liés à l'infonuagique, à l'IA, à l'Internet des objets et aux chaînes de blocs.

Section 2 : Le marché du travail et la formation face à la transformation numérique

La deuxième section se penche sur les impacts de la transformation numérique sur le marché du travail et sur les compétences requises par les travailleurs pour bien réussir dans ce marché transformé.

- Luc Vinet, directeur du Centre de recherches mathématiques (CRM) de l'Université de Montréal, donne son point de vue sur l'importance de la maîtrise des compétences de base en mathématiques. Il en ressort que la numératie est un élément important pour le développement concurrentiel du Québec, sur le plan tant individuel que sociétal.
- Benoit Dostie et Genevieve Dufour, quant à eux, partent du constat que, puisque la majorité de l'apprentissage se fait après la scolarisation formelle, l'adaptation à un marché du travail subissant l'impact de la transformation numérique doit obligatoirement passer par la formation en emploi. Ils notent que la technologie influence les modes de livraison de la formation et qu'elle influe sur la résilience des travailleurs face aux changements technologiques.
- Évidemment, au-delà des anecdotes, les perturbations engendrées par les changements technologiques sont déjà bien observables à grande échelle sur le marché du travail dans plusieurs pays, par le phénomène de polarisation des salaires, où les salaires des hauts et faibles salariés augmentent plus rapidement que ceux de la classe moyenne. Benoit Dostie montre que ce phénomène est aussi observable au Québec. Il note au passage que la classe moyenne, qui ressort relativement perdante de ce phénomène, englobe maintenant des travailleurs qui étaient auparavant perçus comme ayant des salaires élevés.

Section 3 : Données et transformation numérique

La section 3 traite de la matière première sur laquelle s'appuie l'innovation numérique, soit les données. Nous sommes dans l'ère des données massives (on pourrait dire de plus en plus massives) depuis plusieurs années déjà. Dans un contexte d'innovation numérique, les nouvelles technologies permettent de mieux trouver et d'exploiter davantage l'information contenue dans ces données. Cette information est évidemment cruciale pour l'élaboration de politiques publiques basées sur des données probantes.

- Catherine Haeck et Marie Connolly donnent leur point de vue sur l'utilité des données massives qui est bien moindre si des mécanismes ne sont pas mis en place pour en faciliter l'accès aux chercheurs pour les exploiter dans le respect de la confidentialité des répondants. Elles décrivent explicitement plusieurs modèles dont pourrait s'inspirer le Québec pour simplifier l'utilisation de données massives dans le domaine de la recherche.
- L'équipe composée de Benoit Aubert, Nathalie de Marcellis-Warin et Thierry Warin montre comment les nouvelles techniques de science des données se rapportant, entre autres, à l'apprentissage machine et à une puissance de calcul accrue permettent d'analyser des données non structurées et de l'information sous forme de texte. Les auteurs illustrent, à l'aide de nombreux exemples, les retombées de ces analyses en matière de compréhension des mécanismes derrière la prise de décision et les possibilités d'amélioration des politiques publiques.
- Finalement, Dalibor Stevanovic présente différentes méthodes statistiques liées à l'apprentissage automatique, indiquant comment elles peuvent améliorer la prévision économique. Dans ce chapitre, il applique ces techniques à la prévision de la croissance économique au Québec.

Section 4 : L'État et la transformation numérique

L'État est trop souvent écarté des analyses économiques des impacts de la transformation numérique. Pourtant, ce secteur représente une part importante de l'économie. Les deux chapitres de cette section examinent l'influence de la transformation sur les dépenses et les revenus de l'État, ainsi que son efficacité.

- **Luc Godbout et Michaël Robert-Angers** considèrent l'autre facette, les revenus de l'État. Ils montrent qu'une délocalisation des dépenses des consommateurs peut avoir un impact négatif, notamment en raison d'une baisse de la perception des taxes sur les achats dans les commerces en ligne dont le siège social est à l'étranger. Plusieurs pistes prometteuses sont explorées dans ce chapitre pour limiter les répercussions négatives que peut avoir ce type de commerce sur les finances publiques du Québec.
- **Daniel J. Caron** explique tout d'abord comment les investissements en TI peuvent aider l'État à améliorer son efficacité. L'auteur traite des défis et des facteurs de succès des investissements étatiques en TI, en mettant l'accent sur les enjeux de gouvernance et en étudiant les processus, incluant les méthodes de travail.

Section 5 : La transformation numérique à l'œuvre dans plusieurs secteurs

La dernière section du livre examine l'impact de la transformation numérique dans cinq secteurs (finance, agriculture, construction, aérospatiale et transport) en tenant compte des caractéristiques spécifiques de chacun d'entre eux.

- Tout d'abord, l'équipe composée de **Michel Magnan, Robert Normand et Bryan Campbell** aborde les enjeux de la transformation numérique dans le secteur financier. Il ressort de ce chapitre que ce secteur est à l'avant-garde de la transformation numérique. Les autres secteurs auraient donc avantage à scruter ce qui s'y passe en ce qui a trait à l'emploi, à la rétention de la main-d'œuvre et aux points de services, par exemple, pour prévoir ce que la transformation numérique apporte dans leur propre industrie.
- **Annie Royer, Nathalie de Marcellis-Warin, Ingrid Peignier et Thierry Warin** examinent ensuite les enjeux du système agroalimentaire face à la révolution numérique. Ils repèrent plusieurs technologies encore sous-exploitées qui permettraient à la fois d'augmenter la productivité du secteur et de solutionner les enjeux de pénurie de main-d'œuvre propres au secteur.

- Le problème de faible croissance de la productivité est aussi bien présent dans le secteur de la construction. Le collectif de chercheurs formé de Mario Bourgault, Christophe Danjou, Robert Pellerin, Nathalie Perrier, Conrad Boton, Daniel Forgues, Ivanka Jordanova, Érik Poirier, Louis Rivest et Laurent Joblot montre que cet enjeu est aussi lié à des problèmes d'innovation. Les auteurs déterminent plusieurs technologies qui pourraient aider le secteur de la construction en bâtissant sur la pierre angulaire que représente le *Building Information Modelling* (BIM).
- L'équipe composée de Fabiano Armellini, Catherine Beaudry, Mario Bourgault, Patrick Cohendet, Laurent Simon, Laurence Solar-Pelletier, Nasrin Sultana et Ekaterina Turkina se penche sur la transformation numérique pour le secteur de l'aérospatiale, où celle-ci pourrait être utile pour relever d'autres défis de nature environnementale et énergétique.
- En terminant, Carolyn J. Hatch, Patrick Cohendet et Laurent Simon décrivent le concept de mobilité intégrée rendue possible par les nouvelles technologies. Ils expliquent comment ce concept pourrait transformer profondément la circulation des biens et des personnes et exposent les défis d'implémentation de ce concept dans les villes québécoises et canadiennes.

Transformation numérique en temps de pandémie

Il est finalement difficile de passer sous silence le contexte pandémique dans lequel s'est déroulée la préparation de la neuvième édition du *Québec économique*. Plusieurs auteurs ont terminé la rédaction de leur chapitre en plein confinement, et la production d'autres chapitres a dû être annulée : c'est le cas par exemple du Baromètre CIRANO, qui, normalement, a lieu chaque année et dont les résultats sont présentés dans la partie *Le Québec en perspective*.

Certains auteurs ont noté au passage les conséquences de la pandémie de COVID-19 sur l'innovation numérique, sans se prononcer nécessairement sur ses impacts à court et à long terme (cela représenterait une étude en soi). Par exemple, dans son point de vue, Luc Vinet souligne l'importance de connaître les mathématiques (par exemple le concept de croissance exponentielle) pour comprendre l'évolution des taux d'infection, et ainsi les modélisations de la direction que prendra la pandémie. Dans

son chapitre, Pierre Cléroux illustre l'impact de la pandémie sur l'économie et montre qu'on peut déjà déceler un rebond dans l'activité économique au moyen des données officielles publiées. Dans le chapitre écrit par Aubert, De Marcellis-Warin et Warin, plusieurs exemples sont liés à la COVID-19, que ce soit pour l'analyse des données de recherche sur Internet ou des données issues des conversations sur les réseaux sociaux. À la lecture des différents chapitres, il sera intéressant de noter les forces qui pourraient être des accélérateurs de la transformation numérique dans un contexte de pandémie.

En résumé, des chercheurs et des experts reconnus ont participé à la rédaction de cette neuvième édition du *Québec économique*. Une partie des textes présentés provient de résultats de recherches effectuées au CIRANO au cours des derniers mois. Ces résultats ont été vulgarisés afin d'être présentés dans cet ouvrage. Bien que chacun des textes ait été commenté par un comité de lecture ainsi que par la direction scientifique de l'ouvrage, aucun choix n'a été imposé aux auteurs et les textes n'ont pas été harmonisés. Ainsi, les auteurs demeurent entièrement responsables de leurs textes. Les opinions présentées dans cet ouvrage ne représentent pas celles du CIRANO et ne l'engagent en rien.

Remerciements

La réalisation d'un livre tel *Le Québec économique* demande la collaboration de nombreux acteurs. Nous tenons à remercier chaleureusement tous les collaborateurs qui ont su garder le cap malgré les circonstances particulières dans lesquelles cet ouvrage a été préparé en raison de la pandémie de COVID-19.

Nous souhaitons, tout d'abord, remercier les 45 auteurs ayant participé à cet ouvrage. Il s'agit d'un nombre record d'auteurs, ce qui démontre l'intérêt des chercheurs pour le thème de cette édition. Nous tenons à mentionner l'aspect collaboratif de plusieurs textes.

Nous remercions également le comité de lecture pour son soutien au comité de direction scientifique de l'ouvrage. Sous la direction de Patrick Richard (Université de Sherbrooke), le comité de lecture était composé d'Étienne Farvaque (Université de Lille), de Martino Pelli (Université de Sherbrooke) et de Jimmy Royer (Groupe d'analyse). De plus, nous tenons à souligner l'apport important du ministère des Finances du Québec et du

ministère de l'Économie et de l'Innovation, qui ont mis à notre disposition l'expertise de leurs équipes de professionnels pour la relecture des textes, et nous remercions particulièrement Anny Gagnon. Cependant, le contenu de cet ouvrage n'engage en rien les ministères québécois des Finances ainsi que de l'Économie et de l'Innovation.

Nous tenons à souligner le travail minutieux effectué par Louis Desjardins et toute l'équipe de Mardigrafe pour la révision linguistique des textes, la conception graphique de l'ouvrage et son impression, ainsi que la contribution de Molivann Panot (CIRANO) et de Marius Vigne (CIRANO).



Références

Armellini, F., Beaudry, C., Bourgault, M., Cohendet, P., Simon, L., Solar-Pelletier, L., Sultana, N. et Turkina, E. (2020). L'aérospatiale numérique au Québec : un écosystème innovant au cœur des enjeux de la société. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspective et défis de la transformation numérique* (18, p. 457-470). CIRANO.

Aubert, B., De Marcellis-Warin, N. et Warin, T. (2020). Science des données, réseaux sociaux et politiques publiques. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (11, p. 285-314). CIRANO.

Beaudry, C., Hage, G., Piantoni, G. et Solar-Pelletier, L. (2020). Les technologies et les politiques publiques en appui à l'essor de l'intelligence artificielle. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (4, p. 113-147). CIRANO.

Bourdeau, S., Hadaya, P. et Marchildon, P. (2020). Projets de transformation numérique : bénéfiques, enjeux et quelques bonnes pratiques. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (5, p. 149-169). CIRANO.

Bourgault, M., Danjou, C., Pellerin, R., Perrier, N., Boton, C., Forgues, D., Iordanova, I., Poirier, É., Rivest, L. et Joblot, L. (2020). Transformer le secteur de la construction par le numérique : un chantier ambitieux et nécessaire. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (17, p. 433-456). CIRANO.

Caron, D. J. (2020). Technologies numériques et efficience organisationnelle : repenser l'organisation publique selon ses flux informationnels. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (14, p. 373-396). CIRANO.

Cléroux, P. (2020). La pandémie freine une économie en pleine croissance. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (1, p. 25-48). CIRANO.

Changer, transformer, innover

Cloutier, J.-C. (2020). L'immigration comme solution aux effets du ralentissement démographique au Québec : enjeux et pistes de solution découlant du congrès 2019 de l'Association des économistes québécois. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (2, p. 49-72). CIRANO.

Dostie, B. (2020). Changements technologiques et polarisation des salaires au Québec. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation* (9, p. 247-266). CIRANO.

Dostie, B. et Dufour, G. (2020). Transformation numérique et formation continue. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (8, p. 221-246). CIRANO.

Godbout, L. et Robert-Angers, M. (2020). Point de vue sur les défis fiscaux associés au commerce électronique. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (13, p. 355-372). CIRANO.

Hadj, B. (2020). L'intelligence artificielle : un puissant levier de développement économique pour le Québec. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (3, p. 77-112). CIRANO.

Haeck, C. et Connolly, M. (2020). Point de vue sur l'accessibilité aux données des administrations. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (10, p. 269-284). CIRANO.

Hatch, C. J., Cohendet, P. et Simon, L. (2020). La mobilité intégrée : une perspective d'écosystème d'innovation. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation* (19, p. 471-484). CIRANO.

Innovation. (2020, 13 octobre). Dans *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Innovation>

Magnan, M., Normand, R. et Campbell, B. (2020). Les enjeux de la transformation numérique pour le secteur financier. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (15, p. 399-415). CIRANO.

Royer, A., De Marcellis-Warin, N., Peignier, I., et Warin, T. (2020). La révolution numérique appliquée à l'agriculture au Québec. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (16, p. 417-432). CIRANO.

Solar-Pelletier, L., Beaudry, C. et Zhegu, M. (2020). Collaboration et innovation : comment la transformation numérique change la donne. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (6, p. 171-202). CIRANO.

Stevanovic, D. (2020). Préviation macroéconomique dans l'ère des données massives et de l'apprentissage automatique. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (12, p. 315-352). CIRANO.

Vinet, L. (2020). Point de vue sur l'importance des mathématiques et de la numératie pour le Québec. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (7, p. 205-220). CIRANO.

PARTIE

Le Québec en perspective





Chapitre 1

LA PANDÉMIE FREINE UNE ÉCONOMIE EN PLEINE CROISSANCE

Pierre Cléroux

Vice-président à la recherche et économiste en
chef de la Banque de développement du Canada

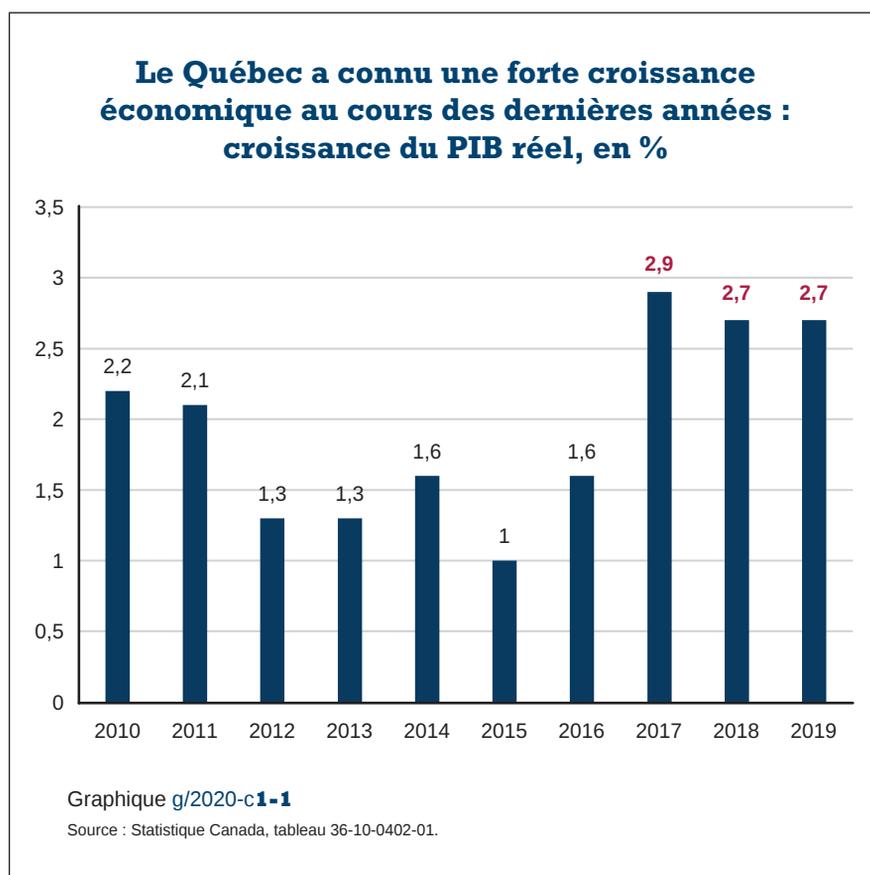
Résumé

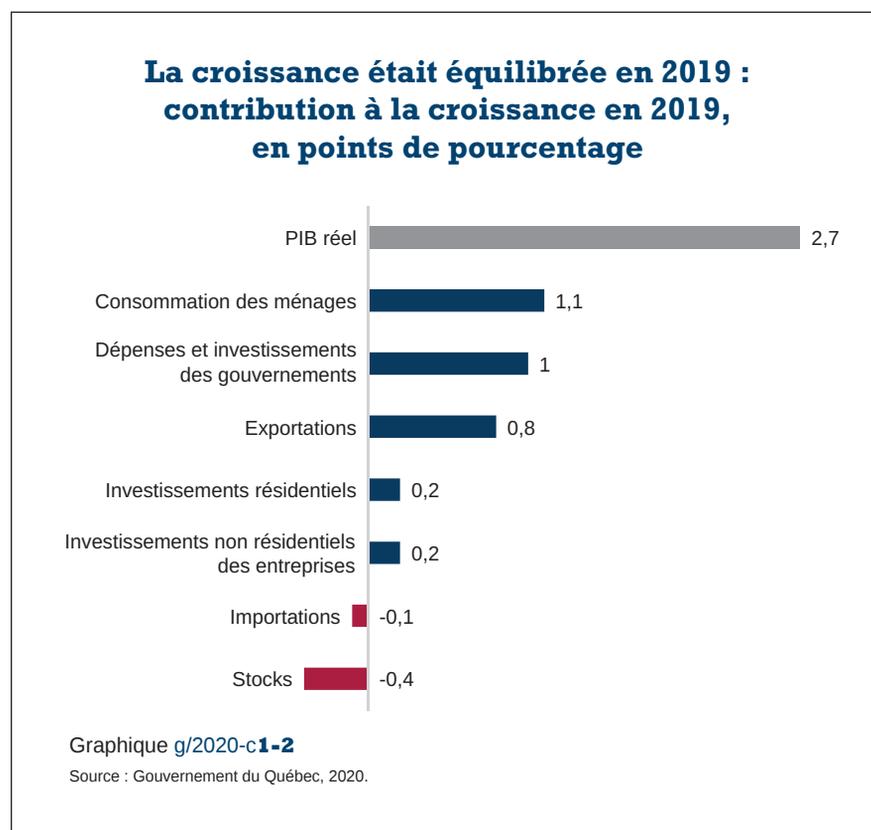
Au Québec, l'économie, comme partout ailleurs dans le monde, a été très durement touchée par la propagation de la COVID-19. Les dommages sont d'autant plus déplorables que le Québec traversait jusqu'alors une période faste qui l'avait propulsé au-devant de la scène canadienne au cours des dernières années.

La pandémie a particulièrement affecté le Québec, qui a été l'épicentre canadien des cas d'infection et du nombre de morts au cours de la vague initiale. Mais la relance est déjà à nos portes et il y a tout lieu de croire que l'économie, qui devrait retrouver sa vigueur d'antan à partir de l'été 2021, permettra à nouveau au Québec d'afficher de solides performances et de continuer à se démarquer. Cette reprise passe toutefois par une transition encore plus marquée vers l'adoption de nouvelles technologies numériques qui permettront d'assurer un meilleur avenir aux entreprises.

Le Québec sous une bonne étoile

L'économie québécoise avait le vent dans les voiles et aurait dû poursuivre son élan en 2020. Malgré le spectre d'une éventuelle récession qui planait depuis quelque temps déjà, après 10 ans de croissance ininterrompue, il y avait toutes les raisons de rester optimiste. Et il y a tout lieu de croire que la reprise économique qui devrait retrouver sa vigueur d'antan à partir de l'été 2021 permettra à nouveau au Québec d'afficher de solides performances et de continuer à se démarquer.





De nombreux facteurs ont contribué à la bonne performance de l'économie du Québec. D'abord, force est de constater que sa croissance est très bien équilibrée. À preuve : le volume des exportations, les investissements des entreprises et du marché de l'habitation de même que les dépenses de consommation et gouvernementales. Nous avons mis l'épaule à la roue et ainsi favorisé les hausses du PIB réel de 2,9 % en 2017, qui s'est avérée la meilleure année, économiquement parlant, au Québec en 15 ans, puis de 2,7 % au cours des deux années suivantes. Il suffit qu'une seule de ces composantes traîne de la patte pour atténuer l'essor d'une économie, ce qui n'était pas le cas au Québec.

Les États-Unis, on le sait, sont une destination privilégiée pour les produits d'ici. Or, le dynamisme de l'économie chez notre principal partenaire commercial, jumelé à la faiblesse du dollar canadien, ont grandement favorisé les exportations québécoises internationales de biens et services

ces dernières années. L'industrie manufacturière québécoise a été l'un des principaux bénéficiaires de la vigueur de l'économie américaine. Après avoir connu un lent déclin au cours des décennies 1990 et 2000, accentué par la délocalisation de certaines activités de fabrication, ce secteur, qui génère près de 90 % des exportations québécoises, a rebondi et a même affiché une croissance importante de son PIB et du nombre d'emplois. Cette excellente performance, qui s'était relativement maintenue depuis, allait à l'encontre de la tendance observée depuis près de 20 ans. Plus récemment, le manque criant de travailleurs a même freiné la croissance d'entreprises manufacturières à un point tel que des fabricants peinaient à suffire à la demande et se voyaient dans l'obligation de refuser de nouvelles commandes, voire de nouveaux clients, et s'empêchaient même de développer de nouveaux marchés géographiques.

La montée du protectionnisme américain, depuis l'arrivée de Donald Trump à la présidence, ainsi que les incertitudes et les inquiétudes liées à la renégociation de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA), n'ont pourtant pas altéré les échanges entre le Québec et son voisin du sud. L'industrie québécoise de la production et de la transformation de l'aluminium, frappée de tarifs douaniers de 10 % sur l'exportation de ses produits vers les États-Unis, a bien sûr fait les frais de la mauvaise humeur de Donald Trump. Mais, dans l'ensemble, les exportateurs québécois ont continué de profiter de la vigueur de l'économie américaine. Même une énième crise commerciale sur le bois d'œuvre, qui perdure depuis l'automne 2017, n'a pas affecté outre mesure les producteurs forestiers d'ici qui, malgré l'imposition de tarifs, ont continué d'exporter avantageusement vers le marché américain pour fournir les constructeurs qui profitaient d'une conjoncture immobilière favorable.

Une majorité d'entreprises québécoises, tous secteurs confondus, ont d'ailleurs vu leurs ventes augmenter, sinon se stabiliser, pendant la durée des pourparlers en vue d'un nouvel accord commercial de libre-échange, selon des sondages menés par la Banque de développement du Canada (BDC). Même sans l'entente finalement conclue par le nouvel Accord Canada–États-Unis–Mexique (ACEUM), qui est entré en vigueur au début de juillet 2020, l'impact aurait été minime pour une majorité d'exportateurs. Les échanges commerciaux auraient en effet été soumis aux faibles tarifs douaniers de l'Organisation mondiale du commerce (OMC), qui sont en moyenne de 2,2 %.

La pandémie freine une économie en pleine croissance

Si l'on regarde plus en détail les données sectorielles, force est de constater que le Québec profite également d'une plus grande diversification de ses activités manufacturières par rapport à l'Ontario, par exemple, où est concentrée la fabrication d'automobiles, de camions et de pièces de véhicules, ou encore à l'Alberta, dont l'économie est fortement dépendante des produits pétroliers. Or, ces secteurs d'activité avaient fortement décliné avant la crise découlant de la pandémie, tandis que le Québec pouvait compter sur une multitude d'industries, notamment dans le secteur de l'aérospatiale qui est le fer de lance de ses exportations.

L'économie québécoise profite aussi d'une diversification accrue de son tissu industriel dans plusieurs régions. Le nouveau paysage économique de Drummondville en particulier et de l'ensemble de la région du Centre-du-Québec, par exemple, témoigne de ce changement. Longtemps dépendante d'une industrie du textile qui avait fait ses beaux jours avant de décliner quand la production a été transférée en Chine, Drummondville est aujourd'hui un exemple de revitalisation et de succès avec ses centaines de PME manufacturières actives dans divers secteurs d'activité qui la rend moins vulnérable aux crises économiques. Le Groupe Soucy est un bel exemple de ce dynamisme. Cette PME de Drummondville spécialisée dans la conception et la production de composantes en plastique et en caoutchouc vend ses produits à travers le monde.

Des régions dites « ressources » sont aussi en train de se métamorphoser. En Mauricie, où la fermeture de grandes entreprises liées à l'exploitation et à la transformation des ressources naturelles a nui considérablement à l'essor économique, la reconversion est aussi au cœur d'une diversification des activités qui permet désormais à la région d'afficher une meilleure performance. Aujourd'hui, l'activité économique y a notamment pris la forme de jeunes pousses dans les domaines des nouvelles technologies et du numérique.

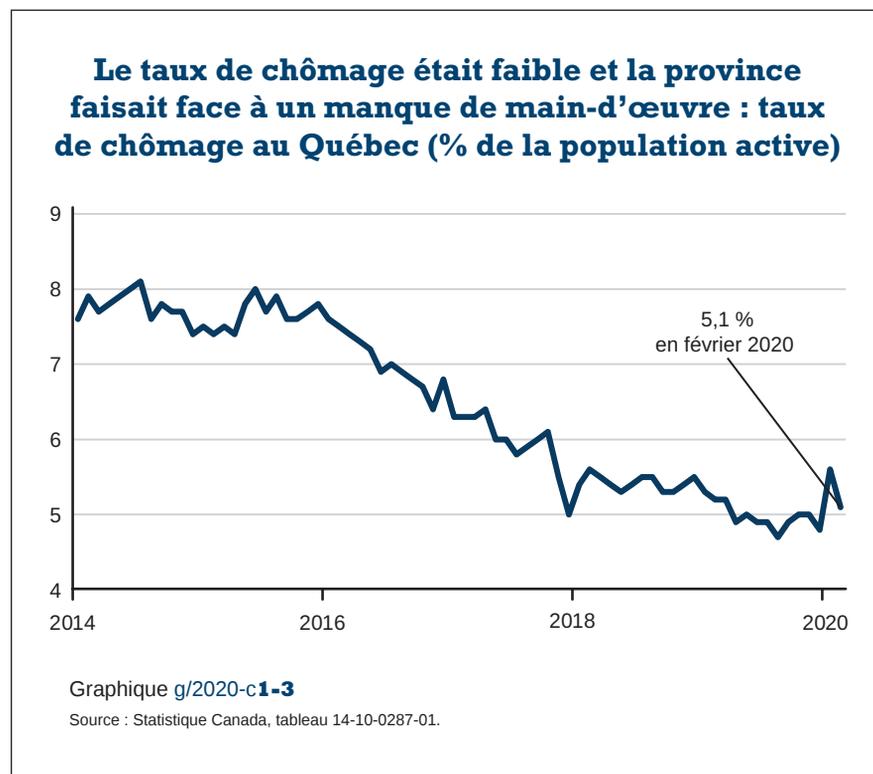
Stimuler par des investissements et un marché du travail vigoureux

L'économie québécoise a été grandement stimulée ces dernières années par les investissements d'entreprises dont les capacités de production avaient atteint des taux historiquement élevés. La confiance des dirigeants envers la croissance de l'économie et les perspectives d'avenir,

jumelée à des profits en hausse, ont ainsi amené des entreprises à investir davantage dans des équipements de même que dans des actifs intangibles comme la technologie ou encore la formation de la main-d'œuvre, dans le but d'améliorer leur productivité et de demeurer compétitives.

La vigueur du marché résidentiel québécois a aussi apporté de l'eau au moulin de la croissance. Comparativement au marché immobilier et résidentiel dans le reste du pays, dont la surchauffe des dernières années à Toronto et à Vancouver a entraîné une croissance négative pendant plusieurs trimestres en 2018-2019 et ainsi limité la croissance de l'économie canadienne ces dernières années, ce secteur d'activité au Québec a été moins touché par le resserrement des conditions de financement hypothécaire et l'amorce d'une hausse des taux d'intérêt.

Les dépenses des ménages, locomotives traditionnelles de la croissance puisqu'elles représentent environ 60 % du PIB québécois, ont aussi joué un rôle essentiel dans la croissance de l'économie, et ce, à la faveur d'un marché du travail qui était en pleine effervescence. Rappelons d'ailleurs que le Québec d'avant la pandémie faisait face à une importante pénurie de main-d'œuvre dont les effets étaient durement ressentis dans plusieurs industries. Les secteurs de la fabrication, du commerce de détail et de la construction étaient particulièrement touchés par le manque de travailleurs. Plusieurs entreprises et organisations de développement économique ont d'ailleurs multiplié les missions à l'étranger ces dernières années, notamment en France et dans les pays d'Afrique du Nord, pour y recruter des employés.



Le Québec comptait un record historique de 140 000 postes vacants au deuxième trimestre de 2019. Le taux de chômage avait même atteint un plancher de 4,5 % en février 2020, soit le plus faible taux jamais enregistré en plus de 40 ans. Certaines régions du Québec, notamment la Capitale-Nationale, le Centre-du-Québec, Chaudière-Appalaches et les Laurentides, affichaient même un taux de chômage sous la barre des 4 % avant la crise sanitaire. Le marché de l'emploi a ainsi fait d'importants gains depuis 2015, alors que le taux de chômage québécois s'élevait à 7,8 %.

Cette excellente performance a d'ailleurs entraîné le Québec en situation de quasi-plein emploi et mis une pression à la hausse sur les salaires. Le salaire hebdomadaire moyen au Québec est passé de 903 dollars en 2018 à 945 dollars en 2019, soit une augmentation de 4,6 %. Cette hausse, plus importante que toute autre ailleurs au pays et jumelée à la croissance graduelle du salaire minimum, a du même coup été favorable à une augmentation continue de la consommation.

Enfin, il est aussi important de souligner l'importance de la contribution du secteur public. D'autant que les dépenses gouvernementales contribuaient à 28 % du PIB aux prix courants en 2019 en termes nominaux. Pendant que d'autres gouvernements provinciaux se lançaient dans des politiques d'austérité budgétaire ces dernières années, le Québec s'était déjà livré à cet exercice et a ainsi pu prendre la tangente inverse et profiter de ses surplus pour augmenter ses dépenses.

Le gouvernement québécois avait même profité de sa mise à jour économique et financière, à l'automne 2019, pour annoncer son intention de remettre 3,3 milliards de dollars de plus dans le portefeuille des Québécois d'ici cinq ans et, du même coup, alimenter les dépenses des consommateurs et la croissance de l'économie.

À n'en pas douter, l'économie québécoise donnait peu de signes d'essoufflement à l'aube de 2020. La croissance devait à nouveau être au rendez-vous. L'apparition de la COVID-19 et la pandémie mondiale qui en a résulté ont toutefois mis un terme abrupt à de telles aspirations.

Le choc de la pandémie

La question que la plupart des économistes se posaient l'an dernier : quand la prochaine récession nous frappera-t-elle ? La crise économique et financière de 2008-2009 était déjà très loin dans nos mémoires et une récession semblait donc inévitable, selon certains analystes. D'autant que la récession technique qui avait vu l'économie canadienne se contracter pendant deux trimestres consécutifs au début de 2015, sous l'effet principalement d'une guerre des prix du pétrole ayant entraîné leur chute de 60 % et du ralentissement des investissements, s'était avérée de courte durée et sans dommages majeurs. En fait, cette récession s'était principalement concentrée dans les provinces de l'Alberta et de la Saskatchewan, et le Québec en avait même été épargné.

L'endettement des ménages, un nouveau ralentissement dans le secteur du pétrole et du gaz ou encore un choc externe en provenance des États-Unis qui aurait des répercussions chez nous constituaient les trois principaux éléments déclencheurs potentiels d'une prochaine récession. Or, les diverses données en la matière nous indiquaient que ces différents facteurs étaient peu susceptibles de déclencher une récession de sitôt.

La pandémie freine une économie en pleine croissance

Les entrepreneurs, selon des sondages, se montraient optimistes envers l'économie canadienne dans son ensemble et leur propre économie provinciale en particulier. La Banque du Canada avait annoncé en début d'année le maintien de son taux directeur à 1,75 % et ne devait probablement pas le hausser en cours d'année. La valeur du dollar canadien, qui oscillait alors autour de 0,75 dollar américain, devait aussi demeurer relativement stable en 2020.

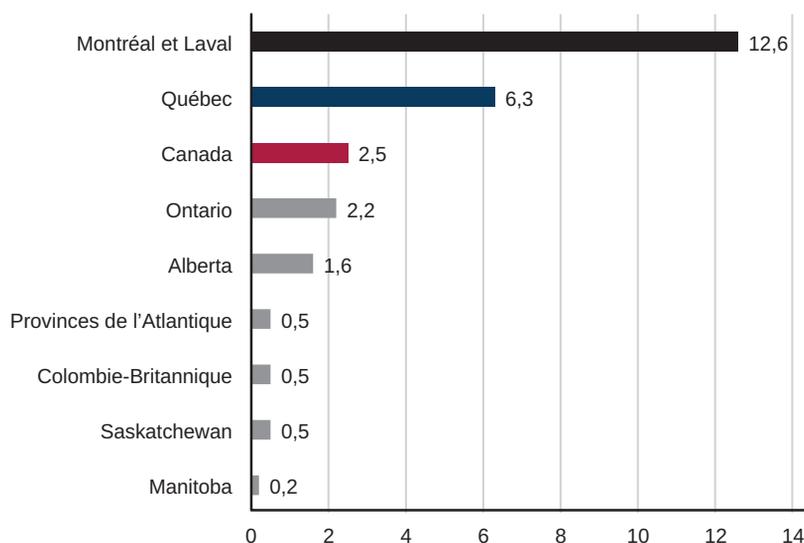
Nous étions bien sûr loin de penser qu'un choc externe frapperait l'économie du Québec. Et, surtout, personne ne pouvait imaginer la source de la crise actuelle. Cette récession est évidemment bien différente de toutes celles que nous avons connues. L'économie est en effet affectée par une crise mondiale dont le point de départ est l'arrêt soudain de toute consommation non essentielle attribuable au confinement et aux mesures de distanciation sociale imposées par les différents gouvernements au Canada et ailleurs sur la planète. L'épidémie de SRAS, qui avait également pris naissance en Chine – en 2003 – et affecté principalement et pendant un seul trimestre l'économie de l'Ontario, semble aujourd'hui bien faible en comparaison des dommages que peut causer un virus.

Le nouveau coronavirus, on le constate fort bien maintenant, a eu l'effet d'une bombe et a plombé l'économie. Le choc de la pandémie a été vif et brutal. Près de 3 millions de Canadiens avaient perdu leur emploi en mars et en avril 2020, et 90 % des PME subissaient des impacts négatifs importants, selon une enquête de la BDC¹. L'économie est encore mise à rude épreuve et devrait d'ailleurs chuter à un niveau sans précédent cette année. Le PIB canadien a déjà plongé de 8,2 % au cours du premier trimestre et, malgré la fin graduelle du déconfinement amorcée en mai, l'activité économique pourrait même fléchir de 40 % à rythme annualisé au deuxième trimestre. En comparaison, la contraction économique aux États-Unis était de 5,0 % lors du premier trimestre, alors que le PIB reculait de 14,2 % dans la zone euro et de 33,8 % en Chine. En juillet 2020, le Fonds monétaire international a prévu une reprise plus lente qu'espéré et une récession mondiale de 4,9 % en 2020.

Le PIB québécois a fait moins bonne figure que celui du Canada, avec une chute de 10,3 % à rythme annualisé au cours des trois premiers mois de l'année 2020, soit la plus forte baisse trimestrielle depuis 1981. Les exportations ont chuté de 11,8 % au premier trimestre, tandis que les dépenses

de consommation des ménages ont dégringolé de 11,1 %. Les ventes des détaillants québécois avaient plongé de 27,8 % de mars à avril, au plus fort de la période de confinement.

La province a représenté l'épicentre canadien au cours de la vague initiale : cas d'infections à la COVID-19 par 1 000 habitants



Graphique g/2020-c1-4

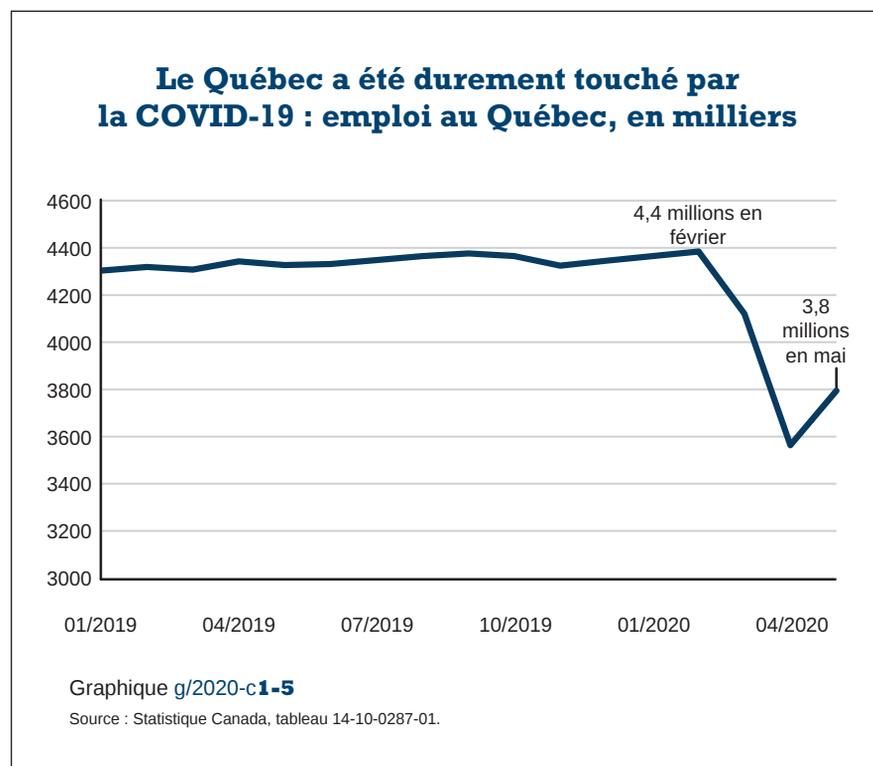
Source : Gouvernement du Canada, s.d.

Note : Mise à jour quotidienne sur l'épidémiologie de l'Agence de la santé publique du Canada.

La COVID-19 a particulièrement affecté le Québec qui a été l'épicentre canadien des cas d'infection et du nombre de morts au cours de la vague initiale. Les mesures de distanciation sociale, adoptées pour enrayer la propagation du virus, y ont été imposées plus tôt que dans d'autres provinces. L'économie du Québec a du même coup été la plus éprouvée au pays, avec ses quelque 820 000 emplois perdus en mars et en avril 2020 ; une perte dont l'ampleur était inégalée ailleurs au Canada. En revanche,

La pandémie freine une économie en pleine croissance

la remise en marche progressive de l'économie avant la plupart des autres provinces a entraîné un rebond inattendu de plus de 576 000 emplois créés en mai et en juin, ce qui représentait la plus forte progression au pays et avait fait baisser le taux de chômage de 17 % à 9,5 %. Près de 80 % des emplois créés au Canada en mai 2020 étaient en effet au Québec, principalement dans les secteurs de la construction (57 900), de la fabrication (56 100) et du commerce (53 600), une situation qui laissait entrevoir des jours meilleurs. Malgré la reprise attendue au deuxième semestre de l'année, l'économie québécoise devrait enregistrer une perte de plus de 130 000 emplois nets en 2020, prévoit le Conference Board du Canada. Il s'agirait de la pire performance du marché du travail dans la province depuis 1982.



Des impacts considérables

Les bouleversements liés à l'émergence et la virulence de la COVID-19 ont été immédiats. La fermeture complète ou partielle de nombreux pans de l'économie dès le mois de mars 2020, en particulier des commerces et des industries non essentielles, et la mise sur pause de nos habitudes de vie ont porté un dur coup et entraîné un ralentissement économique le plus brutal jamais vécu. La pandémie a relégué au second plan le blocage des chemins de fer assurant le transport de marchandises d'un océan à l'autre du pays qui, on l'a vite oublié, avait commencé à avoir un impact sur l'activité économique au premier trimestre de 2020. Mais la croissance, en ce début d'année, était somme toute affectée par des facteurs temporaires.

Les dégâts causés par le début du confinement en mars 2020 se sont fait ressentir encore plus fortement et rapidement. La pandémie a entraîné des mises à pied sans précédent. Près de la moitié (45 %) des entreprises au pays avaient réduit leur effectif et mis à pied au moins 8 employés sur 10. L'hébergement et la restauration étaient parmi les secteurs les plus touchés, à 69 %, mais plus de la moitié des entreprises œuvrant dans les secteurs du commerce de détail, des arts et des soins de santé avaient également mis à pied plus de 80 % de leurs travailleurs.

Le secteur des services a grandement fait les frais de la pandémie. La réduction des heures travaillées au Québec entre février et avril 2020 dans les domaines de la restauration et de l'hébergement (-68 %), des arts et des loisirs (-48 %) ainsi que dans le commerce de gros et de détail (-32 %) témoigne d'ailleurs de l'ampleur de la crise. Jour après jour, plusieurs grandes chaînes de détaillants ont demandé la protection des tribunaux contre leurs créanciers et annoncé du même coup la fermeture de plusieurs magasins. Les ventes des détaillants ont chuté de 27,8 % au Québec de mars à avril 2020, avant d'enregistrer un rebond au fur et à mesure du déconfinement. Le Cirque du Soleil, un des fleurons de l'économie québécoise, a licencié quelque 3 500 personnes et a tout fait pour éviter la faillite. Les interdictions de voyager, les annulations de milliers de vols et l'aversion généralisée pour les voyages ont eu, et auront encore pendant longtemps, une incidence majeure sur l'industrie du tourisme et des voyages d'affaires.

Les entreprises manufacturières n'étaient pas en reste. Elles sont nombreuses à avoir également mis à pied leurs employés, notamment dans le secteur névralgique de l'aérospatiale chez Bombardier, Airbus ou

La pandémie freine une économie en pleine croissance

encore Pratt & Whitney. Le nombre d'heures travaillées dans l'ensemble du secteur québécois de la fabrication a d'ailleurs fléchi de 38 %. Le commerce international a évidemment été grandement atteint par le ralentissement de l'économie, particulièrement aux États-Unis. Les emplois dans des domaines où le télétravail a été plus facile à mettre en place ont été moins touchés, mais n'ont pas été épargnés pour autant. Un quart des entreprises canadiennes du secteur des services professionnels, scientifiques et techniques ont mis au rancart la grande majorité de leurs employés.

Les données économiques de l'année 2020 auraient été encore plus catastrophiques sans l'intervention des gouvernements fédéral et provincial, qui n'ont pas lésiné sur les moyens et adopté des mesures économiques sans précédent pour venir en aide aux travailleurs et aux entreprises.

Avant la pandémie, les entrepreneurs se préoccupaient principalement de la pénurie de main-d'œuvre et de la difficulté à recruter du personnel qualifié. Le vent n'aura jamais tourné aussi rapidement et la situation ne peut que s'améliorer. Les dommages économiques causés par cette crise dépendront aussi du contrôle de la pandémie, de même que de l'ampleur et des effets de la deuxième vague d'infections. Sans quoi, et tant qu'un vaccin ne viendra pas nous immuniser et nous rassurer, nous risquons de retourner à la case départ.

La relance est déjà à nos portes

La contraction économique causée par la pandémie s'est rapidement confirmée. Mais la date d'un retour à la normale, lorsque nous retrouverons le niveau d'activité économique du début de l'année 2020, est inconnue.

Toutefois, la reprise est déjà amorcée, même si elle demeure fragile. L'ajout de plus de 576 000 emplois en mai et en juin 2020 au Québec, jumelé à la fin du confinement et à la reprise des activités dans tous les secteurs à partir du mois de juin 2020, ont témoigné de ce pas dans la bonne direction. La relance sera toutefois lente, graduelle et inégale d'une industrie à l'autre. Certains secteurs connaîtront un rebond plus important que d'autres, tandis que des industries prendront des années à retrouver leur rythme d'antan. Mais, dans l'ensemble, le PIB devrait retrouver sa vigueur d'avant la crise quelque part entre l'été 2021 et l'automne 2023.

L'industrie de la construction, qui était parmi les plus affectées au début de la crise, a aussi été parmi les premières à rouvrir. Elle a donc plus rapidement retrouvé ses repères et a connu un rebond de ses activités et une augmentation des heures travaillées. Le devancement de certains projets d'infrastructures planifiés par les gouvernements contribuera également à la remise sur pied de cette industrie.

À l'instar de ce qui a eu lieu en Asie et en Europe, où plusieurs pays ont été frappés de plein fouet par la COVID-19 avant le Québec, le secteur manufacturier québécois s'est aussi remis graduellement en mode production. Certains fabricants souffriront toutefois davantage, notamment ceux de l'important secteur aérospatial, qui risquent d'avoir à patienter jusqu'en 2022. Si les secteurs manufacturiers et de la construction ont moins tardé à reprendre leurs activités, notamment parce qu'ils se prêtent généralement mieux que d'autres à la distanciation physique, leur bonne tenue dépendra avant tout de la demande pour leurs produits et activités.

Il en va de même chez les détaillants. Malgré la réouverture de l'ensemble des commerces, l'achalandage n'est pas au rendez-vous par rapport à 2019. Les premiers indicateurs en provenance de l'Asie et de l'Europe ont montré que, malgré la réouverture des commerces, l'achalandage restait toutefois en forte baisse. La firme d'analyse Oxford Economics prévoit même qu'il faudra patienter jusqu'à l'été 2021 avant de voir un retour au niveau d'activité pré-crise. De plus, il faut s'attendre à ce que certains sous-secteurs performant mieux que d'autres, notamment ceux ayant déjà effectué leur virage numérique.

Le déconfinement n'a pas entraîné automatiquement une ruée vers les magasins mais la consommation a repris rapidement au cours de l'été. Les ventes au détail en juillet ont rejoint leur niveau d'avant la crise. L'augmentation des transferts du gouvernement fédéral aux ménages a certainement contribué à cette relance. De plus, la pandémie a changé le comportement des consommateurs. Les achats en ligne ont explosé pendant la pandémie et sont demeurés élevés. Enfin, les consommateurs se sont tournés davantage vers les produits locaux depuis le début de la pandémie. Des initiatives comme Le Panier Bleu, une plateforme Web lancée au début de la crise avec l'appui du gouvernement du Québec pour promouvoir les produits québécois, ont contribué à cette tendance.

La pandémie freine une économie en pleine croissance

L'incertitude liée à la COVID-19 a touché évidemment de plein fouet l'industrie touristique, et les répercussions iront bien au-delà de l'année 2020. La firme Oxford Economics s'attend, en effet, à une réduction de près de la moitié de l'activité touristique en 2020 et à un retour à la normale en 2022 au plus tôt. Encore là, tout comme l'engouement pour l'achat local de produits, l'industrie touristique québécoise perdra assurément des visiteurs étrangers, mais profitera d'un regain de popularité de la part des vacanciers québécois, voire des habitants des autres provinces canadiennes, qui en profiteront pour revisiter ou découvrir les attraits d'ici.

La confiance des entrepreneurs a aussi été affectée et il faudra du temps pour la restaurer. D'autant que la récession actuelle a entraîné une augmentation de leur taux d'endettement. Malgré les mesures d'atténuation de la crise mises en place par les gouvernements, de nombreuses entreprises éprouvent des difficultés financières dont les effets se feront sentir encore longtemps. Le climat d'incertitude contribuera également à freiner la reprise des investissements. Plusieurs sondages réalisés par la BDC depuis le début de la pandémie révèlent d'ailleurs une baisse dans les intentions d'investir. La bonne nouvelle, s'il en est une, est que la pénurie de main-d'œuvre qui minait la croissance d'un grand nombre d'entreprises ne sera plus un enjeu à court et à moyen termes. Mais, tôt ou tard, le vieillissement de la population québécoise remettra cet enjeu à l'ordre du jour.

La pandémie a aussi fortement touché les coffres des gouvernements fédéral et provincial. Les déficits annoncés pour 2020, et qui auront cours également dans les prochaines années, témoignent de l'ampleur des effets de la crise sur les finances publiques. La capacité de dépenser des gouvernements s'en trouve du même coup considérablement réduite et sera davantage mise à mal après la deuxième vague de la pandémie. La bonne nouvelle est que, contrairement à d'autres provinces, le Québec avait engrangé des surplus budgétaires ces dernières années qui l'ont ainsi aidé à faire face à ce soudain et violent ralentissement économique.

Le géant américain

La reprise de l'économie québécoise dépendra aussi grandement de la bonne tenue des activités américaines. « Quand les États-Unis éternuent, le Canada attrape la grippe », dit d'ailleurs le célèbre dicton qui prend tout son sens aujourd'hui. Le redressement de l'économie américaine

est évidemment essentiel aux entreprises d'ici. Les États-Unis, on le sait, sont de loin le principal client du Québec, monopolisant plus de 70 % de ses exportations internationales, pour une valeur d'environ 60 milliards de dollars.

La confiance des exportateurs canadiens avait d'ailleurs atteint un creux historique, selon l'indice de confiance commerciale semestriel publié à la fin du mois de juin 2020 par Exportation et développement Canada (EDC). L'indice principal est ainsi passé de 69,3 à la fin de 2019 à 56,0; soit cinq points de moins que durant la grande récession amorcée en 2008, selon le sondage. Même si certaines entreprises (14 %) disent avoir enregistré de meilleures ventes en raison de la COVID-19, la plupart des répondants (64 %) s'attendent à ce que les répercussions négatives de ce choc sur les ventes se poursuivent jusqu'en 2021. Le Conference Board du Canada s'attend à un redémarrage du commerce mondial dans la deuxième moitié de l'année 2020, en précisant qu'il faudra des années pour revenir aux volumes des échanges internationaux d'avant la crise sanitaire.

Dans le contexte actuel, l'entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2020 du nouvel accord commercial liant les États-Unis, le Mexique et le Canada (ACEUM) s'avère une bonne nouvelle. Après de longues et ardues négociations, initiées après l'arrivée à la Maison-Blanche de Donald Trump qui tenait mordicus à remplacer le précédent traité de libre-échange nord-américain (ALENA), le marché américain va donc demeurer ouvert à l'ensemble des manufacturiers québécois.

Le rythme de la reprise s'est accéléré en mai et en juin aux États-Unis, comme le démontrent les ventes au détail et le dynamisme du marché de l'emploi. L'économie américaine a en effet recouvré 4,8 millions d'emplois en juin et ajouté 1,8 million d'emplois en juillet, portant alors à 9,3 millions le nombre d'emplois récupérés depuis avril. La résurgence de la pandémie de COVID-19 aux États-Unis, qui a amené certains États à suspendre la levée des mesures de confinement et même à préconiser de nouvelles fermetures des bars et des restaurants, risque toutefois de ralentir la reprise.

La récession actuelle ne ressemble en rien à celles qui ont marqué les récentes crises économiques et les perspectives demeurent empreintes d'incertitude. Le caractère imprévisible de ce coup de frein et de ses effets amène du même coup différents scénarios de reprise, selon divers secteurs d'activité également. Une reprise en forme de V reposerait sur un rebond

La pandémie freine une économie en pleine croissance

important qui ramènerait l'activité aux sommets précédents relativement rapidement. Elle toucherait particulièrement les secteurs manufacturiers et de la construction. Une reprise en forme de U serait plus lente et pourrait s'étaler sur plus d'un an. Cette situation semble plus probable pour les secteurs nécessitant un retour de la confiance des consommateurs, tant d'un point de vue économique que sanitaire. Une reprise en forme de L, caractérisée par un rebond timide et un niveau d'activité inférieur à sa tendance pré-crise pendant plusieurs années, représenterait le pire des scénarios. Les entreprises œuvrant dans l'industrie du tourisme et des événements grand public risquent malheureusement d'emprunter ce chemin. Enfin, une deuxième vague des cas de COVID-19, plus tard en 2020 ou en 2021, entraînerait une reprise en forme de W pour la plupart des entreprises. Les trois grandes pandémies du xx^e siècle (la grippe de Hong Kong entre 1968 et 1970, la grippe asiatique en 1957 et en 1958 et la grippe espagnole entre 1918 et 1921) se sont caractérisées par plus d'une vague.

Les nouvelles technologies numériques à la rescousse

La pandémie a mis en lumière l'importance de se tourner vers les nouvelles technologies. Les entreprises qui avaient déjà amorcé leur transition vers l'économie numérique, ou qui ont profité de la crise pour faire ce virage, ont généralement été moins pénalisées. Faute de pouvoir se rendre dans les magasins ou les centres commerciaux, les consommateurs se sont en effet tournés vers le commerce électronique pour se procurer divers biens ou services et même de la nourriture. À preuve : les ventes en ligne ont explosé dans le contexte de la COVID-19 alors que 56 % des Québécois ont acheté par le biais d'Internet pour la première fois durant la crise. Autre statistique impressionnante : les ventes en ligne d'appareils électroménagers, d'appareils électroniques, de matériaux de construction et d'articles de bricolage au Canada ont fait un bond prodigieux de 587 % entre le 11 mars et le 14 avril 2020, par rapport à la même période en 2019.

Les entreprises qui ont une forte présence en ligne et qui disposent d'une solide infrastructure de commerce électronique ont donc profité du confinement. Plusieurs d'entre elles ont vu leur chiffre d'affaires moins diminuer, voire même augmenter pour certaines, leur permettant ainsi de beaucoup mieux encaisser le coup. En revanche, les entreprises qui n'étaient pas préparées se trouvent aujourd'hui en plus grande précarité financière

et risquent même d'avoir perdu des clients. Elles ont d'ailleurs tout intérêt à prendre le virage du commerce électronique le plus rapidement possible, car ces nouvelles habitudes de consommation devraient perdurer : 86 % des nouveaux acheteurs en ligne entendent continuer à magasiner en ligne, selon des sondages. Voilà qui démontre assurément que les consommateurs, qui ont ainsi découvert les avantages de l'expérience en ligne pour la livraison à domicile ou les options de ramassage en magasin, n'entendent pas renoncer à la commodité ni à l'efficacité du commerce électronique une fois la pandémie passée. Dans la foulée de l'explosion des ventes en ligne, des sondages internes de la BDC révèlent des intentions accrues chez les entrepreneurs d'investir dans le commerce électronique. Parmi les changements découlant de la pandémie que les entreprises entendent en effet apporter, 30 % d'entre elles souhaitent investir dans les technologies numériques.

Les entreprises investissent dans la technologie pour être plus efficaces : entreprises qui prévoient apporter des changements, en pourcentage par type de changement

27 %

Simplifier les opérations

26 %

Vendre des produits en ligne

22 %

Encourager le télétravail

20 %

Offrir des services à distance

Graphique [g/2020-c1-6](#)

Source : Banque de développement du Canada, 2020.

Note : Sondage de suivi du 2 au 7 juin 2020 (n=481).

Le télétravail s'est aussi avéré particulièrement stratégique depuis le début de la pandémie. Qui connaissait les services de vidéoconférence, de réunions en ligne ou de clavardage comme Zoom, Microsoft Teams et d'autres possibilités d'échanges en téléconférence virtuels, avant la pandémie? De nos jours, des connexions Internet plus rapides et des services infonuagiques fiables rendent encore plus faciles et attrayantes

La pandémie freine une économie en pleine croissance

les options de télétravail. Dans l'ensemble, près de 4 travailleurs canadiens sur 10 (39,1 %) ont fait du télétravail au cours de la dernière semaine complète de mars 2020, indiquent des données publiées par Statistique Canada². Ce pourcentage est d'ailleurs comparable au nombre de travailleurs (38,9 %) pouvant occuper un emploi qui peut vraisemblablement être exercé à domicile³.

La capacité de télétravail varie bien sûr grandement d'une industrie à l'autre. La plupart des emplois dans les secteurs de la finance et des assurances (85 %), des services d'enseignement (85 %) et des services professionnels, scientifiques et techniques (84 %) peuvent être exercés à domicile, indique Statistique Canada. À l'inverse, les emplois dans les secteurs des services d'hébergement et de restauration (6 %) ou de l'agriculture et de la foresterie (4 %) n'ont pratiquement aucune capacité de télétravail. Dans les secteurs plus adaptés au télétravail, l'emploi a reculé en moyenne de seulement 8 % à partir du mois de février 2020, comparativement à une baisse moyenne de 20 % dans les domaines d'activité qui se prêtent moins bien au travail à domicile.

Le pourcentage d'employés qui travaillent habituellement quelques heures à domicile avait très peu varié ces 20 dernières années : il est en effet passé de 10 % en 2000 à 11 % en 2008, puis s'est faiblement élevé à environ 13 % en 2018, estime Statistique Canada. Nul doute que cette tendance sera renversée pendant la crise de la COVID-19, voire dans les années à venir. D'autant que le mythe de la baisse de productivité qui plane au-dessus du télétravail a sûrement volé en éclats. Le télétravail, dans la mesure où les travailleurs ne perdent pas des heures à transiter dans les transports et la congestion routière, a aussi l'avantage de favoriser une meilleure qualité de vie et de faciliter la conciliation travail-famille.

Une nouvelle révolution industrielle

Le secteur des services n'est pas le seul à devoir s'intéresser aux technologies numériques. Ces dernières offrent aussi une myriade de nouvelles possibilités aux entreprises manufacturières, qui se tournent de plus en plus vers l'usine intelligente, car la nouvelle révolution industrielle est bel et bien en marche.

Grâce aux nombreuses percées dans les domaines des technologies de l'information, des communications mobiles et de la robotique, les technologies numériques sont en effet plus présentes dans les usines. Il est maintenant possible de créer une usine intelligente où Internet, des capteurs sans fil, des logiciels et d'autres technologies de pointe sont utilisés de concert afin d'optimiser la production et d'améliorer la satisfaction des clients. Ces outils permettent à l'entreprise de réagir plus rapidement aux changements du marché, d'offrir des produits plus personnalisés et d'accroître son efficacité opérationnelle dans le cadre d'un cycle d'amélioration continue.

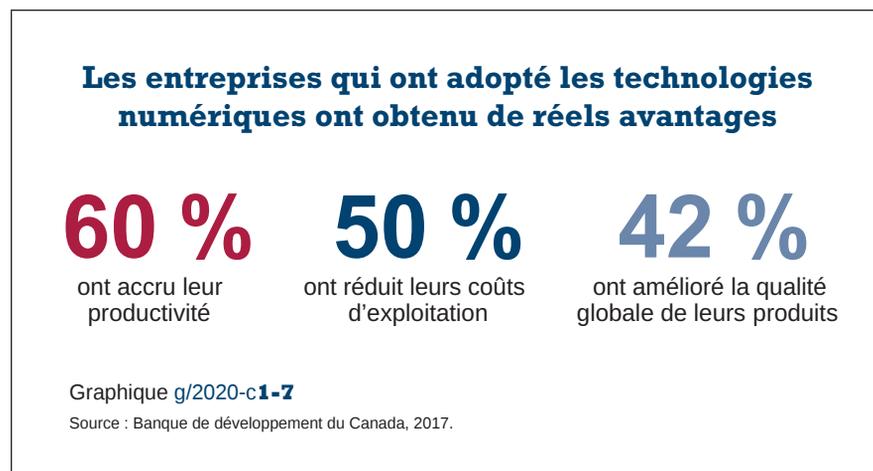
Cette transformation, appelée « industrie 4.0 » ou « quatrième révolution industrielle », succède ainsi aux bouleversements déclenchés d'abord par l'introduction de la machine à vapeur, qui a favorisé la mécanisation, puis par l'établissement des chaînes de montage ayant entraîné la production de masse, avant l'arrivée plus récente de l'automatisation. Le déploiement de la technologie 5G, cette cinquième génération des communications sans fil, améliorera encore plus la connectivité entre des appareils et des équipements ; elle pave ainsi la voie à une foule de nouvelles applications.

Le Québec constitue un pôle d'excellence en recherche dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), grâce entre autres aux travaux de recherche menés par l'Institut québécois d'intelligence artificielle – Mila et à l'expertise du réputé professeur Yoshua Bengio.

L'impact des technologies numériques sur le secteur de la fabrication est remarquable. Les fabricants qui ont adopté des technologies numériques en tirent des avantages très intéressants. Les entreprises manufacturières qui ont entamé le virage 4.0 disent avoir accru leur productivité de 60 % et réduit leurs coûts d'exploitation de 50 %. Une étude de la BDC publiée en 2017 indique aussi que 42 % des entreprises ont amélioré la qualité globale de leurs produits au moyen de technologies numériques. Elles notent entre autres avoir amélioré leur capacité à anticiper et à prévenir les temps d'arrêt, et réussi à optimiser l'efficacité et l'entretien des équipements. Des économies peuvent notamment être générées par la surveillance de la production et le contrôle de la qualité en temps réel afin de réduire le gaspillage et le réusinage. L'automatisation accrue permet aussi de réduire les coûts de main-d'œuvre et d'améliorer le flux de production. L'utilisation d'imprimantes 3D permet d'accélérer le prototypage et de réduire les coûts

La pandémie freine une économie en pleine croissance

de conception. Enfin, les contrôles de la qualité en temps réel permettent notamment aux entreprises de réduire, voire d'éliminer, les retours par les clients causés par des produits non conformes aux spécifications.



Ainsi, des usines hautement automatisées et plus polyvalentes peuvent désormais se mesurer aux usines à faible coût de l'Asie, là où des entreprises manufacturières ont délocalisé en totalité ou en partie leur production ces dernières années. Les entreprises ont d'autant plus intérêt à se tourner vers les technologies numériques que celles ayant un niveau de maturité numérique plus élevé affichent une croissance des ventes et des bénéfices supérieurs à celle de leurs pairs, indiquent plusieurs enquêtes de la BDC. Elles ont également une plus grande propension à exporter et à innover.

Les technologies numériques gagnent du terrain dans de nombreuses usines canadiennes. Les compagnies québécoises ont pour leur part entrepris le passage vers le numérique dans une proportion plus grande que celles des autres provinces. Certaines font même figure de pionnières et servent d'exemple. C'est le cas d'APN Global, une entreprise de Québec spécialisée dans l'usinage de pièces métalliques, qui est une des PME les plus avant-gardistes et est un modèle à suivre. Elle a amorcé son virage 4.0 au début des années 2000, en achetant une première machine d'outillage intelligente, et elle mise aujourd'hui sur un système de production intégré par ordinateur qui permet même à ses dirigeants de gérer l'usine à distance.

Pourtant, les fabricants ont encore beaucoup de chemin à faire dans leur transformation numérique. Bien que près de 40 % des PME manufacturières canadiennes aient mis en œuvre des projets 4.0, seulement 3 % avaient entièrement numérisé leur production tandis que 17 % en étaient à l'étape de la planification. Le fait que 42 % d'entre elles n'avaient pas encore amorcé ce virage, alors que leurs concurrentes aux États-Unis, en Europe et en Asie s'y sont déjà fermement engagées, demeure préoccupant.

L'investissement dans les technologies numériques, bien qu'encore insuffisant, s'est amélioré ces dernières années. Des études de la BDC montrent également un déplacement des investissements dans des actifs corporels, tels que l'équipement et les machines, vers des actifs incorporels tels que les logiciels, la formation et la propriété intellectuelle. En 2015, 20 % des propriétaires d'entreprises avaient l'intention d'investir dans des actifs incorporels. En 2019, cette proportion avait plus que doublé, pour atteindre 47 %.

Un nombre encore trop restreint d'entreprises sont parvenues à une maturité numérique suffisante. Elles ont principalement implanté des systèmes de gestion ERP, divers logiciels ou encore des robots ou des équipements à commande numérique. Mais il arrive souvent que ces diverses mesures ne soient pas adéquatement arrimées avec les besoins ou avec la stratégie de l'entreprise, soit parce que ces technologies ne sont pas connectées, soit parce qu'elles ne sont pas encore maîtrisées convenablement. Certaines entreprises, pour pallier la pénurie de main-d'œuvre, se sont lancées dans l'achat de robots ou d'autres équipements automatisés qui, faute de stratégie d'implantation ou d'intégration, ne sont pas efficaces ou, pire, sont restés dans leurs boîtes pendant des mois. Des entreprises dépensent des milliers de dollars pour un nouveau widget sans réfléchir à son incidence sur leurs activités quotidiennes. Résultat : elles finissent par perdre de l'argent.

Cette nouvelle révolution industrielle n'est pas qu'une affaire de robots ou de programmes informatiques. Les technologies numériques exigent aussi une nouvelle façon de faire les choses qui repose sur des changements dans la culture organisationnelle d'une entreprise. Celles qui investissent dans ces technologies sans stratégie et vision claires, sans formation des employés et sans un environnement qui favorise une culture d'amélioration continue ont plus de mal à enregistrer des bénéfices.

La pandémie freine une économie en pleine croissance

Pour les entreprises manufacturières qui, dans un passé récent, étaient en manque de travailleurs, le virage vers l'industrie 4.0 s'avère incontournable. En période de pandémie et de distanciation sociale, des usines plus intelligentes ont également le potentiel de continuer leur production. À n'en pas douter, les entreprises doivent adopter les technologies numériques pour assurer leur croissance et faire face à la concurrence. Il en va même de leur avenir.

Conclusion

La pandémie de COVID-19 a abruptement mis fin à une longue croissance économique sans précédent au Québec. Dès la fin de l'été 2020, la reprise semble s'être amorcée, bien qu'elle sera plus longue que prévu et demeure fragile notamment en raison de la deuxième vague d'infections. Si certains secteurs d'activité s'en remettent plus facilement, d'autres peineront davantage et pourraient attendre plusieurs années avant d'y parvenir. D'où l'importance, pour les entreprises qui veulent assurer leur relance et leur croissance, d'amorcer ou d'accélérer le virage vers une économie de plus en plus numérique. Et ce, non seulement afin de faire face au risque d'une future pandémie, mais aussi pour se mettre au diapason d'une économie en profonde transformation.



Références

Banque de développement du Canada. (2020, juin). *Sondage sur l'incidence de la COVID-19 sur les PME canadiennes – Sondage de suivi, vague 7*. Repéré à : https://www.bdc.ca/fr/documents/analyses_recherche/report_covid19_survey_jun_02072020_fr_external.pdf

Banque de développement du Canada. (2017, mai). *Industry 4.0: The New Industrial Revolution. Are Canadian manufacturers ready?* <https://bridgr.co/wp-content/uploads/2017/06/bdc-etude-manufacturing-en.pdf>

Gouvernement du Canada. (s.d.). *Maladie à coronavirus (COVID-19) : mise à jour sur l'écllosion*. Repéré à : <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/maladies/2019-nouveau-coronavirus.html>

Gouvernement du Québec. (2020, mars). *Budget 2020-2021 Plan budgétaire – Votre avenir, votre budget*. Repéré à : http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2020-2021/fr/documents/PlanBudgetaire_2021.pdf

Statistique Canada. Tableau 14-10-0287-01. Caractéristiques de la population active, données mensuelles désaisonnalisées et la tendance-cycle, 5 derniers mois. doi : <https://doi.org/10.25318/1410028701-fra>

Statistique Canada. Tableau 36-10-0402-01. Produit intérieur brut (PIB) aux prix de base, par industries, provinces et territoires (x 1 000 000). doi : <https://doi.org/10.25318/3610040201-fra>

Notes

1. Banque de développement du Canada (juin 2020). Sondage sur l'incidence de la COVID-19 sur les PME canadiennes – Sondage de suivi, vague 3. Document interne.
2. Faire tourner l'économie à distance : le potentiel du travail à domicile pendant et après la COVID-19. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/45-28-0001/2020001/article/00026-eng.htm?HPA=1>
3. Pourcentage de l'effectif télétravaillant ou travaillant à distance, et pourcentage de l'effectif qui devrait continuer de télétravailler ou de travailler à distance après la pandémie, selon les caractéristiques de l'entreprise. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=3310024701&pickMembers%5B0%5D=3.3>

Chapitre 2

L'IMMIGRATION COMME SOLUTION AUX EFFETS DU RALENTISSEMENT DÉMOGRAPHIQUE AU QUÉBEC

*Enjeux et pistes de solution découlant du Congrès 2019
de l'Association des économistes québécois*



Jean-Claude Cloutier

Économiste-conseil pour l'Association des économistes québécois

Résumé

L'économie du Québec est confrontée à une évolution démographique qui pourrait diminuer sa capacité de croissance et compromettre à moyen terme l'équilibre de ses finances publiques. Même si l'intégration des nouveaux arrivants peut poser certaines difficultés, l'immigration offre la possibilité de pallier les effets négatifs des changements démographiques en atténuant les pénuries de main-d'œuvre et en fournissant un apport net positif au budget du gouvernement. La réalisation de ces bénéfices se heurte cependant à différents obstacles : concentration excessive de l'immigration dans la grande région métropolitaine, difficultés d'intégration en emploi et surqualification des immigrants, rigidité des programmes gouvernementaux, etc. Les administrations publiques doivent notamment réduire les délais d'approbation des candidats à l'immigration, miser sur la mixité des milieux de vie et de travail et tenir un discours favorable à l'accueil et à l'inclusion. Tout en recherchant à la fois les candidats natifs et les candidats immigrants, les employeurs doivent mettre en œuvre des pratiques de recrutement et de rétention innovatrices correspondant le mieux possible aux attentes personnelles des travailleurs.

Introduction

Le congrès de mai 2019 de l'Association des économistes québécois avait pour thème « Démographie, immigration et marché du travail au Québec – Menaces ou opportunités ? ». Au cours de cette rencontre, plus d'une vingtaine de conférenciers et d'intervenants issus des secteurs privé et public et des milieux universitaires ont abordé divers aspects de cette question. Ils se sont intéressés principalement à la contribution possible de l'immigration au règlement des déséquilibres provoqués par l'augmentation de l'âge moyen de la population québécoise et par la croissance insuffisante des effectifs de la population active. En plus de données factuelles permettant une juste appréciation des questions abordées, le congrès a fait une large part à l'expérience concrète des entreprises et des responsables des programmes gouvernementaux. Le présent article rapporte certaines des observations qui sont ressorties de ce congrès¹. La pandémie de COVID-19 a fait en sorte de freiner brutalement les flux migratoires et a donc créé un contexte très différent de celui qui prévalait au moment du congrès. Cependant, les défis démographiques du Québec demeurent entiers et les questions abordées par les congressistes retrouveront vraisemblablement toute leur pertinence une fois que seront levées les restrictions à l'immigration dictées par l'urgence sanitaire.

Les effets du ralentissement démographique

Une évolution démographique préoccupante

La dynamique démographique du Québec préoccupe nombre d'observateurs et de décideurs depuis plusieurs années. Ainsi, l'accroissement naturel annuel de la population québécoise, qui était de plus de 50 000 dans les années 1970, n'était plus que de 17 600 en 2017 (Ministère de l'Immigration, de la Diversité et de l'Inclusion MIDI, 2019, p. 13). De plus, l'âge moyen de la population, qui était de 38,1 années en 2000, a grimpé à 42,1 années en 2017 (MIDI, 2019, p. 16). Le noyau principal de la population active, composé de toutes les personnes âgées entre 20 et 64 ans, devrait

décliner jusqu'au milieu de la décennie 2020 et seul un niveau d'immigration annuel de 60 000 ou plus empêchera qu'il ne baisse sous le niveau de 2011 (MIDI, 2019, p. 19).

Déjà, l'immigration compense en partie les effets du ralentissement démographique. Ainsi, en 2018, le Québec se plaçait au troisième rang des pays développés au chapitre de la croissance démographique, derrière le reste du Canada et l'Irlande, grâce à l'apport des migrations internationales. Les immigrés représentaient 13,7 % de la population québécoise en 2016, soit une progression notable par rapport à 1991, alors que cette proportion était de 9,0 % (MIDI, 2019, p. 31). Bien qu'inférieure à celle du reste du Canada, cette proportion était équivalente à celle des États-Unis et supérieure à celle de l'ensemble des pays de l'OCDE en 2016 (MIDI, 2019, p. 12).

Mais même avec cet apport substantiel de l'immigration, l'évolution démographique du Québec demeure préoccupante, puisqu'elle entraîne des difficultés pour le marché du travail et pour les finances publiques.

Une main-d'œuvre insuffisante

En quatre ans seulement, le nombre de postes vacants au Québec a doublé pour atteindre 120 000, ce qui témoigne, dans de nombreux secteurs, d'une rareté, voire d'une pénurie de main-d'œuvre. Bien que sévissant partout au Canada, c'est au Québec que cette rareté de la main-d'œuvre est la plus aiguë. Le taux de postes vacants y atteignait 4,1 % au début de l'année 2019, comparativement à 3,6 % en Colombie-Britannique et à 3,3 % en Ontario (La Presse Canadienne, 2019b).

Une enquête effectuée par la Banque de développement du Canada auprès d'un échantillon de 1 208 petites et moyennes entreprises canadiennes confirme le resserrement du marché du travail. Selon cette enquête, 37 % des entrepreneurs québécois déclarent avoir déjà des difficultés à embaucher de nouveaux employés par suite de la rareté de la main-d'œuvre. Ces difficultés sont encore plus grandes dans les zones rurales (42 %) et chez les entreprises de 20 à 49 employés (63 %). La même enquête révèle que 55 % des PME québécoises freinent leurs

investissements en raison des difficultés d'embauche. Les choses risquent d'aller en s'aggravant puisque, selon Emploi Québec, il devrait y avoir au net 1,4 million de postes à combler d'ici 10 ans au Québec.

Une pression sur les finances publiques

Au Québec, en 1971, il y avait 10 travailleurs pour 1 retraité. Ce rapport ne sera plus que de 2 pour 1 en 2031. Cela imposera un lourd fardeau aux finances publiques, puisque les frais de santé risquent d'augmenter sensiblement, alors qu'en parallèle le nombre de contribuables ira en diminuant. En conséquence, des simulations économétriques font présager un déficit budgétaire de 9,5 milliards de dollars en 2035 pour le gouvernement du Québec.

L'apport de l'immigration

La situation

Dans les années 1990, le nombre d'immigrants admis au Québec était inférieur à 30 000 par année. Entre 1998 et 2010, ce nombre a progressé régulièrement pour se situer en moyenne à près de 52 000 par année entre 2009 et 2018 (MIDI, 2019, p. 39). Entre 2013-2014 et 2017-2018, le taux d'immigration a été de 6,1 par 1 000 habitants, soit un niveau comparable à celui de l'Ontario (7,8 par 1 000 habitants) et nettement supérieur à celui des États-Unis (3,3 par 1 000 habitants).

L'immigration permanente se divise en trois grandes catégories selon qu'elle vise des objectifs économiques (principalement en matière de main-d'œuvre), le regroupement familial ou des fins humanitaires (par exemple : accueil de réfugiés). L'immigration temporaire comprend principalement les étudiants étrangers et les travailleurs étrangers admis pour répondre pour une durée limitée à des besoins urgents de main-d'œuvre.

Alors que la proportion de l'immigration économique se situait à près de 70 % en 2009, cette part a diminué à 57,1 % en 2018 du fait de la hausse de l'immigration attribuable aux regroupements familiaux (24,0 %) et à l'accueil

de réfugiés (17,3 %) (MIDI, 2019, p. 38 et 41). En valeur absolue, cette catégorie d'immigrants est passée d'un sommet de près de 40 000 en 2012 à moins de 30 000 en 2018 (MIDI, 2019, p. 40).

Le 31 décembre 2018, le nombre de détenteurs d'un permis d'étudiant étranger au Québec était de 70 060. Il s'agissait d'une augmentation notable par rapport au nombre du 31 décembre 2013, soit 42 095. En cette même année 2018, 43 455 ressortissants étrangers disposaient au Québec d'un permis de mobilité internationale² et 9 670 disposaient d'un permis de travailleur étranger temporaire (MIDI, 2019, p. 75).

Les mouvements migratoires interprovinciaux modifient la donne en ce qui a trait à la croissance de la population et à celle de la main-d'œuvre. Chaque année, le Québec perd en moyenne près de 10 000 personnes, dont une bonne partie dans le groupe d'âge de la population active. Une enquête de Statistique Canada situait à 80,9 % la proportion des immigrants arrivés au Québec en 2011 qui y résidaient toujours en 2016. Les taux correspondants étaient de 91,0 % en Ontario et de 46,8 % au Nouveau-Brunswick³.

Les bénéficiaires

Un apport économique positif

L'immigration économique a pour objectif et pour effet d'augmenter le volume de la population active. Cependant, la capacité de l'immigration à faire baisser le taux d'emplois vacants est atténuée par le fait que l'immigration contribue elle-même à faire augmenter la demande de main-d'œuvre, puisque les nouveaux citoyens demandent des biens et services. En outre, les effets de l'immigration sur la main-d'œuvre sont limités du simple fait qu'une partie seulement des immigrants ont l'âge ou les compétences requises pour travailler ou désirent le faire.

Par contre, la contribution des immigrants à la hausse du taux moyen de scolarité de la main-d'œuvre est indéniable. En 2016, 72 % des immigrants de 25 à 64 ans au Québec détenaient un diplôme d'études postsecondaires, comparativement à 67 % chez les natifs. Selon une enquête de l'OCDE présentée au congrès⁴, la qualification des immigrants au Québec est plus élevée que dans 15 des 17 économies développées ayant été examinées.

Les immigrants québécois sont aussi nettement plus entrepreneuriaux que les natifs. En 2018, 39,8 % d'entre eux déclaraient en effet vouloir se lancer en affaires, comparativement à 16,1 % des natifs. En outre, différentes études pointent dans le sens d'une contribution importante des immigrants à l'innovation (Conseil du patronat du Québec, 2015, p. 9).

Le niveau de vie et le bien-être

Contrairement à certaines craintes, les revenus des natifs risquent peu d'être affectés par l'arrivée des immigrants permanents. Ils peuvent cependant l'être par les séjours au pays de travailleurs étrangers temporaires. Ces derniers sont en effet sélectionnés en fonction des besoins immédiats du marché du travail et, pour cette raison, ils peuvent se substituer aux migrations interrégionales ou interprovinciales de travailleurs natifs.

Cependant, le revenu n'est pas une mesure parfaite du bien-être de la population. Selon Paul Collier, un économiste d'Oxford qui était conférencier d'honneur au congrès, la satisfaction et le bien-être de la population sont aussi fonction du sentiment d'appartenance à une communauté et des liens de confiance et de solidarité entre les membres de celle-ci. Or, une intégration insuffisante des immigrants à leur société d'accueil peut réduire leur bien-être aussi bien que celui des natifs (Collier, 2019).

L'équilibre des finances publiques

Pour atténuer la menace que représente le ralentissement démographique pour l'équilibre à moyen terme des finances publiques, l'immigration est préférable aux mesures natalistes. En effet, c'est entre 25 et 60 ans en moyenne que les individus rapportent plus en impôts et taxes que ce qu'ils coûtent en services publics, et qu'ils représentent donc un bénéfice net pour le budget de l'État. Or, en 2016 au Québec, la majorité des classes d'âge les plus nombreuses chez les immigrants étaient celles allant de 30-34 ans à 45-49 ans alors que chez la population native c'étaient celles allant de 50-55 ans à 60-64 ans (MIDI, 2019, p. 30).

Compte tenu du profil d'âge favorable de la population immigrante, des simulations économétriques indiquent qu'une augmentation de 20 000 du nombre d'immigrants admis chaque année au Québec pourrait améliorer le solde budgétaire du gouvernement de 1,7 milliard de dollars en 2035. Sous réserve des limites inhérentes à de telles projections économétriques

à long terme, l'amélioration serait même de 4,0 milliards de dollars si ces immigrants additionnels étaient parfaitement intégrés à l'économie québécoise et touchaient un revenu correspondant à leurs qualifications. Le déficit budgétaire prévu de 9,5 milliards de dollars évoqué plus haut serait donc réduit d'autant. À l'opposé, une diminution de 20 000 du nombre annuel d'immigrants pourrait créer un déficit supplémentaire de 1,8 milliard de dollars dans le budget du gouvernement.

Les difficultés

Malgré les bénéfices pouvant découler de l'immigration, certaines difficultés empêchent celle-ci de produire tous les effets escomptés.

La concentration des immigrants dans la région métropolitaine

En 2016, plus de 80 % des immigrés au Québec, soit 908 725 sur 1,1 million, résidaient dans la grande région montréalaise⁵. La population immigrante était beaucoup moins nombreuse dans la région de la Capitale-Nationale (41 895) et ailleurs au Québec. Alors que 34 % de la population de Montréal et 28,5 % de celle de Laval était issue de l'immigration en 2016, cette proportion était de 10 % ou moins dans toutes les autres régions du Québec. Elle était même inférieure à 2,5 % dans plus de la moitié de ces dernières (MIDI, 2019, p. 32-33).

Cette concentration dans la région métropolitaine s'explique par le fait que les immigrants peuvent souvent y trouver des communautés provenant de leur pays d'origine. Ils peuvent aussi plus aisément se fondre dans une population déjà largement métissée. En outre, les structures d'accueil y sont plus développées que dans la plupart des autres régions du Québec. Enfin, les obligations financières et personnelles représentent des obstacles majeurs à la mobilité interrégionale, et ce, plus particulièrement pour la main-d'œuvre immigrante.

Cette concentration géographique de l'immigration présente des inconvénients et des risques. En effet, elle empêche les autres régions de profiter d'un apport de main-d'œuvre qui leur est autant sinon plus nécessaire qu'à la grande région métropolitaine. De fait, sur des besoins de main-d'œuvre

établis à 751 000 personnes pour l'ensemble du Québec entre 2017 et 2021, 45 % se situent en dehors des régions de Montréal, de Laval et de la Montérégie (MIDI, 2019, p. 27).

Il y a aussi un risque de ghettoïsation si la présence de communautés ethniques importantes et bien organisées rend moins nécessaire pour les nouveaux immigrants l'intégration à la société native.

L'intégration des immigrants

L'intégration des immigrants au marché du travail pose certaines difficultés, notamment dans les premières années suivant leur arrivée au Québec. Ainsi, en 2018, le taux de chômage au Québec était de 5,0 % chez la population native et de 7,2 % chez les immigrants. Chez ces derniers, le taux variait beaucoup selon le temps écoulé depuis leur arrivée au Québec. Lorsque celle-ci remontait à moins de 5 ans, il était de 11,4 %, comparativement à 6,5 % pour les immigrants dont l'arrivée datait d'entre 5 et 10 ans, et à 6,3 % pour ceux arrivés plus de 10 ans auparavant (MIDI, 2019, p. 22).

Des diplômes difficilement reconnus

Les difficultés d'insertion des immigrants dans le marché du travail tiennent, entre autres causes, à la non-reconnaissance ou à la reconnaissance insuffisante⁶ des diplômes obtenus à l'étranger. Ainsi, en 2016, selon l'enquête précitée de l'OCDE, le taux d'emploi des immigrants ayant obtenu leur diplôme à l'étranger était nettement inférieur à celui des immigrants détenteurs d'un diplôme canadien. En fait, ces derniers profitaient d'un taux d'emploi presque aussi élevé que celui des natifs. La procédure de reconnaissance des diplômes étrangers est longue et complexe et elle décourage les employeurs, les acteurs locaux et les immigrants. La plupart préfèrent renoncer à cette reconnaissance.

La surqualification

Pour que l'immigration apporte un maximum de bénéfices, il faut que les immigrants puissent trouver des emplois correspondant à leurs qualifications. Or, souvent, les qualifications des immigrants arrivant au Québec sont plus élevées que ce que demande le marché du travail, notamment dans les régions moins urbanisées. Cette situation faisait en sorte en 2018 que 48,3 %

de la population québécoise issue de l'immigration détenant un diplôme postsecondaire était réputée surqualifiée. Cette proportion atteignait même 60,0 % chez les personnes arrivées au Québec depuis moins de 5 ans (MIDI, 2019, p. 26). De fait, la surqualification des immigrants au Québec est une des plus élevées parmi la quinzaine d'économies développées ayant été examinées dans le cadre de l'étude de l'OCDE présentée au congrès. De plus, au Québec comme dans ces autres économies développées, le taux d'emploi ne se rapproche de celui des natifs ou ne le dépasse que chez les immigrants qui sont le moins éduqués.

Cette situation montre que la contribution de l'immigration à l'équilibre du marché du travail n'est pas seulement une question de nombre, mais aussi de profil des compétences des candidats à l'immigration. Cela place le Québec devant un dilemme. En effet, d'une part, la sélection d'immigrants moins qualifiés répondrait mieux aux besoins des employeurs et faciliterait l'intégration en emploi. D'autre part, il serait préférable de faire un meilleur usage des qualifications supérieures d'un grand nombre d'immigrants. Idéalement, l'équilibre entre l'offre et la demande de main-d'œuvre devrait se faire à un niveau où les compétences requises et la productivité sont plus élevées. L'atteinte de cet objectif fait appel à des politiques et des programmes pouvant relever sensiblement le niveau technologique et la productivité de l'économie québécoise.

Les pratiques discriminatoires et l'adaptation difficile au milieu du travail

Les immigrants peuvent aussi se heurter à certaines pratiques discriminatoires, ainsi que l'a montré une étude (Oreopoulos, 2011) portant sur le grand Toronto. Cette étude a révélé que les candidats à un poste avaient beaucoup plus de chances d'obtenir une entrevue si leur nom avait une consonance anglophone. Il semble que bon nombre d'employeurs sont préoccupés autant sinon plus par les compétences relationnelles de leurs nouveaux employés que par leur formation ou leur expérience. Ils craignent que l'embauche d'immigrants représente une charge plus exigeante que celle de natifs et ce, d'autant plus qu'à leur arrivée certains immigrants peuvent avoir des habitudes de travail mal adaptées au contexte canadien.

La maîtrise du français

Il est possible que l'intégration des immigrants soit rendue plus difficile au Québec par leur ignorance ou leur maîtrise insuffisante de la langue française. C'est du moins un des principaux obstacles en emploi qu'ont mentionnés les employeurs consultés dans le cadre de l'étude de l'OCDE. La même étude révèle aussi que la maîtrise de l'anglais augmente sensiblement le taux d'emploi des immigrants récents, même dans les régions québécoises les plus francophones. Ces facteurs linguistiques ne peuvent cependant jouer que partiellement puisque, en 2016, 80,5 % de la population québécoise issue de l'immigration était réputée pouvoir tenir une conversation en français et 50,3 %, en français et en anglais (Oreopoulos, 2011).

Les pistes de solution

Dans leurs interventions au congrès, les conférenciers et les panélistes ont proposé différents moyens pouvant favoriser une contribution optimale de l'immigration à l'équilibre du marché du travail. Certains de ces moyens touchaient l'approche générale devant être privilégiée alors que d'autres s'adressaient, selon le cas, aux administrations publiques et aux employeurs.

Quelques éléments généraux

Tenir un discours positif

Plusieurs intervenants au congrès ont insisté sur la nécessité de tenir un discours positif et constructif sur l'immigration, et ce, en vue de combattre à la source les tendances éventuelles à la discrimination ou à la méfiance. Selon plusieurs, il faut aussi changer la perception voulant que tout se passe uniquement dans les grandes villes. Les politiciens et les dirigeants ont un rôle important à jouer à cet égard.

Le discours public doit en outre faire valoir que l'immigration n'est pas seulement une question de main-d'œuvre ou de relève démographique, mais que c'est aussi une source d'enrichissement social et culturel et une réponse à des problèmes humanitaires.

Malgré l'urgence de résoudre les problèmes de recrutement de personnel, et compte tenu de la frilosité d'une partie de la population face à l'immigration, il faut aussi faire appel à la patience tant de la part des natifs et des employeurs que de la part des immigrants. L'insertion au travail et l'intégration des immigrants dans les communautés d'accueil ne peuvent en effet se faire que par le développement de valeurs communes. Or, cela demande une certaine période d'adaptation et d'appropriation mutuelle.

Viser la mixité

Les politiques, les programmes et les discours concernant l'immigration doivent viser la mixité, soit le mélange des cultures et des personnes, tant dans les pratiques des milieux de travail que dans les programmes de logement ou de développement culturel. Cette proximité et cette interpénétration des populations et des cultures natives et immigrantes sont nécessaires pour assurer une intégration sociale harmonieuse des nouveaux citoyens et faire émerger des liens de solidarité et de coopération entre eux et les natifs.

Ne pas oublier les autres migrants

En marge de l'attention devant être accordée à l'accueil et à l'intégration des immigrants, les autorités publiques et les employeurs ne doivent pas négliger le potentiel et les défis que représentent les migrations interprovinciales. Non seulement il faut retenir les travailleurs expérimentés tentés d'offrir leurs services ailleurs au Canada, mais il faut essayer de rapatrier les quelque 400 000 Québécois qui travaillent présentement dans d'autres provinces. Ce sont des travailleurs compétents qui n'ont pas à affronter les difficultés d'intégration des migrants internationaux. Le ralentissement de la croissance des économies de l'Alberta et de l'Ontario ouvre des possibilités nouvelles en ce sens, notamment dans les métiers techniques.

Le recours aux travailleurs étrangers temporaires offre aussi une piste valable pour le travail exigeant peu ou pas de qualifications.

Enfin, les étudiants internationaux représentent un bassin potentiel prometteur compte tenu de leur formation, de la connaissance de la culture québécoise qu'ils acquièrent au cours de leurs études et des possibilités qu'ils offrent pour le développement de réseaux économiques avec d'autres pays.

Réduire les délais d’approbation

Dans un marché du travail très concurrentiel, la vitesse de réaction est importante et les gouvernements québécois et fédéral doivent réduire les formalités et les délais requis pour la sélection et l’admission des candidats à l’immigration permanente. Alors que les délais peuvent parfois s’étirer sur plusieurs années, ils doivent idéalement être réduits à quelques mois. Les délais sont également longs pour les travailleurs étrangers temporaires. Ainsi, au printemps 2019, dans la catégorie des « travailleurs peu spécialisés », les employeurs devaient attendre plus de 100 jours avant de savoir si leur demande d’évaluation de l’impact sur le marché du travail serait approuvée (La Presse Canadienne, 2019a).

Le rôle des administrations publiques

À l’échelle du gouvernement provincial

La coordination

Plusieurs ministères ou organismes gouvernementaux ont des responsabilités ou des moyens d’action en matière d’immigration et de soutien aux immigrants. Leurs actions devraient être coordonnées en vue d’une efficacité maximale. À cette fin, un secrétariat rattaché au bureau du premier ministre serait approprié pour assurer cette coordination et pour confirmer auprès des instances gouvernementales la priorité accordée à ce dossier. En outre, un tel guichet administratif unique faciliterait les choses pour les immigrants et pour bon nombre d’employeurs, puisque ceux-ci connaissent peu, voire pas du tout, les ressources qui leur sont offertes et qu’ils ne sont pas familiers avec les rouages de l’administration publique.

La flexibilité

Selon l’étude de l’OCDE, les acteurs gouvernementaux en région ne disposent pas de suffisamment de latitude dans la mise en œuvre des programmes destinés aux immigrants. Une flexibilité accrue serait utile pour permettre la mise sur pied de projets innovants et l’adaptation aux besoins particuliers. Ainsi, il serait possible de remédier, dans certains cas, aux difficultés causées par la masse critique minimale exigée pour les

programmes de francisation. Cette norme apparaît fréquemment comme trop contraignante à l'échelle des régions et des quartiers urbains. Il faudrait aussi envisager des programmes de francisation par types de métiers.

L'information et la promotion

Le gouvernement devrait s'efforcer de rapprocher les immigrants du marché du travail. À cette fin, une cartographie des offres d'emploi pourrait être établie, et il faudrait renforcer les programmes encourageant la mobilité vers les régions pour les immigrants sans emploi ou surqualifiés.

À l'échelle des administrations municipales

L'immigration présente des enjeux et des défis différents selon les villes et les régions. Le programme du congrès a permis aux participants d'en apprendre davantage sur la situation, les expériences et les approches de trois villes soucieuses de relever les défis posés par l'immigration.

Québec

Selon le recensement de 2016, 5,7 % de la population de la ville de Québec est constituée d'immigrants, et ceux-ci contribuent pour plus que leur part à la main-d'œuvre puisqu'ils occupent 7,2 % des emplois. Québec comptait aussi environ 5 000 étudiants internationaux et 3 000 travailleurs temporaires en 2016.

En matière d'immigration, l'administration municipale applique une politique basée sur le projet de vie des personnes et des familles plutôt que sur les besoins en main-d'œuvre. À cette fin, elle agit en se basant sur les attentes et les besoins des personnes immigrantes, fait la promotion de la qualité de vie à Québec et fonde les efforts de rétention sur l'intégration à la vie et aux réseaux communautaires. Dans cette perspective, elle perçoit les loisirs comme un instrument d'intégration fort efficace.

La Ville met en œuvre différents moyens visant l'accueil et l'information des immigrants et elle organise des événements favorisant les rapprochements interculturels. Les programmes municipaux comportent également

de la formation, de l'accompagnement, du jumelage et des services de proximité. Québec mise aussi sur un bénévolat favorisant les liens entre les immigrants et la population native.

En matière d'insertion en emploi, les services municipaux tiennent une rencontre annuelle à l'intention des gens d'affaires susceptibles d'embaucher des immigrants. Ils aident aussi les employeurs à se diriger vers les services pouvant répondre à leurs besoins.

Le taux de rétention des immigrants à Québec atteint 94 %, ce qui semble indiquer que les actions déployées portent fruit. L'administration municipale se réjouit également de ce que 70 % des étudiants internationaux souhaitent travailler à Québec une fois leur diplôme obtenu.

Sherbrooke

Sherbrooke est une des villes québécoises qui accueillent le plus de réfugiés, qu'il s'agisse de réfugiés pris en charge par l'État (RPCÉ) ou parrainés. Ainsi, sur 12 717 personnes immigrantes arrivées à Sherbrooke entre 2003 et 2018, 61 % étaient des réfugiés, comparativement à 26 % pour les travailleurs qualifiés et à 13 % pour les demandeurs d'asile et les immigrants issus d'autres catégories. La structure d'accueil qui a été mise sur pied à Sherbrooke expliquerait en partie l'attrait que la ville exerce sur les RPCÉ. Par ailleurs, l'arrivée dans la ville d'un bon nombre d'immigrants sans statut serait attribuable à la proximité de la frontière américaine.

La municipalité entend assurer aux immigrants l'accessibilité à ses services, aux emplois et à la vie sociale. Elle veut aussi développer chez eux un sentiment d'appartenance à la communauté. À ces fins, elle s'est donné pour orientations d'encourager la présence des personnes immigrantes dans tous les secteurs d'activité, de favoriser les rapprochements interculturels et de développer des partenariats. Elle veut agir comme entité mobilisatrice et comme intermédiaire entre les différents acteurs de la société civile et les ressources du milieu, afin d'instaurer des conditions favorables à l'attraction, à l'accueil et à l'intégration des immigrants dans une perspective de responsabilité partagée.

Dans le cadre d'une entente avec le ministère de l'Immigration, de la Diversité et de l'Inclusion (MIDI), Sherbrooke met en œuvre une trentaine d'actions consistant, entre autres, en du parrainage professionnel (stages rémunérés de six mois), des programmes de financement de projets locaux, des rencontres interculturelles, une tournée de sensibilisation sur le thème « frontières abolies, cultures enrichies », une semaine d'actions contre le racisme et un tour de ville pour les nouveaux arrivants.

Consciente que l'immigration n'est pas seulement une question de main-d'œuvre, la Ville cherche à valoriser l'apport de l'immigration auprès de la population et à contribuer ainsi à faire tomber les préjugés et les réticences.

Montréal

Comme mentionné précédemment, Montréal est clairement un pôle d'immigration : trois nouveaux immigrants québécois sur quatre s'y établissent et deux enfants montréalais sur trois ont au moins un parent issu de l'immigration. Dans une proportion de 55 %, les immigrants montréalais appartiennent à la catégorie « économique » et ont donc été sélectionnés pour leur aptitude à joindre les rangs de la population active. Ils sont nettement plus éduqués que la société d'accueil montréalaise : 40 % d'entre eux détiennent un diplôme universitaire de premier cycle (52 % pour ceux arrivés depuis cinq ans ou moins) comparativement à 24 % chez les natifs montréalais.

Malgré leurs qualifications, l'intégration des immigrants au marché du travail ne se fait pas sans certaines difficultés. Ainsi, en avril 2019, le taux de chômage chez les immigrants était de 7,8 % (10,1 % chez ceux arrivés depuis cinq ans ou moins) comparativement à 4,7 % dans l'ensemble de l'économie montréalaise.

Le Bureau d'intégration des nouveaux arrivants à Montréal (BINAM) coordonne l'accès des immigrants aux diverses ressources.

En décembre 2018, Montréal a dévoilé son premier plan entièrement consacré aux nouveaux arrivants. Ce plan comporte une panoplie de mesures regroupées en quatre axes stratégiques selon les groupes à qui elles sont destinées :

- Évaluer les impacts des projets financés ;
 - Un sondage réalisé auprès de 2 500 nouveaux arrivants dans les 19 arrondissements afin d'évaluer la pertinence des projets du BINAM ;
- Mobiliser et soutenir l'écosystème d'organismes communautaires ;
 - Une somme de 4 millions de dollars investis dans des nouveaux projets touchant 6 territoires d'inclusion prioritaires dans lesquels résident 62 % des nouveaux arrivants ;
- Accompagner les employeurs et d'autres acteurs stratégiques dans l'expérimentation de processus de dotation et d'intégration novateurs ;
 - Un programme jumelant cinq grands employeurs montréalais à des cohortes de 12 à 15 immigrants qualifiés qui pourront profiter d'une expérience de travail de 30 à 52 semaines, accompagnée d'un plan d'intégration ;
 - À titre expérimental, l'abolition des tests psychométriques pouvant être discriminatoires, pour rendre la gestion des ressources humaines plus inclusive ;
 - En février 2019, la tenue d'un événement réunissant plus de 60 leaders économiques qui a permis d'entreprendre la mobilisation et de jeter les bases de la stratégie *Montréal inclusive au travail* dont les actions porteront sur la conscientisation du public, la mobilisation de grands employeurs et le déploiement d'outils ;
- Assurer aux migrants à statut précaire ou sans statut l'accès aux services municipaux et protéger les immigrants victimes de crimes ou d'abus ;
 - Dans le cadre de la politique d'accès « sans peur », quatre organismes communautaires chargés d'entériner l'identité des personnes sans documents d'identité ;
 - Une cellule de protection et d'intervention à l'intention des immigrants mise sur pied par le Centre d'aide aux victimes d'actes criminels.

Les stratégies mises en place par les employeurs

Les besoins de main-d'œuvre varient selon les secteurs d'activité. Dans le cadre du congrès, des employeurs œuvrant au sein d'industries très différentes ont fait état des stratégies et des moyens qu'ils utilisaient pour recruter la main-d'œuvre dont ils avaient besoin, incluant le recours à l'immigration.

Agir rapidement

Dans les nombreux domaines où la demande de main-d'œuvre excède l'offre, les employeurs doivent agir rapidement pour repérer et mettre sous contrat les travailleurs disponibles. C'est particulièrement vrai dans le secteur des télécommunications, où les diplômés sont très convoités. Ainsi, Bell s'efforce d'approcher le plus tôt possible dans les universités les nouveaux diplômés prometteurs dans les technologies de pointe, dont celles relatives à l'intelligence artificielle. Active dans le domaine de la transformation alimentaire, Olymel s'efforce pour sa part de réagir en moins de deux semaines aux candidatures reçues, sinon le risque est grand que les postulants aillent voir d'autres employeurs.

La réglementation et les formalités administratives peuvent cependant empêcher les entreprises d'agir aussi vite qu'elles le souhaitent. Ainsi, selon Restos Plaisirs, des programmes de formation plus courts aideraient les restaurateurs à combler davantage et plus vite leurs besoins de main-d'œuvre. De même, l'accélération des procédures pour le recrutement d'immigrants serait très utile puisqu'il faut de huit à dix mois pour acquérir les services d'un cuisinier immigrant. Même constat pour Olymel, qui ajoute que le recrutement international lui coûte en moyenne 10 000 dollars par travailleur.

Assurer une relève compétente

Pour Ubisoft, le recrutement est maintenant plus facile que lors de l'implantation initiale de l'entreprise à Montréal en 1997. À l'époque, les personnes disposant de compétences dans la création de jeux vidéo étaient rares, alors qu'elles sont maintenant plus de 200 000 dans le monde et que, au Québec, 13 établissements universitaires offrent un programme relié aux jeux vidéo et 20 000 personnes étudient les technologies de l'information.

Ubisoft a contribué concrètement au développement de la formation au Québec. Ainsi, le campus Ubisoft a été créé grâce à la collaboration de l'entreprise avec des cégeps et des universités. Devenu le campus ADN (Arts et divertissement numérique), il offre des formations en animation, en modélisation et en design de jeux vidéo. Consciente que le campus peut aider à assurer une relève compétente à moyen terme, Ubisoft lui a prêté des spécialistes. L'entreprise a également créé un concours pour le design de prototypes de jeux vidéo ouvert aux étudiants et aux établissements d'enseignement.

Dans le domaine de la restauration, Restos Plaisirs travaille aussi au développement d'une relève compétente en fournissant des étudiants aux écoles professionnelles qui en manquent malgré la qualité de la formation qu'elles offrent.

Tenir compte des attentes des candidats

La notoriété d'une entreprise ou son domaine d'affaires peuvent aider ou nuire au recrutement. Ainsi, Ubisoft profite de sa bonne réputation auprès des personnes intéressées à faire carrière dans les jeux vidéo. À l'inverse, pour Olymel, la nature pénible de certains des postes offerts incite plutôt les candidats à chercher autre chose. Ainsi l'entreprise doit-elle aller à la rencontre des candidats potentiels plutôt que d'attendre qu'ils viennent à elle.

De façon générale, le recrutement est devenu très relationnel. Il faut offrir un parcours professionnel, pas seulement un emploi. Ainsi, dans le domaine des télécommunications, les candidats sont intéressés par les technologies plutôt que par le nom de l'entreprise, même si celle-ci est très connue, comme c'est le cas pour Bell. Le recruteur doit donc être capable de parler en connaissance de cause du domaine d'affaires. Les jeunes candidats sont sensibles à l'équilibre entre la vie privée et le travail qui leur est offert et ils veulent de la flexibilité dans les horaires. À la mi-carrière, les candidats privilégient la stabilité, étant donné leurs responsabilités familiales ou financières. Plus tard, une fois leurs familles élevées, ils peuvent de nouveau être tentés par des défis professionnels.

Olymel fait des constats semblables. Les salaires comptent pour les plus jeunes, mais pour les autres, c'est davantage la rémunération globale, dont les avantages sociaux, qui importe. Ainsi, investir dans l'aménagement d'un

gymnase peut s'avérer très rentable pour l'entreprise étant donné qu'une bonne partie des employés seront heureux de profiter de cet équipement. Dans le même effort de répondre aux besoins particuliers de ses employés, Olymel comble en divers endroits les insuffisances du transport collectif en offrant des services de déplacement au travail et à l'école.

La rétention des employés

Dans la restauration, le taux de roulement du personnel est très important, et 10 à 15 % des postes sont toujours vacants, faute d'employés pour les combler. Enrichir les tâches et donner des promotions peut aider à conserver les meilleurs éléments.

Olymel mise aussi sur la rétention de ses employés en leur offrant les conditions de travail les plus satisfaisantes possibles. En agissant ainsi, elle fait d'une pierre deux coups puisque non seulement elle garde ses employés, mais ceux-ci peuvent devenir de bons promoteurs de l'entreprise auprès de candidats potentiels, particulièrement à l'étranger.

La robotisation

La robotisation peut remédier en partie aux difficultés de recrutement. Ainsi, l'entreprise de restauration Restos Plaisirs y voit une solution pour pallier le manque de plongeurs. Olymel investit aussi en automatisation et en robotisation. Cela augmente sa productivité, mais pose aussi un problème de recrutement puisqu'il faut du personnel en mesure d'utiliser ces équipements spécialisés.

Le recours aux immigrants

Malgré les efforts déployés par les entreprises dans leurs secteurs respectifs, le recours à l'immigration demeure nécessaire pour combler les besoins de main-d'œuvre. Ainsi, malgré les nombreuses cohortes de diplômés issus des collèges et des universités du Québec, Ubisoft doit recruter à l'étranger 20 % de ses nouveaux employés. De même, malgré le fait que son recrutement se fasse beaucoup à l'intérieur d'un rayon de 50 kilomètres, Olymel doit aller à l'international pour 10 %

de son recrutement. Dans la restauration, l'immigration est une solution incontournable pour tous les postes de travail qui ne sont pas automatisables, notamment dans les cuisines.

Conclusions

L'évolution démographique réduit le potentiel de croissance de l'économie québécoise et menace l'équilibre des finances publiques à moyen terme. Une fois qu'auront été levées les restrictions liées à la pandémie concernant la mobilité internationale des personnes, l'immigration pourra contribuer à atténuer ces problèmes, notamment en comblant en partie les pénuries de main-d'œuvre qui affectent la capacité de production de plusieurs entreprises et les empêchent de mettre en œuvre leurs projets d'investissement. Compte tenu de leur profil d'âge, les immigrants constituent également un bénéfice net pour les budgets gouvernementaux.

L'apport de la main-d'œuvre immigrante est d'autant plus bienvenu que les immigrants qui arrivent au Québec ont un niveau de scolarité supérieur à celui de la population native et qu'ils peuvent donc aider l'économie québécoise à améliorer sa performance dans les industries innovantes et technologiques. Cependant, une bonne partie des pénuries de main-d'œuvre touche des emplois exigeant peu ou pas de qualifications. Un équilibre doit donc être recherché entre la réponse à court terme aux besoins de main-d'œuvre et la possibilité de rendre l'économie québécoise plus compétitive et productive à moyen terme grâce à l'apport de personnes hautement qualifiées.

Les effets positifs attendus de l'immigration ne pourront pleinement se matérialiser qu'à la condition que l'insertion des nouveaux arrivants dans la société et le marché du travail québécois se fasse de façon harmonieuse et que la population immigrante soit mieux répartie entre la grande région métropolitaine et les autres régions du Québec.

L'ensemble des acteurs doivent favoriser l'ouverture de la population aux nouveaux arrivants en adoptant un discours positif et rassurant au sujet de l'immigration. Ce discours doit aussi faire valoir que l'immigration n'est pas seulement une solution à la rareté de la main-d'œuvre, mais qu'il s'agit aussi d'un enrichissement social et culturel en plus, dans certains cas, d'un important geste humanitaire. Les politiques doivent aussi favoriser la

mixité des lieux de travail et d'habitation. Les gestes posés seront d'autant plus efficaces s'ils reposent sur une approche concertée des différents partenaires publics et privés intéressés, et ce, tant au niveau local qu'à l'échelon national.

Enfin, quels que soient les efforts déployés, l'immigration pourra difficilement combler tous les besoins de main-d'œuvre. Les employeurs doivent aussi s'ingénier à mettre sur pied des solutions efficaces pour conserver leur personnel et augmenter sa productivité.



Références

Présentations au congrès

Antunes, P. (2019, mai). *Coûts et bénéfices économiques de l'immigration : quelques perspectives pancanadiennes*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/d2/c1/29mai-a2-2-antunes.pdf>.

Arseneau, M. (2019, mai). *Pourquoi l'immigration ne suscite pas autant d'inquiétude ici qu'ailleurs ?* Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/12/39/29mai-a1-3-arseneau.pdf>.

Castilla, A. (2019, mai). *Implication de la Ville de Sherbrooke dans l'intégration des personnes immigrantes*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/83/f5/30mai-a3-3-castilla.pdf>.

Cléroux, P. (2019, mai). *Rareté ou pénurie de main-d'œuvre : comment les entreprises doivent-elles s'adapter ?* Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/c3/80/30mai-a4-1-cleroux.pdf>.

Coulombe, S. (2019, mai). *Immigration : importance de la sélection*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/32/66/29mai-a2-3-coulombe.pdf>.

Crépault, K. (2019, mai). *Expérience Ville de Québec*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Récupéré du site de l'Association des économistes québécois : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/13/26/30mai-a3-1-crepault.pdf>.

Dorval, Y.-T. (2019, mai). *L'immigration au cœur de la vitalité du Québec*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/c2/47/29mai-a2-4-dorval.pdf>.

Fortin, P. (2019, mai). *Immigration : le juste milieu entre « trop » et « pas assez »*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/83/c0/30mai-pfortin.pdf>.

Homsy, M. (2019, mai). *Seuils d'immigration au Québec : analyse des incidences démographiques et économiques*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://economistesquebecois.com/files/documents/02/57/29mai-a2-1-homsy.pdf>.

Ladouceur-Girard, M.-C. (2019, mai). *L'expérience de la Ville de Montréal*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/83/87/30mai-a3-2-ladouceur-girard.pdf>.

Légaré, J. (2019, mai). *Rôle de l'« immigration » dans la dynamique de la croissance de la population québécoise*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/02/92/29mai-a1-1-leugareu.pdf>.

Michaud, P.-C. (2019, mai). *Les implications pour les finances publiques du Québec*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/d2/60/29mai-a1-4-michaud.pdf>.

Murray, A. (2019, mai). *Leviers pour survivre à la transformation du marché du travail*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/53/b1/30mai-a5-2-murray.pdf>.

Rempel, B. (2019, mai). *Stratégie du Manitoba : grandir grâce à l'immigration*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/23/27/30mai-a5-3-rempe.pdf>.

St-Pierre, R. (2019, mai). *Tendances du marché du travail au Québec : de l'abondance à la rareté de main-d'œuvre*. Conférence présentée au 44^e congrès de l'Association des économistes québécois, Québec. Repéré sur le site de l'Association des économistes québécois à : <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/b2/81/29mai-a1-2-st-pierre.pdf>.

Autres documents

Cloutier, J.-C. (2018). « Des technologies perturbatrices – Éclairages provenant du Congrès de l'Association des économistes québécois ». Dans Joanis, M. et Montmarquette, C. (dir.), *Le Québec économique 7 – Éducation et capital humain*, Québec, Les Presses de l'Université Laval, p. 65-90.

Collier, P. (2019). *Exodus : immigration et multiculturalisme au XXI^e siècle*. Paris, L'Artilleur.

Comité consultatif des personnes immigrantes et INRS. (2018). Portrait de l'intégration en emploi de personnes immigrantes au Québec : expériences et points de vue croisés sur les obstacles systémiques, les éléments facilitants et les ressources, Montréal. Repéré à : <http://ccpi-quebec.ca/wp-content/uploads/2019/01/rapport-ccpi-version-imprimerie.pdf>.

Conseil du patronat du Québec. (2015). L'immigration économique, un riche potentiel de prospérité pour le Québec : étude sur la prospérité n° 3. Repéré à : <https://www.cpq.qc.ca/workspace/uploads/files/etude3prosperte021215.pdf>.

El-Assal, K., Fields, D., Homsy, M., Savard, S. et Scarfone, S. (2019). Seuils d'immigration au Québec : analyse des incidences démographiques et économiques. Montréal, Institut du Québec. Repéré à : https://www.institutduquebec.ca/docs/default-source/default-document-library/201905-immigration_vf.pdf?sfvrsn=0.

La presse canadienne Record de postes vacants dans le secteur privé, Le Devoir. (2019b, 13 juin).

Ministère de l'Immigration, de la Diversité et de l'Inclusion. (2019). Recueil de statistiques sur l'immigration au Québec. Repéré à : http://www.midi.gouv.qc.ca/publications/fr/planification/BRO_RecueilStat_PlanificationImmigration.pdf.

Oreopoulos, P. (2011, novembre). Why do skilled immigrants struggle in the labor market? A field experiment with thirteen thousand resumes. *American Economic Journal: Economic Policy*, 3, 148-171.

Notes

1. Les présentations au congrès sont disponibles et mises en références mais, elles ne seront pas citées dans le texte.
2. Le Programme de mobilité internationale (PMI) permet à l'employeur d'embaucher un travailleur étranger temporaire sans obtenir une étude d'impact sur le marché du travail.
3. Voir le tableau 43-10-0013-01 de Statistique Canada.
4. Dans le cadre de cette enquête réalisée par le secrétariat de l'OCDE à la demande du gouvernement du Québec, quelque 300 entreprises québécoises ont été consultées.
5. Soit 59,1 % à Montréal (644 680), 13,5 % en Montérégie (147 110) et 10,7 % à Laval (116 935). (MIDI, 2019, p. 33).
6. Selon l'université où ils ont été obtenus, certains diplômés peuvent être perçus comme reflétant une scolarité de moindre valeur.

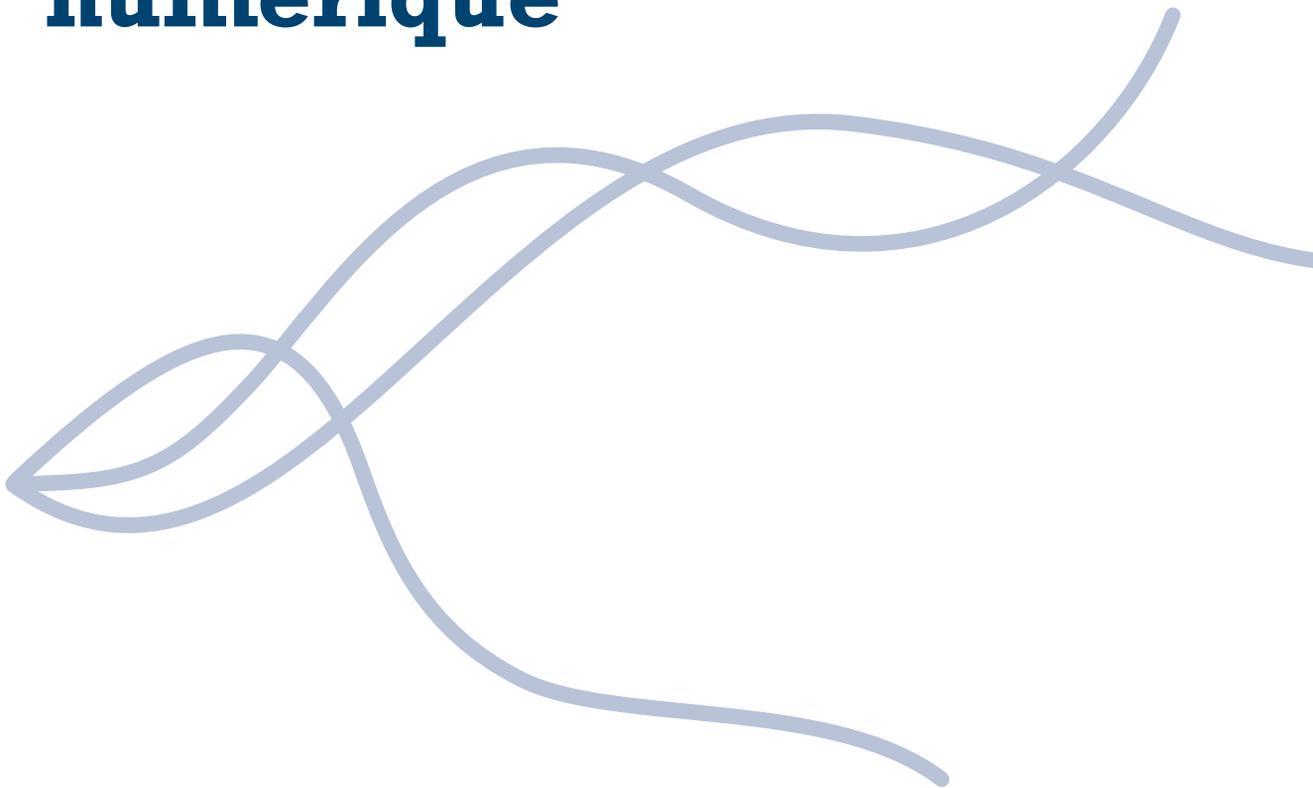
PARTIE

**Transformation
numérique
et politiques
publiques
innovantes**



Section 2.1

La transformation numérique



Chapitre 3

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : UN PUISSANT LEVIER DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE POUR LE QUÉBEC

Ben Hadj

Analyste-conseil en innovation à la Direction de la valorisation et du capital d'investissement du ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec

Résumé

L'intelligence artificielle (IA) désigne la capacité des machines et des systèmes d'acquérir et de mettre en pratique des connaissances et d'adopter des comportements « intelligents ». Depuis quelques années, aussi bien les industriels que les gouvernements ont un intérêt marqué pour les technologies d'IA. Propulsées par la disponibilité accrue de la puissance de calcul, une connectivité améliorée et les données massives, elles offrent de fascinantes possibilités de promouvoir la croissance économique et de s'attaquer de façon positive à un large éventail de problèmes sociaux. Ce chapitre vise à décrire la démarche du gouvernement du Québec qui, de concert avec le gouvernement fédéral, appuie la création d'un pôle mondial en IA et œuvre à faire de celui-ci un vecteur de développement économique. Il aborde également les enjeux stratégiques qui pourraient être amplifiés par le développement rapide de l'IA, ainsi que les nouveaux défis que pourrait engendrer l'utilisation de ces technologies.

Introduction

L'IA constitue l'un des bouleversements majeurs qui marquent notre époque. Même s'il n'existe pas de définition univoque de l'IA, le présent chapitre se base sur celle de Nils J. Nilsson (2010) : « L'intelligence artificielle est l'activité consacrée à rendre les machines intelligentes; l'intelligence étant cette qualité qui permet à une entité d'agir de manière appropriée et avisée dans son environnement. » Cette définition est conforme à celle retenue dans les travaux de l'OCDE sur ce sujet.

Rarement une évolution technologique aura suscité autant de possibilités d'innovation, de résolution de problèmes et de changements dans les usages. Cette tendance est particulièrement nette dans les économies les plus développées, qui reconnaissent le caractère révolutionnaire de l'IA et qui ont adopté, au cours des dernières années, des stratégies nationales dans cette discipline ou publié des documents d'orientation pour guider l'élaboration de politiques futures.

Le gouvernement américain a présenté une stratégie en matière d'IA en 2016, avant d'adopter en février 2019 un ordre exécutif (l'« *American AI initiative* ») demandant aux agences gouvernementales de consacrer plus de ressources à la recherche et à la promotion de l'IA. Avec son « plan de développement de l'IA de nouvelle génération », la Chine ambitionne de devenir un acteur mondial de premier plan dans ce domaine d'ici 2030; elle procède actuellement à des investissements massifs dans la recherche et l'industrialisation des technologies de l'IA. D'autres pays tels que le Japon, le Royaume-Uni et la Finlande ont également conçu leurs propres stratégies (ESPC, 2018). Le gouvernement du Canada a déployé, en mars 2017, la Stratégie pancanadienne en matière d'intelligence artificielle, dont le financement est de 125 millions de dollars sur cinq ans (Dutton, Barron et Boscovic, 2018).

Au Québec, les investissements publics et privés en IA ont connu une forte expansion au cours des dernières années, notamment grâce à l'excellence de la recherche universitaire sur l'apprentissage automatique et les méthodes d'apprentissage profond comme les réseaux de neurones artificiels. Cette dynamique favorable a concouru à l'arrivée dans la

province d'entreprises internationales de haute technologie, à la prolifération de jeunes entreprises québécoises en IA et à la création d'instituts de recherche de calibre international.

Le Québec peut se vanter d'avoir un écosystème en IA de calibre mondial, et il est important de s'appuyer sur cette réussite afin de s'assurer que le niveau d'investissement à long terme sera suffisant pour maintenir l'avantage concurrentiel de la province dans l'avenir, pour accélérer l'adoption des technologies d'IA dans tous les secteurs de l'économie (que les entités concernées relèvent du secteur privé ou public), et pour créer des avantages économiques et sociaux tangibles et durables pour l'ensemble des Québécois.

Afin d'apporter un éclairage plus systémique sur certaines questions liées au développement de l'IA au Québec, ce chapitre est divisé en trois parties. La première propose une description synthétique des différentes composantes de l'écosystème en IA et des moyens d'action déployés par les gouvernements du Québec et du Canada pour appuyer la création d'un pôle mondial en IA au Québec. La deuxième partie présente les avantages potentiels liés à l'utilisation de l'IA dans un contexte de transformation numérique de l'économie du Québec. La troisième partie discute de certains enjeux importants posés par le développement de l'IA.

L'écosystème de l'IA au Québec

Les acteurs de l'écosystème québécois de l'IA

Au Québec, un pôle d'expertise de calibre mondial en IA s'est développé dans la grande région de Montréal afin de soutenir la recherche universitaire dans cette discipline, de renforcer la collaboration entre les acteurs du milieu, d'accélérer l'adoption de l'IA par les entreprises et de faire progresser ses applications industrielles, qui sont à l'origine de technologies transformatrices dans tous les secteurs de l'économie. Le développement rapide de l'IA au Québec a aussi été facilité par l'émergence de deux pôles de recherche, un à l'Université de Sherbrooke, en sciences quantiques, et l'autre à l'Université Laval, avec la création d'un observatoire sur les enjeux éthiques et sociétaux de l'IA et du numérique. Le pôle d'expertise en sciences quantiques vise à soutenir la recherche en physique quantique et à

faire progresser ses applications en nanoélectronique, en optoélectronique, en informatique quantique ou encore en IA (calcul de haute performance et techniques d'apprentissage automatique). Il s'est développé grâce à une synergie efficace entre différents acteurs comme l'Institut quantique (IQ) et l'Institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT), tous les deux de l'Université de Sherbrooke.

L'écosystème actuel de l'IA au Québec est composé d'une multitude d'acteurs dont l'Institut des algorithmes d'apprentissage de Montréal (MILA), l'Institut de valorisation des données de Montréal (IVADO), l'IQ, la supergrappe des chaînes d'approvisionnement axées sur l'IA SCALE AI, ainsi que des incubateurs d'entreprises, des investisseurs en capital de risque (par exemple Real Ventures, Good AI Capital, Fonds CDPQ-IA, etc.) et une masse critique de grandes et de petites entreprises spécialisées. L'ensemble de ces éléments contribue à créer un environnement favorable au développement et au déploiement de nouvelles technologies basées sur l'IA au Québec.

La recherche, noyau fort de l'écosystème de l'IA au Québec

La R-D constitue le fondement de la réussite dans le domaine de l'IA et, à cet égard, Montréal est reconnue à l'échelle internationale comme un chef de file de la recherche et des talents dans cette discipline, avec plus de 300 chercheurs à l'Université de Montréal et à l'Université McGill seulement (MILA, 2019). L'une des caractéristiques de l'écosystème montréalais en IA est l'implication importante du milieu de la recherche dans la production de solutions d'IA appliquées à l'industrie. Ce modèle est également caractérisé par le fait que le personnel compétent demeure au sein de centres de recherche universitaires en IA. Cela permet à un plus grand nombre de joueurs, notamment les jeunes entreprises ou les entreprises en démarrage, de bénéficier des résultats de la recherche, puisque les chercheurs demeurent rattachés à leurs universités et peuvent transférer leurs connaissances à l'industrie grâce à des institutions de transfert technologique établies.

Montréal abrite actuellement 11 établissements universitaires et plusieurs centres de recherche dans le domaine de l'IA, dont IVADO, qui regroupe plus de 1 100 scientifiques affiliés et est un acteur de premier plan en matière de transfert technologique, et le MILA, l'un des plus grands

laboratoires publics d'apprentissage profond au monde. D'autres centres de recherche universitaires en IA, tels que le Centre for Intelligent Machines (CIM), le Centre de recherche informatique de Montréal (CRIM), le Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), le Groupe d'étude et de recherche en analyse des décisions (GERAD), le Groupe de recherche en apprentissage automatique de l'Université Laval (GRAAL) et le *Reasoning and Learning Lab* de l'Université McGill (RLLAB), sont présents sur à Montréal et à Québec.

Point de convergence de l'IA à Montréal, IVADO est né d'une initiative universitaire qui regroupe HEC Montréal, Polytechnique Montréal et l'Université de Montréal. L'organisme, qui collabore avec une centaine de partenaires industriels, universitaires et gouvernementaux ayant contribué à son financement, a pour vocation de développer une expertise de pointe au Québec dans les domaines de la science des données, de l'optimisation (recherche opérationnelle) et de l'IA. Par ses activités, IVADO vise à soutenir le développement d'une filière économique autour de l'exploitation des données massives pour la prise de décision, à faciliter la communication et le partage des travaux de recherche, à favoriser le développement de partenariats de recherche en IA et à agrandir le bassin d'étudiants formés en science des données, et ce, en vue de combler les besoins croissants de main-d'œuvre au Québec. Force est de constater, aujourd'hui, qu'IVADO a réussi, d'une part, à bâtir un pont entre les diverses expertises universitaires et les besoins des entreprises et, d'autre part, à propulser Montréal au rang de chef de file mondial en matière de recherche en IA et d'exploitation des données massives.

Dans le domaine particulier de la recherche de pointe en science des données, Montréal est considérée comme un important pôle d'expertise, grâce notamment à la Chaire d'excellence en recherche du Canada sur la science des données pour la prise de décision en temps réel de Polytechnique Montréal, dont le titulaire est le professeur Andrea Lodi. Il s'agit indéniablement d'atouts qui devraient renforcer la position d'excellence de la métropole et accroître son rayonnement tant au Canada qu'à l'étranger.

En ce qui a trait à l'offre de talents de haut niveau, les 11 établissements universitaires de la métropole forment à l'heure actuelle plus de 11 000 étudiants dans des disciplines nécessaires à l'IA, notamment l'informatique, les mathématiques et les sciences des données

(Investissement Québec, 2019). Ces étudiants pourraient potentiellement grossir les rangs de la main-d'œuvre d'un environnement de travail caractérisé par l'IA.

Une masse critique de grandes et de jeunes entreprises émergentes en IA au Québec

Au cours des deux dernières années, l'écosystème de l'IA au Québec a connu une forte croissance. En particulier, le nombre de jeunes entreprises en IA a augmenté considérablement. Actuellement, plus de 90 entreprises de ce domaine – Element AI, Algolux, Aifred Health, Giro, Imagia, Irosoft, Stradigi AI et plusieurs autres – sont implantées dans la région métropolitaine de Montréal. Ainsi, la métropole est la troisième ville à l'échelle canadienne pour ce qui est des jeunes pousses et des PME offrant de l'IA.

Montréal se distingue aussi par la forte présence de grandes entreprises qui figurent dans le peloton de tête mondial en matière de recherche en IA, et qui ont réussi à créer des produits et des services basés sur les avancées de cette science. Depuis 2017, de nombreuses entreprises multinationales ont mis sur pied de nouveaux laboratoires de recherche appliquée en IA à Montréal, parmi lesquelles Google (qui a créé Google Brain à Montréal en novembre 2016), Facebook (FAIR), Microsoft Research (qui a fait l'acquisition de Maluuba en janvier 2017), IBM (qui a ouvert un laboratoire de recherche en IA en avril 2017 afin de resserrer ses liens de collaboration avec le MILA) et Huawei. Au nombre des raisons énoncées pour l'établissement ou l'implantation de leurs centres de recherche au Québec, ces entreprises mentionnent la présence de centres de recherche de calibre mondial et la disponibilité de talents de haut niveau en IA.

La capacité d'attraction de Montréal repose également sur la création, en 2018, de la supergrappe des chaînes d'approvisionnement axées sur l'IA Scale AI, grâce à des fonds fédéraux et québécois. SCALE AI est basée à Montréal et dispose d'un bureau à Waterloo, en Ontario. Un laboratoire privé y est associé, IVADO Labs, qui accompagne les entreprises engagées dans la réalisation de projets dans le cadre de cette supergrappe. Impliquant les secteurs de la fabrication, du transport, du commerce de détail, des infrastructures et des technologies de l'information et de la communication (TIC), ce consortium d'innovation dirigé par l'industrie regroupe plus de 80 entreprises canadiennes, 26 associations professionnelles, IVADO

(l'institut lui-même) et 12 établissements de recherche de haut niveau. La majorité des participants et des collaborateurs sont basés dans les pôles technologiques du Québec et de l'Ontario. Les principaux objectifs de SCALE AI sont de promouvoir l'avantage compétitif du Canada dans le domaine de l'IA appliquée à l'industrie et d'accélérer le transfert des technologies d'IA aux divers maillons des chaînes d'approvisionnement (SCALE AI, 2017).

Une communauté florissante d'incubateurs et d'accélérateurs d'entreprises en IA

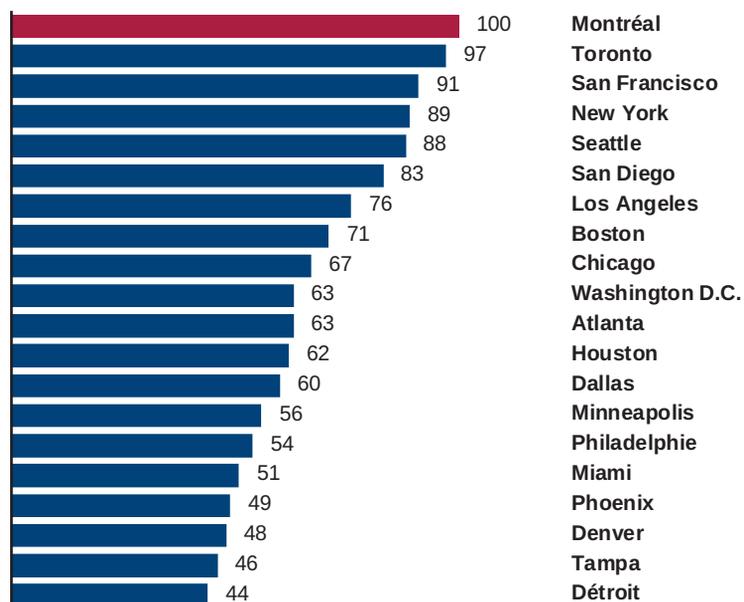
Le Québec se positionne favorablement pour ce qui est des outils d'accompagnement offerts aux entreprises innovantes en démarrage, tels que les incubateurs, les accélérateurs d'entreprises et les centres d'entrepreneuriat universitaire (CEU)¹. Une dizaine d'incubateurs pouvant appuyer le démarrage d'entreprises technologiques, notamment dans le domaine de l'IA, y ont élu domicile. C'est, par exemple, la maison Notman qui a incubé Element AI en 2016. Plusieurs de ces incubateurs sont affiliés à des universités alors que d'autres sont soutenus par des fonds gouvernementaux (par exemple AG-Bio Centre, le Centre d'entreprises et d'innovation de Montréal [CEIM], le Centre québécois d'innovation en biotechnologie [CQIB], Inno-centre, Centech). Le ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec (MEI) participe aussi au financement de deux initiatives de HEC Montréal visant à bonifier l'offre dans ce domaine, soit le Creative Destruction Lab (CDL) de Montréal et l'accélérateur Next AI.

De plus en plus présents au Québec, ces organismes constituent des outils très efficaces pour soutenir l'émergence de jeunes pousses en IA. Les services de soutien proposés par ces structures d'accompagnement à la création et au développement d'entreprises incluent des formations et des ateliers, des offres de mentorat, un accès au financement ainsi qu'à des équipements et à des infrastructures particuliers, de même que la mise à disposition d'un espace de travail. Ces offres sont généralement complétées par des occasions de réseautage en fonction des besoins des entreprises accompagnées.

De ce qui précède, il ressort clairement que le Québec est un endroit propice aux investissements et à l'innovation en IA. Ce constat est également soutenu par les résultats d'une étude menée en 2019 par fDi Benchmark du *Financial Times*, qui mesure la compétitivité de 20 villes

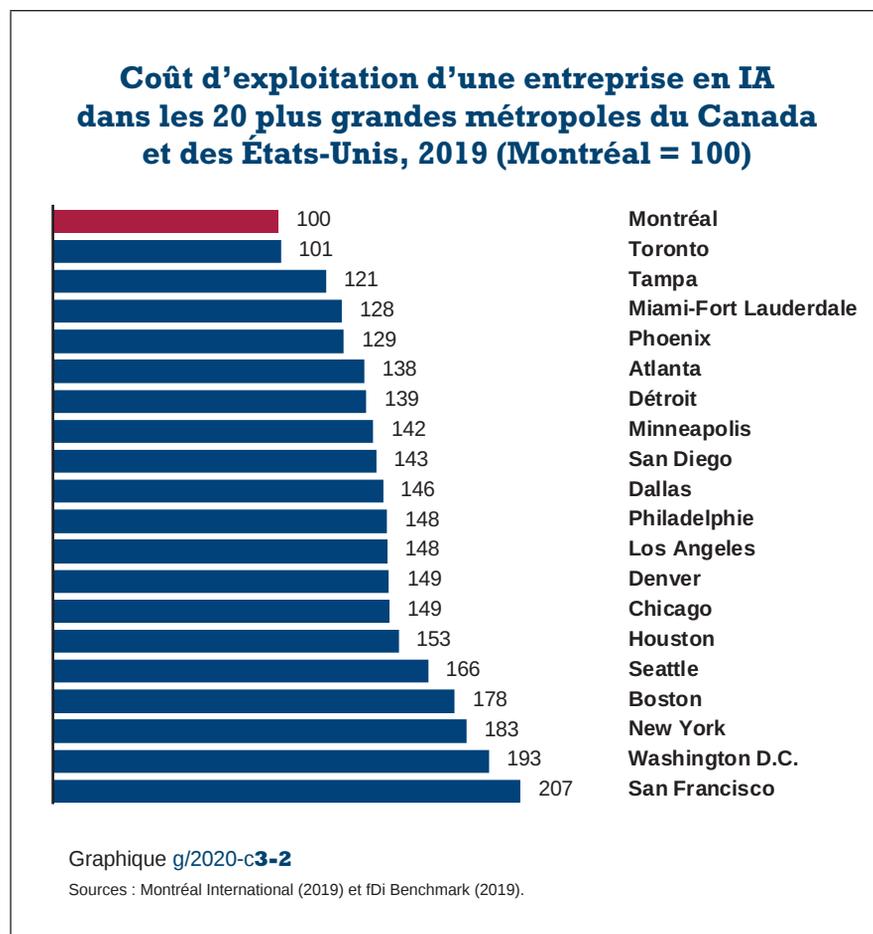
nord-américaines pour des projets d'investissement en IA, selon cinq critères (voir les graphiques 3-1 et 3-2). Les résultats de cette analyse comparative indiquent que Montréal se classe au premier rang parmi les 20 plus grandes métropoles du Canada et des États-Unis pour la qualité et la compétitivité de son secteur de l'IA. Globalement, la métropole québécoise affiche un avantage concurrentiel de plus de 47 % par rapport à la moyenne des 20 villes comparées. De plus, en ce qui a trait au coût d'exploitation d'une entreprise en IA, Montréal se trouve également au premier rang, affichant des coûts d'entreprise de 32 % inférieurs à la moyenne des coûts dans les villes comparées (fDi Benchmark, 2019 ; Montréal International, 2019).

Indice de qualité du secteur de l'IA dans les 20 plus grandes métropoles du Canada et des États-Unis, 2019 (Montréal = 100)



Graphique g/2020-c3-1

Sources : Montréal International (2019) et fDi Benchmark (2019).



Des investissements publics et en capital de risque dans le secteur de l'IA au Québec

Les investissements du Québec pour appuyer la création d'un pôle mondial en IA

Dans le cadre de ses efforts visant à faire de la province un pôle de recherche mondial dans le domaine de l'IA, le gouvernement du Québec a annoncé en mars 2017 un investissement de 100 millions de dollars sur cinq ans pour la création de la grappe québécoise en IA (Ministère des Finances

du Québec [MFQ], 2017). Au même moment, le MEI a confié à l'Université de Montréal, en collaboration avec les acteurs du milieu, la responsabilité de mettre sur pied un comité d'orientation chargé d'élaborer la stratégie de développement d'une grappe en IA de 2018 à 2022.

Un an plus tard, soit en mai 2018, ledit comité d'orientation a présenté au MEI les résultats de ses travaux et de ses réflexions ainsi que des recommandations dans le cadre du mandat qui lui avait été confié (Comité d'orientation de la grappe en intelligence artificielle, 2018). La stratégie exposée dans le rapport intitulé *Stratégie pour l'essor de l'écosystème québécois en intelligence artificielle* s'articule autour de cinq grandes orientations liées à la pérennité d'un pôle de recherche universitaire en IA au Québec, au développement des talents en sciences numériques, à l'accélération de l'adoption de ces technologies dans l'ensemble de l'économie québécoise, à la création d'un pôle d'expertise international en IA responsable, et au développement de structures de soutien robustes à l'écosystème de l'IA au Québec (par exemple pour augmenter la puissance de calcul de pointe mise à la disposition des chercheurs en IA).

Dans ce contexte, le gouvernement du Québec a multiplié les actions pour répondre aux besoins grandissants de l'écosystème de l'IA et pour donner suite, en bonne partie, aux recommandations du comité d'orientation. Les mesures prises comprennent entre autres les actions suivantes :

- Mars 2017 : Annonce d'un investissement de 100 millions de dollars sur cinq ans pour la création d'une grappe québécoise en IA (MFQ, 2017) ;
- Juillet 2017 : Adoption d'une nouvelle structure autonome par le MILA, qui s'incorpore pour devenir un organisme à but non lucratif (OBNL), le MILA – Institut québécois d'intelligence artificielle. L'organisme est appelé à doubler ses effectifs et déménage dans de nouveaux locaux en janvier 2019 ;
- Novembre 2017 : Tenue du Forum sur le développement socialement responsable de l'IA à Montréal et lancement de la version préliminaire de la Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'IA ;
- Mars 2018 : Octroi d'un financement de 60 millions de dollars sur trois ans pour soutenir les activités de la supergrappe des chaînes d'approvisionnement axées sur l'IA SCALE AI (MFQ, 2018). Située à Montréal

et exerçant ses activités dans le corridor Québec-Windsor, SCALE AI mobilise à ce jour 118 partenaires (industriels, organismes d'intermédiation et établissements de recherche de calibre mondial) ;

- Mars 2018 : Allocation d'une aide financière de 5 millions de dollars à Montréal International pour faciliter la mise en place d'une nouvelle organisation internationale en IA, et ce, en collaboration avec les acteurs clés du milieu (MFQ, 2018). L'organisation aura en outre pour mandat de rassembler les acteurs internationaux en IA qui en deviendront membres, apportant ainsi une valeur ajoutée à l'écosystème montréalais ;
- Décembre 2018 : Lancement de l'Observatoire international sur les impacts sociétaux de l'IA et du numérique (OBVIA). Cet organisme, dont le mandat est d'assurer une vigie et un rôle-conseil sur la question des impacts sociétaux de l'IA, est soutenu financièrement par les Fonds de recherche du Québec (FRQ) en partenariat avec le MEI. Il recevra 1,5 million de dollars par année pendant cinq ans, pour une enveloppe globale de 7,5 millions de dollars ;
- Mars 2019 : Le gouvernement annonce un vaste ensemble de mesures représentant 329,3 millions de dollars sur cinq ans afin de soutenir la recherche et le transfert de connaissances en IA à l'industrie (MFQ, 2019a) ;
- Juin 2019 : Le Forum IA.Québec voit le jour avec la fin des travaux du comité d'orientation de la grappe en IA. L'objectif de cet OBNL est de fédérer et de rassembler l'ensemble des joueurs de l'écosystème québécois en IA ;
- Juillet 2019 : Le ministère du Travail, de l'Emploi et de la Solidarité sociale (MTESS) accorde au regroupement SCALE AI une aide financière de 23,4 millions de dollars sur cinq ans dans le but de soutenir le développement d'une main-d'œuvre québécoise qualifiée en IA.

En résumé, on peut conclure qu'au cours des trois dernières années, le soutien public québécois au secteur de l'IA a considérablement augmenté, ce qui a permis de renforcer la position du Québec comme acteur de premier plan à l'échelle canadienne et internationale. Au total, le gouvernement du Québec a investi plus de 500 millions de dollars dans le développement d'un écosystème de l'IA depuis 2017, sans compter les investissements (indirects) dans les infrastructures numériques² et les dépenses fiscales relatives aux crédits d'impôt à la R-D et à l'innovation.

Divers programmes d'aide fiscale s'ajoutent aux mesures publiques directes du gouvernement du Québec destinées au secteur de l'IA, comme les crédits d'impôt à la R-D, le crédit d'impôt pour le développement des affaires électroniques (CDAE) et les congés fiscaux pour les chercheurs, les experts et les professeurs étrangers ainsi que les chercheurs étrangers en stage postdoctoral à l'emploi d'une université québécoise ou d'un centre de recherche public. À titre indicatif, le CDAE, qui cible les activités innovantes à forte valeur ajoutée dans les domaines de la conception et du développement de systèmes informatiques et de logiciels liés aux affaires électroniques, a engendré une dépense fiscale de près de 416 millions de dollars en 2017 (MFQ, 2019b).

Le rôle du gouvernement fédéral

L'essor fulgurant et les progrès rapides de l'IA que l'on connaît actuellement au Québec prennent racine dans le milieu universitaire et tiennent en partie au soutien que l'Institut canadien de recherches avancées (CIFAR)³ a apporté en 2004 à la création, par le professeur Yoshua Bengio, du programme sur l'apprentissage automatique. Grâce au financement du CIFAR, le professeur Bengio a pu poursuivre ses travaux et a publié, en collaboration avec d'autres pionniers du secteur, des articles qui ont fait renaître l'intérêt pour ce domaine de recherche. Les technologies dérivées des avancées dans l'entraînement de réseaux profonds de neurones artificiels ont suscité un engouement autant du côté des organismes subventionnaires qu'au sein de l'industrie. Ces techniques sont à l'origine des progrès spectaculaires obtenus récemment dans le domaine de l'analyse des signaux audio et des images, par exemple.

Au cours des dernières années, le gouvernement fédéral a annoncé plusieurs initiatives importantes pour appuyer la croissance du secteur de l'IA au Québec. À l'automne 2016, le Fonds d'excellence en recherche Apogée Canada a ainsi octroyé une subvention de 93,6 millions de dollars sur sept ans pour soutenir les travaux de recherche d'IVADO dans les domaines de la science des données, de la recherche opérationnelle (l'optimisation) et de l'IA. Dans le cadre de la Stratégie pancanadienne sur l'IA, annoncée dans le budget fédéral de 2017, le MILA a également obtenu un financement de 44 millions de dollars (sur cinq ans) sur l'enveloppe totale de 125 millions allouée à cette stratégie. En 2018, la supergrappe des chaînes d'approvisionnement axées sur l'IA, soumise par le consortium

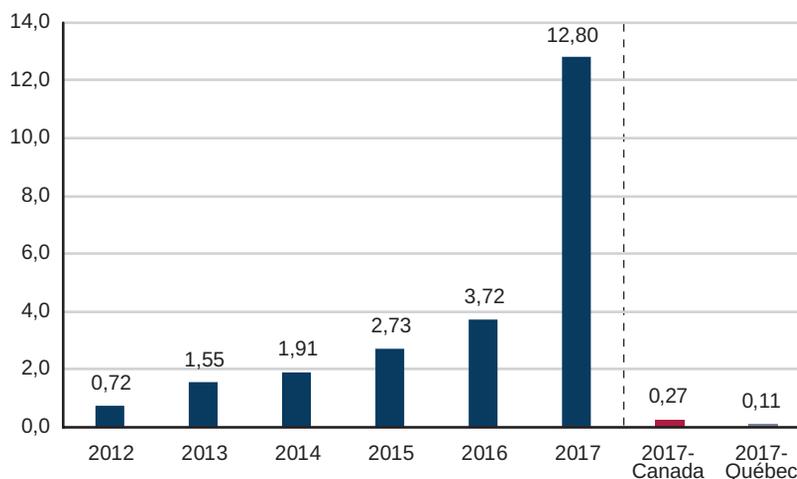
SCALE AI de Montréal, a été sélectionnée pour faire partie d'un groupe de cinq supergrappes financées par le gouvernement canadien et, à ce titre, elle s'est vu octroyer un financement de 230 millions de dollars sur cinq ans⁴. Ce financement supplémentaire est venu rehausser le total des investissements directs consacrés à l'écosystème de l'IA au Québec par les deux paliers de gouvernement à plus de 867 millions de dollars depuis 2017.

Des investissements en capital de risque

À l'échelle mondiale, les investissements en capital de risque dans des entreprises d'IA en démarrage ont connu un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 78 % entre 2012 et 2017 (voir le graphique 3-3). Le financement a plus que triplé entre 2016 et 2017, pour atteindre 12,8 milliards de dollars américains, ce qui reflète le développement rapide de l'IA et l'investissement sans cesse croissant qui y est apporté par les investisseurs du secteur privé.

En ce qui concerne l'investissement total de capital de risque au Canada, toujours dans le domaine de l'IA, on note une tendance à la hausse soutenue au cours des trois dernières années. À titre indicatif, en 2017, les investissements de capital de risque dans des entreprises spécialisées en IA s'élevaient à 270 millions de dollars américains au Canada (répartis sur 36 transactions) et à 110 millions au Québec (répartis sur 2 transactions). Le Québec demeure ainsi parmi les endroits qui investissent le plus en capital de risque en IA comparativement aux autres provinces canadiennes. Element AI – entreprise fondée à Montréal et chef de file mondial de la recherche appliquée en IA – a recueilli en 2017 un financement de 102 millions de dollars américains auprès d'investisseurs technologiques de grande envergure ; il s'agit du plus important fonds de série A pour une entreprise axée sur l'IA.

Investissements en capital de risque dans des entreprises d'IA en démarrage dans le monde, de 2012 à 2017



Graphique g/2020-c3-3

Sources : EPSC (2018) et CB Insights et PwC Canada (2018).

Le gouvernement du Québec s'assure d'une offre constante de capitaux de risque pour soutenir le démarrage et le développement des entreprises technologiques en IA. En mars 2017, par l'entremise d'Investissement Québec, il a engagé 15 millions de dollars dans la capitalisation du fonds RV Orbite Montréal consacré au financement d'entreprises technologiques aux stades d'amorçage et de démarrage. Les secteurs visés par le fonds comprennent notamment les technologies de l'information (TI), les technologies avancées et les technologies liées à l'IA telles que l'Internet des objets, les données massives, la robotique, la voiture connectée, la réalité virtuelle, la santé numérique, les technologies financières et les villes intelligentes. En outre, la Caisse de dépôt et placement du Québec (CDPQ) a annoncé, en mars 2019, un investissement de 250 millions de dollars pour la création d'un fonds de capital de risque destiné à soutenir les entreprises

québécoises spécialisées en IA. De fait, l'intensification des activités de financement par capital de risque ces dernières années montre bien la vigueur de l'écosystème de l'IA au Québec.

Le potentiel transformateur et les retombées incontestables de l'IA

L'IA est une technologie de portée transversale qui promet de grandes transformations pour les secteurs public et privé. Les avantages économiques et sociaux d'un secteur puissant de l'IA au Québec sont immenses (Conseil consultatif sur l'économie et l'innovation, 2017). Les technologies d'IA ont un impact majeur sur de nombreux domaines de l'économie numérique et ouvrent la voie à des solutions particulièrement prometteuses, notamment dans les domaines de la fabrication, de la santé, du transport et de la sécurité. Les multiples applications de l'IA pour optimiser les procédés industriels dans le secteur manufacturier permettront notamment d'accroître la productivité et d'offrir des produits à haute valeur ajoutée et de meilleure qualité.

Par ailleurs, les applications d'IA peuvent entraîner des avantages spectaculaires sur le plan social, plus précisément des progrès dans les soins de santé, l'éducation, l'environnement, la sécurité hydrique et alimentaire ainsi que la prévision des épidémies et des catastrophes naturelles. Elles peuvent aussi aider à réduire la fracture numérique et à créer une société plus inclusive grâce à la numérisation à grande échelle des activités humaines (OCDE, 2018).

Des effets transformateurs à l'échelle de l'entreprise et des secteurs

L'IA ouvre de nouvelles avenues aux entreprises et aux gestionnaires. D'une manière générale, les applications de l'IA permettent aux entreprises de rendre leurs infrastructures intelligentes pour récolter des données et prendre de meilleures décisions, de renforcer le niveau de sécurité de leurs terminaux, d'améliorer l'expérience de leurs clients grâce à des interactions et des produits plus pertinents et personnalisés, de créer de nouveaux modèles d'affaires pour perfectionner leurs structures de coûts et de revenu, et de recruter les talents clés dont elles ont besoin pour croître

et prospérer. L'IA peut ainsi permettre aux entreprises de devenir plus profitables, plus flexibles, moins hiérarchiques et plus souples, en modifiant notamment la nature du travail et des relations entre l'humain et la machine et en augmentant l'autonomie des équipes, la polyvalence, l'organisation horizontale et les pratiques innovantes et participatives.

En revanche, la réussite de l'intégration de l'IA au cœur du système d'information de l'entreprise nécessite toujours d'investir dans les infrastructures numériques, le recrutement de ressources spécialisées en TIC ainsi que la récolte et l'agrégation des données d'apprentissage nécessaires à l'entraînement des algorithmes d'IA. La collecte et la préparation des données sont des étapes clés de tout projet d'IA, car ce sont elles qui vont alimenter les algorithmes et permettre au système de fournir un résultat.

Voyons maintenant en quoi les nouvelles technologies d'IA remettent en cause les systèmes de production actuels dans plusieurs secteurs, par exemple ceux de la santé, des transports, de la fabrication, de la finance et de la sécurité.

Le domaine de la santé

L'IA inspire de grandes avancées technologiques et ses effets se font ressentir dans plusieurs secteurs clés de l'économie québécoise, dont celui de la santé (Chambre de commerce du Montréal métropolitain, 2018). Les progrès de l'IA dans ce domaine devraient permettre d'analyser des quantités massives de données pour produire des diagnostics, déterminer les traitements adaptés, fournir des services de santé de manière préventive et mettre au point des outils d'assistance et d'aide à la décision en matière médicale⁵. La convergence entre la robotique et l'analyse des données conduira à des prises en charge de meilleure qualité, à des accompagnements plus poussés et à des opérations chirurgicales plus sûres. Les avancées en apprentissage automatique devraient également stimuler la découverte et le développement de nouveaux médicaments par l'exploration de données et de publications scientifiques (OCDE, 2018).

Le système de santé et de services sociaux du Québec absorbe actuellement près de 50 % des dépenses de programmes du gouvernement. Face au vieillissement de la population, à l'érosion du nombre de travailleurs d'expérience et à l'augmentation des coûts de la santé au Québec, l'intégration

des nouvelles technologies numériques pourrait permettre d'accroître l'efficacité et la soutenabilité des services et d'améliorer l'accès aux soins. Le créneau porteur de l'IA ouvre la voie à de nombreuses applications dans le domaine de la santé, notamment grâce à la mise en œuvre de moyens d'automatisation (par exemple la prédiction et l'optimisation des flux de patients et de matériel, les outils de gestion des effectifs, la simplification du parcours des patients et les dossiers de santé électroniques connectés) et de la médecine à distance (par exemple les consultations à distance et le suivi des patients à distance).

La mise en application de l'IA dans les hôpitaux et dans les cliniques privées est l'un des sujets prioritaires depuis plusieurs années maintenant dans le secteur de la santé au Québec. Parmi les initiatives importantes visant à répondre à cette priorité, on peut citer les activités du Bureau de l'innovation en santé et en services sociaux et la création de l'École de l'IA en santé du Centre hospitalier de l'Université de Montréal, qui a eu lieu en novembre 2018, ainsi que le programme de prêts participatifs BioMed Propulsion, qui fournit du soutien financier aux entreprises du secteur des sciences de la vie, notamment pour des projets d'IA en technologies médicales.

Les transports et la logistique

L'intégration de l'IA a déjà un impact majeur sur les transports avec l'apparition de dispositifs de conduite autonome et de calcul d'itinéraires en fonction des données de circulation. Le développement des réseaux de neurones profonds est l'un des principaux facteurs qui ont favorisé les avancées réalisées sur le front des véhicules autonomes au cours des 10 dernières années, notamment grâce à la vision par ordinateur⁶. L'IA permet en outre d'améliorer l'efficacité des chaînes logistiques liées aux réseaux de transport ferroviaire et routier et aux activités portuaires, et d'optimiser l'utilisation des infrastructures existantes en examinant l'ensemble du transport de personnes et de marchandises de manière globale. Au Québec, le CIRRELT, affilié à IVADO, joue un rôle très actif dans le domaine de l'optimisation des réseaux logistiques et des réseaux de transport basée sur l'IA.

Les services financiers

Pour répondre aux nouvelles attentes de la clientèle, les institutions financières se sont tournées vers la numérisation de leurs activités dans le but d'améliorer leur efficacité opérationnelle, d'abaisser leurs coûts d'exploitation et d'optimiser les interactions avec leurs clients. Mais si cette tendance à la numérisation a progressé ces dernières années, le recours à l'IA s'avère désormais déterminant pour conserver leur avance en matière de performance et de relation client. Les applications de l'IA dans le domaine de la banque et de l'assurance sont multiples, comprenant notamment la gestion des centres de relation client, les analyses prédictives, les assistants personnels, les agents conversationnels (*chatbots*), les systèmes experts de détection des fraudes et les modèles de notation de crédit basés sur l'IA. L'emploi de ces outils d'IA concerne en effet des applications diverses et recouvre une grande variété de fonctions (efficacité opérationnelle, relation client, développement commercial, etc.).

Au Québec, le secteur financier et bancaire pourrait constituer l'un des plus propices à une application rapide de l'IA. Les entreprises qui se spécialisent dans les services financiers (paiement, assurances, investissement, etc.) sont bien placées pour tirer profit des occasions offertes par le développement de l'IA, entre autres grâce à l'exploitation des données de leurs propres clients et à leurs atouts technologiques (maîtrise de l'IA, infrastructures en TIC de pointe, personnalisation des offres, etc.). Le secteur financier québécois emploie près de 150 000 personnes dans plus de 7 150 entreprises. L'industrie représente à elle seule plus de 6 % du PIB de la province (Finance Montréal, 2019). Le Québec et la grande région de Montréal sont reconnus mondialement comme un pôle d'excellence en finance.

La sécurité

En matière de cybersécurité, les technologies d'IA peuvent améliorer les renseignements et les prévisions sur les cybermenaces et renforcer la protection. Elles peuvent également accélérer la détection des attaques et les délais de réponse, tout en réduisant le besoin d'experts humains en cybersécurité. L'IA se révèle particulièrement efficace contre les cyberattaques et l'usurpation d'identité par le biais de l'analyse des tendances et des anomalies. En mettant à profit l'IA et l'analytique avancée

pour traiter de grandes quantités de données internes et externes, les technologies de cybersécurité peuvent générer des perspectives prédictives et concrètes qui aideront les entreprises et les organisations à prendre de meilleures décisions liées à la cybersécurité et à protéger leurs actifs et leurs infrastructures contre les cyberattaques, dont la croissance est exponentielle et dont les répercussions sont de plus en plus coûteuses.

L'IA offre en outre une gamme étendue d'applications de sécurité ne se limitant pas à la cybersécurité. Elle constitue en effet un puissant outil d'identification pour les services de police, notamment, grâce à la reconnaissance faciale qui exploite d'importants réseaux de caméras de surveillance. Lors de catastrophes, l'IA pourrait permettre une optimisation de la planification et du déploiement des ressources par les organismes de secours, les agences internationales et les organisations non gouvernementales.

Le secteur manufacturier

L'IA fait partie des technologies sur lesquelles s'appuient l'industrie 4.0 (la transformation numérique des entreprises manufacturières), l'Internet des objets⁷, la fabrication additive (impression 3D) et la robotique. Elle constitue un facteur essentiel pour réussir la transformation numérique des entreprises manufacturières de toutes tailles qui font des investissements pour l'acquisition et l'intégration de nouvelles technologies numériques dans l'ensemble de leur chaîne de valeur.

L'accélération de l'innovation manufacturière due à l'IA, grâce à l'automatisation des processus, réduit les coûts et les délais de production des entreprises, leur permettant d'offrir des produits à haute valeur ajoutée et de meilleure qualité. Les applications sont multiples et comprennent notamment la robotique de pointe basée sur l'IA, l'optimisation du débit et de la qualité des chaînes de production, l'amélioration du processus de maintenance par le biais de la maintenance prédictive, le renforcement de la sécurité des employés grâce à la vidéo augmentée et aux équipements dédiés intelligents, la production manufacturière personnalisée (à la demande) ainsi qu'une meilleure gestion des relations avec les fournisseurs.

Au Québec, la part du PIB du secteur manufacturier dans l'économie était de 14 % en 2017 (STIQ, 2018), soit une valeur ajoutée de 46 milliards de dollars en dollars constants de 2007. Malgré le déclin qu'elle a connu au cours des 10 dernières années, l'industrie manufacturière demeure l'un

des secteurs qui produisent le plus de richesse au Québec. Les possibilités combinées de l'IA, de l'informatique en nuage, des communications mobiles, de l'Internet des objets et de l'informatique quantique pour l'analyse des mégadonnées pourraient entraîner une transformation sans pareille du secteur manufacturier québécois en favorisant la flexibilité et l'efficacité de sa production, et en permettant une analyse sans précédent à l'échelle des chaînes de valeur mondiales (CVM). En définitive, le secteur manufacturier québécois est bien positionné pour tirer profit des avancées technologiques de l'IA grâce, notamment, à une série d'initiatives en cours comme le Manufacturier innovant et le programme de développement du Réseau des centres d'expertise industrielle 4.0 (RCEI). On entend d'ailleurs parler, depuis quelques années, d'usines intelligentes, de machines et d'infrastructures connectées au nuage (*cloud*), ou encore d'« intégration homme-machine ». L'IA fait partie de ces technologies qui transforment déjà l'industrie manufacturière et vont encore la transformer à l'avenir.

Les retombées économiques attendues de l'IA

L'IA est une technologie générique qui promet d'accélérer la création de richesse, de diminuer les coûts, d'accroître la productivité des entreprises et d'effectuer une meilleure affectation des ressources dans tous les secteurs de l'économie. Elle devrait également stimuler la productivité de la science dans un contexte où le flux de nouvelles idées et d'innovations se tarit et où la productivité de la recherche scientifique continue à baisser dans diverses régions de l'OCDE (OCDE, 2018).

Au Québec, les méthodes d'optimisation traditionnelles ont atteint leur limite, comme le prouve le plateau de productivité auquel sont confrontées de nombreuses industries. En 2017, comparativement à l'Ontario, le Québec affichait un écart de productivité de l'ordre de 10 %. Celui-ci est encore plus marqué avec le voisin américain : un écart de presque 27 % (Deslauriers, Gagné et Paré, 2019b). Au regard de cet enjeu, il est clairement établi que l'innovation, le capital humain et les investissements des entreprises en machines et en équipements, et plus particulièrement l'acquisition et l'intégration des TIC, constituent des éléments clés de l'accroissement de la productivité au Québec.

Les multiples applications de l'IA dans le secteur manufacturier québécois peuvent aider les entreprises à optimiser les processus de conception des produits et à améliorer de manière significative l'efficacité de la chaîne de production et d'approvisionnement sur tous les plans. Dans un futur proche, l'automatisation industrielle liée aux techniques avancées de l'IA et à la robotique de pointe améliorera considérablement la performance des machines en usine et permettra de faire des gains de productivité là où l'intervention humaine sera réduite dans les tâches routinières et les travaux répétitifs nécessitant une faible qualification.

Une chose est sûre, les technologies liées à l'IA tiennent une place cruciale dans la croissance de l'industrie et de l'économie de façon plus générale. Les analyses du cabinet de conseil Accenture estiment que l'IA pourrait doubler les taux de croissance économique annuels et augmenter jusqu'à 40 % la productivité du travail dans les pays développés d'ici 2035, ce qui permettrait d'accroître de près de 38 % la rentabilité des entreprises (Purdy et Daugherty, 2016). Les gains pourraient également être importants dans le secteur public sur la même période : l'IA permettrait aux secteurs publics de 16 grands pays développés d'engranger 939 milliards de dollars américains en valeur supplémentaire, soit une augmentation d'environ 25 % de la productivité restituée aux contribuables (Accenture Conseils, 2018; Purdy et Daugherty, 2017). La firme internationale PwC pronostique une croissance de 15 000 milliards de dollars américains de la production économique mondiale jusqu'en 2030, attribuable à l'IA (CB Insights et PwC Canada, 2018). Les gains de productivité du travail devraient représenter plus de la moitié (55 %) de la totalité des bénéfices économiques générés par l'IA au cours de la période allant de 2016 à 2030.

Ces ordres de grandeur ne font toutefois pas l'unanimité et les retombées économiques de cette nouvelle industrie disruptive sont par nature difficilement prévisibles (Lomazzi, Lavoie-Moore, Gélinas et Hébert, 2019). Comme l'IA n'en est qu'à ses balbutiements, les données empiriques sur de telles retombées ne sont pas encore disponibles. Dans l'ensemble, d'après Aghion, Jones et Jones (2017), l'IA peut stimuler la croissance économique en remplaçant la main-d'œuvre, une ressource limitée, par du capital, une ressource non limitée, tant pour la production de biens et services que pour celle des idées. Pour les auteurs de l'étude, l'IA peut toutefois inhiber la croissance si elle est associée à une politique concurrentielle inadaptée qui limiterait l'accès et l'innovation en IA à certaines entreprises dominantes au sein de l'économie.

Les retombées économiques attendues de l'IA pour le Québec découlent principalement des bénéfices potentiels de la commercialisation de ses solutions, de la diffusion de ses technologies dans toutes les sphères de l'économie québécoise et de l'établissement à Montréal de grandes entreprises technologiques actives dans ce domaine comme Google, Facebook, Microsoft, IBM, Thales, Samsung, Ericsson, Fujitsu, etc.

Même si l'ampleur des retombées économiques de l'IA à l'échelle mondiale varie considérablement, il n'en demeure pas moins que les investissements publics et privés dans la recherche en IA et dans la création d'un écosystème dédié au sein de la province permettront de générer des résultats économiques significatifs pour le Québec par la création d'emplois locaux, de PIB, d'exportations et de recettes fiscales pour les gouvernements. La portion de ces retombées locales qui constituent des revenus pour les gouvernements est engrangée sous forme d'impôts, de taxes et de parafiscalité⁹, ces montants étant payés par les travailleurs salariés.

Les retombées économiques positives de l'IA sont récurrentes et pourraient croître au cours des années à venir, dans la mesure où la production axée sur l'IA augmente et où les innovations technologiques se poursuivent.

Enjeux et défis liés au développement de l'IA au Québec

Encourager les entreprises québécoises à repousser les limites de l'IA

L'un des principaux défis que le Québec doit relever afin de rendre son économie plus compétitive est d'assurer le recours aux technologies de l'IA dans l'ensemble de ses secteurs d'activité. En dépit d'une bonne disposition du gouvernement à l'égard du virage 4.0 et du transfert de connaissances en IA à l'industrie, les entreprises québécoises ont du mal à adopter les technologies de pointe qui pourraient considérablement améliorer leur productivité et leur compétitivité. Selon l'Enquête sur les technologies de pointe (ETP) effectuée par Statistique Canada pour la période allant de 2012 à 2014,

la proportion des entreprises de petite taille recourant aux technologies de pointe est relativement faible au Québec, à peine égale au tiers des entreprises de cette catégorie (Deslauriers, Gagné et Paré, 2019a).

Les constats sont sensiblement les mêmes pour les technologies basées sur l'IA. À l'heure actuelle, l'adoption de ces technologies est assez embryonnaire au Québec, et le niveau d'intégration des applications d'IA est plus élevé chez les grandes entreprises. Selon une enquête menée en 2018 par la firme Novipro, seulement 23 % des entreprises québécoises envisagent d'investir en IA au cours des prochaines années, comparativement à 66 % pour les entreprises américaines. Lorsque sondées sur la nature des obstacles qui les empêchent d'utiliser l'IA pour résoudre leurs enjeux, les entreprises québécoises invoquent souvent un manque de compréhension de ses avantages et de ses applications potentielles, une méfiance à l'égard de ses applications, une faiblesse des fournisseurs à sensibiliser et à démontrer la valeur de l'applicabilité de leurs offres, un manque d'expertise et l'absence d'une stratégie claire dans ce domaine, un accès insuffisant au soutien des gouvernements pour répondre véritablement à leurs besoins ainsi que des défis de mise en œuvre et des problèmes liés à la qualité et à la structuration des données requises pour entraîner ou actualiser les algorithmes et concevoir des applications performantes.

Pour faciliter l'adoption de l'IA par les entreprises du Québec, des canaux de transfert technologique devront être considérés afin d'assurer sa diffusion dans l'ensemble du tissu industriel. Par exemple, IVADO, le MILA et SCALE AI devront tous participer à ce transfert technologique auprès d'entreprises québécoises existantes. Il convient de mentionner, enfin, que le gouvernement du Québec a posé des gestes concrets au chapitre de l'intégration des technologies d'IA. Le plan budgétaire de mars 2019 du gouvernement provincial prévoit une somme totale de 65 millions de dollars sur cinq ans pour appuyer l'adoption de l'IA en entreprise et dans les organisations publiques.

Un bassin de talents qualifiés en IA

Dans les années à venir, la demande de talents en IA devrait poursuivre sa progression, puisque de plus en plus d'organisations se positionnent pour tirer profit du potentiel de cette science. De plus, l'utilisation croissante des applications d'IA dans pratiquement tous les secteurs de l'économie

est en train de changer la nature tendancielle des compétences requises par le marché du travail et les types d'emplois disponibles : émergence de nouveaux profils d'emplois, notamment dans le domaine du développement des algorithmes d'apprentissage automatique et d'autres innovations numériques, création d'emplois axés sur des tâches spécialisées, nouveaux modes d'organisation du travail, collaboration entre l'IA pointue et les humains, notion de responsabilité, etc. Pour assurer l'acceptabilité sociale de l'IA, il sera donc crucial de garantir aux travailleurs la possibilité de s'adapter et d'avoir accès à de nouvelles ouvertures et à une formation en conformité avec les besoins nouveaux qu'engendre l'IA sur le marché du travail.

À l'échelle du Québec, la demande de talents dans le numérique et en IA de la part des différentes organisations de l'écosystème montréalais est présentement en forte croissance. Bien que Montréal possède un riche bassin de talents dans le domaine de l'IA, la demande actuelle excède l'offre. Les grandes entreprises numériques présentes dans la ville, qui investissent considérablement dans le développement et l'utilisation de l'IA, tirent parti du bassin de talents disponibles et exercent, par le fait même, une forte pression sur la demande de main-d'œuvre qualifiée dans ce secteur. Il importe également de souligner que l'attraction et la rétention des talents en sciences numériques constituent une préoccupation majeure pour les jeunes entreprises en IA de la région métropolitaine de Montréal. Les données actuellement disponibles pour le Québec indiquent que plus de 250 000 travailleurs spécialisés sont issus du domaine des TIC, incluant le développement de logiciels, le multimédia, les services infonuagiques et l'IA (MFQ, 2018).

Dans son rapport intitulé *La prochaine vague de talents : naviguer le virage numérique. Perspectives 2021*, publié en 2017, le Conseil des technologies de l'information et des communications (CTIC) prévoit que d'ici 2021, environ 44 000 postes de travailleurs spécialisés en TIC seront à combler au Québec, et que le nombre total d'emplois en TIC s'élèvera à 336 200 (CTIC, 2017). Le CTIC identifie cinq technologies clés qui transformeront le secteur des TIC : la réalité virtuelle et augmentée, la technologie mobile 5G, l'impression 3D, les chaînes de blocs et l'IA. Sans surprise, l'étude révèle que la pression concurrentielle que subissent les employeurs pour trouver de nouveaux talents en TIC demeure extrêmement élevée au Québec.

Alors que les applications de l'IA commencent à se déployer au Québec, le recrutement et la rétention des talents nécessaires à la production et à l'intégration de l'IA dans les entreprises requièrent qu'un effort particulier soit fait pour accroître l'offre de formation initiale dans les domaines du numérique et de l'IA, et pour donner une plus grande importance aux STIM dans l'éducation secondaire et postsecondaire ainsi qu'au perfectionnement professionnel de la main-d'œuvre actuelle. Les programmes de formation de base offerts par les établissements d'enseignement ainsi que la formation continue et les formations visant le perfectionnement doivent être axés sur des exigences en mutation. Tous les acteurs du domaine de la formation doivent fournir des efforts conjoints pour assurer une transition équitable des travailleurs au fur et à mesure du déploiement de l'IA, notamment grâce à des programmes de formation pensés pour être suivis tout au long de la vie active, à du soutien aux personnes affectées par les suppressions de postes et à un accès facilité à de nouvelles possibilités sur le marché du travail.

La présence d'une main-d'œuvre qualifiée disponible à court et à long terme repose également sur des initiatives visant à encourager davantage de jeunes à opter pour des carrières dans le domaine de l'IA, à attirer des talents internationaux de premier plan et à aligner les politiques d'immigration sur les besoins de secteurs prometteurs où le Québec jouit d'atouts fondamentaux, comme le sont le numérique et l'IA.

Éthique et gouvernance en matière d'IA

Le débat international sur l'IA s'est fortement intensifié au cours des dernières années. Si les bénéfices sont réels et à portée de main, le développement rapide de cette nouvelle technologie suscite des craintes tout aussi importantes.

Les principaux risques posés par l'IA à court terme sont éthiques et portent particulièrement sur la responsabilité des décisions des algorithmes, la protection de la vie privée et des libertés et la transparence de la décision (non discriminatoire et à caractère explicable ; par exemple le risque de voir les algorithmes, et les données qui les alimentent, renforcer les inégalités et les préjugés existants, notamment en matière de race, de sexe et de catégorie sociale)⁹. L'IA et la robotisation posent d'importantes questions éthiques, tant au moment de la conception des systèmes numériques et

des algorithmes que lors de leur utilisation. L'accès à de grandes quantités de données, bien que primordial pour le développement et le rendement de l'IA, soulève aussi de nombreux enjeux relatifs à la protection des renseignements personnels, notamment sur les plans de l'éthique (consentement) et de la sécurité. À l'évidence, la sensibilité individuelle aux usages des données augmente, et nuit à la confiance en l'IA.

Au Québec, l'avènement d'une IA éthique et responsable dépend de la capacité des acteurs de l'écosystème à envisager les impacts sociaux potentiels de son développement, à en évaluer le degré d'acceptation par la société et à coconstruire, avec les citoyens, les conditions de l'émergence d'une IA désirable, responsable et transparente.

À cet égard, le gouvernement du Québec a appuyé plusieurs initiatives majeures pour accroître les connaissances et entamer une réflexion multidisciplinaire sur les enjeux éthiques et sociétaux liés aux progrès récents de l'IA. Parmi ces initiatives, soulignons l'organisation d'un forum sur le développement socialement responsable de l'IA à Montréal et le dévoilement de la Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'IA en décembre 2018. Ce manifeste propose un cadre éthique pour le développement et le déploiement de l'IA et vise à en favoriser l'accès universel. Le gouvernement du Québec a également financé la création de l'OBVIA, l'Observatoire international sur les impacts sociétaux de l'IA et du numérique. Cet organisme a pour mission principale de soutenir la recherche, la formation et la mobilisation des connaissances sur les répercussions et les défis posés par le développement de l'IA et du numérique dans toutes les sphères de la société.

Afin de poursuivre conjointement leurs efforts en matière de développement éthique et inclusif de l'IA, les gouvernements du Québec et du Canada ont annoncé en septembre 2019 la création à Montréal d'un centre d'expertise international pour l'avancement de l'IA dans le cadre du Partenariat mondial sur l'IA (PMIA)¹⁰. De plus, les deux paliers de gouvernement prévoient adopter prochainement un protocole d'entente qui permettra au Québec d'obtenir un rôle particulier à titre de partenaire essentiel dans le développement d'une IA utilisée de façon responsable au sein de l'équipe représentant le Canada auprès du PMIA (Ministère des Relations internationales et de la Francophonie). Pour le gouvernement du Québec, la création d'un centre d'expertise international pour l'avancement de l'IA à Montréal

constitue l'aboutissement d'une démarche structurée visant à doter la métropole d'un organisme international qui promeut le développement et l'utilisation d'une IA fondée sur l'éthique, la responsabilité et le bien collectif.

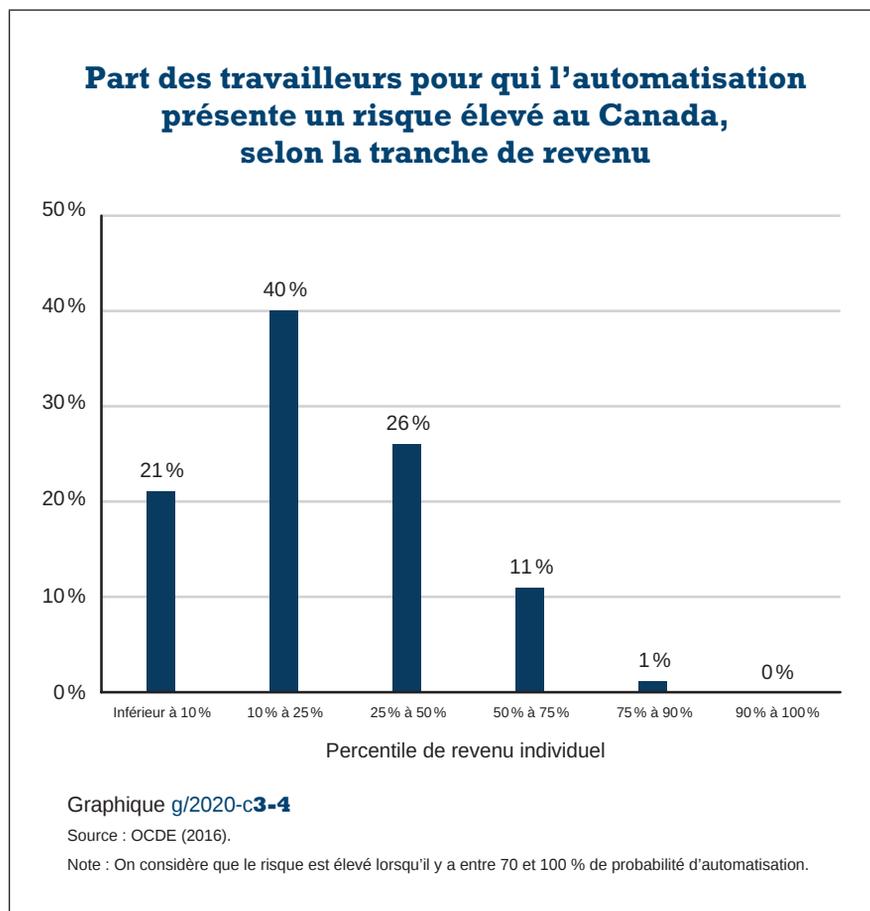
Somme toute, la place de l'éthique dans le débat sur l'IA a pris aujourd'hui une importance telle qu'il paraît nécessaire d'instaurer des mécanismes de gouvernance et de pilotage à même d'apporter des réponses aux préoccupations du public ainsi qu'aux risques inhérents à ces technologies. Les enjeux relatifs au partage de la gouvernance participative entre institutions publiques et privées, de même que les risques qui accompagnent ce partage, devront être abordés. Actuellement, la gouvernance et la réglementation des technologies émergentes, comme l'IA et l'apprentissage automatique, sont rudimentaires dans bien des pays de l'OCDE. En revanche, grâce à une série d'initiatives visant à surveiller et à atténuer les risques associés à l'IA, le Québec fait figure de précurseur en matière de recherche et d'innovation en IA et de réflexion sur les enjeux éthiques et sociétaux que celle-ci soulève (Dilhac, Abrassart et Voarino, 2018).

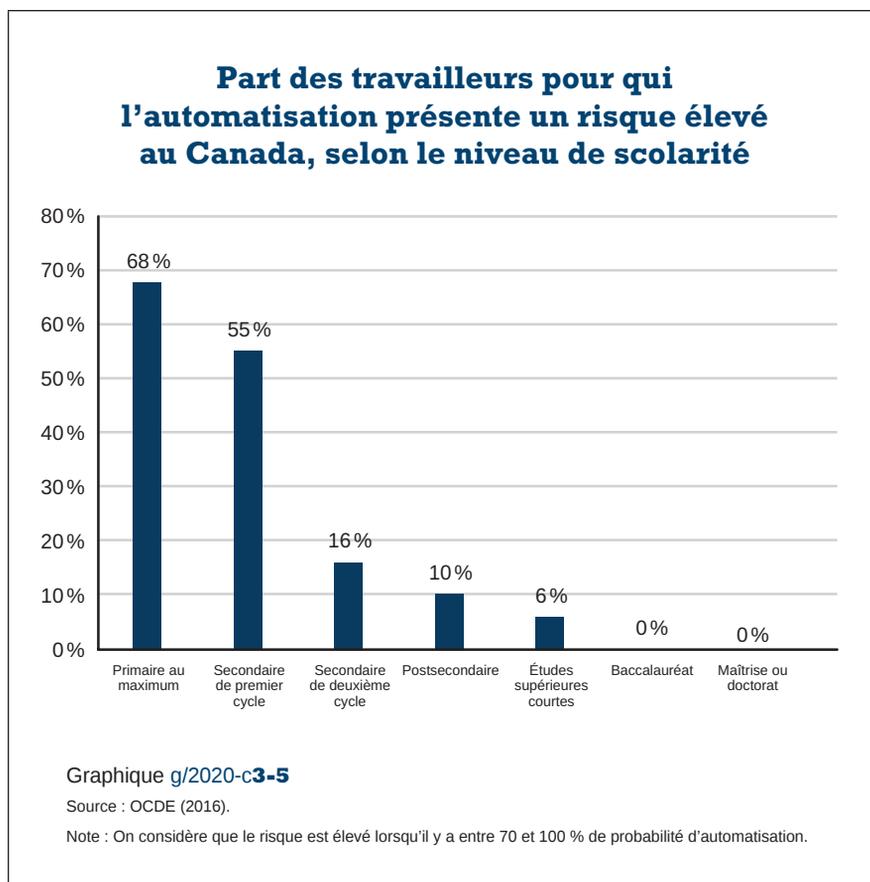
L'incidence de l'IA sur l'emploi

L'incidence de l'IA sur les emplois est une autre préoccupation actuelle. À mesure que la robotique, l'IA et la transformation numérique se diffusent dans le monde du travail, de nombreuses inquiétudes apparaissent quant aux conséquences de ces technologies sur la quantité d'emplois disponibles. Certains dressent même un tableau particulièrement sombre du futur, et considèrent que l'automatisation pourrait faire disparaître près de la moitié des emplois au cours des prochaines décennies (Frey et Osborne, 2017).

Selon une étude de l'OCDE (Arntz, Gregory et Zierahn, 2016), la prévision quant à la proportion d'emplois menacés par l'automatisation au Canada se situerait à 39 % ; en revanche, seulement 9 % des emplois considérés seraient exposés à un risque élevé d'automatisation (de 70 à 100 % de probabilité d'automatisation). Les graphiques 3-4 et 3-5 jettent davantage de lumière sur ces données et donnent un aperçu des emplois pour lesquels l'automatisation présente un risque élevé, en fonction du revenu et du niveau de scolarité. Comme on peut le constater, ce sont surtout les travailleurs peu instruits et à faible revenu qui seront confrontés

au risque de voir leurs emplois automatisés; les compétences de ces travailleurs seront soumises à une obsolescence plus rapide et ils vivront des changements d'emploi plus importants dans les secteurs de l'économie canadienne où ils œuvrent. Et, bien évidemment, le secteur manufacturier est particulièrement exposé.





Selon une étude réalisée par l'Institut C.D. Howe (Oschinski et Wyonch, 2017), environ 1,4 million des emplois au Québec seraient potentiellement automatisés ou pourraient être profondément transformés du fait d'une automatisation croissante, soit 34 % du total actuel. Les employés exposés à un risque d'automatisation de leurs tâches ou susceptibles de voir leur emploi transformé comprendraient les nouveaux chômeurs technologiques, les personnes occupant un emploi remanié (ou partiellement automatisé) ainsi que les personnes en situation de sous-emploi ou en quête de nouvelles formations.

En dépit de perspectives d'avenir incertaines, un chômage technologique de masse sous l'effet de la transformation numérique et de l'automatisation semble peu vraisemblable. De fait, selon les estimations récentes de l'OCDE (2019), 14 % des emplois actuels dans les pays membres risquent d'être entièrement automatisés au cours des 15 à 20 prochaines années, et 32 % supplémentaires pourraient être profondément transformés du fait de l'automatisation des tâches – ce qui est largement inférieur aux chiffres avancés par d'autres chercheurs, certains estimant que l'automatisation pourrait faire disparaître près de la moitié des emplois au cours des prochaines décennies (Frey et Osborne, 2017).

En ce qui concerne l'impact des robots sur l'emploi net, les constats sont mitigés. Acemoglu et Restrepo (2017) rendent compte d'effets négatifs : un robot supplémentaire par millier de travailleurs réduirait le taux d'emploi de 0,37 point de pourcentage aux États-Unis, soit une perte de 6,2 emplois par robot supplémentaire. Toutefois, Graetz et Michaels (2018) considèrent que l'automatisation n'a pas d'effet sur l'emploi de manière générale. Dans ce dernier cas, il appert que le rythme de la création d'emplois dépasserait celui de la disparition d'emplois attribuable à une utilisation accrue des robots industriels.

Le défi futur consiste probablement à continuer d'évaluer l'impact des nouvelles technologies sur la quantité et la qualité des emplois ainsi que sur l'inclusivité, et d'étudier les actions qui doivent être menées pour renforcer la résilience et la capacité d'adaptation du marché du travail.

Conclusion

Il ne fait aucun doute que les technologies d'IA seront d'ordre transformationnel. Des avancées spectaculaires seront réalisées dans un avenir proche, une richesse substantielle sera créée et bon nombre de nos structures sociales et institutionnelles seront transformées. Et bien que les avancées technologiques de l'IA et la montée en puissance du numérique suscitent des inquiétudes en ce qui a trait au remplacement des travailleurs et aux questions éthiques liées à l'adoption de ces technologies, le recours à l'IA s'avère désormais déterminant pour accélérer l'innovation et le développement économique et pour conserver l'avance des entreprises

en matière de performance et de relation client. L'IA pourrait également constituer un vecteur puissant de progrès sociétal et de création de valeur partagée.

Au cours des dernières années, l'IA a progressé à un rythme effréné au Québec et surtout à Montréal, atteignant un point où elle peut maintenant produire une véritable valeur commerciale. Les progrès accomplis dans les domaines de l'IA et de l'apprentissage automatique permettront aux entreprises québécoises d'exploiter des données, d'identifier des tendances et de prendre des décisions plus judicieuses pour accroître les capacités humaines. Ces fonctionnalités leur offriront de nouvelles sources de revenus ainsi que de nouvelles méthodes pour, d'une part, attirer et fidéliser leurs clients et, d'autre part, optimiser leur efficacité opérationnelle. Sur le plan macroéconomique, les multiples applications de l'IA permettront notamment d'accroître la productivité et d'accélérer la croissance des entreprises dans tous les secteurs de l'économie, mais ce sont surtout ceux de la santé, de la fabrication, des transports et de la finance qui devraient en bénéficier le plus (Chambre de commerce du Montréal métropolitain, 2018).

Aujourd'hui, le Québec est reconnu à l'échelle internationale comme un chef de file dans le domaine de l'IA, à la faveur d'un ensemble diversifié de centres de recherche spécialisés dans cette discipline et en science des données, d'un écosystème dynamique d'entreprises en démarrage, et d'un investissement croissant des grands acteurs internationaux du développement du domaine, comme Google, Facebook, Microsoft et IBM. Le secteur de l'IA bénéficie également d'un financement diversifié et abondant, ce qui peut être considéré comme un atout important pour son développement. L'ensemble de ces éléments contribue à créer un environnement favorable à la demande pour des technologies basées sur l'IA.

Toutefois, la transformation numérique et le gigantesque potentiel de l'IA s'accompagnent de défis importants, tels que le manque de confiance et les questions éthiques soulevées, la propriété et la confidentialité des données, les risques en matière de sécurité, les craintes d'exacerbation des inégalités sociales (distorsion algorithmique), l'opacité et les effets perturbateurs de ces technologies sur l'emploi. Face à ces défis, il est donc essentiel que le gouvernement du Québec continue à travailler activement pour encourager la recherche systématique sur les implications éthiques de l'IA, pour accroître la résilience du marché du travail face aux perturbations engendrées par les technologies numériques et pour appuyer la recherche

sur les interactions homme-machine (IHM) et sur l'explicabilité des systèmes d'IA basés sur l'apprentissage automatique. À long terme, l'explicabilité de ces technologies est l'une des conditions de leur acceptabilité sociale. Enfin, il sera nécessaire d'adapter et de réorienter les systèmes d'éducation et de formation afin de s'assurer que les jeunes et les adultes au travail possèdent les bonnes compétences pour évoluer dans un environnement axé sur l'IA, et de veiller à ce que les avantages de celle-ci soient partagés largement et équitablement.

En conclusion, l'IA pourrait être le vecteur économique de notre époque, et la collaboration entre les travailleurs et les machines (intelligentes) ainsi que la combinaison de leurs compétences sont primordiales. C'est de cette collaboration et de cette combinaison que découleront les meilleures applications de cette technologie transformatrice.



Références

Accenture Conseils. (2018). *Intelligence artificielle, des conséquences réelles – Les services publics à l'ère de l'intelligence artificielle*. Repéré à : https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-88/Accenture-Artificial-Intelligence-Genuine-Impact.pdf.

Acemoglu, D. et Restrepo, P. (2017). *Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets* (23285) [rapport de recherche]. The National Bureau of Economic Research (NBER). doi:10.3386/w23285.

Aghion, P., Jones, B. F. et Jones, C. I. (2017, octobre). *Artificial Intelligence and Economic Growth* (23928) [rapport de recherche]. NBER. doi:10.3386/w23928.

Arntz, M., Gregory, T. et Zierahn, U. (2016). *The risk of automation for jobs in OCDE countries: A comparative analysis*. Document de travail de l'OCDE sur les affaires sociales, l'emploi et les migrations, 189. Éditions OCDE. doi:10.1787/5jlz9h56dvq7-en.

CB Insights et PwC Canada. (2018). *MoneyTree Canada Report*. T3 2018. PwC Canada.

Centre européen de stratégie politique (EPSC). (2018, 27 mars). *The Age of Artificial Intelligence: Towards a European Strategy for Human-Centric Machines* (29) [note stratégique]. Commission européenne. Repéré à : https://www.labparlamento.it/wp-content/uploads/2018/04/epsc_strategicnote_ai.pdf.

Chambre de commerce du Montréal métropolitain. (2018). *L'intelligence artificielle. Un pilier de développement économique pour la métropole*. Repéré à : https://www.cmm.ca/fr/nouvelles/cahier_l-intelligence-artifi-elle-un-pilier-de-developpement-economique-pour-la-metropole/.

Comité d'orientation de la grappe en intelligence artificielle. (2018, mai). *Stratégie pour l'essor de l'écosystème québécois en intelligence artificielle*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation.

L'intelligence artificielle : un puissant levier de développement économique pour le Québec

Conseil consultatif sur l'économie et l'innovation. (2017, septembre). *Agir ensemble : pour un Québec innovant, inclusif et prospère*. Gouvernement du Québec. Repéré à : <http://www.ccei.quebec/fr/rapport-integrateur>.

Conseil des technologies de l'information et des communications (CTIC). (2017, avril). *La prochaine vague de talents : naviguer le virage numérique. Perspectives 2021*. Repéré à : https://www.ictc-ctic.ca/wp-content/uploads/2017/04/ICTC_Perspectives-2021.pdf.

Deslauriers, J., Gagné, R. et Paré, J. (2019a). *Manufacturier 4.0. Dynamiser l'activité manufacturière au Québec*. Centre sur la productivité et la prospérité (CPP) – Fondation Walter J. Somers, HEC Montréal. Repéré à : <https://cpp.hec.ca/wp-content/uploads/2019/09/PP-2019-02.pdf>.

Deslauriers, J., Gagné, R. et Paré, J. (2019b). *Productivité et prospérité au Québec. Bilan 2018*. Centre sur la productivité et la prospérité (CPP) – Fondation Walter J. Somers, HEC Montréal. Repéré à : <https://cpp.hec.ca/wp-content/uploads/2019/03/PP-2018-01.pdf>.

Dilhac, M.-A., Abrassart, C. et Voarino, N. (2018). *Rapport de la Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'intelligence artificielle*. Déclaration de Montréal – IA responsable et Université de Montréal. Repéré à : https://5da05b0d-f158-4af2-8b9f-892984c33739.filesusr.com/ugd/ebc3a3_d806f109c4104c91a2e719a7bef77ce6.pdf.

Dutton, T., Barron, B. et Boscovic, G. (2018, décembre). *L'ère de l'IA : rapport sur les stratégies nationales et régionales en matière d'IA*. Institut canadien en recherches avancées (ICRA). Repéré à : https://www.cifar.ca/docs/default-source/ais-francais/buildinganaiworld_fr.pdf.

fDi Benchmark du *Financial Times*. (2019). *Analyse comparative qui classe les plus grandes villes nord-américaines en fonction de leur capacité à attirer des investissements en intelligence artificielle*.

Finance Montréal. (2019). *Les intelligences du futur dans l'industrie des services financiers [rapport]*. Préparé dans le cadre de la Stratégie métropolitaine sur les compétences du futur du Conseil emploi métropole. Repéré à : https://www.finance-montreal.com/wp-content/uploads/2019/04/565_FM_Rapport_Intelligences-du-futur_F-Web_Simple.pdf.

Frey, C. B. et Osborne, M. A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation?. *Technological Forecasting and Social Change*, 114, 254-280. doi:10.1016/j.techfore.2016.08.019.

Graetz, G. et Michaels, G. (2018). Robots at work. *Review of Economics and Statistics*, 100(5), 753-767. doi:10.1162/rest_a_00754.

Institut des algorithmes d'apprentissage de Montréal (MILA). (2019, juin). *Plan stratégique. Présentation au conseil d'administration*.

Investissement Québec. (2019, juin). *Montréal, centre mondial de l'intelligence artificielle*. Repéré à : <https://www.investquebec.com/international/fr/secteurs-activite-economique/technologies-information-communications/Montreal-centre-mondial-de-l-intelligence-artificielle.html>.

Lomazzi, L., Lavoie-Moore, M., Gélinas, J. et Hébert, G. (2019, mai). *Financer l'intelligence artificielle, quelles retombées économiques et sociales pour le Québec ?* [note socioéconomique]. Institut de recherche et d'informations socio-économiques (IRIS). Repéré à : https://cdn.iris-recherche.qc.ca/uploads/publication/file/Intelligence_artificielle_IRIS_WEB4.pdf.

Ministère des Finances du Québec (MFQ). (2019a, mars). *Plan budgétaire du Québec. Budget 2019-2020* (p. D.37). Repéré à : <http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2019-2020/>.

MFQ. (2019b, mars). *Dépenses fiscales* (édition 2018, p. C.239). Repéré à : http://www.finances.gouv.qc.ca/documents/Autres/fr/AUTFR_DepensesFiscales2018.pdf.

MFQ. (2018, mars). *Plan économique du Québec. Budget 2018-2019* (p. D.47 et D.53). Repéré à : <http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2018-2019/>.

MFQ. (2017, mars). *Plan économique du Québec. Budget 2017-2018* (p. B.104). Repéré à : <http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2017-2018/>.

Ministère des Relations internationales et de la Francophonie. (2019, 6 septembre). *Le gouvernement du Canada et le gouvernement du Québec annoncent la création d'un centre d'expertise international à Montréal pour l'avancement de l'intelligence artificielle*. Repéré à : <http://www.mrif.gouv.qc.ca/fr/salle-de-presse/communiqués/18740>.

Montréal International. (2019, 3 septembre). Communiqué. Repéré à : <https://www.montrealinternational.com/fr/actualites/montreal-meilleur-endroit-en-amerique-du-nord-pour-investir-en-ia/>.

Nilsson, N. J. (2010). *The quest for Artificial Intelligence: A history of ideas and achievements*. Presses universitaires de Cambridge.

OCDE. (2019). *Perspectives de l'emploi de l'OCDE 2019. L'avenir du travail. Éléments marquants*. Repéré à : <http://www.oecd.org/fr/emploi/Perspective-de-emploi-2019-Highlight-FR.pdf>.

OCDE. (2018). *Science, technologie et innovation. Perspectives de l'OCDE 2018. S'adapter aux bouleversements technologiques et sociétaux*. doi:10.1787/sti_in_outlook-2018-fr.

Oschinski, M. et Wyonch, R. (2017, mars). *Future Shock? The Impact of Automation on Canada's Labour Market*. Institut C.D. Howe. Repéré à : https://www.cdhowe.org/sites/default/files/attachments/research_papers/mixed/Update_Commentary%20472%20web.pdf.

Purdy, M. et Daugherty, P. (2017). *How AI boosts industry profit and innovation*. Accenture. Repéré à : https://www.accenture.com/fr-fr/_acnmedia/36dc7f76eab444cab6a7f44017cc3997.pdf.

Purdy, M. et Daugherty, P. (2016). *Why artificial intelligence is the future of growth*. Accenture. Repéré à : https://www.accenture.com/t20170524T055435__w_/ca-en/_acnmedia/PDF-52/Accenture-Why-AI-is-the-Future-of-Growth.pdf.

SCALE AI (2017). *Plan stratégique*. Repéré à : https://scaleai.ca/wp-content/uploads/2017/11/SCALE_AI-STRATEGIC_PLAN-FR-FINAL-1.pdf.

STIQ. (2018, mai). *Baromètre industriel québécois. Un portrait unique du secteur manufacturier* (9^e édition). Repéré à : <https://www.stiq.com/wp-content/uploads/2018/05/STIQ-Barom%C3%A8tre-industriel-qu%C3%A9b%C3%A9cois-9e-%C3%A9dition.pdf>.

Notes

1. Les accélérateurs d'entreprises ont pour objectif principal d'accélérer le processus de création d'entreprise et de préparer les entrepreneurs à recevoir un afflux de capitaux. Une distinction essentielle entre les accélérateurs d'entreprises et les incubateurs d'entreprises réside dans le fait que les accélérateurs prennent généralement une participation dans le capital de l'entreprise innovante en démarrage, souvent sous la forme d'un investissement providentiel, plutôt que de percevoir un loyer en contrepartie des services fournis.
2. Les investissements du gouvernement du Québec en infrastructures matérielles (physiques) destinés à promouvoir l'économie numérique ne concernent pas directement et exclusivement le domaine de l'IA. En plus de répondre aux besoins croissants de débits Internet rapides (accès à la connectivité numérique), ces infrastructures favorisent l'expansion de l'Internet des objets, de l'infonuagique et des technologies mobiles.
3. L'acronyme correspond à « Canadian Institute for Advanced Research (CIFAR) », le nom de l'organisme en anglais, et est utilisé y compris dans les publications en français.
4. Dans le cadre de l'Initiative fédérale des supergrappes d'innovation (ISI), cinq propositions ont été retenues à travers le Canada en vue d'un financement, soit la supergrappe des technologies numériques (située en Colombie-Britannique), la supergrappe des industries des protéines (située dans les Prairies), la supergrappe de la fabrication de pointe (située en Ontario), la supergrappe de l'économie océanique (située au Canada atlantique) et la supergrappe des chaînes d'approvisionnement axées sur l'IA SCALE AI (située au Québec).
5. Aujourd'hui, l'IA en santé joue un rôle d'assistance. À ce titre, elle permet, par exemple, d'apporter aux médecins une aide au diagnostic ou au choix thérapeutique, ou encore d'interpréter en un temps record et avec une précision inégalée des images médicales.
6. Par contre, cette technologie n'a pas encore atteint un niveau de sûreté tel qu'il soit possible de prévoir avec précision un calendrier pour sa généralisation, qui supposera que les réglementations aient évolué et que les assurances se soient adaptées.
7. L'Internet des objets fait référence à l'intégration de capteurs et de servomoteurs dans des machines et d'autres objets physiques afin de les relier à un réseau Internet.
8. Au Québec, la parafiscalité correspond aux sommes versées à la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), au Fonds des services de santé (FSS), au Régime québécois d'assurance parentale (RQAP) et à Retraite Québec (RQ). Du côté du gouvernement fédéral, ces prélèvements obligatoires correspondent aux contributions au régime d'assurance-emploi (AE).
9. Afin d'accroître la transparence et de réduire au minimum le risque de partialité ou d'erreur, les systèmes d'IA devraient être conçus de façon à permettre à l'être humain de comprendre le fondement de leurs actions. À ce propos, les systèmes d'IA à base d'apprentissage sont couramment dénoncés comme des boîtes noires pour leurs utilisateurs.
10. La création du PMIA constitue un élément clé de la Déclaration franco-canadienne sur l'IA et elle fait suite à la conférence multipartite du G7 sur l'IA qui a eu lieu à Montréal le 6 décembre 2018.

Chapitre 4

LES TECHNOLOGIES ET LES POLITIQUES PUBLIQUES EN APPUI À L'ESSOR DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

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, chercheuse et fellow au CIRANO

Giulia Piantoni

Candidate au doctorat à Politecnico di Milano, en Italie

Georges Hage

Candidat au doctorat à Polytechnique Montréal

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

Résumé

Les défis posés par la transformation numérique de notre économie, et plus particulièrement les technologies de rupture, dont l'IA, nécessitent une collaboration intersectorielle et interdisciplinaire plus large de la part des entreprises qui souhaitent bénéficier de tels changements. À cet effet, l'initiative des supergrappes d'innovation du gouvernement fédéral vise à contribuer au développement de ce type de synergie. Au Québec, c'est la supergrappe sur les chaînes d'approvisionnement axées sur l'intelligence artificielle (SCALE AI) qui a été financée. S'apparentant,

dans les faits, beaucoup plus à un écosystème d'innovation, SCALE AI vise à remédier et à renforcer le potentiel de création et de capture de valeur de l'IA au Québec et au Canada. Par ailleurs, le supercluster compte offrir des services pour former et guider les autres entreprises et organisations, qui ont pour l'instant encore un faible taux d'adoption de technologies de pointe et émergentes pourtant nécessaires à l'intégration de l'IA.

Introduction

La science, la technologie et l'innovation contribuent au bien-être de nos sociétés (OCDE, 2018). Il existe en effet de nombreux arguments empiriques en faveur d'une relation positive entre la recherche scientifique, l'innovation technologique et le développement économique (Autio et Thomas, 2014). Or, il est paradoxal de constater qu'alors que le Canada et Québec ont d'excellentes performances en sciences et technologies, cet avantage ne se traduit pas en innovation, du moins pas dans une égale mesure. Ainsi, le Québec arrive sixième au pays en ce qui a trait au nombre de publications par 1 000 habitants (derrière la moyenne canadienne), mais connaît la plus faible croissance en termes de nombre de brevets (CCA, 2018). De même, bien que sa mesure d'intensité de la R-D le classe en tête des provinces canadiennes, il arrive à ce chapitre loin derrière la moyenne des pays de l'OCDE, ce qui met en péril sa capacité d'innovation. Face à un tel paradoxe, et pour contrer le déclin de l'innovation au Canada, le gouvernement fédéral a mis sur pied l'Initiative des supergrappes d'innovation. Cinq supergrappes ont été sélectionnées à la suite de l'appel de projet : au Québec, c'est SCALE AI, une supergrappe sur les chaînes d'approvisionnement axées sur l'intelligence artificielle (IA), qui a été retenue. Celle-ci met de l'avant deux forces de la province, soit l'IA et la logistique. Les impacts multisectoriels visés par cette supergrappe s'appuieront sur la transversalité de l'IA, technologie au cœur même de la transformation numérique de notre économie, et les énormes possibilités qui en découlent.

L'IA est censée remodeler les économies en améliorant l'efficacité et la productivité (OECD, 2019) et constitue par le fait même une priorité nationale et provinciale (UNESCO, 2018). Le Canada a par ailleurs

été l'un des premiers à lancer, en 2017, une stratégie nationale sur l'IA – stratégie pancanadienne avec un investissement de 125 millions de dollars du gouvernement canadien (UNESCO, 2018). Cette stratégie repose sur les atouts du Canada en matière de talents dans le domaine de l'IA (des chercheurs réputés et des décennies de recherche, en plus de 650 nouvelles entreprises d'IA), mais aussi sur le risque perçu de « fuite des cerveaux » et sur les difficultés de commercialiser les innovations et les résultats de la recherche fondamentale. Cette stratégie s'appuie sur des forces préexistantes au pays telles que Amii¹ en Alberta, MILA² au Québec et le Vector Institute en Ontario.

Plus spécifiquement, le Québec constitue un pôle d'IA reconnu mondialement (ReflectionAI, 2019), avec d'autres acteurs comme IVADO, Element AI et Borealis et des écosystèmes comme Québec.AI. C'est également un pôle d'attraction pour les talents et les entreprises composé de plus de 300 chercheurs, 93 000 spécialistes en activité et 11 000 étudiants dans la région métropolitaine. Il n'est donc pas surprenant que Montréal mise sur l'IA comme un secteur clé (Montréal International, 2019) pour le développement économique, et que l'Ontario mette l'accent sur l'adoption d'IA à grande échelle en s'appuyant sur des forces principalement à Waterloo et à Toronto, où le talent, la recherche et les entreprises se rencontrent et interagissent.

Une précision est à faire avant d'aller plus loin. Il nous semble important de clarifier le terme « écosystème d'innovation », une combinaison de mots très à la mode, voire galvaudés. Les écosystèmes d'innovation incluent des participants extérieurs à la chaîne de valeur traditionnelle, tels que les clients, les universités (fournisseurs de science et technologies), les gouvernements, les intermédiaires de recherche et d'innovation, et les entreprises qui évoluent au sein de l'écosystème, souvent dans des relations symbiotiques (Mazzucato et Robinson, 2017). Les fondements théoriques du concept reposent sur des travaux publiés couvrant les grappes industrielles, les réseaux de collaboration, les proximités géographiques, sociales et cognitives, entremêlées de pratiques de collaboration et d'innovation ouverte, qui se sont tous avérés avoir un impact positif sur la propension des entreprises à innover³. Un exemple connu est la Silicon Valley, avec ses liens informels identifiés pour la première fois par Saxenian (1994).

Les écosystèmes d'innovation sont perçus comme un moyen d'accélérer l'innovation, notamment parce qu'ils contribuent à décloisonner les disciplines et les secteurs industriels. En effet, pour être novatrices, les organisations doivent plus que jamais mobiliser leurs talents à l'échelle locale et mondiale en concentrant leurs investissements sur des programmes de R-D interdisciplinaires (Nielsen, 2011 ; Teece, 2009) et sur des initiatives de collaboration dans des domaines variés d'expertise (Gassmann, Enkel et Chesbrough, 2010). La recombinaison des connaissances à la base de l'innovation exige des politiques de propriété intellectuelle audacieuses (Cohendet et Pénin, 2011) et de nouvelles activités de commercialisation. Dans les faits, en mobilisant une variété d'acteurs de la société, l'initiative des supergrappes d'innovation s'apparente davantage à la constitution d'écosystèmes d'innovation centrés autour de la création de produits et services et de l'adoption des technologies émergentes qu'à des grappes industrielles.

Le reste du chapitre abordera l'adoption des technologies de pointe au Québec et dans le reste du Canada. Ensuite sera présenté l'utilisation des technologies émergentes, telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des objets et les chaînes de blocs. Finalement, se basant sur l'initiative fédérale des supergrappes, le chapitre fera un survol de l'impact attendu de la supergrappe SCALE AI sur le Québec.

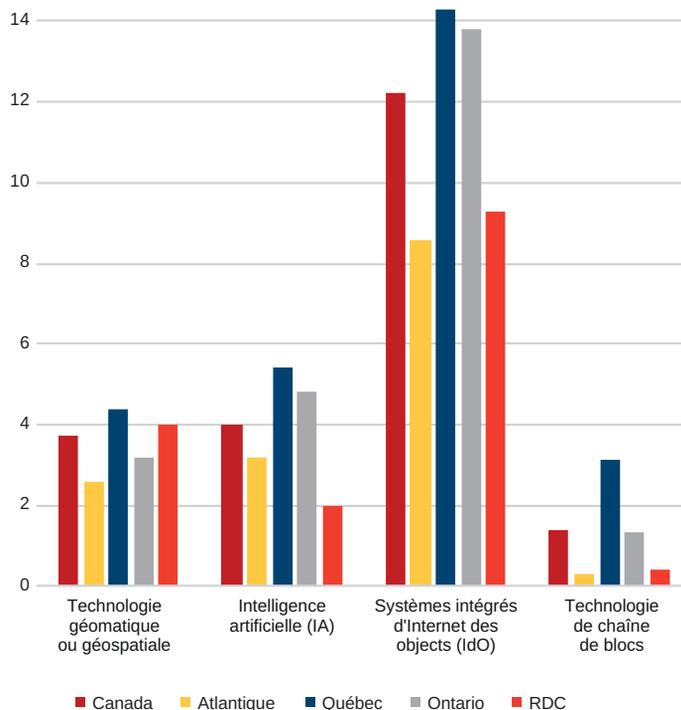
Adoption des technologies de pointe et des technologies émergentes

Avant de plonger dans les supergrappes et SCALE AI, il est important de souligner que l'adoption de l'IA dans les entreprises québécoises repose en fait sur une combinaison de technologies existantes. En effet, pour que certaines technologies soient bien déployées, les entreprises doivent intégrer un bouquet de technologies, souvent interdépendantes. À titre d'exemple, l'IA a besoin d'un grand volume de données pour être entraînée, aussi est-il nécessaire de se doter d'outils de collecte de données pour la nourrir. Pour cette raison, cette section présente les résultats de deux enquêtes de Statistique Canada (2014 et 2017) portant

sur l'adoption des technologies de pointe et émergentes par les entreprises canadiennes. Cela mettra en évidence, du moins partiellement, les enjeux technologiques auxquels sont confrontées les entreprises. Les statistiques démontrent également l'écart qu'il peut y avoir entre le Québec et d'autres provinces, ainsi que les secteurs ayant davantage tendance à adopter ces technologies – soulignant les nombreux défis auxquels tenteront, du moins en partie, de répondre les supergrappes.

Nous avons relevé quatre technologies de pointe ou émergentes parmi celles nommées dans la plus récente (2017) enquête de Statistique Canada sur l'innovation et les stratégies d'entreprise⁴. Ces quatre technologies sont pertinentes à la transformation numérique de l'économie en lien avec celles mises de l'avant par les cinq supergrappes : les technologies géomatique ou géospatiale, l'intelligence artificielle (IA), les systèmes intégrés d'Internet des objets (IdO) et les technologies de chaînes de blocs. Parmi cette liste, il ne fait aucun doute que l'IA sera le fer de lance, soit le mécanisme d'amélioration, d'optimisation, de déploiement et d'expansion des trois autres. Actuellement, les systèmes intégrés d'IdO sont de loin la technologie émergente la plus adoptée au pays (voir le graphique 4-1). Fait intéressant, le Québec est un chef de file au Canada pour chacune de ces quatre technologies de pointe (pour plus de détails, consulter le tableau 4-2 dans l'annexe, aux p. 137-139).

Taux d'adoption des technologies émergentes au Québec, en Ontario et dans le reste du Canada

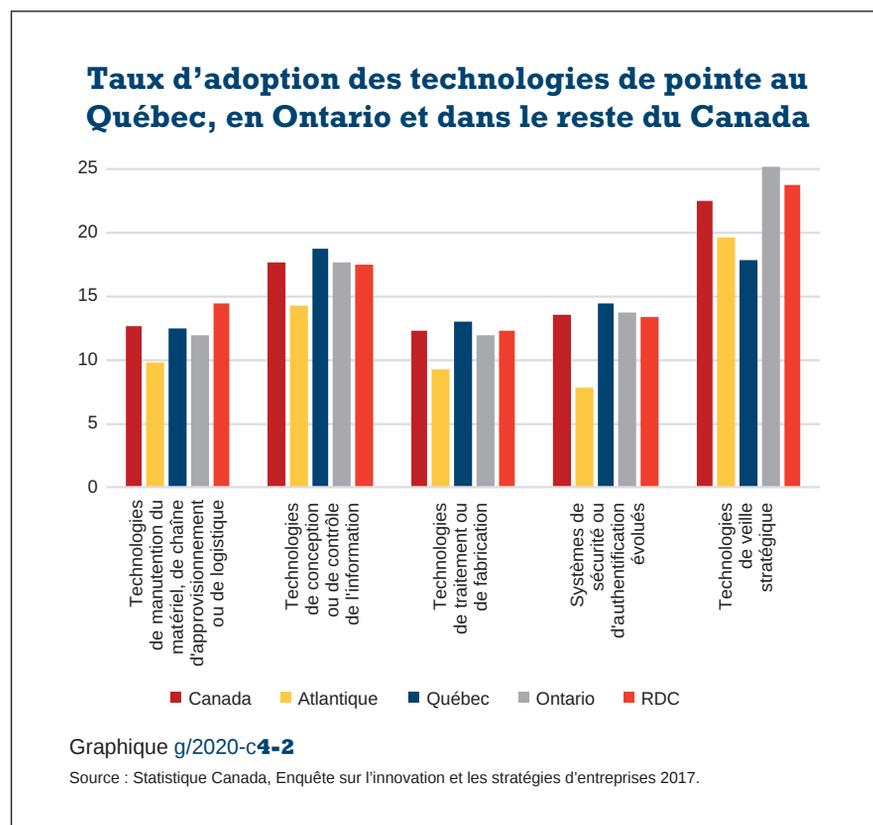


Graphique g/2020-c4-1

Source : Statistique Canada, Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprises 2017.

En revanche, en ce qui a trait aux technologies de pointe utilisées en 2017 par les entreprises, l'avance du Québec n'est pas uniforme, la province affichant même parfois un retard important. De plus, l'écart entre le Québec, l'Ontario et le reste du Canada y est moins prononcé. Le Québec présente une plus forte proportion d'entreprises utilisatrices de telles technologies que les autres provinces en matière de technologies de conception ou de contrôle de l'information, de technologies de traitement et de fabrication, et de systèmes de sécurité ou d'authentification évolués. Les provinces à

l'ouest de l'Ontario (reste du Canada dans le graphique 4-2) sont toutefois en avance en ce qui touche aux technologies de manutention du matériel et aux chaînes d'approvisionnement ou de logistique, et l'Ontario domine en ce qui a trait à la veille stratégique. Les provinces enclavées du pays ont par exemple un besoin accru d'adopter des solutions innovantes afin d'acheminer leurs produits vers le marché. Comme nous le verrons plus loin dans le chapitre, il semble que les supergrappes s'appuient sur des forces locales, ce qui ne se traduit pas nécessairement par une utilisation plus répandue de ces technologies.



Dans les paragraphes qui suivent, les quatre technologies sont détaillées davantage et mises en perspective avec des données provenant de l'enquête de Statistique Canada sur les technologies de pointe de 2014⁵. Ces dernières sont pertinentes puisqu'elles peuvent, par exemple, faciliter l'adoption de l'IdO ou de l'intelligence artificielle, ce qui permet d'ajouter

un élément temporel à l'adoption. Alors que le Québec accusait un léger retard en 2014 pour toutes ces technologies (voir la première ligne de chaque section du tableau 4-1, dans l'annexe, p. 135), la province avait rattrapé, sinon dépassé, les autres provinces en 2017 pour la plupart des technologies émergentes et de pointe.

L'intelligence artificielle (IA)

Les données sont l'élément primordial pour permettre l'adoption de l'IA. Bien que celles-ci puissent être collectées manuellement, l'IdO, avec ses réseaux de capteurs, augmente de beaucoup la quantité de données collectées, d'où l'importance de plus en plus pressante de déployer l'IA. Afin de pouvoir traiter ces données, les technologies les plus utilisées sont les logiciels de traitement de données à grande échelle, qui permettent de collecter une grande quantité de données non structurées.

En 2014, lorsque Statistique Canada a lancé son Enquête sur les technologies de pointe⁶, les logiciels de traitement de données à grande échelle nécessaires à l'adoption de l'IA (*AI enablers*) n'avaient été adoptés que par 7,0 % des entreprises canadiennes (voir le tableau 4-1, dans l'annexe, p. 135). Le plus haut taux d'adoption (23,3 %) de ces technologies se retrouve dans le secteur des services publics, propulsé par les secteurs de la production, du transport et de la distribution d'électricité [2211]⁷, en particulier grâce à l'Ontario (26,2 %). Au Québec, c'est surtout le secteur de l'extraction minière, l'exploitation en carrière et l'extraction de pétrole et de gaz [21] qui se démarque (15,1 %) par rapport à la moyenne canadienne (5,7 %). Suivent l'industrie de la fabrication de produits pharmaceutiques et de médicaments [3254] (12,4 %), et l'industrie de la fabrication des produits aérospatiaux et de leurs pièces [3364] (12,3 %). Compte tenu de la force de l'écosystème d'innovation québécois dans ce dernier secteur (l'aérospatiale), il est surprenant de constater que le Québec est en retard par rapport au Canada (16,5 %) et à l'Ontario (16,4 %) à cet égard.

Quelques mois ou quelques années sont nécessaires pour voir des stratégies d'IA émerger à la suite de l'adoption d'un logiciel de traitement de données à grande échelle. Pour cette raison, les secteurs mentionnés plus haut auraient dû être des pionniers en adoption de l'IA. Or, ce n'est pas tout à fait ce que l'on observait en 2017. Les secteurs où l'IA était la plus

répandue sont la finance et les assurances [52] et l'industrie de l'information et l'industrie culturelle [51]⁸, suivis de l'industrie des services professionnels, scientifiques et techniques [54]. Pour cette dernière, le taux d'adoption des logiciels essentiels à l'IA était de 11,9 % au Québec et de 10,3 % au Canada (voir le tableau 4-1 dans l'annexe, p. 135). L'état relativement embryonnaire de la technologie et sa forte proximité avec le système de science ont fait en sorte que le taux d'adoption dans les autres secteurs de l'économie n'était pas encore répandu, ce qui a eu des répercussions sur le taux d'adoption de l'IA dans ces industries en 2017.

L'Internet des objets (IdO)

Afin d'adopter l'IdO et d'en exploiter les capacités, quelques technologies sous-jacentes sont aussi nécessaires. Il faut entre autres des identifications par radiofréquences (IDRF), des réseaux intégrés de capteurs, ainsi que des systèmes de communication sans fil permettant de collecter ces données. Le déploiement de ces technologies s'appuie également sur un logiciel de traitement de données à grande échelle.

De manière générale, en 2014, le Québec se trouvait derrière l'Ontario dans les classements relatifs à presque toutes les technologies nécessaires à l'IdO (voir le tableau 4-1 dans l'annexe, p. 135). En outre, le Québec était aussi en retard par rapport au Canada en ce qui a trait aux systèmes de communication sans fil, tous secteurs confondus. Une exception notable était le secteur de la fabrication des produits en bois (321) (23,7 %). Cet écart avait toutefois été grandement rattrapé, voire dépassé, en 2017, grâce notamment au secteur de la finance et des assurances (voir le tableau 4-2 dans l'annexe, p. 137).

Les technologies géomatiques et géospatiales

Le domaine des services publics [22] est aussi le secteur qui utilise le plus les technologies géomatiques et géospatiales, et là encore, le Québec a adopté ces technologies dans une moindre mesure que l'Ontario et le reste du Canada (voir le tableau 4-2 dans l'annexe, p. 137). Le secteur québécois de la finance et des assurances [52] se démarque encore une fois pour son fort taux d'utilisation de ces technologies, ce qui fait en sorte que la province se classe bonne deuxième à cet égard. Les inondations auxquelles de nombreux Québécois ont dû faire face, notamment en 2011

et en 2017, ne sont probablement pas étrangères à l'importance que ce secteur accorde à ces technologies. Il y a fort à parier que l'avenir apportera une utilisation accrue de la géomatique pour ce secteur.

Les chaînes de blocs

Pour terminer ce survol de l'utilisation des technologies émergentes en 2017, il n'est pas surprenant de constater que le secteur ayant utilisé le plus les chaînes de blocs est encore une fois le secteur de la finance et des assurances [52]. Tous secteurs confondus, c'est également au Québec que le taux d'adoption a été le plus élevé (41,5 %). Les secteurs publics [22] québécois sont d'ailleurs en avance sur leurs homologues du reste du Canada pour l'utilisation des chaînes de blocs (8,3 %).

Effet de la taille des entreprises sur l'utilisation des technologies émergentes

La taille d'une entreprise peut aussi affecter le degré d'adoption des technologies. Fabiani, Schivardi, and Trento (2005) ont trouvé que les grandes entreprises ont une meilleure capacité à adopter de nouvelles technologies⁹. Cela peut être dû au fait que ces entreprises ont souvent plus de ressources financières et humaines, mais aussi une plus grande capacité d'absorption (Cohen et Levinthal, 1990) de nouvelles connaissances. Par exemple, le logiciel Hadoop pour le traitement de données à grande échelle est gratuit, mais requiert souvent une expertise avancée en programmation qui n'est pas nécessairement disponible dans les plus petites entreprises. Le coût d'adoption des technologies dépasse largement les économies d'échelle que leur adoption pourrait induire.

Heureusement, ce ne sont pas seulement les grandes entreprises qui adoptent les technologies de pointe et émergentes, bien qu'elles adoptent davantage de technologies émergentes tous secteurs confondus. Par exemple, dans le cas de l'IA, 10,1 % des grandes entreprises l'ont adoptée, contre 7,1 % et 3,2 % respectivement pour les petites et les moyennes entreprises. Le même scénario se répète pour l'IdO, alors que les grandes entreprises sont plus nombreuses à l'adopter (17,8 %) que les autres (11,4 % pour les petites et 17,8 % pour les grandes). Certains secteurs propres à chaque technologie présentent des taux d'adoption plus élevés pour les

entreprises de taille moyenne. C'est le cas pour l'utilisation de l'IA et de l'IdO dans le secteur des services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement [56], et pour l'utilisation des technologies de chaînes de blocs dans le secteur de la finance et des assurances [52]. Il est donc fort probable que les entreprises de technologies financières (*fintech*) soient responsables de ces hauts taux d'adoption parmi les entreprises de taille moyenne.

Les différentes technologies émergentes et de pointe sont interdépendantes et l'adoption de l'une requiert généralement l'adoption d'une autre pour qu'une entreprise puisse effectuer sa transition numérique. À cet égard, les supergrappes contribueront chacune à leur façon à cette transition.

Initiative des supergrappes d'innovation

En février 2018, le gouvernement canadien a annoncé la création de cinq supergrappes d'innovation (voir l'encadré). Celles-ci visent à « promouvoir l'innovation commerciale et la présence mondiale, de l'idéation à la création de valeur » (Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2016), tout en fournissant les moyens d'organiser les écosystèmes d'innovation pour faire face collectivement aux nouvelles technologies révolutionnaires et en tirer parti. Si les supergrappes atteignent les objectifs ambitieux du programme, elles auront attiré et retenu les meilleurs talents et contribué à augmenter les dépenses industrielles de R-D et la taille des entreprises, ainsi qu'à instaurer la collaboration sur une très vaste échelle. Plus concrètement, l'initiative vise la création de plus de 50 000 emplois et une augmentation du PIB de plus de 50 milliards de dollars sur 10 ans (ce qui correspond à 100 000 de dollars par emploi créé par année¹⁰).

Dans le cadre de l'initiative de supergrappes d'innovation, le gouvernement fédéral a investi 950 millions de dollars sur 5 ans dans cinq supergrappes. L'objectif de cet investissement majeur et de cette initiative innovante est de soutenir la génération d'innovation par les entreprises et d'accélérer la croissance économique. L'initiative encouragera l'établissement de « partenariats industriels de grande envergure, soutenus par d'autres acteurs des écosystèmes d'innovation. On demandera à ces acteurs de collaborer à des propositions ambitieuses axées sur le marché dans le but d'améliorer leurs écosystèmes d'innovation régionaux, venant ainsi renforcer la croissance et la compétitivité des entreprises participantes, en plus de maximiser les avantages économiques, dont de bons emplois bien rémunérés et la prospérité pour le Canada¹¹ ».

Un premier objectif du gouvernement est de fournir l'appui nécessaire à l'adoption de technologies de rupture au sein des écosystèmes d'innovation, en particulier des petites et moyennes entreprises (PME), afin de favoriser la création généralisée de richesses. Un second objectif est la création et le développement de produits innovateurs pour tout l'écosystème (universités et PME). Alors que la NGen de la fabrication de prochaine génération (Ontario) améliorera considérablement les techniques de production, la SCALE AI (traversant le corridor Québec-Waterloo) s'assurera d'optimiser les chaînes d'approvisionnement et la logistique à l'aide de l'intelligence artificielle. En outre, la supergrappe de l'économie océanique pourrait fournir une partie des données relatives au transport maritime pour faciliter cette logistique des transports des produits manufacturés au Canada. Faisant écho à SCALE AI, la supergrappe des technologies numériques (Colombie-Britannique) exploitera par exemple l'apprentissage automatique pour analyser de volumineux ensembles de données. Il serait donc souhaitable qu'un certain nombre d'organisations, voire d'individus, facilitent le partage de connaissances inter et extra supergrappes. En effet, plusieurs écosystèmes d'innovation performants dans différents secteurs sont susceptibles de renforcer la capacité d'innovation et la compétitivité du Canada.

Les cinq supergrappes sont ainsi ancrées dans les expertises de chacune des provinces. Par exemple, l'enquête de Statistique Canada de 2017 montrait que l'avantage du Québec au niveau des technologies de pointe (tableau 4-3) tient surtout au fait que plus du quart des entreprises des secteurs suivants ont utilisé des technologies de manutention du matériel, de chaîne d'approvisionnement ou de logistique :

- Extraction minière et exploitation en carrière [212]¹² (28,3 %) ;
- Fabrication de produits aérospatiaux et de leurs pièces [3364] (30,3 %) ;
- Fabrication de meubles et de produits connexes [337] (31,8 %) ;
- Grossistes-marchands de produits alimentaires, de boissons et de tabac [413] (31,3 %) ;
- Transport par camion [484] (26,6 %) ;
- Transport de tourisme et d'agrément et activités de soutien au transport [487 et 488] (25,8 %) ;
- Services postaux, messageries et services de messagers, et entreposage [491, 492 et 493] (39,6 %).

En comparaison, les forces de l'Ontario à cet égard se trouvent dans les secteurs suivants :

- Fabrication de pièces pour véhicules automobiles [3363] (27,7 %) ;
- Grossistes-marchands d'articles personnels et ménagers [414] (31,7 %) ;
- Grossistes-marchands de matériaux et fournitures de construction [416] (26,1 %) ;
- Transport de tourisme et d'agrément et activités de soutien au transport [487 et 488] (28,1 %) ;
- Services postaux, messageries et services de messagers, et entreposage [491, 492 et 493] (36,8 %).

Or, la logistique et la chaîne d’approvisionnement sont au cœur de ces différents secteurs, ce à quoi il faut ajouter les forces manufacturières respectives du Québec et de l’Ontario dans les domaines de l’aérospatiale et de l’automobile. Il n’est donc pas surprenant que SCALE AI, axée sur l’utilisation de l’IA pour optimiser les chaînes d’approvisionnement, soit principalement basée au Québec, et que NGen, axée sur la fabrication de prochaine génération, soit essentiellement basée en Ontario.

Ainsi, malgré leurs noms, les supergrappes sont davantage centrées sur les technologies plutôt que sur les secteurs industriels, et en particulier sur des technologies de rupture (voir l’encadré). Les actions de la plupart des supergrappes se basent sur le fait que la donnée sera la ressource la plus précieuse dans les années, voire décennies, à venir. Toutes s’appuient donc sur la transformation numérique que subiront la majeure partie des secteurs industriels au pays, des véhicules maritimes autonomes à la génomique, en passant par l’IA, la réalité augmentée et l’impression en 3D. Bien que toutes les supergrappes aient une base locale forte, elles couvrent chacune plusieurs régions du pays, dans le but de tirer parti des nombreux pôles technologiques locaux.

Les cinq supergrappes d'innovation canadiennes

Supergrappe de l'économie océanique (Canada atlantique) : exploitera les technologies émergentes pour renforcer les industries océaniques du Canada, telles que l'énergie renouvelable marine, les pêches, l'aquaculture, le pétrole et le gaz, la défense, la construction navale et les transports.

- Principales technologies : **capteurs** et surveillance numériques, véhicules maritimes **autonomes**, production d'énergie, **automatisation**, **biotechnologie** marine et technologies de mécanique navale.
- Secteurs traditionnels : exploration et production de pétrole et de gaz en mer; livraison par bateau (*shipping*); construction navale et équipement maritime; pêche et transformation du poisson; tourisme maritime et côtier; transport maritime, logistique et activités portuaires.
- Secteurs émergents : énergies renouvelables marines; exploitation des fonds marins pour l'extraction de métaux et de minéraux; aquaculture marine; biotechnologie marine; suivi, contrôle et surveillance des océans.
- **Supergrappe SCALE AI** (traversant le corridor Québec-Waterloo) : réunira les secteurs de la vente au détail, de la fabrication, des transports, de l'infrastructure et des technologies de l'information et des communications pour créer des chaînes d'approvisionnement intelligentes par l'intelligence artificielle et la robotique.
- Principales technologies : **intelligence artificielle** et technologie des chaînes d'approvisionnement.
- **Supergrappe de la fabrication de prochaine génération** (NGen – Ontario) : développera des capacités de fabrication de nouvelle génération, intégrant des technologies telles que la robotique avancée et l'impression 3D.
- Principales technologies: **Internet des objets**, **apprentissage machine**, **cybersécurité** et fabrication additive (impression en 3D).
- Secteurs traditionnels : automobile, aérospatiale, acier, produits métalliques et plastiques, machines et équipement, préparation des aliments, textile, produits médicaux, produits du bois, électronique.

- Domaines d'application émergents : applications de capteurs spécialisés et de la microélectronique dans les produits et les processus de fabrication; déploiement de systèmes d'intelligence artificielle et de vision avancée dans de nouvelles applications de robotique et d'apprentissage automatique pour le contrôle de la qualité à grande vitesse, la manipulation de matériaux flexibles et la production; solutions de maintenance prédictive; et développement d'une plate-forme de caractérisation et d'essai accélérée des matériaux pour la fabrication d'additifs métalliques.
- **Supergrappe des industries des protéines** (Protein Industries Canada – PIC, Provinces des Prairies) : utilisera la génomique des plantes et une technologie de traitement novatrice pour accroître la valeur des principales cultures canadiennes, telles que le canola, le blé et les légumineuses convoitées sur les marchés étrangers à forte croissance, comme la Chine et l'Inde, satisfaire les marchés en croissance d'Amérique du Nord et d'Europe pour les substituts de viande à base de plantes et les nouveaux produits alimentaires.
- Principales technologies : technologies habilitantes en agroalimentaire, y compris la génomique, la transformation, et les technologies de l'information (TI) – dont la bioinformatique, l'imagerie numérique et les chaînes de blocs.
- Secteurs traditionnels : agriculture et agroalimentaire, transformation alimentaire et alimentation animale.
- Secteurs émergents : secteur de la transformation à valeur ajoutée.
- **Supergrappe des technologies numériques** (Colombie-Britannique) : utilisera des jeux de données plus volumineux et de meilleure qualité et des applications de pointe en réalité augmentée, en informatique, en nuage et en apprentissage automatique pour améliorer la prestation de services dans les secteurs des ressources naturelles, de la santé de précision et de la fabrication.
- Principales technologies : réalité virtuelle, mixte et augmentée (RV/RM/RA), collecte et analyse de données, infonuagique, intelligence des objets, et informatique quantique.
- Secteurs traditionnels : soins de santé, ressources naturelles et applications industrielles pour débiter. D'autres secteurs s'ajouteront par la suite.
- Secteurs émergents : applications de réalité virtuelle, mixte et augmentée (RV/RM/RA).

Source : Gouvernement du Canada, 2020

La supergrappe SCALE AI

La supergrappe de l'intelligence artificielle¹³, nommée SCALE AI pour l'acronyme anglais « *Supply Chain And Logistics Excellence AI* », est un « consortium dirigé par des entreprises et dont le siège social est à Montréal et centré au Québec et en Ontario » (SCALE AI, 2018). Elle se définit comme la supergrappe canadienne sur les chaînes d'approvisionnement. Ses activités seront dédiées à construire la prochaine génération de ces chaînes, mais aussi à faire bénéficier les entreprises des nouvelles possibilités qu'apporte l'IA.

Malgré le succès de la recherche appliquée et fondamentale en matière d'IA et de technologies de pointe connexes, le constat est que le niveau de production et de commercialisation de l'innovation diminue. SCALE AI vise à remédier à ce désalignement en renforçant le potentiel de création et de capture de valeur de l'IA dans les secteurs liés à la supergrappe. L'écosystème d'innovation vise ainsi à améliorer la recherche dans les domaines de l'IA, de l'apprentissage automatique, de la chaîne de blocs et de l'IdO, ainsi que de l'adoption et de l'utilisation d'applications connexes dans les domaines de la fabrication, de la logistique, des transports et de la construction (SCALE AI, 2019b). Comme il a été mentionné ci-dessus, de telles technologies ont déjà été adoptées par des entreprises de divers secteurs de la province, constituant ainsi un terrain fertile. De surcroît, la supergrappe SCALE AI fournira également des services pour former et guider les autres entreprises et organisations dans cette voie.

Lors de son lancement, le consortium était composé de plus de 120 partenaires de natures et de tailles différentes (entreprises, universités, banques, consultants, etc.)¹⁴, provenant de multiples endroits et ayant des besoins variés. Tous doivent néanmoins s'aligner au cœur de la mission de SCALE AI, soit d'« accroître la productivité de tous les secteurs au Canada en intégrant l'IA aux chaînes d'approvisionnement et en créant un cadre de partage des connaissances pour faire avancer la recherche technologique » (SCALE AI, 2019b). Ces avancées sont attendues sous la forme d'une augmentation de la production, de la commercialisation et de l'adoption de technologies liées à l'IA. Les résultats seront mesurés en termes de PIB, de création d'emplois, d'exportations, de production industrielle, du nombre de PME, de croissance des jeunes entreprises, et de développement des talents et de la collaboration. Les réalisations se concrétiseront par la mise en œuvre de projets collaboratifs axés sur les nouvelles entreprises, les

talents, le partage de données et la propriété intellectuelle. Les impacts seront perçus partout au Canada et dans de nombreux secteurs liés à l'IA et aux autres supergrappes, tels que les biens de consommation et de détail, les biens industriels et la fabrication, la logistique, le transport intra-hospitalier, les infrastructures et la construction (SCALE AI, 2019b). Par la suite, des effets multiplicateurs, indirects, induits et itératifs sont souhaités et attendus dans tous les autres secteurs économiques connexes. La supergrappe vise donc clairement une collaboration étendue dans toutes les sphères de l'économie.

SCALE AI a reçu 230 millions de dollars du gouvernement du Canada (un montant au moins doublé grâce au financement de l'industrie) et 83,4 millions de dollars du gouvernement du Québec (SCALE AI, 2019a), dont 30 millions de dollars accordés à IVADO Labs. À l'instar des autres supergrappes, SCALE AI s'appuie sur des forces locales autant industrielles que dans le domaine de la recherche. La supergrappe est toutefois un écosystème d'innovation en émergence, ne bénéficiant pas de secteurs centraux liés aux caractéristiques naturelles du territoire (comme les supergrappes des industries des protéines, ou de l'économie océanique), ni de groupes d'activités d'affaires préexistants (comme les supergrappes de la fabrication de prochaine génération – NGen –, et des technologies numériques). Pour cette raison, SCALE AI a dû consacrer beaucoup de temps aux opérations et au processus de constitution de la supergrappe, ce qui ne l'a pas empêché d'organiser des activités de maillage pour rapprocher ses différentes parties prenantes.

Le corridor de SCALE AI et le contexte économique

En plus des conditions du marché, le contexte économique de SCALE AI joue un rôle clé dans son développement actuel et futur. La supergrappe a son siège social à Montréal, mais ses activités principales se développent au Québec et en Ontario, notamment dans le corridor Waterloo-Québec.

En 2018, le Québec a enregistré une forte croissance du PIB issu de l'industrie des services professionnels, scientifiques et techniques (3,9 %), attribuable aux secteurs de la conception de systèmes informatiques et services connexes (5415), et de l'architecture, du génie et des services connexes (5413). En outre, le commerce de gros (les grossistes-marchands) de machines, de matériel et de fournitures (417) a aussi

crû de façon spectaculaire (9,8 %)¹⁵. La situation est semblable en Ontario, où le PIB du secteur des services professionnels, scientifiques et techniques a crû de 4,9 % et celui des machines, du matériel et des fournisseurs de gros a augmenté de 8,9 %¹⁶. Le développement important de ces secteurs spécifiques, accompagné d'une forte croissance des secteurs connexes (tels que les transports, la construction, la fabrication et les services d'information), combinés à l'adoption croissante de l'IA et d'autres technologies émergentes, sont de bon augure pour SCALE AI, qui pourrait ainsi exploiter ce fort potentiel de croissance comme un foyer de transformation.

La proximité physique, technologique et culturelle avec d'autres supergrappes pourrait aussi créer des synergies intéressantes (Kourtis, Nijkamp et Arribas, 2012) et ouvrir des possibilités de collaboration. En effet, la supergrappe NGen¹⁷, basée à Toronto, en Ontario, vise à encourager la fabrication de pointe en favorisant l'adoption et l'exploitation de technologies émergentes. Les rapprochements avec le développement de l'IA dans le domaine de la fabrication et des supergrappes connexes sont évidents. Par exemple, la supergrappe de l'économie océanique est partiellement située au Québec et se concentre sur les secteurs liés au transport, à la production alimentaire, et à l'extraction, mais a aussi des liens étroits avec l'IA et les technologies de pointe.

Le potentiel de la supergrappe SCALE AI en tant que créateur de valeur

Bien que les domaines d'application de l'IA soient dans des secteurs généralement matures de notre économie, la pénétration de l'IA, elle, est encore jeune. La supergrappe reste donc un écosystème d'innovation en émergence, conçu de manière descendante plutôt qu'ascendante à partir de grappes industrielles ou d'applications préexistantes. L'IA s'applique aux secteurs de la santé, des transports, de l'automobile, de l'aérospatiale et de la fintech (OCDE, 2019), tous des secteurs pertinents pour les provinces impliquées dans SCALE AI.

Tel que mentionné ci-dessus, les différentes supergrappes sont en cours de développement partout au Canada. Les projets industriels qu'elles appuient favorisent l'adoption de l'IA en diminuant le risque perçu par les entreprises face à l'acquisition et à l'implantation de solutions d'IA,

ce qui aura des répercussions sur l'ensemble de l'économie. SCALE AI, en particulier, se concentre sur les biens de consommation et la vente au détail, les biens industriels et de fabrication, le transport et la logistique, la logistique intra-hospitalière, les infrastructures et la construction. Il s'agit de secteurs en forte croissance au Québec et en Ontario. Les retombées seront donc obtenues en développant des fournisseurs de technologies de l'IA et du numérique, ainsi que des fournisseurs de solutions pour les supergrappes. Les synergies possibles avec NGen sont nombreuses.

SCALE AI vise à générer des solutions commerciales dans des domaines tels que la prévision et la planification de la demande, l'approvisionnement automatisé, la planification et l'analyse prédictive des perturbations, et l'intégration de données en temps réel (SCALE AI, 2019b). Ces solutions sont essentielles à la supergrappe et sont mises en place grâce aux applications d'IA : opérations (structuration de solutions d'approvisionnement automatisées), données (sécurisation de l'échange de données), gestion des périphériques et intégration de l'intelligence artificielle (mise en œuvre d'IdO industriels et mobiles), infrastructure (avec une concentration sur le risque et la conformité) (SCALE AI, 2019b). Aussi, SCALE AI crée de la valeur pour les entreprises en finançant des projets industriels. En soutenant les entreprises de la sorte, la supergrappe contribue à réduire le risque perçu par les entreprises lié à l'acquisition et l'adoption de l'IA. SCALE AI prévoit également offrir des programmes d'accélération pour soutenir les jeunes pousses en IA.

Dans l'ensemble, il apparaît que la collaboration mise en place au sein de la supergrappe pour exploiter le potentiel de l'écosystème existant et prévoir les problèmes devrait permettre d'obtenir de plus amples avantages. Dans un domaine d'innovation de plus en plus peuplé par la technologie, la collaboration entre individus demeure essentielle. De plus, l'éthique, l'inclusion et l'accent mis sur le talent et les valeurs sont des défis clés pour les applications liées à l'IA (OCDE, 2019). L'avenir de SCALE AI est très prometteur, mais à construire. La fenêtre de résultats possibles est assez large, mais toutefois peuplée d'externalités autant positives que négatives. Cette incertitude est également due au stade d'émergence où se trouve SCALE AI. Pour augmenter la probabilité d'obtenir une gamme de résultats positifs, il est essentiel de connaître et de bien connecter la supergrappe avec les acteurs qui composent l'écosystème existant afin d'en exploiter les synergies.

Les supergrappes sont des structures de création à haute valeur ajoutée, favorisant les exportations et la concurrence mondiale et couvrant des frontières administratives et géographiques (Rangen, 2019), mais, à long terme, SCALE AI prévoit des impacts pour 2028 relativement au PIB (16,5 milliards de dollars) et à l'emploi (16 000 emplois supplémentaires, de préférence qualifiés) (SCALE AI, 2019b). L'ajout d'autres paramètres, tels que le développement des talents et l'inclusion, conduit SCALE AI à devenir un moteur inclusif de valeur partagée (Kramer et Porter, 2011), pour toutes les parties prenantes concernées. Des modèles intégrés et dynamiques peuvent guider et informer les entreprises, les centres de recherche, les jeunes pousses, les investisseurs et les décideurs, contribuant ainsi à la réalisation d'avantages socio-économiques.

Conclusion

Les défis posés par la transformation numérique de notre économie, et plus particulièrement les technologies de rupture¹⁸, dont l'IA, nécessiteront une collaboration intersectorielle et interdisciplinaire plus large de la part des entreprises qui souhaitent bénéficier de tels changements. En effet, la rapidité avec laquelle ces technologies s'imposent sur le marché obligera le développement simultané de nouvelles pratiques, politiques et réglementations en matière d'innovation impliquant toutes les parties prenantes, de même qu'une accélération de la recombinaison des connaissances provenant de divers domaines, facilitée par les entités à l'intersection de ces domaines. Par exemple, certaines entreprises spécialisées en logistique feront appel à des fournisseurs de solutions d'IA, réunissant ainsi deux communautés jadis séparées. Il est donc impératif pour les acteurs de l'économie de tirer parti de leurs écosystèmes d'innovation pour accélérer l'adoption de technologies de pointe et de technologies émergentes facilitant la transformation numérique. L'initiative SCALE AI cherche à développer ces collaborations nécessaires à l'intégration de technologies de ruptures. Il est donc pertinent de se questionner sur la capacité du Québec et de SCALE AI à matérialiser ce potentiel sous forme d'innovation et de création de valeur.

Alors que le potentiel de l'IA pour la société est reconnu (OCDE, 2019), son déploiement n'est pas exempt de risques et de préoccupations. En plus des forces et des occasions déjà présentées, certaines faiblesses et menaces doivent aussi être soulignées. Entre autres, malgré un régime fiscal

qui encourage les investissements au Québec (Investissement Québec, 2019), les crédits d'impôt¹⁹ ne sont pas encore ciblés et l'infrastructure appartient à de grandes entreprises étrangères dotées d'un pouvoir de négociation élevé. Cela menace une capture de valeur équitable, ainsi que la rétention de jeunes entreprises et de talents canadiens liés à l'IA. Par exemple, moins de 100 des brevets liés à l'IA développés au Canada en 2017 sont restés sous propriété canadienne (Reynolds, 2019).

Par conséquent, les gouvernements du Canada et du Québec ont appuyé la création d'organisations servant à observer les impacts et les conséquences sociales de l'IA, tels que l'Organisation mondiale de l'intelligence artificielle, aussi appelée OMIA. Ces initiatives sont concernées par les questions largement débattues autour de l'IA, tant les préoccupations éthiques que les risques de déshumanisation (pertes d'emplois, de valeurs, etc.) au profit de la numérisation et de l'automatisation des décisions, des activités et des processus. Ces préoccupations et la difficulté à commercialiser l'IA caractérisent également le paysage canadien. Définir les applications de l'IA, ses occasions commerciales, les mécanismes de rétention des talents qui fonctionnent dans ce domaine, et adopter des comportements d'inclusion et éthiques sont des choses qui pourraient aider à surmonter ces problèmes.

Finalement, rappelons que les supergrappes d'innovation, malgré leur nom, s'apparentent davantage aux écosystèmes d'innovation qu'aux grappes industrielles. Bien que les gouvernements se soient efforcés d'imiter ou de reproduire la Silicon Valley, rares sont ceux qui ont réussi en créant simplement une grappe industrielle de toutes pièces. Il manquait visiblement des éléments à l'analyse pour permettre d'identifier les ingrédients secrets de la recette, dont l'importance de la diversité des parties prenantes. Avec l'initiative des supergrappes d'innovation, délibérément ancrée dans les forces du Canada, le gouvernement fédéral expérimente quelque chose de différent; il vise à encourager la collaboration intersectorielle, ce qui ne sied pas naturellement à la plupart des entreprises, en s'appuyant sur l'adoption de technologies de pointe et émergentes. Au Québec, il sera intéressant de voir ce que le programme des zones d'innovation récemment proposé par le gouvernement québécois permettra de construire en parallèle du programme canadien. Il nous est d'avis que ces zones s'apparenteront, elles aussi, davantage à des écosystèmes d'innovation qu'à des grappes industrielles.

Annexe

		Utilisation de certaines technologies de pointe en 2014 au Québec et dans le reste du Canada															
Code ^a	Secteurs	Total	Taille ^b				Province/région										
			P	M	G	Qc	Ont.	Atl.	RDC								
Identification par radio-fréquence (IDRF)																	
	Toutes les industries sondées	4,6	A	4,0	A	8,0	A	16,0	A	4,4	A	5,6	A	4,4	A	3,6	A
113	Foresterie et exploitation forestière	6,0	B	5,9	A	13,6	C	x	x	5,6	B	5,3	B	17,6	D	4,3	B
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	5,2	B	4,8	A	1,9	A	13,0	B	2,1	A	6,9	B	5,3	A	5,2	A
22	Services publics	8,3	A	6,9	A	0,0	A	20,1	C	10,6	B	7,5	A	11,7	B	3,2	A
31-33	Fabrication	2,9	A	1,6	A	5,5	A	19,7	B	2,4	A	3,6	A	1,1	A	2,8	A
41	Commerce de gros	4,5	A	3,6	A	15,9	B	10,3	B	5,6	A	5,4	A	3,6	A	1,9	A
44-45	Commerce de détail	5,8	B	5,4	A	8,9	B	21,7	E	6,0	B	8,9	B	1,5	A	3,7	B
48-49	Transport et entreposage	9,6	B	9,2	A	10,1	B	19,6	B	7,0	A	8,0	A	18,9	C	9,2	B
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	1,6	A	1,6	A	2,0	A	1,6	A	0,8	A	1,6	A	4,0	A	1,2	A
Réseau intégré de capteurs																	
	Toutes les industries sondées	3,4	A	2,6	A	7,5	A	21,2	A	3,5	A	4,1	A	3,0	A	2,4	A
113	Foresterie et exploitation forestière	0,0	A	0,0	A	0,0	A	x	x	0,0	A	0,0	A	0,0	A	0,0	A
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	7,1	A	4,7	A	8,4	B	32,6	C	7,7	B	16,4	B	5,6	A	6,6	A
22	Services publics	23,6	A	18,2	A	20,9	C	54,4	D	25,0	B	27,3	B	12,6	B	27,4	B
31-33	Fabrication	7,1	A	4,9	A	13,0	A	35,6	B	6,8	A	7,6	A	6,7	A	6,8	A
41	Commerce de gros	4,5	A	4,1	A	5,7	A	13,6	B	4,0	A	6,5	A	3,3	A	1,8	A
44-45	Commerce de détail	0,3	A	0,3	A	0,0	A	0,0	A	0,6	A	0,0	A	0,0	A	0,5	A
48-49	Transport et entreposage	3,0	A	2,0	A	12,1	B	17,2	B	1,2	A	4,7	A	1,3	A	3,4	A
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	2,8	A	2,6	A	7,3	B	6,0	A	5,7	A	1,9	A	3,9	A	1,0	A
Communications sans fil pour la production																	
	Toutes les industries sondées	12,0	A	10,4	A	21,3	A	43,6	B	10,8	A	13,6	A	15,6	A	9,2	A
113	Foresterie et exploitation forestière	10,3	B	10,3	B	0,0	A	x	x	4,8	B	0,0	A	17,6	D	13,1	B
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	19,7	A	16,0	B	10,8	B	68,4	D	23,1	C	24,1	B	21,3	B	13,5	B
22	Services publics	26,7	A	21,5	A	24,3	C	56,3	D	22,4	B	33,5	B	17,4	B	21,0	B
31-33	Fabrication	17,5	A	14,0	A	31,5	A	53,5	B	15,1	A	20,3	A	17,9	B	15,1	A
41	Commerce de gros	11,3	A	9,5	A	26,7	C	40,3	C	10,9	A	13,9	A	13,5	B	5,8	A
44-45	Commerce de détail	7,8	A	7,4	A	8,0	C	31,2	E	7,2	B	5,8	B	16,1	C	7,3	B

48-49	Transport et entreposage	13,6	A	12,0	A	20,4	B	53,0	B	11,3	A	20,4	B	16,6	C	7,2	A
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	11,4	A	11,2	A	17,7	B	12,6	B	11,8	B	12,7	A	10,5	B	9,6	A
Systèmes automatisés pour inspection (par exemple, vision artificielle, à base de laser, rayons X, caméra haute définition (HD) ou à base de capteurs)																	
	Toutes les industries sondées	4,3	A	3,2	A	12,7	A	24,1	A	4,0	A	6,1	A	3,9	A	2,5	A
113	Foresterie et exploitation forestière	0,6	A	0,6	A	0,0	A	x	x	0,0	A	0,0	A	5,9	B	0,0	A
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	6,4	A	4,6	A	1,1	A	31,0	D	9,8	B	9,1	B	6,4	A	4,4	A
22	Services publics	10,6	A	7,0	A	15,1	C	27,8	C	17,4	B	11,6	A	5,8	B	8,3	B
31-33	Fabrication	10,9	A	7,8	A	23,7	A	41,9	B	10,2	A	13,3	A	9,5	A	8,0	A
41	Commerce de gros	3,6	A	3,1	A	8,4	B	10,2	B	1,4	A	5,5	A	6,2	B	1,3	A
44-45	Commerce de détail	1,1	A	0,8	A	6,3	C	8,9	D	1,1	A	2,6	A	0,0	A	0,0	A
48-49	Transport et entreposage	3,0	A	2,4	A	6,9	A	13,4	A	1,9	A	2,9	A	5,2	B	3,0	A
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	2,9	A	2,7	A	6,9	B	8,1	A	4,5	A	3,2	A	0,9	A	2,2	A
Logiciel de traitement de données à grande échelle (par exemple, Hadoop)																	
	Toutes les industries sondées	7,0	A	6,3	A	12,3	A	17,2	A	7,0	A	8,0	A	7,8	A	5,2	A
113	Foresterie et exploitation forestière	2,4	A	2,5	A	0,0	A	x	x	0,0	A	0,0	A	0,0	A	4,3	B
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	5,7	A	4,6	A	7,8	B	16,5	B	15,1	B	5,4	A	4,5	A	5,9	B
22	Services publics	17,2	A	16,0	A	15,1	C	24,8	C	16,3	B	20,5	B	9,7	B	18,5	C
31-33	Fabrication	5,7	A	4,5	A	11,6	A	17,2	A	5,4	A	6,1	A	7,0	A	4,9	A
41	Commerce de gros	6,7	A	6,1	A	13,1	B	17,2	B	4,1	A	9,5	A	9,6	B	3,4	A
44-45	Commerce de détail	6,5	A	6,2	A	9,8	B	16,3	C	8,8	B	5,8	B	7,7	C	4,6	B
48-49	Transport et entreposage	7,1	A	6,5	A	13,6	B	14,1	B	1,6	A	11,9	B	7,8	B	6,4	B
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	10,3	A	9,7	A	19,6	B	20,4	B	11,9	B	11,1	A	9,1	B	8,3	A

Tableau t/2020-c4-1

Source : Statistique Canada, Enquête sur les technologies de pointe 2014 : tableau 27-10-0288-01 – Entreprises utilisant des technologies de pointe, selon l'industrie et la taille de l'entreprise : https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2710028801&request_locale=fr

Notes :

^a Codes SCIAN (2012);

^b Taille : P : Petites entreprises (10 à 99 employés), M : Moyennes entreprises (100 à 249 employés), L : Grandes entreprises (250 employés et plus)

^{A, B, C, D, E, x} Qualité des données excellente (A), très bonne (B), bonne (C), acceptable (D), à utiliser avec prudence (E), omise pour raisons de confidentialité (x).

Les technologies et les politiques publiques en appui à l'essor de l'intelligence artificielle

		Adoption de certaines technologies émergentes en 2017 au Québec et dans le reste du Canada										
Code ^a	Secteurs	Total	Taille ^b				Province/région					
			P	M	G	Atl.	Qc	Ont.	RDC			
Technologie géomatique ou géospatiale												
	Toutes les industries sondées	3,7 ^A	3,2 ^A	5,3 ^A	7,6 ^A	2,6 ^A	4,4 ^A	3,2 ^A	4,0 ^A			
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	5,3 ^A	4,8 ^A	11,0 ^B	5,2 ^A	2,4 ^A	11,7 ^B	0,0 ^E	6,6 ^B			
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	11,4 ^A	10,3 ^A	8,7 ^A	18,7 ^A	3,4 ^A	1,7 ^A	10,5 ^A	13,1 ^A			
22	Services publics	18,2 ^B	12,6 ^B	13,3 ^B	35,8 ^B	0,0 ^E	16,6 ^B	20,4 ^B	18,0 ^B			
23	Construction	3,8 ^A	3,2 ^A	5,8 ^B	13,8 ^A	1,5 ^A	3,6 ^A	2,8 ^A	5,1 ^B			
31-33	Fabrication	1,4 ^A	1,1 ^A	0,9 ^A	4,9 ^A	3,2 ^A	1,8 ^A	1,1 ^A	1,0 ^A			
4x-5x	Industries de services sélectionnées ^c	4,0 ^A	3,5 ^A	6,3 ^A	6,9 ^A	2,8 ^A	5,0 ^A	3,9 ^A	3,5 ^A			
41	Commerce de gros	3,0 ^A	2,7 ^A	4,7 ^A	3,9 ^A	1,3 ^A	2,8 ^A	3,1 ^A	3,2 ^A			
44-45	Commerce de détail	0,1 ^A	0,0 ^E	0,7 ^A	2,1 ^A	0,8 ^A	0,1 ^A	0,1 ^A	0,0 ^E			
48-49	Transport et entreposage	4,2 ^A	3,3 ^A	9,9 ^A	9,8 ^A	4,7 ^A	7,0 ^A	4,8 ^A	1,7 ^A			
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	5,8 ^A	5,7 ^A	6,1 ^A	6,0 ^A	13,0 ^B	4,5 ^A	6,2 ^A	5,3 ^B			
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	13,1 ^A	11,3 ^A	22,1 ^A	12,4 ^A	2,9 ^A	42,5 ^A	2,7 ^A	0,9 ^A			
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	2,6 ^A	2,1 ^A	3,4 ^A	11,7 ^A	3,7 ^A	9,0 ^B	1,0 ^A	0,2 ^A			
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	10,2 ^A	9,7 ^A	12,8 ^A	14,8 ^A	6,3 ^B	8,6 ^B	9,5 ^A	13,0 ^B			
55	Gestion de sociétés et d'entreprises	1,6 ^A	1,3 ^A	0,0 ^E	6,6 ^A	0,0 ^E	0,0 ^E	4,0 ^B	0,9 ^A			
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	4,7 ^A	4,7 ^B	6,0 ^B	2,7 ^A	5,3 ^B	0,2 ^A	6,5 ^B	5,4 ^B			
Intelligence artificielle (IA)												
	Toutes les industries sondées	4,0 ^A	3,2 ^A	7,1 ^A	10,1 ^A	3,2 ^A	5,4 ^A	4,8 ^A	2,0 ^A			
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	1,8 ^A	1,6 ^A	3,2 ^A	2,9 ^A	5,0 ^B	4,6 ^B	0,2 ^A	0,7 ^A			
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	3,7 ^A	1,8 ^A	4,9 ^A	11,3 ^A	3,3 ^A	0,0 ^E	4,0 ^A	4,1 ^A			
22	Services publics	3,4 ^A	0,0 ^E	0,0 ^E	14,2 ^B	0,0 ^E	16,6 ^B	1,6 ^A	2,7 ^A			
23	Construction	0,8 ^A	0,5 ^A	3,4 ^A	3,2 ^A	1,5 ^A	2,6 ^A	0,5 ^A	0,1 ^A			
31-33	Fabrication	2,8 ^A	2,0 ^A	4,5 ^A	6,7 ^A	1,3 ^A	3,4 ^A	2,8 ^A	2,3 ^A			

4x-5x	Industries de services sélectionnées ^b	5,3	A	4,3	A	9,0	A	12,7	A	3,9	A	6,7	A	6,6	A	2,6	A
41	Commerce de gros	3,0	A	2,8	A	2,3	A	7,1	A	1,4	A	2,3	A	4,3	A	1,7	A
44-45	Commerce de détail	2,1	A	1,6	A	6,0	A	3,9	A	4,7	B	2,1	A	2,8	A	0,7	A
48-49	Transport et entreposage	1,6	A	1,1	A	3,8	A	6,0	A	3,9	A	0,5	A	2,8	A	1,0	A
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	16,8	A	16,1	A	14,7	A	25,5	B	22,3	B	19,2	A	19,4	A	8,6	B
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	19,1	A	15,6	A	26,4	A	32,2	A	4,1	A	46,0	B	10,5	A	7,4	B
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	2,1	A	1,9	A	3,4	A	5,1	A	0,0	E	3,6	B	3,1	A	0,2	A
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	11,5	A	10,4	A	14,7	A	23,6	A	6,5	B	9,6	B	15,7	B	7,7	B
55	Gestion de sociétés et d'entreprises	3,2	A	2,1	A	0,0	E	16,4	B	0,0	E	7,1	B	3,8	A	0,9	A
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	4,7	A	3,2	A	13,2	B	6,8	A	0,0	E	8,6	B	5,2	B	1,9	A
Systèmes intégrés d'Internet des objets (IdO)																	
	Toutes les industries sondées	12,2	A	11,4	A	15,6	A	17,8	A	8,6	A	14,3	A	13,8	A	9,3	A
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	13,8	B	13,8	B	13,7	B	16,4	B	2,5	A	4,6	B	18,9	B	17,6	E
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	11,1	A	8,7	A	12,6	A	20,8	A	6,8	B	7,6	A	11,1	A	11,8	A
22	Services publics	18,8	A	7,7	B	26,4	B	44,8	B	25,8	E	16,6	B	24,8	B	7,9	A
23	Construction	16,0	B	16,5	B	10,5	B	17,5	A	8,0	B	20,0	B	11,9	B	18,7	E
31-33	Fabrication	9,6	A	7,4	A	16,1	A	18,7	A	8,8	A	11,5	A	10,8	A	5,2	A
4x-5x	Industries de services sélectionnées ^b	12,0	A	11,1	A	16,7	A	16,7	A	9,3	A	14,6	A	14,8	A	6,6	A
41	Commerce de gros	13,1	A	12,7	A	13,5	A	18,2	A	6,9	A	12,7	A	17,2	A	8,1	B
44-45	Commerce de détail	7,8	A	7,8	A	8,0	A	7,2	A	7,7	B	11,4	B	9,0	B	3,0	A
48-49	Transport et entreposage	11,7	A	10,2	A	19,3	A	21,9	A	12,5	A	14,4	B	14,9	B	6,9	B
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	21,3	A	20,0	A	28,2	A	23,3	B	26,8	B	17,9	A	24,5	A	18,7	B
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	20,6	A	18,9	A	30,8	A	17,8	A	13,4	A	43,8	A	14,2	A	8,0	A
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	6,3	B	5,6	B	7,0	B	18,0	A	0,0	E	0,3	A	9,6	B	6,6	B
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	17,0	A	15,2	A	27,2	B	28,0	A	12,0	B	21,1	B	18,1	B	13,1	B

Les technologies et les politiques publiques en appui à l'essor de l'intelligence artificielle

55	Gestion de sociétés et d'entreprises	6,3	^A	4,0	^A	10,2	^B	19,8	^B	9,0	^B	11,0	^B	5,8	^A	3,3	^A
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	12,5	^B	11,5	^B	20,7	^B	10,0	^A	11,4	^B	11,1	^B	20,1	^B	3,4	^A
Technologie de chaîne de blocs																	
	Toutes les industries sondées	1,4	^A	1,2	^A	2,5	^A	3,0	^A	0,3	^A	3,1	^A	1,3	^A	0,4	
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	0,0	^E	0,0													
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	0,6	^A	0,0	^E	1,0	^A	3,3	^A	0,0	^E	2,1	^A	1,2	^A	0,4	
22	Services publics	2,5	^A	0,0	^E	6,7	^B	7,0	^A	0,0	^E	8,3	^B	1,4	^A	2,7	
23	Construction	0,0	^A	0,0	^E	0,0	^E	1,3	^A	0,0	^E	0,1	^A	0,0	^A	0,0	
31-33	Fabrication	0,5	^A	0,5	^A	0,8	^A	0,6	^A	0,3	^A	0,9	^A	0,4	^A	0,4	
4x-5x	Industries de services sélectionnées ^b	2,1	^A	1,7	^A	3,7	^A	4,3	^A	0,4	^A	4,6	^A	1,8	^A	0,5	
41	Commerce de gros	2,2	^A	2,2	^A	1,6	^A	3,6	^A	0,5	^A	2,4	^A	2,9	^A	1,1	
44-45	Commerce de détail	0,6	^A	0,6	^A	0,0	^E	0,3	^A	0,0	^E	1,9	^A	0,0	^E	0,0	
48-49	Transport et entreposage	1,0	^A	0,6	^A	2,3	^A	4,2	^A	0,0	^E	0,4	^A	2,3	^A	0,5	^A
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	4,3	^A	4,3	^A	3,3	^A	5,7	^A	4,3	^A	5,1	^A	3,4	^A	5,1	^B
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	13,4	^A	12,7	^A	19,6	^A	9,7	^A	1,1	^A	41,5	^A	4,0	^A	1,4	^A
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	0,9	^A	0,6	^A	3,4	^A	1,7	^A	0,0	^E	2,6	^B	0,4	^A	0,6	^A
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	2,7	^A	2,1	^A	5,5	^A	7,5	^A	1,9	^A	4,8	^A	3,3	^A	0,4	^A
55	Gestion de sociétés et d'entreprises	0,0	^E	0,0	^E												
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	1,5	^A	0,6	^A	5,9	^B	3,7	^A	0,0	^E	3,3	^A	1,7	^A	0,2	^A

Tableau t/2020-c4-2

Source : Statistique Canada, Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise 2017 : tableau 27-10-0155-01– Introduction de différents types d'innovation, par industrie et taille de l'entreprise : <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2710015501>

Notes :

^a Codes SCIAN (2012);

^b Taille : P : Petites entreprises (20 à 99 employés), M : Moyennes entreprises (100 à 249 employés), L : Grandes entreprises (250 employés et plus)

^c Ce regroupement de secteurs comprend les codes SCIAN suivants : 41, 44-45, 48-49, 51, 52, 53, 54, 55 et 56;

^d Cette catégorie exclut le code SCIAN 521.

^{A, B, E} Qualité des données : excellente (A), très bonne (B), à utiliser avec prudence (E).

		Adoption de certaines technologies de pointe en 2017 au Québec et dans le reste du Canada															
Code ^a	Secteurs	Total	Taille ^b						Province/région								
			P	M	L	Atl.	Qc	Ont.	RDC								
Technologies de manutention du matériel, de chaîne d'approvisionnement ou de logistique																	
	Toutes les industries sondées	12,7	A	11,8	A	16,1	A	21,0	A	9,8	A	12,5	A	12,0	A	14,4	A
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	20,8	B	20,3	B	26,0	B	22,1	B	7,7	B	10,1	B	13,9	B	34,9	E
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	15,6	A	12,7	B	12,7	A	32,3	A	10,4	B	20,4	A	12,4	A	15,9	A
22	Services publics	8,6	A	6,7	A	0,0	E	18,0	B	16,2	B	8,3	B	9,3	B	6,2	B
23	Construction	12,8	B	12,9	B	10,9	B	17,8	A	8,6	B	10,6	B	8,4	B	18,7	E
31-33	Fabrication	14,6	A	12,2	A	20,3	A	27,2	A	13,8	A	14,8	A	16,3	A	11,4	A
4x-5x	Industries de services sélectionnées ^c	11,7	A	10,9	A	15,4	A	17,9	A	9,4	A	12,2	A	11,4	A	12,1	A
41	Commerce de gros	26,0	A	25,2	A	28,0	A	34,7	A	13,6	A	22,2	A	24,3	A	34,3	B
44-45	Commerce de détail	9,5	A	8,6	A	14,0	B	23,7	A	10,8	B	12,1	B	7,3	B	9,3	B
48-49	Transport et entreposage	21,4	A	19,8	B	30,7	B	30,8	A	17,2	B	23,5	B	22,9	B	19,3	B
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	9,9	A	9,4	A	11,4	A	12,2	A	12,9	B	9,5	A	8,7	A	12,1	B
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	4,9	A	4,7	A	5,0	A	6,3	A	3,7	A	2,9	A	3,4	A	9,7	B
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	9,7	B	9,8	B	6,5	B	14,6	A	3,7	A	12,4	B	11,2	B	6,7	B
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	5,6	A	5,2	A	5,7	A	10,9	A	0,6	A	2,6	A	8,3	A	4,5	A
55	Gestion de sociétés et d'entreprises	3,7	A	3,2	A	7,6	A	3,4	A	9,4	B	3,5	B	4,1	B	2,5	A
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	4,3	A	2,8	A	13,3	B	6,9	A	3,4	B	6,3	B	5,5	B	1,5	A
Technologies de conception ou de contrôle de l'information																	
	Toutes les industries sondées	17,7	A	16,7	A	20,6	A	26,5	A	14,2	A	18,7	A	17,6	A	17,5	A
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	15,5	B	15,7	B	10,8	B	27,9	B	7,6	B	7,8	B	13,5	B	23,0	E
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	12,8	A	7,2	A	18,1	A	34,1	A	6,7	A	12,7	A	10,5	A	13,6	A
22	Services publics	28,6	B	17,2	B	46,9	B	50,1	B	67,7	E	24,1	B	27,0	B	26,7	B
23	Construction	17,5	B	17,2	B	17,9	B	22,9	A	17,8	B	12,4	B	12,9	B	24,4	E
31-33	Fabrication	24,6	A	23,0	A	30,2	A	30,5	A	19,3	A	25,2	A	23,7	A	26,6	B

Les technologies et les politiques publiques en appui à l'essor de l'intelligence artificielle

4x-5x	Industries de services sélectionnées ^c	16,0	A	15,3	A	18,1	A	24,2	A	12,8	A	18,4	A	17,1	A	13,3	A
41	Commerce de gros	20,6	A	21,0	A	17,0	A	21,7	A	8,9	A	24,0	B	20,8	B	19,1	B
44-45	Commerce de détail	8,4	A	8,1	A	8,0	A	19,1	A	13,5	B	9,2	B	7,8	B	7,0	B
48-49	Transport et entreposage	14,9	A	13,3	A	25,0	B	23,5	A	17,4	B	15,5	B	15,7	B	13,5	B
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	28,2	A	28,2	B	24,5	A	33,4	B	31,0	B	26,4	B	22,8	A	39,5	B
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	26,1	A	24,6	A	33,9	A	25,6	A	9,9	A	52,8	A	17,3	B	15,5	B
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	15,0	B	14,4	B	10,2	B	36,1	B	5,5	A	17,3	B	15,9	B	13,3	E
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	25,8	A	25,3	B	26,5	B	33,5	A	15,3	B	29,4	B	27,9	B	21,7	B
55	Gestion de sociétés et d'entreprises	10,5	A	8,4	A	16,2	B	19,8	B	4,8	B	23,1	B	11,1	B	3,3	A
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	13,4	B	11,7	B	22,1	B	18,8	A	8,7	B	12,7	B	18,5	B	7,8	B
Technologies de traitement et de fabrication																	
	Toutes les industries sondées	12,2	A	11,4	A	14,9	A	18,6	A	9,3	A	13,0	A	11,9	A	12,3	A
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	14,8	B	14,5	B	16,4	B	22,2	B	22,4	B	9,8	B	11,9	B	17,8	E
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	14,3	A	12,3	A	10,6	A	27,1	A	7,0	A	12,7	A	16,5	A	14,6	A
22	Services publics	10,1	A	11,6	B	0,0	E	10,8	B	0,0	E	23,1	B	12,4	B	3,2	A
23	Construction	9,9	B	9,5	B	12,0	B	16,2	A	6,9	B	9,5	B	5,9	B	14,3	B
31-33	Fabrication	35,4	A	33,7	A	40,5	A	42,3	A	25,9	A	33,5	A	33,6	A	42,8	B
4x-5x	Industries de services sélectionnées ^c	6,2	A	6,1	A	6,4	A	7,6	A	4,9	A	7,2	A	6,8	A	4,7	A
41	Commerce de gros	15,2	A	15,8	A	11,5	A	12,7	A	8,2	A	16,1	A	15,4	A	15,2	B
44-45	Commerce de détail	3,6	A	3,6	A	3,3	A	5,4	A	4,7	B	6,1	B	2,2	A	2,4	A
48-49	Transport et entreposage	5,2	A	4,9	A	6,4	A	6,8	A	7,4	A	3,1	A	5,3	A	6,2	B
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	7,6	A	7,4	A	6,0	A	11,7	A	18,3	B	7,3	A	5,1	A	11,0	B
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	2,0	A	1,0	A	4,0	A	6,1	A	2,4	A	2,4	A	1,5	A	2,3	A
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	4,4	A	4,3	A	5,0	A	6,7	A	0,0	E	3,6	B	8,2	B	0,6	A
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	5,7	A	5,2	A	7,8	A	10,2	A	1,8	A	4,9	A	8,1	A	3,6	A

55	Gestion de sociétés et d'entreprises	6,5	^A	5,1	^B	13,1	^B	9,9	^B	4,6	^B	3,5	^B	8,9	^B	6,6	^B
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	5,0	^A	4,9	^A	7,3	^B	3,4	^A	2,7	^A	8,6	^B	7,0	^B	0,3	^A
Systèmes de sécurité ou d'authentification évolués																	
	Toutes les industries sondées	13,5	^A	12,4	^A	17,0	^A	22,6	^A	7,9	^A	14,4	^A	13,8	^A	13,3	^A
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	12,4	^B	13,1	^B	6,1	^B	8,3	^A	0,0	^E	2,9	^A	10,4	^B	21,9	^E
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	7,9	^A	3,7	^A	13,3	^A	21,8	^A	10,7	^B	7,2	^A	14,0	^A	6,8	^A
22	Services publics	22,5	^B	14,0	^B	26,9	^B	43,1	^B	0,0	^E	31,9	^B	27,2	^B	14,7	^B
23	Construction	8,1	^B	8,0	^B	8,3	^B	13,0	^A	1,7	^A	11,0	^B	5,7	^B	9,8	^B
31-33	Fabrication	9,8	^A	8,2	^A	14,2	^A	17,7	^A	6,8	^A	9,9	^A	9,2	^A	11,5	^B
4x-5x	Industries de services sélectionnées ^c	15,9	^A	14,7	^A	20,4	^A	26,2	^A	10,5	^A	17,1	^A	17,0	^A	14,5	^A
41	Commerce de gros	15,1	^A	14,7	^A	16,4	^A	19,3	^A	5,9	^A	12,8	^A	14,9	^A	19,3	^B
44-45	Commerce de détail	10,3	^A	9,7	^A	14,1	^B	16,5	^A	8,5	^B	15,4	^B	9,2	^B	7,2	^B
48-49	Transport et entreposage	13,5	^A	12,0	^A	23,3	^B	20,4	^A	11,3	^B	10,7	^A	14,1	^B	15,4	^B
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	30,9	^A	28,4	^B	35,3	^A	46,6	^B	34,7	^B	19,2	^A	32,8	^B	40,2	^B
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	34,8	^A	31,9	^B	43,3	^B	42,0	^A	22,3	^A	53,5	^B	29,1	^B	26,6	^B
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	12,7	^B	10,6	^B	22,2	^B	36,3	^B	14,8	^A	15,6	^B	14,1	^B	8,5	^B
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	21,1	^A	20,0	^B	24,5	^B	32,7	^A	15,7	^B	19,2	^B	25,4	^B	17,1	^B
55	Gestion de sociétés et d'entreprises	9,7	^B	7,9	^B	5,3	^A	29,7	^B	8,8	^B	5,4	^B	8,7	^B	13,2	^B
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	17,5	^B	16,9	^B	18,9	^B	21,8	^A	8,8	^B	16,0	^B	20,0	^B	16,7	^B
Technologies de veille stratégique																	
	Toutes les industries sondées	22,5	^A	20,7	^A	29,2	^A	36,9	^A	19,6	^A	17,9	^A	25,1	^A	23,7	^A
11	Agriculture, foresterie, pêche et chasse	16,1	^B	16,0	^B	16,7	^B	19,0	^B	6,3	^B	3,6	^A	11,5	^B	28,6	^E
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	21,3	^A	14,5	^B	35,4	^A	38,5	^A	17,2	^B	9,1	^A	25,5	^B	22,2	^B
22	Services publics	34,6	^B	23,2	^B	53,6	^B	55,7	^B	25,8	^E	54,7	^B	35,7	^B	27,2	^B
23	Construction	18,6	^B	16,9	^B	30,3	^B	30,4	^A	13,2	^B	9,6	^B	20,1	^B	22,9	^E
31-33	Fabrication	15,8	^A	13,2	^A	22,0	^A	29,2	^A	12,1	^A	12,3	^A	17,7	^A	17,7	^B

Les technologies et les politiques publiques en appui à l'essor de l'intelligence artificielle

4x-5x	Industries de services sélectionnées ^c	25,7	A	23,9	A	31,9	A	41,3	A	24,2	B	22,0	A	28,9	A	25,0	A
41	Commerce de gros	27,3	A	25,9	A	30,5	A	41,9	A	17,2	A	22,3	A	29,9	B	29,4	B
44-45	Commerce de détail	16,9	A	16,3	B	20,0	B	25,7	A	25,6	B	15,1	B	17,3	B	16,0	B
48-49	Transport et entreposage	27,3	B	25,5	B	37,1	B	39,6	A	25,0	B	14,2	B	29,9	B	35,0	B
51	Industrie de l'information et industrie culturelle	47,0	A	46,0	B	48,9	B	52,5	B	54,8	B	35,6	B	51,7	B	50,0	B
52 ^d	Finance et assurances excluant les autorités monétaires	43,7	A	38,7	B	54,4	B	61,8	A	26,9	A	57,1	B	39,9	B	38,7	B
53	Services immobiliers et services de location et de location à bail	19,8	B	17,8	B	28,8	B	44,1	B	22,2	B	15,6	B	20,0	B	22,1	E
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	41,2	A	40,2	B	43,6	B	54,9	A	32,7	B	41,1	B	47,1	B	34,2	B
55	Gestion de sociétés et d'entreprises	18,2	B	17,9	B	10,2	B	31,3	B	33,8	B	13,2	B	11,9	B	23,9	E
56	Services administratifs, de soutien, de gestion des déchets et d'assainissement	17,7	B	14,3	B	32,4	B	31,0	A	11,4	B	11,1	B	23,9	B	15,0	B

Tableau t/2020-c4-3

Source : Statistique Canada, Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise 2017 : tableau 27-10-0155-01– Introduction de différents types d'innovation, par industrie et taille de l'entreprise : <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2710015501>

Notes :

^a Codes SCIAN (2012);

^b Taille : S : Petites entreprises (20 à 99 employés), M : Moyennes entreprises (100 à 249 employés), L : Grandes entreprises (250 employés et plus)

^c Ce regroupement de secteurs comprend les codes SCIAN suivants : 41, 44-45, 48-49, 51, 52, 53, 54, 55 et 56;

^d Cette catégorie exclut le code SCIAN 521.

^{A, B, E} Qualité des données : excellente (A), très bonne (B), à utiliser avec prudence (E).

Références

- Autio, E. et Thomas, L. D. W. (2014). Innovation ecosystems – Implications for innovation management? Dans M. Dodgson, D. M. Gann et N. Phillips (dir.), *The Oxford handbook of innovation management* (p. 204-288). Oxford (Royaume-Uni) : Oxford University Press.
- Beaudry, C. et Solar-Pelletier, L. (2020). *The superclusters initiative: An opportunity to reinforce innovation ecosystems*. IRPP.
- Christensen, C. M. (1997). *The innovator's dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Boston (MA) : Harvard Business School Press.
- Cohen, W. M. et Levinthal, D. A. (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128-152.
- Cohendet, P. et Pénin, J. (2011). Patents to exclude vs. include: Rethinking the management of intellectual property rights in a knowledge-based economy. *Technology Innovation Management Review*, 1(3), 12-17.
- Council of Canadian Academies (CCA). (2018). *Competing in a Global Innovation Economy: The Current State of R&D in Canada*. Ottawa (Canada) : Expert Panel on the State of Science and Technology and Industrial Research and Development in Canada, Council of Canadian Academies.
- Fabiani, S., Schivardi, F. et Trento, S. (2005). ICT adoption in Italian manufacturing: firm-level evidence. *Industrial and Corporate Change*, 14(2), 225-249. doi:10.1093/icc/dth050
- Gassmann, O., Enkel, E. et Chesbrough, H. W. (2010). The future of open innovation. *R&D Management*, 40(3), 213-221. doi:10.1111/j.1467-9310.2010.00605.x
- Innovation Science et Développement économique Canada. (2016). *Un programme d'innovation inclusif : état des lieux*. Gouvernement du Canada. Rapport rédigé pour l'initiative Bâtir un Canada prospère et novateur.
- Investissement Québec. (2019). Why Québec? Retrieved from <https://www.investquebec.com/international/en/why-quebec.html>
- Kourtiti, K., Nijkamp, P. et Arribas, D. (2012). Smart cities in perspective—A comparative European study by means of self-organizing maps. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 25(2), 229-246. doi:10.1080/13511610.2012.660330
- Kramer, M. R. et Porter, M. (2011). Creating shared value. *Harvard Business Review*, 89(1/2), 62-77.
- Mazzucato, M. et Robinson, D. K. R. (2017). Co-creating and directing Innovation Ecosystems? NASA's changing approach to public-private partnerships in low-earth orbit. *Technological Forecasting and Social Change*. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2017.03.034
- Montréal International. (2019). Montréal: Artificial Intelligence serving the common good. Repéré à : <https://www.montrealinternational.com/en/keysectors/artificial-intelligence/>
- Morgan, A., Colebourne, D. et Thomas, B. (2006). The development of ICT advisors for SME businesses: An innovative approach. *Technovation*, 26(8), 980-987. doi:https://doi.org/10.1016/j.technovation.2005.09.001
- Nielsen, M. (2011). *Reinventing discovery: The new era of networked science*. Princeton (NJ) : Princeton University Press.

Les technologies et les politiques publiques en appui à l'essor de l'intelligence artificielle

OCDE. (2018). *Science, technologie et industrie : tableau de bord de l'OCDE 2017*.

OCDE. (2019). *Artificial Intelligence in Society*. Paris (France) : Éditions OCDE.

Rangen, C. (2019). Why Superclusters are Engines of Future growth. Repéré à : <https://www.engage-innovate.com/insights/christian-rangen-on-innovation-superclusters/>

ReflectionAI. (2019). Mapping Canada's unique pioneering AI ecosystem. Repéré à : <http://reflectionai.ca/mapping-canadas-unique-and-pioneering-ai-ecosystem/>

Reynolds, C. (2019, 7 février). Canada needs to commercialize AI, not just do research, industry leaders say. Repéré à : <https://www.cbc.ca/news/canada/kitchener-waterloo/artificial-intelligence-funding-canada-commercialization-1.5009458>.

Saxenian, A. (1994). *Regional Advantage: Culture and Competition in Silicon Valley and Route 128*. Cambridge (MA) : Harvard University Press.

SCALE AI. (2018). *Scale.AI, the AI-Powered Supply Chain Supercluster* [communiqué de presse]. Repéré à : https://scaleai.ca/wp-content/uploads/2017/11/Press-release_SC-announcement_VF_ENG.pdf.

SCALE AI. (2019a). *Scale.AI: About us*. Repéré à : <https://scaleai.ca/about-us/>.

SCALE AI. (2019b). *Scale.AI: Strategic plan*. Repéré à : https://scaleai.ca/wp-content/uploads/2017/11/SCALE_AI-STRATEGIC_PLAN_EN.pdf.

Teece, D. J. (2009). *Dynamic capabilities and strategic management: Organizing for innovation and growth*. Oxford (Royaume-Uni) : Oxford University Press.

UNESCO. (2018). Canada first to adopt strategy for artificial intelligence [communiqué de presse]. Repéré à : http://www.unesco.org/new/en/media-services/single-view/news/canada_first_to_adopt_strategy_for_artificial_intelligence/

Notes

1. Alberta Machine Intelligence Institute.
2. Montréal Institute for Learning Algorithms.
3. Les supergrappes sont des réseaux géographiquement étendus d'organisations regroupées localement et à ce titre s'apparentent davantage aux écosystèmes d'innovation qu'aux grappes industrielles proprement dites. La récente publication de Beaudry et Solar-Pelletier (2020) pour l'IRPP compare les supergrappes aux écosystèmes d'innovation. Nous référons donc le lecteur à ce texte pour en savoir plus sur les écosystèmes d'innovation.
4. La question 39 du questionnaire de *l'Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprise 2017 de Statistique Canada* (tableau 27-10-0155-01 – Introduction de différents types d'innovation, par industrie et taille de l'entreprise : <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2710015501>) demande aux entreprises d'indiquer si elles ont utilisé l'une ou l'autre des technologies de pointe, ou des technologies émergentes suivantes : [Technologies de pointe] Technologies de manutention du matériel, de chaîne d'approvisionnement ou de logistique; Technologies de conception ou de contrôle de l'information; Technologies de traitement et de fabrication; Technologies propres; Systèmes de sécurité ou d'authentification évolués; Technologies de veille stratégique;

Autres types de technologies de pointe; [Technologies émergentes] Nanotechnologie; Biotechnologie; Technologie géomatique ou géospatiale; IA; Systèmes intégrés d'IdO; Technologie de chaîne de blocs; Autres types de technologies émergentes. Ces technologies sont décrites à l'annexe A.2 à la fin du chapitre.

5. Il s'agit d'un document intitulé *Entreprises utilisant des technologies de pointe, selon l'industrie et la taille de l'entreprise*, qui peut être trouvé à cette adresse : https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2710028801&request_locale=fr. Statistique Canada, tableau 27-10-0288-01.
6. Les technologies incluses dans cette enquête sont présentées dans les tableaux qui composent l'annexe de ce chapitre.
7. Dans ce chapitre, les nombres entre crochets [] représentent les codes du Systèmes de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) Canada 2012. La liste complète des codes SCIAN se trouve à l'adresse suivante : <https://www.statcan.gc.ca/fra/sujets/norme/scian/2012/index>. De plus, nous référons le lecteur aux tableaux détaillés cités en notes de bas de tableau pour les données sur les sous-secteurs des industries mentionnées dans les tableaux.
8. Ces deux secteurs ne faisaient pas partie de la base d'échantillonnage de l'*Enquête sur les technologies de pointe* en 2014.
9. Sur les facteurs d'adoption des PME, consulter, par exemple, Morgan, Colebourne et Thomas (2006).
10. Aux fins de comparaison, le PIB du Canada en 2018 était de 1 733 milliards de dollars pour 18,8 millions d'employés en novembre 2018, ce qui correspond à environ 92 000 dollars par employé.
11. Survol du programme des supergrappes d'innovation (consulté en janvier 2020) : <https://www.ic.gc.ca/eic/site/093.nsf/fra/accueil>.
12. Nous référons le lecteur au tableau 27-10-0155-01 – Introduction de différents types d'innovation, par industrie et taille de l'entreprise : <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2710015501>, pour les données sur ces sous-secteurs.
13. L'intelligence artificielle est un « système basé sur une machine qui peut, pour un ensemble donné d'objectifs définis par l'homme, faire des prédictions, des recommandations ou des décisions influençant des environnements réels ou virtuels. Il utilise des entrées de machine et/ou humaines pour percevoir des environnements réels et/ou virtuels; résumer ces perceptions dans des modèles (de manière automatisée, par exemple avec ML ou manuellement); et utiliser l'inférence de modèle pour formuler des options d'information ou d'action. Les systèmes d'intelligence artificielle sont conçus pour fonctionner avec différents niveaux d'autonomie » (OCDE, 2019a).
14. Environ 80 entreprises industrielles, 14 partenaires universitaires et 16 partenaires du secteur public (SCALE AI, 2019).
15. Source : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/190501/dq190501a-fra.htm>
16. Source : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/190501/dq190501a-fra.htm>

Les technologies et les politiques publiques en appui à l'essor de l'intelligence artificielle

17. NGen et SCALE AI sont toutes deux considérées comme des pôles d'innovation et de commercialisation pour l'écosystème d'innovation de l'IA de Waterloo (ReflectionAI, 2019). En outre, avec la supergrappe des technologies numériques, elles sont répertoriées en tant que trois supergrappes créées pour l'IA.
18. Une technologie ou innovation est dite de rupture si son existence, créant un nouveau marché, finit par remplacer une technologie dans le marché (Christensen, 1997).
19. Le crédit d'impôt capital synergie, annoncé dans le cadre du budget 2020-2021 du gouvernement du Québec (section C, mesure 4.1.3), appuie notamment les PME innovantes du secteur de l'intelligence artificielle en favorisant le maillage avec les entreprises établies. Ce crédit d'impôt sera en vigueur le 1^{er} janvier 2021.

Chapitre 5

PROJETS DE TRANSFORMATION NUMÉRIQUE

Bénéfices, enjeux et quelques bonnes pratiques

Simon Bourdeau

Professeur agrégé à l'École des sciences de la gestion de l'Université du Québec à Montréal, chercheur et fellow au CIRANO

Pierre Hadaya

Professeur titulaire à l'École des sciences de la gestion de l'Université du Québec à Montréal et cofondateur du Groupe ASATE

Philippe Marchildon

Professeur agrégé à l'École des sciences de la gestion de l'Université du Québec à Montréal

Résumé

Si elles veulent survivre à la concurrence mondiale, la plupart des organisations d'aujourd'hui doivent prendre le virage numérique. Pour ce faire, ces organisations lancent de vastes projets de transformation numérique et investissent massivement dans les technologies de l'information (TI). Cependant, pour tirer profit de leurs investissements, les organisations doivent effectuer une saine gestion des bénéfices générés par ces projets. Il leur faut reconnaître le potentiel de chaque mesure, instaurer et exécuter un plan de réalisation, évaluer les résultats puis réajuster les paramètres afin d'améliorer la situation. Or, malgré la simplicité apparente de ce processus, la matérialisation des bénéfices découlant de tels projets est souvent

complexe et problématique. Afin d'aider les organisations et leurs gestionnaires à relever cet important défi, le présent chapitre définit ce qu'est un bénéfice, expose quelques catégorisations de bénéfices, décrit ce qu'est la gestion des bénéfices et présente les principaux enjeux ainsi que quelques bonnes pratiques à considérer lors de la réalisation de projets de transformation numérique.

Introduction

Pour survivre à la concurrence mondiale, les organisations, qu'elles soient petites ou grandes, privées ou publiques, manufacturières ou du domaine des services, doivent se transformer et prendre le virage numérique. Par conséquent, le succès des organisations d'aujourd'hui dépendra de la compréhension qu'elles auront de leur environnement (par exemple en ce qui a trait aux changements démographiques, à la mondialisation, aux forces concurrentielles) et de la manière dont elles ajusteront leurs stratégies, leurs structures et leurs infrastructures technologiques (par exemple les technologies mobiles, l'infonuagique, l'intelligence artificielle et l'apprentissage machine, l'Internet des objets). C'est par ailleurs ces infrastructures technologiques qui permettent très souvent aux organisations d'innover, que ce soit en créant de nouveaux produits ou services, en améliorant leurs relations avec leurs clients et leurs fournisseurs, en repensant leurs manières de travailler, etc. Il s'agit donc de l'un des principaux leviers de croissance des organisations (Gurbaxani et Dunkle, 2019), qui lancent aujourd'hui de vastes projets de transformation numérique et investissent massivement dans les technologies de l'information (TI).

Vial (2019) définit la notion de transformation numérique comme le « processus visant à améliorer une entité, en provoquant des modifications importantes de ses propriétés par le biais de combinaisons de technologies de l'information, de la communication et de la connectivité ». Pour leur part, Gurbaxani et Dunkle (2019) définissent la transformation numérique comme étant « la réinvention de la vision et de la stratégie d'une organisation, de sa structure organisationnelle, de ses processus, de ses capacités et de sa culture en les adaptant à l'évolution du contexte technologique global ». Une transformation numérique est donc un type de transformation organisationnelle qui vise précisément à tirer profit des TI. Dans ce contexte,

il est essentiel que les gestionnaires soient en mesure de : 1) reconnaître et anticiper les technologies, les processus, les pratiques et la culture à transformer ; 2) prioriser les investissements dans les technologies et faire des changements organisationnels ; 3) évaluer les impacts potentiels de ces transformations et de ces investissements ; et 4) comprendre comment tirer profit de ces transformations et de ces investissements afin de créer et de capter de la valeur pour leur organisation (Ashurst, 2015 ; Gurbaxani et Dunkle, 2019).

La matérialisation des bénéfices découlant des investissements dans les TI passe habituellement par la réalisation de projets de transformation numérique. Afin de tirer profit de leurs investissements, les organisations doivent donc reconnaître le potentiel d'un projet de transformation numérique, mettre en place et exécuter un plan de réalisation pour ce projet, évaluer les résultats et réajuster le tir au besoin. Or, malgré la simplicité apparente de ce processus, mesurer les gains représente souvent un casse-tête pour les gestionnaires. À titre d'exemple, le gouvernement du Québec et le ministère de la Santé et des Services sociaux tardent à récolter les fruits de l'implantation et de l'utilisation du Dossier clinique informatisé (DCI) au sein des établissements de santé du Québec. En effet, les retombées de cet important projet de transformation numérique ne se sont toujours pas matérialisées et les instances concernées peinent à les quantifier.

Afin d'aider les gestionnaires à relever le défi de la matérialisation des bénéfices, nous portons une attention particulière aux gains qui peuvent résulter d'un projet de transformation numérique bien géré. Plus précisément, ce chapitre définit ce qu'est un bénéfice, expose quelques catégorisations de bénéfices, décrit ce qu'est la gestion des bénéfices et présente les principaux enjeux à considérer lors de la réalisation de projets de transformation numérique. Finalement, quelques bonnes pratiques sont mises de l'avant.

Qu'est-ce qu'un bénéfice découlant de projets de transformation numérique ?

Il existe un large éventail de conceptions et de définitions de ce qu'est un bénéfice découlant de projets de transformation numérique. Cette situation engendre une certaine confusion sur le plan de l'évaluation et de la gestion de ces bénéfices. Par exemple, on considère parfois qu'il s'agit

d'améliorations permettant d'apporter de la valeur à une organisation, non seulement du point de vue des actionnaires, mais également du point de vue des clients, des fournisseurs et de la société en général (Serra et Kunc, 2015). Dans d'autres circonstances, on conçoit les bénéfices comme un avantage mesurable pour le compte d'un groupe particulier et on estime que celui-ci est issu de modifications dans les façons de faire actuelles, ces modifications étant elles-mêmes engendrées par des mécanismes de gestion de projets (Badewi, 2016 ; Badewi et Shehab, 2016). Les bénéfices peuvent également être considérés comme des avantages anticipés perçus (Chwelos, Benbasat et Dexter, 2001). Finalement, on admet aussi parfois qu'ils peuvent avoir un impact stratégique positif (PMI, 2016a, 2016b, 2016c).

Malgré cette grande variété de conceptions et de définitions, il est possible de se baser sur certains éléments consensuels pour formuler la définition suivante : *un bénéfice, dans le cadre d'un projet de transformation numérique, est une amélioration ou un gain mesurable qui profitera à une ou à plusieurs parties prenantes d'un projet de transformation numérique et qui est engendré par les transformations réalisées durant l'exécution du projet ainsi que par l'utilisation de nouvelles TI une fois celles-ci implantées.*

Comment classer les bénéfices découlant de projets de transformation numérique ?

Selon la littérature, un même bénéfice découlant d'un projet de transformation numérique peut être catégorisé de multiples façons. Il peut être classé selon :

- Le *type d'impact* qu'il aura, soit direct, soit indirect (Chwelos, Benbasat et Dexter, 2001). On inclut dans les bénéfices directs les économies de frais d'exploitation ainsi que les gains d'efficacité opérationnelle, alors que les bénéfices indirects se rapportent plutôt aux possibilités qui émergent à la suite de l'implantation et de l'utilisation de nouvelles TI (par exemple dans le cas d'une amélioration du service à la clientèle) ;
- Le *niveau d'impact* qu'il aura, c'est-à-dire le nombre de personnes qui en ressentiront les effets. Il faut ainsi déterminer si le bénéfice aura un impact sur des individus, sur des groupes ou des équipes, sur des organisations ou encore sur l'ensemble de la société (Gable, Sedera et Chan, 2008) ;

Projets de transformation numérique

- La *nature de l'impact* attendu, qu'elle touche à la stratégie (par exemple lorsqu'on décide de fournir aux clients une proposition de valeur unique), à la gestion (par exemple si on accroît l'agilité ou la flexibilité), à l'exploitation (par exemple lorsqu'on diminue les coûts ou qu'on améliore la qualité) ou à la fonctionnalité de l'organisation (par exemple quand on améliore la communication et la collaboration entre les unités) (Farbey, Land et Targett, 1993; Irani et Love, 2000);
- Sa *matérialité*, c'est-à-dire ses propriétés tangibles (par exemple l'amélioration des flux de trésorerie) ou quasi tangibles (par exemple dans les tâches cléricales, lorsqu'on s'assure d'augmenter la précision) ou encore, s'il s'agit d'un bénéfice immatériel, ses propriétés intangibles (par exemple l'amélioration de la prise de décisions) (Ryan et Harrison, 2000);
- Son *degré de précision*, qu'il soit mesurable ou pas, et ce, tant pour les bénéfices financiers que pour les autres bénéfices (Ashurst, 2015; Ashurst, Williams, Robinson-Lamb et Freer, 2011; Ward et Daniel, 2012);
- Le *type de changements et de transformations* que le bénéfice permettra d'effectuer dans l'organisation (Ashurst, 2015; Ward et Daniel, 2012). Ainsi, un bénéfice peut permettre à la fois de faire quelque chose de nouveau (nouveau), d'exercer les activités actuelles de manière améliorée (amélioration) ou d'éliminer certaines activités (arrêt);
- La *source de la mesure* du bénéfice, c'est-à-dire la façon de déterminer s'il s'agit objectivement d'un bénéfice ou si sa mesure est perceptuelle (Coombs, 2015; Coombs, Doherty et Neaga, 2013);
- Le *type d'activités principalement touchées* par le bénéfice dans les organisations, c'est-à-dire les activités primaires ou les activités de soutien (Porter et Millar, 1985).

Devant le grand nombre de catégories de bénéfices découlant de projets de transformation numérique, plusieurs spécialistes estiment qu'elles ne sont pas toutes utiles. Par exemple, la distinction entre des bénéfices tangibles et intangibles ou entre des bénéfices directs et indirects est plutôt floue et crée une certaine confusion (Murphy et Simon, 2002). Par ailleurs, la classification des bénéfices est laborieuse et parfois imprécise malgré la grande variété d'aspects évalués. Il est donc important de souligner qu'il n'existe pas une manière de catégoriser qui soit plus efficace ou meilleure qu'une

autre. Chacune a ses avantages et ses inconvénients. Les gestionnaires devraient donc choisir la méthode la plus efficace pour leur organisation, soit celle qui leur permettra d'établir un plan de réalisation des bénéfices découlant de leurs projets de transformation numérique.

Une approche efficace et englobante pour mesurer les répercussions des bénéfices est de définir pour chacun les trois éléments suivants :

1. *L'effet.* Cette dimension détermine si l'effet du bénéfice est à la hausse, c'est-à-dire qu'il améliore, augmente ou permet quelque chose, ou bien si l'effet du bénéfice est à la baisse, c'est-à-dire qu'il réduit ou élimine quelque chose. Par exemple, augmenter la productivité ou encore améliorer le service à la clientèle sont des effets à la hausse alors que réduire les coûts ou éliminer des postes sont des effets à la baisse.
2. *Le type d'activité visé.* Cette dimension évalue si le bénéfice concernera principalement des activités primaires ou bien des activités de soutien de l'organisation.

Les activités primaires englobent : 1) la logistique entrante (par exemple la réception, l'entreposage, le contrôle d'inventaire, la planification du transport) ; 2) la fabrication ou la réalisation d'un produit ou d'un service ; 3) la logistique sortante (par exemple l'entreposage, le transport, la distribution, la commande) ; 4) la mise en marché et la vente d'un produit ou d'un service (par exemple la publicité, le placement, la promotion) ; et 5) le service à la clientèle et le service après-vente.

Les activités de soutien englobent : 1) les infrastructures organisationnelles (par exemple la gestion générale, la planification, les aspects légaux, les finances, la comptabilité) ; 2) la gestion des ressources humaines (par exemple le recrutement, la formation, le soutien) ; 3) la recherche et le développement ou R-D (par exemple l'amélioration continue, l'innovation) ; et 4) l'approvisionnement et les achats (par exemple le matériel, la technologie) (Porter et Millar, 1985).

3. *L'ampleur de l'impact.* Cette dimension observe si l'impact principal du bénéfice se situera sur le plan stratégique, tactique ou opérationnel.

Les bénéfices stratégiques permettront à l'organisation d'obtenir un avantage compétitif, d'innover, de planifier à long terme et de prendre de meilleures décisions sur le plan stratégique.

Les bénéfices tactiques lui permettront de consacrer ses ressources là où elles seront le plus utiles et de les contrôler, de suivre son mode d'exploitation et de soutenir ses décisions stratégiques.

Quant aux bénéfices opérationnels, ils lui permettront de mieux effectuer ses activités quotidiennes, qui impliquent l'acquisition et la consommation de ressources (Shang et Seddon, 2002).

Qu'est-ce que la gestion des bénéfices découlant de projets de transformation numérique ?

Pour certains chercheurs, la gestion des bénéfices représente un cadre de référence permettant d'accroître la probabilité de succès d'un projet de transformation numérique (Badewi, 2016). Pour d'autres, il s'agit du processus permettant d'organiser et d'évaluer un projet de transformation numérique afin que les avantages anticipés de l'utilisation des TI implantées se matérialisent (Ward et Daniel, 2012). Ici, la gestion des bénéfices découlant d'un projet de transformation numérique représente « l'initiation, la planification, l'organisation, l'exécution, le contrôle, la transition, le soutien des changements organisationnels ainsi que les conséquences découlant des mécanismes de gestion de projet permettant de réaliser les bénéfices prédéfinis du projet de transformation numérique et de s'assurer que ces bénéfices perdurent une fois le projet terminé » (Badewi, 2016, p. 763).

Afin de soutenir les gestionnaires dans leurs efforts de gestion des bénéfices découlant des projets de transformation numérique, plusieurs experts ont développé des outils et des approches (Ashurst, 2015 ; Bradley, 2010 ; Melton, Yates et Iles-Smith, 2008 ; Peppard, Ward et Daniel, 2007 ; Ward et Daniel, 2012 ; Ward, Taylor et Bond, 1996). Ceux-ci diffèrent légèrement, mais la plupart d'entre eux proposent de gérer les bénéfices en suivant un processus en cinq étapes : 1) déterminer les bénéfices ; 2) élaborer un plan de réalisation des bénéfices ; 3) exécuter le plan de réalisation ; 4) évaluer et réviser les résultats ; et 5) rechercher des bénéfices additionnels.

La première étape, qui est l'une des plus importantes, consiste à déterminer les bénéfices escomptés¹ ainsi qu'à établir la façon dont ils seront mesurés. Par ailleurs, à cette étape, il est également essentiel de

cerner les liens entre les investissements se rapportant à un projet de transformation numérique et les transformations organisationnelles nécessaires à la matérialisation des bénéfices. La valeur (Davern et Kauffman, 2000) des bénéfices escomptés est potentielle, c'est-à-dire qu'on peut estimer la valeur maximale qui pourrait être engendrée pour les parties advenant que de nouvelles TI soient implantées et utilisées avec succès. À cette étape, il est donc important de ne pas surestimer cette valeur (voir l'enjeu n° 5 un peu plus loin). La valeur des bénéfices réalisés peut être établie et mesurée lors de l'étape 4 du processus de gestion des bénéfices, après que les nouvelles TI ont commencé à servir. La matérialisation des bénéfices escomptés se fait donc en fonction de plusieurs facteurs (Doherty, Ashurst et Peppard, 2012), dont le succès du projet et l'utilisation adéquate des nouvelles TI.

La deuxième étape du processus est d'attribuer l'imputabilité de la réalisation des bénéfices aux différentes parties et de planifier les transformations et les changements essentiels à la matérialisation des bénéfices.

La troisième étape consiste à développer et à implanter de nouvelles TI ainsi qu'à effectuer les changements et les transformations complémentaires.

L'objectif de la quatrième étape est d'évaluer les bénéfices et de comparer les résultats obtenus aux bénéfices escomptés, ces derniers ayant été établis lors de l'étape de détermination.

Pour la cinquième et dernière étape, il s'agit de mettre en évidence des bénéfices qui n'avaient pas été prévus et de documenter les leçons apprises.

Malgré la relative simplicité du processus de gestion des bénéfices découlant de projets de transformation numérique, la mise en place des transformations nécessaires et l'atteinte des résultats escomptés peuvent représenter un important casse-tête pour les gestionnaires. Afin de les aider à mieux planifier ce type de projets et à maximiser les effets de leurs investissements en TI, les prochaines sections présentent les enjeux à considérer et certaines pratiques à adopter.

Dix enjeux à considérer pour assurer une saine gestion des bénéfices des projets de transformation

Enjeu n° 1 – Les TI, des leviers pour soutenir les transformations numériques

« Une fois les TI implantées, les bénéfices vont suivre » (Peppard, 2007). Trop souvent cet adage est suivi par les gestionnaires. Or, les bénéfices ne découlent pas directement des TI, mais plutôt de leur utilisation. Les TI doivent permettre aux individus et aux organisations de faire les choses différemment. Les bénéfices découlant de projets de transformation numérique ne se matérialiseront que si les TI déployées permettent aux utilisateurs d'effectuer leurs tâches et leur rôle plus efficacement grâce à une amélioration de l'information qui est mise à leur disposition (Ashurst, 2015, 2012). C'est par l'entremise de transformations et de changements organisationnels soutenus par les nouvelles TI que les bénéfices se matérialiseront. En effet, à elles seules, les TI n'ont aucune valeur inhérente, elles ne représentent que des coûts. Les bénéfices découleront de l'utilisation efficace des TI déployées dans le cadre d'un projet de transformation numérique et des changements organisationnels qui y seront associés. De plus, il est important de rappeler que mettre en œuvre un projet de transformation numérique sans changer les façons de faire équivaut à jeter de l'argent par les fenêtres, car la gestion des bénéfices et la gestion du changement sont inextricablement liées (Peppard, 2007).

Enjeu n° 2 – La matérialisation des bénéfices, due aux bénéficiaires, pas aux livreurs de projets

La matérialisation des bénéfices découlant de projets de transformation numérique nécessite généralement une étroite collaboration entre le département de TI et les unités d'affaires. Très souvent, dans le cadre de tels projets, le département de TI a la responsabilité de gérer et de livrer les projets alors que les unités d'affaires, en tant que bénéficiaires, doivent de leur côté formuler leurs besoins et leurs attentes. Or, ce n'est pas un département de TI qui, en fournissant des solutions de TI, engendrera la matérialisation des bénéfices escomptés par les unités d'affaires. Ces

dernières doivent plutôt utiliser les ressources que leur offre le département de TI de leur organisation afin de transformer leurs façons de faire, c'est-à-dire les processus, les stratégies, la structure dans laquelle elles travaillent, etc. (Peppard, 2007 ; Peppard, Ward et Daniel, 2007).

Dès l'initiation d'un projet de transformation numérique, l'imputabilité de la réalisation des bénéfices doit être partagée entre le département de TI, les unités d'affaires impliquées et l'ensemble des autres parties du projet. Les organisations doivent passer d'une culture de livraison de TI, dans laquelle l'accent est mis sur les coûts et les dépenses, sur les plans d'implantation de TI et où les parties sont assujetties et subissent les projets, à une culture de livraison de bénéfices où on insiste sur la valeur, sur des analyses de rentabilité et de faisabilité, et où toutes les parties sont impliquées et imputables (Ashurst, 2015).

Enjeu n° 3 – Ne jamais oublier les investissements complémentaires

Sans investissements complémentaires, les probabilités de voir les bénéfices escomptés d'un projet de transformation numérique se matérialiser sont faibles. Ces investissements peuvent prendre la forme, entre autres, de formation et de soutien aux utilisateurs, de réalignement des tâches avec les nouvelles TI, de révision du cadre de gouvernance (Ward et Daniel, 2012). Les investissements initiaux dans des projets de TI peuvent être considérés comme des semences alors que les investissements complémentaires représentent l'engrais nécessaire pour que les premiers fleurissent (Kohli et Devaraj, 2004).

Enjeu n° 4 – La nature des bénéfices variera selon le type de projet réalisé

La nature des bénéfices escomptés variera en fonction du type de projets de transformation numérique. Un projet de type transactionnel, par exemple pour automatiser des processus ou augmenter le volume des transactions, n'engendrera pas les mêmes bénéfices qu'un projet de type informationnel ou stratégique ou qu'un projet d'infrastructure (Aral et Weill, 2007). De plus,

la nature des bénéfices escomptés variera selon le type des déclencheurs de projets : ceux qui visent à résoudre des problèmes et ceux qui visent à profiter d'occasions particulières ou d'innovations (Ward et Daniel, 2012).

Enjeu n° 5 – Ne pas surestimer les bénéfices anticipés lors de la sélection des projets

Lors du processus de sélection des projets de transformation numérique, il arrive souvent qu'on surestime les bénéfices afin d'assurer le financement. Bien qu'il soit parfois difficile d'évaluer les bénéfices anticipés pour un projet, il est primordial de porter une attention particulière aux justifications et aux arguments présentés, qui doivent être bien décrits, documentés et validés (PMI, 2016c).

Enjeu n° 6 – À chaque bénéfice sa propre temporalité

La matérialisation des bénéfices peut prendre quelques semaines, quelques mois, voire quelques années. Ceci s'explique par le fait que les TI qui sont déployées dans le cadre d'un projet ne représentent qu'un seul des multiples éléments de l'équation permettant aux bénéfices de se matérialiser, par exemple les investissements complémentaires, la gestion du changement, le leadership, les individus et la stratégie. Il est donc essentiel, lors de l'évaluation des bénéfices découlant de projets de transformation numérique, de considérer une échéance temporelle qui tiendra compte de ces délais parfois longs, mais inévitables (Peppard, Ward et Daniel, 2007).

Enjeu n° 7 – Ne pas mesurer uniquement les coûts lors de l'évaluation de la rentabilité d'un projet

Quantifier les bénéfices d'un projet de transformation numérique peut être ardu, mais c'est essentiel pour fournir un portrait précis de la rentabilité des investissements. Il arrive très souvent que les gestionnaires, lorsqu'ils calculent le rendement du capital investi (RCI) d'un projet, soient principalement préoccupés par le dénominateur (c'est-à-dire la diminution des dépenses) et, ce faisant, qu'ils oublient le numérateur, qui est pourtant la façon dont leurs projets peuvent transformer leur organisation, générer des revenus, leur permettre d'améliorer leurs méthodes ou d'offrir de nouveaux

services ou de nouveaux produits, etc. Il est essentiel que les gestionnaires se penchent sur les deux côtés de la médaille « rentabilité », c'est-à-dire qu'ils tiennent compte à la fois des coûts et des bénéfices (Peppard, Ward et Daniel, 2007 ; Shang et Seddon, 2002), pour que les organisations puissent faire les choses autrement.

Enjeu n° 8 – Tenir compte des risques lors de la sélection des projets

En plus de mesurer l'ensemble des coûts et des bénéfices, il est également essentiel que les gestionnaires prennent en considération les risques technologiques, financiers, organisationnels et humains lors de la sélection d'un projet de transformation numérique, car ces risques peuvent directement affecter la réalisation d'un projet ainsi que la matérialisation des bénéfices escomptés (Kutsch, Denyer, Hall et Lee-Kelley, 2013 ; Schmidt, Lyytinen, Keil et Cule, 2001). Or, ce serait une erreur de ne pas prendre en considération ces risques lors de l'identification et de l'évaluation des bénéfices puisqu'il existe généralement une corrélation positive entre le niveau des bénéfices anticipés et le niveau des risques (Flyvbjerg et Budzier, 2011).

Enjeu n° 9 – Éviter d'évaluer les bénéfices de chaque projet en silo

Les gestionnaires doivent être vigilants afin d'éviter d'évaluer les bénéfices de chaque projet de transformation numérique en silo. De plus, ils doivent prendre en considération le contexte organisationnel dans lequel chaque projet est réalisé. Effectivement, les bénéfices escomptés d'un projet peuvent être influencés par d'autres projets ou, à l'inverse, avoir une incidence sur d'autres projets. Par exemple, les bénéfices liés à deux projets distincts pourraient être bonifiés si ces projets visent à mettre en place des transformations complémentaires. Bref, il est important de mettre en perspective un projet et ses bénéfices escomptés avec l'ensemble des autres projets actuels et à venir afin d'en faire une meilleure évaluation.

Enjeu n° 10 – Équilibrer la gestion des bénéfices et la gestion de projet

La gestion des bénéfices et la gestion de projet sont deux pratiques complémentaires, et leurs champs de responsabilités sont partagés. La gestion des bénéfices a une portée plus large et une durée beaucoup plus importante que la gestion de projet, car elle doit permettre de reconnaître les bénéfices avant que ne débute la gestion du projet en plus de soutenir la matérialisation des bénéfices après sa clôture. Par contre, ce serait une erreur de les dissocier et de les gérer séparément (Badewi, 2016).

Trois bonnes pratiques

Pratique n° 1 – Établir un cadre d'analyse

Il est fortement recommandé, avant d'amorcer la détermination des bénéfices d'un projet de transformation numérique, qui est par ailleurs l'une des premières étapes du processus de gestion des bénéfices, et avant d'évaluer les retombées d'un investissement en TI, de bien établir le cadre d'analyse sous-jacent. En effet, plusieurs experts prétendent que de déterminer les bénéfices escomptés d'un projet de transformation numérique sans clairement définir la perspective adoptée n'a aucun sens et ne peut que diminuer les probabilités de matérialisation desdits bénéfices. Le tableau 5-1 présente une liste de sept questions permettant de guider les gestionnaires dans la mise en place d'un tel cadre d'analyse (Shang et Seddon, 2002).

Questions permettant d'établir un cadre d'analyse pour la détermination et la gestion des bénéfices	
Question	Exemples de réponses possibles
Q1. Par rapport à quelles perspectives seront déterminés les bénéfices escomptés ?	Celle des utilisateurs ; celle des gestionnaires ; celle des employés de soutien.
Q2. Quel est le domaine d'activité ?	Le service des TI ; les ressources humaines.
Q3. Quel est le niveau d'analyse ?	Unité d'affaires ; service ; organisation.
Q4. Quel est l'objectif de l'évaluation ?	Sélectionner le projet ; rechercher des partenaires.
Q5. Quelle est la perspective temporelle ?	L'année après l'implantation de la nouvelle infrastructure de TI.
Q6. Quels types de données seront utilisés ?	Des données objectives ; des données perceptuelles ; les deux types de données.
Q7. À qui ou à quoi se référera-t-on pour déterminer les bénéfices ?	À un ancien projet ; à un expert indépendant ; à une analyse de rentabilité (<i>Business Case</i>).

Source : Shang et Seddon (2002).

Tableau t/2020-c5-1

Pratique n° 2 – Utiliser les bonnes questions lors du développement du plan de réalisation des bénéfices

Pour plusieurs experts, la matérialisation des bénéfices d'un projet de transformation numérique passe par l'élaboration d'un plan de réalisation. Généralement, un plan de réalisation définit (PMI, 2016a) :

- Les bénéfices, les hypothèses associées et la façon dont chaque bénéfice sera atteint ;
- Les mesures, y compris l'indicateur de performance et la procédure permettant de mesurer les progrès faits pour réaliser les bénéfices ;
- Les rôles et les responsabilités nécessaires pour gérer les bénéfices ;
- La façon dont les bénéfices et les capacités organisationnelles qui en découlent seront transférés du projet aux opérations afin d'assurer la matérialisation des bénéfices ;
- La façon dont les capacités organisationnelles qui en résultent seront transférées aux individus, aux groupes ou aux organisations responsables de la pérennisation des bénéfices.

Puisque l'élaboration d'un plan de réalisation des bénéfices peut représenter une tâche complexe et ardue, une bonne pratique est de se poser plusieurs questions clés avant (Ashurst, 2015 ; Badewi, 2016 ; Peppard, Ward et Daniel, 2007 ; Ward et Daniel, 2012).

Question n° 1 : Pourquoi devons-nous réaliser ce projet de transformation numérique ?

L'idée sous-jacente à cette question est de comprendre les motifs fondamentaux d'un projet de transformation numérique. Il s'agit de mettre en évidence les problèmes que le projet tentera de résoudre ou les occasions dont il essaiera de tirer profit, et ce, afin d'établir les bénéfices clés escomptés. Par ailleurs, pour répondre à cette question, il est important de contextualiser le projet à l'aide de différents outils d'analyse (par exemple PESTEL², FFOM³, chaînes de valeur⁴, etc.) et de désigner les parties. De plus, afin d'évaluer rapidement si un projet représente une occasion organisationnelle ou non, Ashurst (2015) suggère de répondre succinctement (en une page) aux cinq questions suivantes :

- Pourquoi serait-il pertinent de réaliser ce projet (quelles sont les contributions stratégiques et les contributions sur le plan du portefeuille de TI qu'il apportera) ?
- Quels sont les principaux bénéfices escomptés du projet (pour le client, pour les autres parties et pour l'organisation dans son ensemble) ?
- Qui seront les acteurs clés de ce projet (pour aller de l'avant à partir d'ici) ?
- Comment ce projet utilisera-t-il les ressources et les capacités de l'organisation comme levier pour la réalisation de bénéfices ?
- Quels sont les principaux domaines d'incertitude et de risque ?

Question n° 2 : Quelles sont les améliorations nécessaires et possibles grâce à ce projet ?

Une fois le pourquoi du projet de transformation numérique établi, il importe de définir le « quoi ». En d'autres termes, il s'agit de recenser les améliorations qu'il est possible de réaliser ainsi que celles qui sont nécessaires. Lors de cette recension, il est essentiel d'impliquer l'ensemble

des parties afin de tenir compte de leur point de vue. Cette façon de faire devrait permettre de comprendre les améliorations à apporter au projet, de faciliter leur acceptation par l'ensemble des parties et d'établir un rapport entre les améliorations et les bénéfices escomptés. Par ailleurs, les améliorations recensées peuvent servir à établir les objectifs du projet.

Question n° 3 : Quels seront les bénéfices anticipés pour chaque partie advenant que les objectifs du projet sont atteints ?

Lors de la recension des améliorations, il faut également déterminer comment celles-ci se traduiront en bénéfices pour chacune des parties. Ainsi, le lien de causalité entre une amélioration et ses bénéfices escomptés doit être décrit et justifié (Ashurst, 2015 ; Ward et Daniel, 2012). Cet exercice permettra de déterminer si le projet peut réellement mener aux bénéfices prévus. De plus, l'exercice exige que les mesures et les critères d'atteinte des bénéfices soient déterminés dès le début d'un projet afin de faciliter l'évaluation de ces derniers au fil du temps.

Question n° 4 : Qui sera le propriétaire de chaque bénéfice et qui sera responsable de sa matérialisation ?

Comme mentionné précédemment, la matérialisation des bénéfices escomptés d'un projet de transformation numérique passe par la responsabilisation de toutes les parties. Or, lors de l'établissement d'un plan de réalisation des bénéfices, il est essentiel de nommer minimalement un « propriétaire » pour chacun des bénéfices. Pour ce faire, des matrices des responsabilités du type de RACI⁵ peuvent aider, tant pour définir les rôles et les responsabilités de chacune des parties du projet que dans la phase post-projet. Sans propriétaire et sans l'imputabilité qui s'y rattache, il y a peu de chances que les bénéfices escomptés se réalisent, car personne ne souhaitera utiliser les nouvelles TI livrées par le projet.

Question n° 5 : Quels changements ou transformations devront être effectués afin de réaliser chacun des bénéfices ?

La clé de la réalisation des bénéfices des projets de transformation numérique est d'établir des liens explicites entre chaque bénéfice et les changements ou les transformations requis afin que les bénéfices se

matérialisent. Comme mentionné précédemment, il est important que les nouvelles TI déployées pour la mise en place d'un projet soient décrites. Mais il est encore plus important de décrire les transformations ou les changements organisationnels devant accompagner ces nouvelles TI (par exemple les changements ou les transformations touchant les processus d'affaires, les rôles et les responsabilités ou encore la gouvernance des données).

Question n° 6 : De quelle manière et à quel moment les transformations ou les changements déterminés peuvent-ils être effectués ?

Une fois les transformations ou les changements nécessaires déterminés, l'organisation doit évaluer sa capacité à les mener à terme. Un volet temporel est bien sûr essentiel afin d'établir la séquence à réaliser.

Pratique n° 3 – Impliquer l'ensemble des parties

Pour être en mesure de faire une gestion optimale des bénéfices, il est fortement recommandé d'impliquer l'ensemble des parties dans le processus de détermination des bénéfices escomptés. Ce faisant, chaque partie sera en mesure de répondre à la question suivante : qu'est-ce que j'y gagne ? (Ward et Daniel, 2012). Les réponses à cette question permettront de désigner les parties qui auront le plus à gagner ou à perdre d'un projet de transformation numérique ainsi que les partisans et les détracteurs du projet.

Par ailleurs, en offrant une voix à l'ensemble des parties, les responsables d'un projet de transformation numérique pourront avoir une perspective plus étendue des tenants et aboutissants. Cela pourrait leur permettre de trouver des bénéfices escomptés auxquels ils n'avaient peut-être pas pensé. Cette ouverture fournira davantage d'éléments d'information pour appuyer la sélection d'un projet. Finalement, en participant au processus de détermination, les parties prendront conscience des changements qu'elles devront mettre en place pour utiliser efficacement les nouvelles TI et ainsi engendrer les bénéfices escomptés.

Conclusion

Il est aujourd'hui reconnu que toute organisation, qu'elle soit petite ou grande, privée ou publique, manufacturière ou dans le domaine des services, doit se transformer afin de prendre le virage numérique et, pour ce faire, investir dans les TI. Or, pour tirer profit de ses investissements dans des projets de transformation numérique, il est essentiel qu'une organisation gère bien les bénéfices qu'elle tire de ces projets. Il ne faut jamais oublier que les TI ne sont que des leviers qui permettront aux unités d'affaires concernées, en collaboration avec les départements TI, d'engendrer (ou pas) des bénéfices. Afin que les bénéfices des projets TI se matérialisent, il est essentiel pour les organisations et l'ensemble des parties prenantes concernées de bien comprendre pourquoi un projet TI est entrepris, comment il sera effectué et surtout ce qui doit être effectué (par exemple les investissements complémentaires, la révision des processus et de la gouvernance, l'identification des bénéfices, l'imputabilité, etc.).



Références

Aral, S. et Weill, P. (2007). IT assets, organizational capabilities, and firm performance: How resource allocations and organizational differences explain performance variation. *Organization Science*, 18(5), 763-780. doi:10.1287/orsc.1070.0306.

Ashurst, C. (2015). *Competing with IT: Leading a Digital Business*. Londres (Royaume-Uni) : Palgrave Macmillan.

Ashurst, C. (2012). *Benefits Realization from Information Technology*. Londres (Royaume-Uni) : Palgrave Macmillan.

Ashurst, C., Williams, S., Robinson-Lamb, J. et Freer, A. (2011). Benefits-led IT: Building the organisational capability. *UK Academy for Information Systems Conference Proceedings 2011*. Repéré à <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1005&context=ukais2011>.

Badewi, A. (2016). The impact of Project Management (PM) and Benefits Management (BM) practices on project success: Towards developing a project benefits governance framework. *International Journal of Project Management*, 34(4), 761-778. doi:10.1016/j.ijproman.2015.05.005.

Badewi, A. et Shehab, E. (2016). The impact of organizational project benefits management governance on ERP project success: Neo-institutional theory perspective. *International Journal of Project Management*, 34(3), 412-428. doi:10.1016/j.ijproman.2015.12.002.

Bradley, G. (2010). *Benefit Realisation Management: A practical guide to achieving benefits through change* (2^e éd.). Abingdon (Royaume-Uni) : Routledge.

Projets de transformation numérique

Chwelos, P., Benbasat, I. et Dexter, A. S. (2001). Research report: Empirical test of an EDI adoption model. *Information Systems Research*, 12(3), 304-321. doi:10.1287/isre.12.3.304.9708.

Coombs, C. R. (2015). When planned IS/IT project benefits are not realized: A study of inhibitors and facilitators to benefits realization. *International Journal of Project Management*, 33(2), 363-379. doi:10.1016/j.ijproman.2014.06.012.

Coombs, C. R., Doherty, N. F. et Neaga, I. (2013). Measuring and managing the benefits from IT projects: A review and research agenda. Dans Owusu, G., O'Brien, P., McCall, J. et Doherty, N. (dir.), *Transforming Field and Service Operations* (p. 257-269): Springer.

Davern, M. J. et Kauffman, R. J. (2000). Discovering potential and realizing value from information technology investments. *Journal of Management Information Systems*, 16(4), 121-143. doi:10.1080/07421222.2000.11518268.

Doherty, N. F., Ashurst, C. et Peppard, J. (2012). Factors affecting the successful realisation of benefits from systems development projects: Findings from three case studies. *Journal of Information Technology*, 27(1), 1-16. doi:10.1057/jit.2011.8.

Farbey, B., Land, F. et Targett, D. (1993). *How to Assess your IT Investment: A Study of Methods and Practice*. Oxford : Butterworth-Heinemann.

Flyvbjerg, B. et Budzier, A. (2011, septembre). Why your IT project may be riskier than you think. *Harvard Business Review*, 89, 23-25. Repéré à <https://hbr.org/2011/09/why-your-it-project-may-be-riskier-than-you-think>.

Gable, G., Sedera, D. et Chan, T. (2008). Re-conceptualizing Information System success: The IS-impact measurement model. *Journal of the Association for Information Systems*, 9(7), 377-408. doi:10.17705/1jais.00164.

Gurbaxani, V. et Dunkle, D. (2019). Gearing up for successful Digital Transformation. *MIS Quarterly Executive*, 18(3), 209-220. doi:10.17705/2msqe.00017.

Irani, Z. et Love, P. E. D. (2000). The propagation of technology management taxonomies for evaluating investments in information systems. *Journal of Management Information Systems*, 17(3), 161-178. doi:10.1080/07421222.2000.11045650.

Kohli, R. et Devaraj, S. (2004). Realizing the business value of information technology investments: An organizational process. *MIS Quarterly Executive*, 3(1). Repéré à <https://aisel.aisnet.org/misqe/vol3/iss1/6/>.

Kutsch, E., Denyer, D., Hall, M. et Lee-Kelley, E. (2013). Does risk matter? Disengagement from risk management practices in information systems projects. *European Journal of Information Systems*, 22(6), 637-649. doi:http://dx.doi.org/10.1057/ejis.2012.6.

Melton, T., Yates, J. et Iles-Smith, P. (2008). *Project Benefits Management: Linking projects to the Business*. XXX : Butterworth-Heinemann.

Murphy, K. E. et Simon, S. J. (2002). Intangible benefits valuation in ERP projects. *Information Systems Journal*, 12(4), 301-320. doi:10.1046/j.1365-2575.2002.00131.x.

Peppard, J. (2007). The conundrum of IT management. *European Journal of Information Systems*, 16(4), 336-345. doi:10.1057/palgrave.ejis.3000697.

Peppard, J., Ward, J. et Daniel, E. (2007). Managing the realization of business benefits from IT investments. *MIS Quarterly Executive*, 6(1). Repéré à https://www.researchgate.net/publication/42795451_Managing_the_realization_of_business_benefits_from_IT_investments.

PMI. (2016a). *Benefits realization management framework*. Repéré à <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/series/benefits-realization/benefits-realization-management-frameworkPMI>.

PMI. (2016b). *Beyond the project: Sustain benefits to optimize business value*. Repéré à <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/pulse/sustain-project-benefits-optimize-value>.

PMI. (2016c). *The strategic impact of projects: Identify benefits to drive business results*. Repéré à <https://www.pmi.org/learning/thought-leadership/pulse/identify-benefits-business-results>.

Porter, M. E. et Millar, V. E. (1985, juillet). How information gives you competitive advantage. *Harvard Business Review*, 149-160. Repéré à <https://hbr.org/1985/07/how-information-gives-you-competitive-advantage>.

Ryan, S. D. et Harrison, D. A. (2000). Considering social subsystem costs and benefits in information technology investment decisions: A view from the field on anticipated payoffs. *Journal of Management Information Systems*, 16(4), 11-40. doi:10.1080/07421222.2000.11518264.

Schmidt, R., Lyytinen, K., Keil, M. et Cule, P. E. (2001). Identifying software project risks: An international Delphi study. *Journal of Management Information Systems*, 17(4), 5-36. doi:10.1080/07421222.2001.11045662.

Serra, C. E. M. et Kunc, M. (2015). Benefits Realisation Management and its influence on project success and on the execution of business strategies. *International Journal of Project Management*, 33(1), 53-66. doi:10.1016/j.ijproman.2014.03.011.

Shang, S. et Seddon, P. B. (2002). Assessing and managing the benefits of enterprise systems: The business manager's perspective. *Information Systems Journal*, 12(4), 271-299. doi:10.1046/j.1365-2575.2002.00132.x.

Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 118-144. doi:10.1016/j.jsis.2019.01.003.

Ward, J. et Daniel, E. (2012). *Benefits Management: How to Increase the Business Value of Your IT Projects* (2^e éd.). Chichester (Royaume-Uni) : John Wiley & Sons.

Ward, J., Taylor, P. et Bond, P. (1996). Evaluation and realisation of IS/IT benefits: An empirical study of current practice. *European Journal of Information Systems*, 4(4), 214-225. doi:10.1057/ejis.1996.3.

Notes

1. Il est toujours question, à la première étape du plan, de bénéfices escomptés. Les bénéfices réalisés seront évalués plus tard.
2. L'outil PESTEL et les analyses qui s'y rattachent permettent de faire une analyse exhaustive de l'environnement externe d'une organisation en portant une attention particulière aux composantes politique, économique, sociale, technologique, environnementale et légale (comme l'indique l'acronyme PESTEL).
3. L'outil d'analyse FFOM est conçu pour la planification et permet de déterminer les forces et les faiblesses d'une organisation ainsi que les occasions (l'organisation utilise l'anglicisme *opportunités*) qui s'offrent à elle et les menaces auxquelles elle est exposée (comme l'indique l'acronyme FFOM).
4. Il est question ici de l'outil chaînes de valeur dans le sens où l'entend Michael Porter, ou de *result chain*.
5. La matrice RACI, fréquemment utilisée en gestion de projet, est un outil servant à définir les rôles et les responsabilités de chacun dans un tel contexte. L'acronyme RACI correspond aux mots anglais suivants : *responsible*, *accountable*, *consulted* et *informed*. En d'autres termes, cette matrice permet de préciser qui, dans un projet, est responsable des tâches à accomplir, qui doit répondre de la complétion ou non de ces tâches, qui doit être consulté (de qui on doit obtenir l'opinion) et qui doit être informé de la progression du projet.

Chapitre 6

COLLABORATION ET INNOVATION : COMMENT LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE CHANGE LA DONNE

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

Majlinda Zhegu

Professeure à l'École des sciences de la gestion de l'Université du Québec à 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, chercheuse et fellow au CIRANO

Résumé

La transformation numérique bouleverse plusieurs pans de la société. Notamment, la démocratisation des téléphones intelligents et de l'accès à Internet, de même que les différentes avancées technologiques, entraînent une « destruction créatrice » qui affecte en profondeur l'ensemble des secteurs économiques. La transformation numérique vient aussi affecter directement l'innovation, qui est de plus en plus appelée à être ouverte au sein d'écosystèmes forts. Les technologies numériques offrent de nouveaux outils qui viennent faciliter cette collaboration, qui n'est pas

non plus sans enjeux, notamment en ce qui a trait à la propriété intellectuelle. Ce chapitre présente les concepts d'innovation et d'innovation ouverte, ainsi que certaines technologies numériques, leur niveau d'adoption dans différents secteurs et leurs impacts économiques. Plusieurs encadrés offrent des exemples comme les hackatons en santé, les villes intelligentes et l'aérospatiale numérique.

La transformation numérique affecte l'ensemble des secteurs de la société, et ce, tant du point de vue économique qu'environnemental ou humain. En rendant plus rapides et efficaces les échanges de données de toutes sortes, elle contribue à accroître la capacité des communautés et des organisations à créer de la valeur grâce à la collaboration d'individus et de machines interconnectées. La transformation numérique vient modifier les attentes et les comportements des consommateurs et remet en question les modèles d'affaires des entreprises ainsi que les politiques publiques. Par exemple, les plateformes comme Airbnb imposent la désintermédiation de l'activité économique en mettant directement en contact des usagers, venant perturber le secteur de l'hôtellerie, mais également les lois qui le régissent, et ce, sans posséder d'immeubles locatifs. Le même constat est fait quant à l'industrie du taxi, bouleversée par Uber et Lyft, deux entreprises qui ne gèrent pas de flottes de véhicules, mais bien des groupes de conducteurs. Wikipédia est l'exemple même de la transformation numérique collaborative : des bénévoles du monde entier travaillent à bâtir une encyclopédie riche de millions d'articles dans de nombreuses langues. Le savoir est alors plus facilement accessible et n'est plus réservé aux encyclopédies telle l'*Encyclopædia Britannica*, qui a d'ailleurs cessé d'imprimer son ouvrage en 2010. Cette transformation numérique a été accélérée par la pandémie de COVID-19, qui a forcé les organisations à repenser le développement de l'innovation en utilisant des outils de collaboration numériques.

De la sorte, la transformation numérique est composée d'un ensemble de transformations profondes des activités, des processus et des modèles d'affaires des organisations causées par des innovations technologiques interdépendantes, tels Internet et les données massives, et qui ont également un impact sur la société (Olleros et Zhegu, 2016). Elle résulte de l'effet combiné d'innovations basées sur de nouvelles technologies numériques,

dont les téléphones intelligents, l'infonuagique, l'Internet des objets (IdO), l'analytique des mégadonnées et la puissance toujours croissante des ordinateurs. De fait, la disponibilité et l'abondance des données constituent un aspect central de l'accélération de la transition numérique. Cet accès accru aux mégadonnées et la capacité à les analyser ont fait tomber les barrières traditionnelles qui régissaient l'analytique des mégadonnées, qu'elles soient structurées ou non. Cela a favorisé le développement d'outils liés à l'intelligence artificielle (IA), faisant miroiter des solutions prometteuses dans des domaines aussi divers que la santé, l'aérospatiale ou les services juridiques. La transformation numérique touche donc tous les secteurs, à des intensités variables, et soulève plusieurs enjeux pour les organisations existantes, mais offre également de nombreuses occasions d'amélioration.

La gestion de l'innovation est affectée par la transformation numérique. La compétitivité des organisations repose notamment sur leur capacité à adopter et à développer de nouvelles technologies. Les changements rapides et les nouveaux défis imposés par la transformation numérique font évoluer les processus de production et le développement des innovations. Pour l'OCDE (2019), quatre tendances fortes caractérisent l'innovation dans ce cadre : la donnée est devenue essentielle à l'innovation ; l'innovation se concentre plus dans les services que dans les produits ; les cycles d'innovation s'accroissent grâce aux outils d'expérimentation tels que l'impression 3D et la réalité virtuelle ; et l'innovation devient de plus en plus collaborative. Cette tendance vers une collaboration accrue permet notamment de faire face à une complexification de l'innovation, ce qui requiert des compétences et une approche interdisciplinaires, voire intersectorielles. Pour cette raison, les entreprises s'orientent aujourd'hui vers le développement de modèles d'affaires plus ouverts qui intègrent des idées et des technologies externes aux processus internes de l'entreprise. Ces modèles d'affaires ouverts doivent, par exemple, comprendre une stratégie de protection de la propriété intellectuelle, une base solide nécessaire à toute collaboration.

Les technologies numériques offrent autant de nouveaux outils qui viennent modifier la collaboration entre les acteurs de la société. Ces outils facilitent l'innovation ouverte, une approche déjà fort avantageuse depuis quelques années, notamment en contribuant au déploiement de réseaux de collaboration étendus. Pour bien comprendre comment la transformation numérique vient faciliter la collaboration au profit d'une augmentation de l'innovation, ce chapitre rappelle ce qu'est l'innovation, présente l'innovation

ouverte et la collaboration, puis observe comment certaines technologies affectent l'ensemble des secteurs économiques. Plusieurs encadrés viennent appuyer le texte par des exemples pertinents de transformations.

L'innovation

Avant d'aborder la question de la transformation numérique et de la collaboration affectant l'innovation, il convient de bien définir ce qu'on entend par ce dernier concept. L'innovation repose sur des forces simultanées de destruction et de création, ce que Schumpeter (1942) nommait la « destruction créatrice ». Il a défini l'innovation comme étant une invention introduite sur le marché. Autrement dit, une invention ne devient pas systématiquement une innovation, il faut qu'elle soit commercialisée. Néanmoins, l'innovation ne se limite pas aux produits, elle peut par exemple correspondre à la mise en place de nouvelles pratiques ou à l'intégration en milieu social d'une invention. Dans ces deux derniers cas, l'innovation n'est pas commercialisée, mais peut avoir un impact important sur la société, l'environnement et l'économie. Afin d'éviter toute confusion concernant ce qu'est l'innovation, nous adoptons la définition qu'en donne l'OCDE (2018).

En 2018, l'OCDE a en effet mis à jour le *Manuel d'Oslo* (ci-après « le *Manuel* »), la référence internationale en matière d'innovation. L'innovation y est définie comme suit : « Une innovation est un produit ou processus (ou une combinaison de ceux-ci) nouveau ou amélioré qui diffère considérablement des produits ou processus précédents de l'unité et qui a été mis à la disposition d'utilisateurs potentiels (produit) ou mis en service par l'unité (processus)¹. »

Le *Manuel* poursuit en distinguant les *activités d'innovation* et l'*innovation d'affaires*. D'une part, les activités d'innovation représentent les activités de développement, financières et commerciales de la firme qui peuvent la mener à une innovation. Il s'agit des processus organisationnels desquels résulte, ou non, une innovation. D'autre part, l'innovation d'affaires consiste selon le *Manuel* en « l'introduction d'un produit ou d'un processus d'affaires (ou la combinaison des deux) nouveau ou sensiblement amélioré, et qui diffère significativement de la génération précédente introduite sur le marché ou achetée par cette firme ». Le produit peut être un bien ou un service, ou les deux, alors que le processus d'affaires inclut les activités permettant de générer le produit. Il faut donc une implantation

et une adoption pour que cela soit considéré comme une innovation. À titre d'exemple d'innovation d'affaires, les technologies numériques ont créé un contexte fertile pour l'émergence d'un nombre important de modèles d'affaires, notamment sous la forme de plateformes numériques multifaces (par exemple Uber, PayPal, TripAdvisor, Expedia, Netflix ou Innocentive).

En outre, l'innovation varie selon son degré de nouveauté : elle peut être radicale (perturbatrice) ou, à l'autre bout du spectre, incrémentale (comme la majorité des innovations). La première émane d'un processus ayant un impact significatif sur les activités économiques des entreprises et implique la prise d'un risque important, tel un développement coûteux qui ne mènera peut-être pas à une commercialisation de l'invention de la part de l'organisation. Cet impact peut se traduire par des changements technologiques majeurs. Par exemple, le téléphone intelligent, tel que proposé par Apple avec son premier iPhone en 2007, est une innovation radicale. Le téléphone intelligent est utilisé tour à tour comme navigateur (GPS), appareil photo et vidéo, baladeur, plateforme de jeu, outil pour gérer son réseau social, faire des achats en ligne, etc. La transformation socioéconomique qui a résulté de l'introduction sur le marché de ce téléphone dit intelligent a été colossale. La seconde, l'innovation incrémentale, renvoie à des améliorations continues, à faible risque, et s'appuie sur les connaissances déjà existantes dans l'organisation. Par exemple, les téléphones intelligents continuent d'évoluer, avec de meilleurs appareils photo ou systèmes d'exploitation, mais n'offrent pas depuis plusieurs années d'avancées majeures. Il est par ailleurs possible qu'une innovation incrémentale devienne radicale, comme lorsqu'elle est appliquée à un autre secteur industriel. Par exemple, le secteur de la balistique militaire utilise la fibre de carbone depuis les années 1960, mais ce n'est que beaucoup plus tard que le matériau a été utilisé pour la production de prothèses et d'implants, ce qui a révolutionné les pratiques médicales.

Jusqu'à la fin des années 1970, les entreprises concentraient leur recherche et développement (R-D) à l'intérieur de l'organisation. Or, face à la complexité croissante du processus d'innovation, elles collaborent de plus en plus avec diverses entités externes, comme leurs fournisseurs ou leurs clients, ou encore les universités, afin d'accroître leur capacité à innover. La transformation numérique a contribué à accélérer cette tendance vers l'innovation ouverte.

L'innovation ouverte et la collaboration

L'innovation ouverte paraît efficace afin de naviguer au sein de l'environnement concurrentiel du xxi^e siècle. Elle est même considérée comme l'une des approches les plus importantes pour la réussite des projets d'innovation. Le paradigme du modèle fermé de l'innovation, où la firme était seule à innover par le biais de son département de R-D, ne suffit plus pour qu'une firme demeure compétitive. Selon Chesbrough (2003), l'innovation ouverte est « un paradigme qui suppose que les entreprises, lorsqu'elles cherchent à progresser dans leurs technologies, peuvent et doivent utiliser les idées externes tout comme les idées internes, ainsi que les voies internes et externes de commercialisation ». Plusieurs autres définitions existent, mais toutes conservent cette idée que l'innovation, ou une partie de celle-ci, ne se fait pas qu'à l'intérieur d'une organisation. Il s'agit donc d'un processus offrant de nouvelles façons de gérer les connaissances, les expertises et les technologies inhérentes à l'innovation.

L'innovation ouverte n'implique pas pour autant que l'entreprise cesse d'investir dans ses propres capacités de R-D, mais plutôt qu'elle élargisse ses sources d'innovation. En fait, l'entreprise pourra choisir d'ouvrir son processus d'innovation dans certains cas, mais pas dans d'autres. Lorsqu'elle n'est pas en mesure d'innover à l'interne, l'entreprise pourra décider d'acquérir de nouvelles connaissances à l'aide de différentes stratégies, telles que les alliances, la recherche collaborative ou l'achat de brevets. Il est ainsi possible de regrouper les pratiques de l'innovation ouverte en trois catégories :

- Les activités entrantes (*outside-in* ou *inbound*). Elles réfèrent à l'utilisation et à l'exploitation de connaissances ou d'une expertise externes au sein de la firme, laquelle établit donc des relations avec, par exemple, des universités ou d'autres firmes afin d'améliorer ses propres performances d'innovation. L'obtention d'une licence, l'externalisation ouverte (*crowdsourcing*), la commercialisation d'innovations externes ou les alliances de R-D sont toutes des activités de ce type ;
- Les activités sortantes (*inside-out* ou *outbound*). Elles sont à l'inverse des précédentes, puisqu'il s'agit de l'utilisation externe des connaissances de l'entreprise. Celle-ci transfère ses connaissances et les résultats de sa propre R-D à des partenaires externes. Par exemple, une entreprise peut vendre une partie de sa propriété intellectuelle (PI)

à une entreprise ayant une meilleure capacité à commercialiser l'innovation issue de cette PI dans un marché donné ;

- Les activités couplées (*coupled*). Elles sont une combinaison des deux premières. Elles consistent en un partage de connaissances dans le cadre de projets collaboratifs avec des organisations ayant des compétences intellectuelles complémentaires. Ces activités peuvent être formalisées, par exemple, au moyen d'alliances stratégiques.

L'entreprise conservera à l'interne ses connaissances stratégiques, mais sera davantage amenée à partager celles qui sont périphériques à son cœur d'activité. Par ailleurs, l'innovation ouverte s'accompagne souvent d'un changement de culture au sein même des organisations, ce qui implique de combattre le syndrome du « pas inventé ici » (« *not invented here*² »), qui freine l'adoption interne d'innovations externes.

La plupart des innovations requièrent des interactions qui traversent les frontières traditionnelles des organisations. Les organisations collaborent de plus en plus avec divers partenaires issus des milieux industriels, universitaires et gouvernementaux, entre autres. La collaboration est aujourd'hui considérée comme l'un des facteurs les plus importants de la réussite de projets d'innovation. Que ce soit dans un contexte d'innovation interfirmes (par exemple entre des firmes indépendantes de l'industrie aérospatiale) ou au sein de grands groupes industriels (par exemple entre plusieurs filiales d'une même multinationale), la collaboration est devenue essentielle, ne serait-ce que pour faire face à la complexité croissante de la technologie. Le tableau 6-1 détaille la diversité des types de partenaires qui ont été impliqués dans une collaboration avec une entreprise.

Seulement 17,4 % des entreprises sondées au Canada ont déclaré avoir collaboré avec une autre entreprise ou organisation pour leurs activités d'innovation entre 2015 et 2017, chiffre qui est plus élevé pour les moyennes (20,4 %) et les grandes (26,9 %) entreprises. Les entreprises du Québec (20,5 %) et de l'Ontario (18,7 %) sont celles qui collaborent le plus au pays. Bien qu'il y ait beaucoup de collaboration intrafirme, l'innovation ouverte est omniprésente. Les entreprises collaborent surtout avec leurs fournisseurs, avec leurs clients du privé, mais aussi avec ceux du public, et, sauf dans la région de l'Atlantique, le cinquième des entreprises collaborent avec leurs

concurrents. Les universités et collèges sont particulièrement prisés par les moyennes et grandes entreprises, et il n'y a que l'Ouest du Canada où les entreprises collaborent moins avec ces institutions.

	Collaboration à des activités d'innovation de 2015 à 2017, par taille d'entreprise et par région (pourcentage)							
	Tous	Taille d'entreprise			Région			
	Canada	P	M	G	Qc	Ont.	Atl.	RDC
Proportion d'entreprises qui affirment collaborer (%)	17,4 ^A	16,4 ^A	20,4 ^A	26,9 ^A	20,5 ^A	18,7 ^A	15,1 ^A	13,6 ^A
Avec qui les entreprises collaborent-elles ?								
Entreprise mère ou entreprises affiliées ou filiales	36,9 ^A	33,9 ^B	43,8 ^A	54,7 ^A	44,5 ^B	40,4 ^B	35,9 ^B	22,1 ^B
Fournisseurs d'équipement, de matériel, de composants ou de logiciels	57,7 ^A	56,6 ^B	61,4 ^A	61,7 ^A	60,4 ^B	49,2 ^B	54,0 ^B	69,1 ^B
Clients du secteur privé	34,2 ^A	34,5 ^B	30,1 ^A	37,5 ^A	29,7 ^B	34,1 ^B	24,6 ^B	41,8 ^B
Clients du secteur public	13,6 ^A	13,6 ^A	11,8 ^A	16,5 ^A	10,1 ^A	13,7 ^A	14,2 ^B	17,6 ^B
Concurrents ou autres entreprises du secteur	22,3 ^A	23,6 ^B	17,5 ^A	17,4 ^A	27,3 ^B	21,0 ^B	8,3 ^B	21,1 ^B
Consultants ou laboratoires commerciaux	22,7 ^A	21,0 ^A	26,8 ^A	31,5 ^A	24,7 ^B	23,2 ^B	18,5 ^B	20,1 ^B
Universités, collèges ou autres établissements d'enseignement supérieur	18,6 ^A	15,4 ^A	28,6 ^A	34,1 ^A	22,9 ^A	21,5 ^B	18,1 ^B	8,8 ^A
Instituts de recherche gouvernementaux	13,1 ^A	11,1 ^A	19,1 ^A	22,3 ^A	18,6 ^A	12,5 ^A	11,9 ^A	7,6 ^A
Autres partenaires en collaboration	13,9 ^A	13,6 ^A	14,9 ^A	15,0 ^A	12,6 ^A	16,2 ^B	17,7 ^B	10,9 ^B

Tableau t/2020-c6-1

Source : Statistique Canada, tableau 27-10-0178-01.

Légende : A – excellente qualité des données, B – bonne qualité des données³; P – petites entreprises (de 50 à 99 employés), M – moyennes entreprises (de 100 à 249 employés), G – grandes entreprises (250 employés et plus); « AT » inclut Terre-Neuve-et-Labrador, l'Île-du-Prince-Édouard, la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick, « RDC » signifie « reste du Canada » et comprend donc le Manitoba, la Saskatchewan, l'Alberta, la Colombie-Britannique, le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest et le Nunavut.

Certaines collaborations sont formelles et impliquent une entente contractuelle afin de préciser les rôles de chacun ainsi que les termes de la collaboration. Dans ce cas, les droits, les devoirs et les contributions de chaque partie sont fixés à l'avance, tout comme la distribution des résultats avec, par exemple, une entente de partage de propriété intellectuelle. D'autres sont plutôt informelles et consistent surtout en un échange moins structuré d'information. Les activités d'innovation ouverte s'exécutant à l'aide de mécanismes transactionnels impliquent généralement des échanges complexes. Plusieurs formules de recherche collaborative ont été identifiées par Liyanage (1995) : la coentreprise de recherche ; les contrats directs entre les partenaires sur des projets précis ; les transferts et échanges de technologies ; l'octroi et l'acquisition de licences de technologies ; et l'échange ou le transfert de personnel. L'acquisition et l'incubation de jeunes pousses (*start-ups*) font partie de ces mécanismes formels. Les activités informelles regroupent plutôt des activités telles que la veille technologique, la mise à disposition de codes et de données libres de droits, les concours comme les marathons de programmation (voir l'encadré traitant de Hacking Health) ou l'accès à des communautés en ligne.

Hacking Health : le marathon de programmation en santé

Hacking Health est une organisation à but non lucratif fondée à Montréal en 2012, année où elle a tenu son premier marathon de programmation. Mieux connus sous le terme de *hackathon*, de *hack* (piratage) et de *marathon*, ces événements de cocréation rassemblent des équipes de programmeurs qui ont pour objectif de développer des solutions informatiques innovantes, d'améliorer des logiciels ou de développer de nouvelles applications concernant un problème ou un thème donné. Les équipes utilisent les données et les outils mis à leur disposition et doivent fournir un prototype fonctionnel à la fin de la compétition.

Hacking Health se concentre sur les problèmes vécus dans le domaine de la santé. Ainsi, lors de la première édition, environ 70 professionnels de la santé, incluant des chercheurs et des patients, ont proposé 40 projets représentant des problèmes qu'ils rencontraient dans le cadre de leur travail. En tout, 19 projets ont été retenus par les 160 experts en jeux vidéo, programmeurs, designers Internet, qui ont alors développé des prototypes fonctionnels durant les trois jours de l'événement. Depuis, les marathons organisés par Hacking Health réunissent entre 200 et 300 personnes et sont tenus dans plusieurs villes à travers le monde, durant généralement une fin de semaine. Les participants, qui comptent aussi des entrepreneurs et des gestionnaires de capitaux de risque, continuent souvent à collaborer après l'événement afin de développer des prototypes qui seront testés dans les cliniques et les hôpitaux.

Hacking Health rayonne et a 40 chapitres répartis dans 13 pays sur 5 continents. Son succès repose notamment sur l'approche collaborative, qui contribue à l'innovation en santé en tirant profit de la transformation numérique. En fait, elle semble répondre aux besoins croissants d'innovation numérique dans le domaine de la santé et elle le fait dans une approche ascendante (*bottom-up*), où les professionnels de la santé viennent exposer leurs besoins auprès de développeurs informatiques. Hacking Health a également diversifié ses activités afin de favoriser la collaboration et le remue-méninges dans d'autres contextes, tels les Hacking Health Cafés, des ateliers et des coopérations.

Collaboration numérique

Les technologies numériques ont contribué au développement rapide d'un modèle collaboratif particulier. En effet, par l'intermédiaire de plateformes numériques d'externalisation ouverte (*crowdsourcing*), les organisations peuvent solliciter le grand public afin qu'il contribue au processus d'innovation. Au-delà de la sous-traitance traditionnelle des activités d'innovation (*outsourcing*), les organisations ont à présent la possibilité de puiser dans les ressources d'intelligence collective sans égard à la géographie, à la nationalité, à la formation ou au secteur d'activité des participants dans l'effort d'innovation.

Certaines des plateformes d'externalisation ouverte peuvent faciliter le processus d'innovation en amont, lors de la collecte et de l'analyse de l'information. C'est le cas des plateformes basées sur le modèle question-réponse, comme StackExchange, ou de celles qui invitent le public à collaborer pour analyser leurs données, comme Peer to Patent (USPTO) ou IBM's InnovationJam. D'autres plateformes d'externalisation ouverte permettent la participation de la communauté directement à la résolution de problèmes. Les divers modes de conception des concours d'innovation par des plateformes telles que Innocentive, TopCoder ou Kaggle permettent aux organisations de dénicher les meilleures solutions innovantes tout en gardant le contrôle du coût, de l'échéancier et des droits de propriété intellectuelle de leurs innovations.

L'externalisation ouverte peut devenir l'ingrédient principal pour l'innovation dans les modèles d'affaires. C'est le cas pour l'entreprise Transit App, qui offre ses services à Montréal et dans 130 grandes villes. Pour améliorer l'expérience des utilisateurs du transport public, Transit App utilise les mégadonnées ouvertes des sociétés de transport au sujet des trajets et des horaires des lignes d'autobus et de métro. En couplant ces données ouvertes avec celles obtenues par l'externalisation ouverte (les utilisateurs de la plateforme partagent les informations sur leurs déplacements), l'entreprise a amélioré son service en offrant aux utilisateurs des informations en temps réel sur l'arrivée des bus et des métros.

Génome Québec a également eu recours à l'externalisation ouverte afin d'assurer la maintenance et les mises à jour continues de bases de données génomiques. Dans un autre domaine, l'entreprise montréalaise Chic Moustache utilise elle aussi l'externalisation ouverte, pour boucler le

processus de création et de commercialisation de ses produits. Ainsi, les membres du public proposent des modèles de blouses. Les modèles sont exposés dans le site Web de la compagnie (chicmoustache.com). Ensuite, les œuvres qui suscitent le plus d'intérêt du public sont imprimées sur des blouses, qui sont mises en vente dans la boutique en ligne du site Web. Les créateurs reçoivent une partie des profits.

Ainsi, les plateformes d'externalisation ouverte permettent des collaborations qui dépassent les proximités habituelles (sectorielles, régionales, institutionnelles, etc.) ayant jusqu'ici favorisé l'innovation. Les recherches sur l'externalisation ouverte montrent qu'une majorité de problèmes se rapportant à une innovation ont été résolus par des personnes n'appartenant pas au secteur d'activité ou d'expertise de l'entreprise instigatrice du problème. En d'autres mots, dans un contexte de sous-traitance traditionnelle, la rencontre entre l'organisation et le détenteur de la solution n'aurait pas pu avoir lieu.

La collaboration ouverte des organisations avec la communauté prend de plus en plus place dans la collecte automatisée des données (*data-sourcing*). Ni laborieuse ni consciente, cette collecte apparaît le plus souvent comme un sous-produit d'une activité avantageuse pour l'utilisateur (par exemple une recherche d'information sur Google). Ces données sont difficiles à falsifier, car elles sont captées à la source. D'une valeur de plus en plus importante pour les entreprises, ce modèle de collecte des données est mis en question par les défenseurs du droit à la vie privée des citoyens.

Facilitateurs et inhibiteurs de l'innovation ouverte

La tendance à l'ouverture s'ancre dans des changements majeurs, sur lesquels les entreprises ont peu de contrôle et qui sont venus bouleverser leur environnement d'affaires, dont la mondialisation, les technologies de l'information et des télécommunications et la croissance du capital de risque. La libre circulation des biens, des capitaux et des personnes à l'échelle mondiale a eu pour conséquence d'ouvrir les frontières du marché de l'innovation, ce qui a forcé les entreprises à développer et à vendre de nouveaux produits plus efficaces, moins coûteux, et ce, plus rapidement. Il est devenu beaucoup plus facile d'obtenir un bien fabriqué dans une région afin d'y faire de l'ingénierie inversée pour la produire ailleurs à moindre coût dans une autre région du globe. La compétition pour obtenir les meilleurs

talents s'est également intensifiée : les entreprises ne se concurrencent plus entre elles seulement dans une région donnée, elles le font à l'échelle internationale. Par ailleurs, les barrières à l'entrée étant diminuées avec la transformation numérique, il devient plus facile de créer de nouvelles entreprises qui viennent perturber les secteurs économiques traditionnels.

D'autres facteurs ont aussi contribué à l'innovation ouverte. D'abord, les coûts de développement de nouvelles technologies sont de plus en plus élevés, alors que la durée de vie des produits diminue, rendant plus risqué l'investissement en innovation. Aussi, les cycles de développement de l'innovation sont de plus en plus courts et nécessitent une recombinaison des connaissances provenant de domaines différents. Dans le contexte tumultueux actuel, l'innovation ouverte a le potentiel de réduire les temps de développement et de diminuer les risques, qui sont alors distribués auprès de plusieurs parties prenantes, tout en contribuant au mélange de connaissances nécessaire à l'innovation.

Plusieurs avantages et inconvénients peuvent être relevés lorsqu'une organisation ouvre son processus d'innovation. D'abord, les entreprises bénéficient d'économies d'échelle en réduisant les coûts et les risques liés à l'innovation, puisqu'ils sont répartis entre plusieurs partenaires. Ensuite, le partage des ressources et des connaissances peut accélérer l'innovation en donnant accès à des expertises et à des compétences auxquelles les entreprises n'auraient pas normalement. Obtenir l'expertise de leurs partenaires permet ainsi aux entreprises de construire sur une base commune de connaissances déjà bien établie. Plus particulièrement, la collaboration avec les clients et les fournisseurs permet aussi le développement d'une innovation mieux adaptée aux besoins des uns et des autres, de même qu'à l'établissement de standards forts que plusieurs entreprises d'un même secteur auront contribué à établir. Il en va de même pour accéder à de nouveaux marchés. Le risque est aussi diminué quant à l'introduction d'innovations sur le marché, en particulier pour les produits nouveaux ou complexes. Dans l'ensemble, la collaboration a un impact positif sur la performance en matière d'innovation.

Plusieurs inconvénients doivent toutefois être soulignés : la perte de l'expertise interne ou de la nécessité de la développer, le coût élevé de la coordination des partenaires, le dédoublement des infrastructures ou des équipements, ou encore le processus décisionnel dépendant des partenaires. Il peut également être difficile de trouver le partenaire idéal

détenant les connaissances recherchées, ou de s'entendre sur le partage de la propriété intellectuelle. Finalement, le risque du profiteur (*free rider*) reste réel pour les entreprises qui s'investissent dans l'innovation ouverte. Ce risque n'est pas spécifique à l'innovation ouverte, mais afin d'en limiter la possibilité, les entreprises doivent s'accompagner d'une bonne stratégie de protection de la propriété intellectuelle, ce qui fait défaut chez certaines d'entre elles.

L'innovation ouverte a contribué à décloisonner les processus de R-D des entreprises. La diversité des partenaires liés à l'innovation s'accroît et inclut notamment les universités et les cégeps, différents paliers de gouvernement, des intermédiaires de l'innovation et les utilisateurs finaux. L'ouverture a été renforcée avec le développement de nombreux outils simplifiant la collaboration numérique. Certaines technologies, présentées dans la prochaine section, facilitent cette tendance.

Les technologies numériques

Les transformations numériques résultent des effets combinés d'innovations numériques souvent interdépendantes, elles-mêmes alimentées par un accroissement de l'accessibilité, de la connectivité, de la numérisation et de l'automatisation. La généralisation des téléphones intelligents, l'explosion de la quantité et de la variété des données, moins coûteuses à se procurer, et la capacité exponentielle de la puissance de calcul des ordinateurs (la fameuse loi de Moore) facilitent le développement de l'intelligence artificielle et de l'analytique des mégadonnées. Sur le plan organisationnel, l'adoption de ces technologies et de ces outils numériques aide la prise de décisions basée sur les données probantes. L'accès à de l'information de meilleure qualité pousse les entreprises à mettre en place des systèmes de soutien organisationnel pour favoriser l'adoption de ces technologies émergentes. Ce faisant, celles-ci renforcent leurs capacités d'innovation. L'acquisition de technologies numériques ouvre en effet de nouveaux horizons techniques aux entreprises, ce qui accroît leur propension à innover, tant en ce qui touche aux produits qu'aux procédés de fabrication. L'adoption de telles technologies permet aussi de réduire les cycles de production ainsi que les délais de livraison, ce qui influe positivement sur les capacités de commercialisation des entreprises. Les processus organisationnels, les modèles d'affaires ainsi que l'expérience client sont également profondément modifiés par le numérique.

La transformation numérique facilite la diffusion de l'information, accroît les liens possibles entre les partenaires issus de différents milieux et régions, permet de resserrer ces relations en diminuant l'impact de la distance géographique et en simplifiant les communications. Elle amène les parties prenantes à codévelopper de nouvelles pratiques d'innovation et agit comme un catalyseur en permettant le partage de l'information, des compétences et des ressources et en accroissant la génération et la validation d'idées, améliorant ainsi la capacité d'innovation. Cela entraîne des gains de productivité et d'efficacité (OCDE, 2019). La transformation numérique permet une plus grande fluidité des échanges et en crée de nouveaux : des interactions d'humain à humain, entre un humain et une machine, et de machine à machine.

Quelques exemples de technologies

Les données, et plus spécifiquement la mise en données (*datafication*), sont à la fois un moteur et une ressource de la transformation numérique. Une fois numérisées, les données peuvent être exploitées, copiées, traitées ou transmises, et ce, à l'infini, par des outils technologiques sans risque de dégradation, le tout à très grande vitesse et pour un coût marginal pratiquement nul. L'accès à un volume de données sans précédent ainsi que la capacité à l'héberger permettent aux organisations de faire de l'analyse de mégadonnées, structurées ou non, à l'aide de multiples outils d'exploration et de traitement des données. Ainsi, l'analytique des mégadonnées regroupe un ensemble de techniques et d'outils de statistiques multivariées qui sont utilisés afin de les traiter et de les interpréter. Les analyses des bases de données issues de multiples sources permettent d'inférer des relations, d'établir des dépendances et de faire des prédictions sur les résultats et les comportements, ce qui génère des connaissances et facilite la prise de décision en temps réel. Les firmes peuvent alors offrir des services répondant mieux aux besoins des consommateurs et effectuer des tâches plus efficacement.

L'apprentissage automatique, une branche de l'intelligence artificielle (IA), repose sur la capacité à analyser les mégadonnées. Les avancées récentes dans ce domaine ont accéléré la démocratisation de l'IA, qui désigne, en fait, un ensemble de technologies visant à simuler l'intelligence humaine. Les promoteurs de l'IA avancent qu'elle pourra aider à résoudre des problèmes complexes, générer des gains de productivité, améliorer l'efficacité de la prise de décision et réduire les coûts (OCDE, 2019).

L'IdO est en pleine croissance depuis quelques années. Le terme *Internet des objets* désigne tout objet physique qui est connecté à Internet ou à un autre réseau informatique, comme un intranet, ce qui rend possibles la collecte et l'échange de données, que ce soit entre machines ou de machine à humain. Les objets connectés sont une source importante de données qui viennent notamment alimenter l'analytique des mégadonnées et l'IA. L'Internet des objets industriel (IdOI), ou encore l'industrie 4.0, a le potentiel d'affecter la collaboration intra et interfirmes. Ainsi, dans les entreprises manufacturières connectées, la communication se fait tout au long de la chaîne de valeur. Une entreprise ayant besoin, par exemple, d'un matériau spécifique pourra le commander à un fournisseur qui le produira pour qu'il soit livré au bon moment. Ce processus automatisé pourrait impliquer uniquement une intervention entre machines, c'est-à-dire sans action humaine.

L'infonuagique constitue un bon exemple de la croissance de la connectivité liée à la transformation numérique. Le principe de l'infonuagique repose sur le fait que les données sont hébergées et exploitées à distance sur des serveurs non locaux, situés hors de l'organisation. Il est également possible d'utiliser à distance la puissance de calcul d'un serveur situé aussi hors de l'organisation. Les services offerts par l'infonuagique se concentrent sur le logiciel-service (*software as a service, SaaS*, par exemple Microsoft Office 365), la plateforme-service (*platform as a service, PaaS*, ou *application platform as a service, aPaaS*, par exemple Amazon Web Services) et l'infrastructure-service (*infrastructure as a service, IaaS*, par exemple OpenStack), mais d'autres possibilités existent, comme les données-service (*data as a service, DaaS*).

En 2014, lorsque Statistique Canada a mené son enquête sur les technologies de pointe, le Québec était très en retard par rapport au reste du Canada en ce qui touche aux logiciels-service (voir le tableau 6-2). En effet, toutes industries confondues, 11,7 % des entreprises québécoises avaient adopté cette technologie, alors que la moyenne canadienne était de 15,0 % et celle de l'Ontario et de l'Alberta, de 18,4 % et de 18,3 % respectivement. Dans presque tous les secteurs sondés, le Québec accusait un retard important. Sur le plan des infrastructures-service, par contre, le Québec menait la ronde, alors que 12,4 % de ses entreprises avaient utilisé cette technologie, par rapport à une moyenne canadienne de 9,6 %.

		Utilisation de certaines technologies de pointe en 2014 au Québec et au Canada							
		Taille d'entreprise				Région			
Code		Total	P	M	G	Qc	Ont.	Alb.	RDC
Logiciel-service (SaaS) (par exemple, informatique en nuage – logiciel)									
	Toutes les industries sondées	15,0 ^A	14,2 ^A	17,3 ^A	34,9 ^B	11,7^A	18,4 ^A	18,3 ^A	12,0 ^A
113	Foresterie et exploitation forestière	5,0 ^A	4,9 ^A	0,0 ^A	x	9,7^C	0,0 ^A	0,0 ^A	4,7 ^B
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	19,4 ^A	17,0 ^B	16,2 ^B	48,1 ^D	5,4^B	18,1 ^B	21,2 ^B	19,8 ^B
22	Services publics	31,3 ^A	26,0 ^A	54,8 ^D	48,6 ^C	23,9^B	41,2 ^B	18,4 ^B	22,9 ^C
31-33	Fabrication	12,1 ^A	10,8 ^A	16,7 ^A	25,8 ^B	8,7^A	13,4 ^A	14,7 ^A	12,7 ^A
41	Commerce de gros	14,7 ^A	13,4 ^A	30,6 ^C	30,1 ^C	9,1^A	18,9 ^A	15,9 ^B	12,7 ^A
44-45	Commerce de détail	11,2 ^A	11,0 ^A	4,3 ^A	F	10,2^B	15,4 ^C	16,9 ^C	5,2 ^B
48-49	Transport et entreposage	12,5 ^A	11,6 ^A	16,8 ^B	33,8 ^B	6,4^A	16,7 ^B	14,2 ^B	12,6 ^B
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	28,6 ^A	28,0 ^A	32,4 ^C	46,9 ^D	27,3^B	30,7 ^B	28,0 ^B	26,8 ^B
Infrastructure-service (IaaS) (par exemple, informatique en nuage – équipement)									
	Toutes les industries sondées	9,6 ^A	9,0 ^A	12,3 ^A	21,0 ^A	12,4^A	8,5 ^A	11,7 ^A	7,3 ^A
113	Foresterie et exploitation forestière	2,4 ^A	2,4 ^A	0,0 ^A	x	4,8^B	0,0 ^A	0,0 ^A	2,1 ^A
21	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	12,7 ^A	10,4 ^A	6,0 ^B	44,1 ^D	7,7^B	10,4 ^A	15,3 ^B	9,1 ^B
22	Services publics	17,0 ^A	15,8 ^A	30,5 ^C	17,1 ^C	8,7^B	24,2 ^B	9,7 ^B	10,2 ^B
31-33	Fabrication	7,2 ^A	5,9 ^A	14,5 ^A	16,0 ^B	6,7^A	8,2 ^A	10,0 ^A	4,6 ^A
41	Commerce de gros	10,3 ^A	9,5 ^A	21,3 ^B	18,6 ^B	11,3^A	10,0 ^A	10,6 ^B	9,7 ^A
44-45	Commerce de détail	6,0 ^A	5,9 ^A	1,8 ^A	25,8 ^E	13,3^B	0,4 ^A	8,4 ^C	4,2 ^B
48-49	Transport et entreposage	8,2 ^A	7,4 ^A	15,3 ^B	20,4 ^B	5,3^A	9,1 ^A	10,6 ^B	8,6 ^A
54	Services professionnels, scientifiques et techniques	20,4 ^A	20,4 ^A	17,9 ^B	25,8 ^C	26,6^B	20,3 ^A	19,1 ^B	15,5 ^B

Tableau t/2020-c-6-2

 Source : Statistique Canada, *Enquête sur les technologies de pointe 2014*.

Notes :

Codes SCIAN (2012) ;

Taille : P : petites entreprises (de 10 à 99 employés), M : moyennes entreprises (de 100 à 249 employés), G : grandes entreprises (250 employés et plus) ;

^{A, B, C, D, E, x} Qualité des données : excellente (A), très bonne (B), bonne (C), acceptable (D), à utiliser avec prudence (E), omise pour raisons de confidentialité (x)⁴.

« RDC » signifie « reste du Canada » et comprend les provinces et territoires autres que le Québec, l'Ontario et l'Alberta.

La technologie de chaîne de blocs permet le déploiement d'infrastructures numériques décentralisées, sans intermédiaires, pour faciliter les échanges économiques et les interactions de pair à pair. Cette technologie représente une petite révolution en ce qui concerne le stockage d'information, mais surtout la sécurité des données, puisque chaque transaction est enregistrée et que la modification d'une chaîne de blocs est impossible. Une chaîne de blocs constitue des registres distribués rassemblant des bases de données ou des masses d'information qui peuvent être utilisées par les entreprises publiques comme privées et par les particuliers. Ces registres viennent modifier le fondement même des transactions numériques en étant transparents, traçables, immuables et inviolables. La chaîne de blocs accroît donc la confiance entre les parties prenantes. En 2027, 10 % de la valeur du PIB mondial pourrait être stockée dans des chaînes de blocs (Institut de gouvernance numérique, 2019). Néanmoins, la technologie reste coûteuse à mettre en place et a un impact environnemental non négligeable. Des organisations œuvrant dans des domaines aussi variés que le vote électronique, la gestion de contrats ou les services bancaires pourraient adopter cette technologie.

Les plateformes en ligne viennent redéfinir les marchés en facilitant les échanges de biens et de services de même que la mise en contact des fournisseurs et des clients. La création de valeur provenant de telles plateformes est liée à leur capacité à arrimer l'offre et la demande au mieux tout en minimisant les frictions sous-jacentes. Les données générées par les utilisateurs viennent aussi enrichir et améliorer la plateforme. La compétition y est donc davantage virtuelle que physique.

De plus en plus d'entrepreneurs utilisent la collaboration ouverte pour le financement de l'innovation par le biais des plateformes de sociofinancement (*crowdfunding*). Le sociofinancement permet à un individu ou à une organisation de solliciter de petits montants d'argent d'un grand nombre de personnes. Une plateforme de sociofinancement met en relation un artiste ou un entrepreneur avec une foule de donateurs ou d'investisseurs intéressés à financer son projet ou son entreprise. Ces plateformes sont ouvertes à une très large gamme de projets. Outre son rôle dans les campagnes de financement, la plateforme de sociofinancement devient très souvent un moyen de tester le potentiel d'une idée. Le fait que la réalisation des promesses de paiement est conditionnelle au succès⁵ de la campagne a deux avantages : i) réduire le risque de se lancer dans une aventure sans

aucune chance de succès, et ii) augmenter la « viralité » et la rapidité du processus de diffusion de la nouveauté. Haricot, la première plateforme de sociofinancement québécoise, a contribué à hauteur de quelque 1,2 million de dollars au financement d'environ 440 projets⁶.

Les plateformes accélèrent la tendance à la réorientation vers l'offre de services plutôt que de produits. Par exemple, l'entreprise John Deere est en transition pour devenir une entreprise offrant des services technologiques, et non plus uniquement de l'équipement. L'entreprise offre de plus en plus de solutions d'agriculture de précision. En outre, elle a récemment développé un partenariat avec Volocopter, une entreprise spécialisée dans les drones. Ces plateformes contribuent aussi à la désintermédiation de l'économie en réduisant le nombre d'intermédiaires et en diminuant les coûts de transaction pour les consommateurs. Ces espaces numériques donnent un essor aux stratégies qui requièrent une collaboration étroite entre les participants en contribuant au partage efficace de la valeur (Iansiti et Levien, 2004). La recherche scientifique est notamment affectée par cette transformation. L'accès à de nombreuses données en libre accès et la diffusion des résultats par le biais de plateformes en ligne elles-mêmes libres d'accès remodelent la collaboration en recherche. Dans le domaine de la santé, les plateformes, les applications mobiles et les dossiers médicaux numériques contribuent à améliorer la coordination entre les différents experts. Les pouvoirs publics peuvent offrir un accès aux données ou utiliser eux-mêmes celles qu'ils possèdent pour optimiser l'offre de transport et améliorer le quotidien des populations. La Ville de Montréal offre un exemple intéressant à ce sujet (voir l'encadré).

Villes intelligentes : le projet de la Ville de Montréal

La Ville de Montréal a obtenu un financement de 50 millions de dollars du gouvernement fédéral lors du « Défi des villes intelligentes » organisé par Infrastructure Canada. Le projet, porté par le Laboratoire d'innovation urbaine de Montréal (LIUM), s'ancre dans une démarche de cocréation avec la communauté, qui a été amenée à retenir deux enjeux : la mobilité et l'accès à l'alimentation. Le LIUM poursuivra la collaboration afin de développer diverses plateformes dans une approche itérative et inclusive. Celles-ci utiliseront un grand volume de données générées par différentes sources, ce qui contribuera à la prise de décision basée sur des données probantes, et les enjeux de cybersécurité et de vie privée sont pris en compte dans chacune des étapes du projet de la ville intelligente.

Le volet mobilité se divise entre mobilité intégrée et mobilité de quartier. La première vise à fluidifier les déplacements sur le territoire montréalais en offrant une plateforme ouverte combinant différents modes de déplacement (par exemple l'autobus, le métro, le vélo et l'autopartage). Elle permettra d'accéder à divers services et offrira une tarification simplifiée et adaptée à l'utilisation faite par les usagers. Les fournisseurs de services seront également présents sur la plateforme. La mobilité de quartier vise la facilitation des trajets de courte distance et la diminution des besoins en déplacements dans un quartier. L'offre sera adaptée à chaque quartier et une plateforme de partage de véhicules (par exemple des vélos, des remorques à vélo et des automobiles personnelles) sera développée.

Le volet alimentation se concentre sur l'accessibilité à des produits sains et locaux pour les populations vulnérables. Une plateforme technologique sera créée pour aider à la mutualisation des infrastructures et des ressources en place. Elle facilitera la gestion des inventaires, de la vente, des dons alimentaires et des livraisons, ce qui permettra aux organisations d'augmenter leur pouvoir d'achat, de réduire le gaspillage alimentaire et de réduire les coûts de livraison. Plusieurs acteurs clés de la chaîne alimentaire sont impliqués, dont Moisson Montréal et des centres alimentaires communautaires.

La collaboration ne se limite pas aux technologies décrites précédemment : certaines stratégies plus classiques sont également adoptées par les entreprises. Selon l'OCDE (2019), les entreprises collaborent davantage qu'auparavant avec les autres acteurs des écosystèmes d'innovation, et ce, bien que le tableau 6-1 semble indiquer que la collaboration est loin d'être généralisée au Québec et au Canada. Les organisations ont adopté plusieurs approches pratiquées avec une plus grande intensité : le partage de données, l'incubation d'entreprises, les partenariats stratégiques, l'acquisition et le capital de risque de même que la participation à des plateformes d'innovation. De plus en plus de grandes entreprises mettent en place des incubateurs ou des accélérateurs de jeunes pousses dans des domaines qui sont adjacents à leurs activités clés. Une telle approche permet aux entreprises de secteurs plus traditionnels d'attirer des talents, de gagner en flexibilité et de développer des technologies perturbatrices.

Adoption des technologies numériques dans des secteurs économiques choisis

De nombreuses technologies viennent modifier la collaboration en innovation. La question est ouverte à savoir à quel point ces technologies ont été adoptées par les entreprises canadiennes et québécoises au cours des dernières années. À cet effet, les secteurs économiques ne sont pas tous égaux et certains sont davantage proactifs que d'autres. Or, la compétitivité et la capacité d'innovation du Québec reposent sur leur adoption rapide. Le tableau 6-3 présente l'adoption de quatre technologies (l'IA, l'IdO, les technologies de veille stratégique dont l'infonuagique, et la chaîne de blocs) dans certains secteurs économiques. Ces derniers ont été retenus parce qu'ils sont traités dans d'autres chapitres du présent livre (agriculture, construction, aérospatial, et financier), ou parce qu'ils sont particulièrement affectés par la transformation numérique. Les données proviennent de l'Enquête sur l'innovation et les stratégies d'entreprises 2017 de Statistique Canada.

Adoption de l'IA, de l'IdO, des technologies de veille technologique et de la chaîne de blocs par les entreprises du Canada (2017)								
Canada	Taille d'entreprise			Région				
	P	M	G	Qc	Ont.	Atl.	RDC	
Intelligence artificielle (IA)								
Toutes les industries sondées	4,0 ^A	3,2 ^A	7,1 ^A	10,1 ^A	5,4 ^A	4,8 ^A	3,2 ^A	2,0 ^A
Agriculture, foresterie, pêche et chasse	1,8 ^A	1,6 ^A	3,2 ^A	2,9 ^A	4,6 ^B	0,2 ^A	5,0 ^B	0,7 ^A
Construction	0,8 ^A	0,5 ^A	3,4 ^A	3,2 ^A	2,6 ^A	0,5 ^A	1,5 ^A	0,1 ^A
Fabrication de produits aérospatiaux	11,0 ^A	6,8 ^A	20,0 ^B	11,5 ^B	17,2 ^B	7,5 ^A	0,0 ^E	10,5 ^B
Intermédiation financière et activités connexes et fonds et autres instruments financiers	35,2 ^A	33,2 ^A	45,5 ^B	29,4 ^A	80,9 ^B	8,4 ^A	7,0 ^A	5,9 ^A
Sociétés d'assurance et activités connexes	11,8 ^B	8,4 ^B	7,0 ^B	39,3 ^B	12,7 ^B	13,2 ^B	2,5 ^A	10,9 ^B
Services juridiques	4,6 ^A	3,4 ^B	14,3 ^B	18,4 ^B	1,5 ^A	7,4 ^B	-	0,5 ^A
Internet des objets (IdO)								
Toutes les industries sondées	12,2 ^A	11,4 ^A	15,6 ^A	17,8 ^A	14,3 ^A	13,8 ^A	8,6 ^A	9,3 ^A
Agriculture, foresterie, pêche et chasse	13,8 ^B	13,8 ^B	13,7 ^B	16,4 ^B	4,6 ^B	18,9 ^B	2,5 ^A	17,6 ^E
Construction	16,0 ^B	16,5 ^B	10,5 ^B	17,5 ^A	20,0 ^B	11,9 ^B	8,0 ^B	18,7 ^E
Fabrication de produits aérospatiaux	15,5 ^A	13,3 ^A	20,0 ^B	15,9 ^B	20,1 ^B	15,0 ^A	0,0 ^E	10,1 ^B

Collaboration et innovation : comment la transformation numérique change la donne

Intermédiation financière et activités connexes et fonds et autres instruments financiers	37,1 ^A	36,9 ^A	48,5 ^B	19,3 ^A	80,9 ^B	13,3 ^A	15,3 ^B	5,1 ^A
Sociétés d'assurance et activités connexes	10,9 ^A	8,5 ^B	16,7 ^B	21,0 ^B	8,9 ^B	16,0 ^B	14,7 ^B	3,6 ^A
Services juridiques	5,4 ^B	4,8 ^B	11,8 ^A	9,2 ^B	1,5 ^A	6,3 ^B	0,0 ^E	6,3 ^B
Technologies de veille stratégique (incluant infonuagique, outils d'analyse des mégadonnées)								
Toutes les industries sondées	22,5 ^A	20,7 ^A	29,2 ^A	36,9 ^A	17,9 ^A	25,1 ^A	19,6 ^A	23,7 ^A
Agriculture, foresterie, pêche et chasse	16,1 ^B	16,0 ^B	16,7 ^B	19,0 ^B	3,6 ^A	11,5 ^B	6,3 ^B	28,6 ^E
Construction	18,6 ^B	16,9 ^B	30,3 ^B	30,4 ^A	9,6 ^B	20,1 ^B	13,2 ^B	22,9 ^E
Fabrication de produits aérospatiaux	25,9 ^A	23,7 ^B	30,0 ^B	26,7 ^B	20,4 ^B	27,3 ^B	0,0 ^E	50,0 ^B
Intermédiation financière et activités connexes et fonds et autres instruments financiers	56,4 ^B	52,7 ^B	63,5 ^B	65,1 ^B	86,0 ^B	40,7 ^A	22,9 ^B	38,4 ^E
Sociétés d'assurance et activités connexes	35,7 ^B	30,2 ^B	51,8 ^B	56,3 ^B	26,8 ^B	35,9 ^B	32,6 ^B	42,6 ^E
Services juridiques	36,2 ^B	35,4 ^B	40,2 ^B	54,4 ^E	-	46,5 ^E	-	26,3 ^E
Technologie de la chaîne de blocs								
Toutes les industries sondées	1,4 ^A	1,2 ^A	2,5 ^A	3,0 ^A	3,1 ^A	1,3 ^A	0,3 ^A	0,4 ^A

Agriculture, foresterie, pêche et chasse	0,0 ^E	0,0 ^E	0,0 ^E	0,0 ^E				
Construction	0,0 ^A	0,0 ^E	0,0 ^E	1,3 ^A	0,1 ^A	0,0 ^A	0,0 ^E	0,0 ^A
Fabrication de produits aérospatiaux	0,0 ^E	0,0 ^E	0,0 ^E	0,0 ^E				
Intermédiation financière et activités connexes et fonds et autres instruments financiers	33,2 ^A	34,9 ^A	38,4 ^B	14,8 ^A	82,1 ^B	4,6 ^A	0,0 ^E	2,0 ^A
Sociétés d'assurance et activités connexes	2,6 ^A	2,4 ^A	2,4 ^A	4,2 ^A	2,5 ^A	4,0 ^B	2,3 ^A	0,5 ^A
Services juridiques	0,6 ^A	0,0 ^E	2,4 ^A	18,0 ^B	0,0 ^E	0,5 ^A	0,0 ^E	1,0 ^A

Tableau t/2020-c6-3

Source : Statistique Canada, tableau 27-10-0367-01, *Utilisation de technologies de pointe ou émergentes*.

Légende : Taille : P : petites entreprises (de 20 à 99 employés), M : moyennes entreprises (de 100 à 249 employés), G : grandes entreprises (250 employés et plus).

Région : « Atl. » inclut Terre-Neuve-et-Labrador, l'Île-du-Prince-Édouard, la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick. « RDC » signifie « reste du Canada » et comprend donc le Manitoba, la Saskatchewan, l'Alberta, la Colombie-Britannique, le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest et le Nunavut.

^{A, B, C, D, E} Qualité des données : excellente (A), très bonne (B), bonne (C), acceptable (D), à utiliser avec prudence (E)⁷.

Il est intéressant de voir que des secteurs traditionnels, axés sur la machinerie, adoptent l'IdO et les technologies de veille stratégique. Ceci est particulièrement vrai pour l'IdO en Ontario (18,9 %). En effet, l'agriculture, la foresterie et la pêche sont en profonde transformation et de nombreuses technologies sont adoptées ou en développement dans ces domaines. Le tracteur intelligent, les drones qui collectent des données qui seront ensuite analysées pour gérer les champs ou encore les senseurs qui indiquent les besoins en arrosage, notamment, sont autant d'innovations qui appuient les agriculteurs dans leur travail. Il existe même des applications qui permettent aux chasseurs de trouver le gibier.

L'industrie aérospatiale est profondément bouleversée par la transformation numérique, qui apporte non seulement de nouvelles avancées quant à la fabrication, mais aussi de nouveaux produits tel l'avion autonome ou de nouveaux services promus par plusieurs aéroports pour rendre l'expérience de transport aérien plus agréable (*seamless customer experience*). Ainsi, 11 % des entreprises canadiennes du secteur ont adopté au moins une technologie liée à l'IA. Au Québec, où l'écosystème est concentré dans la grande région de Montréal, 17,2 % des entreprises ont adopté l'IA, 20,1 % l'IdO et 20,4 % l'infonuagique. Ces chiffres devraient considérablement augmenter dans les années à venir compte tenu des efforts menés en matière d'aérospatiale numérique dans la province (voir l'encadré et Armellini *et al.*, 2020).

Aérospatiale numérique au Québec

L'industrie aérospatiale est un secteur économique phare du Québec. À l'avant-garde du développement technologique, elle cherche à bénéficier de la transformation numérique. Cette dernière offre en effet un potentiel considérable d'innovation de rupture, d'ouverture de nouveaux marchés et de nouveaux modèles d'affaires, de même qu'une refonte majeure de la chaîne de valeur de l'industrie. Par exemple, l'intégration de nouvelles technologies numériques dans les processus de fabrication permet d'optimiser les procédés manufacturiers. Les nouveaux outils, telle l'impression 3D, contribuent à réduire la durée de la R-D et permettent d'avoir accès rapidement à des prototypes. Les 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 l'innovation.

Le concept émergent de l'aérospatiale numérique remodèle les frontières de l'industrie aérospatiale en incluant des entreprises du secteur des technologies de l'information et des communications (TIC), et plus particulièrement de l'écosystème en pleine ébullition de l'intelligence artificielle. Or, les organisations dans ce secteur collaborent encore peu avec l'industrie aérospatiale.

Pourtant, soutenue par une main-d'œuvre hautement qualifiée, des chercheurs de calibre mondial et des investissements publics et privés massifs, Montréal jouit d'une position unique pour développer des produits et services dans le domaine de l'aérospatiale, où des liens étroits ont été tissés au fil des années grâce à la présence d'organisations ayant favorisé la collaboration, comme Aéro-Montréal.

Un autre exemple est le Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale du Québec (CRIAQ), qui a contribué au déploiement de l'innovation ouverte en intégrant petites et grandes entreprises dans des projets de recherche menés dans des universités.

Le CRIAQ a récemment commandité une étude dont l'un des objectifs était de comprendre les écosystèmes de l'aérospatiale et de l'IA à Montréal et de définir les points de jonction possibles afin de favoriser des collaborations intersectorielles. Alors que de nombreux chevauchements entre les communautés aérospatiales et les TIC ont été notés, les liens avec l'IA étaient plutôt ténus. Le CRIAQ, avec ses collaborateurs, travaille donc à favoriser des projets communs de R-D intégrant aérospatiale et IA dans une approche d'innovation ouverte.

Toujours selon le tableau 6-3, le secteur de l'intermédiation financière au Canada se démarque de l'ensemble des autres secteurs avec l'adoption massive de l'IA (35,2 %), de l'IdO (37,1 %), de technologies de veille stratégique (56,4 %) et de la chaîne de blocs (33,2 %). Le Québec se démarque d'autant plus avec des taux d'adoption respectifs de 80,9 %, de 80,9 %, de 86 % et de 82,1 %. Les petites et moyennes entreprises sont également plus susceptibles d'avoir adopté ces technologies. Cela s'explique par la structure de la *fintech*, un domaine très dynamique au Québec composé de plusieurs jeunes pousses qui développent de nouvelles technologies et qui collaborent avec de grandes institutions financières.

Il est plus inquiétant de constater les faibles taux d'adoption dans les domaines des assurances et des services juridiques, qui seront tous deux touchés par ces technologies. Par exemple, l'intelligence artificielle, au moyen de l'apprentissage machine, accélérera le travail des avocats en leur permettant de survoler rapidement des textes légaux pour en retenir les informations clés. De surcroît, la chaîne de blocs a le potentiel de perturber profondément ces secteurs en ce qui a trait à la création de contrats, à la gestion de la propriété intellectuelle ou à la gestion de la vente et de l'achat immobilier. Dans le groupe des sociétés d'assurance, au Canada, 35,7 % des entreprises ont adopté les technologies de veille, alors qu'au Québec, c'est 26,8 % d'entre elles qui les ont adoptées; ces sociétés dépassent la moyenne de toutes les entreprises pour l'utilisation de l'IA, avec 12,7 %. Ce sont généralement les grandes entreprises qui adoptent le plus de nouvelles technologies, avec 39,3 % pour l'IA et 56,3 % pour l'infonuagique dans ce groupe. L'adoption reste faible pour la chaîne de blocs. Le constat est assez similaire pour les services juridiques, à l'exception ici de l'IA dans les moyennes (14,3 %) et les grandes entreprises (18,4 %), ces dernières ayant aussi adopté la chaîne de blocs (18 %).

Conclusion

Beaucoup de promesses sont faites grâce à la transformation numérique, qui va effectivement avoir des impacts importants sur l'économie, l'environnement et la société. La façon d'innover est elle-même affectée et, devant sa complexification croissante, les organisations sont appelées à collaborer davantage. Néanmoins, il est important aussi de demeurer prudent par rapport aux possibilités qu'offre la transformation numérique, que ce soit par exemple en ce qui touche à la qualité des données, aux biais des algorithmes, à la vie privée ou à la cybersécurité.

En effet, les données, au cœur de la transformation numérique, ne sont pas exemptes de biais. Cinq caractéristiques sont généralement utilisées pour présenter les enjeux potentiels concernant la qualité des données : le volume, la vélocité, la variété, la véracité et la valeur. Ainsi, les données peuvent être difficiles à comparer parce qu'issues de sources différentes, ou être en quantité insuffisante, ou encore être mal exploitées. Par exemple, un logiciel d'aide au diagnostic de crise cardiaque pour une femme se base en fait sur des données collectées sur des hommes, puisque trop peu de données ont été collectées sur des femmes à ce sujet. Or, le diagnostic varie entre les deux sexes. Un tel enjeu s'applique également pour les personnes racisées, alors que les algorithmes sont souvent entraînés avec une population masculine caucasienne. Par ailleurs, les algorithmes peuvent être programmés de façon biaisée, et ce, de manière inconsciente, ce qui accroît les inégalités sociales et économiques. Finalement, la cybersécurité est un enjeu clé de la transformation numérique. Or, de nombreuses organisations ne prennent pas les mesures suffisantes pour protéger leurs données sensibles ou celles de leurs clients. Les récentes fuites de données d'Equifax ou de Desjardins sont parlantes à ce sujet.

En bref, la transformation numérique affecte l'ensemble des secteurs et cela s'accompagne de réflexions importantes quant à son utilisation et à ses biais. La collaboration entre les différents acteurs de la société semble d'autant plus essentielle dans ce contexte.

Alors que la transformation numérique facilite la collaboration entre une diversité de partenaires, les organisations doivent plus que jamais innover de façon ouverte afin de faire face aux innovations de rupture telles Uber ou Airbnb. La propriété intellectuelle demeure un enjeu clé, et il y a bien sûr un équilibre à maintenir entre la R-D interne et celle qui est externalisée, de même qu'avec les différentes formules adoptées pour ouvrir le processus d'innovation. De nombreuses technologies numériques viennent augmenter le potentiel de collaboration et d'innovation, et si les tableaux présentés dans ce chapitre montrent que le taux d'adoption au Québec reste faible, nous avons montré qu'il est essentiel que les entreprises québécoises les adoptent davantage afin d'assurer leur compétitivité à moyen et à long terme.



Références

Armellini, F., Beaudry, C., Bourgault, M., Cohendet, P., Simon, L., Solar-Pelletier, L., Sultana, N. et Turkina, E. (2020). L'aérospatiale numérique au Québec : un écosystème innovant au cœur des enjeux de la société. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (18, p. 457-470). CIRANO.

Chesbrough, H. W. (2003). The era of open innovation. *MIT Sloan Management Review*, 44(3), 35-41. Repéré à <https://sloanreview.mit.edu/article/the-era-of-open-innovation/>

Iansiti, M. et Levien, R. (2004). *The Keystone Advantage: What the new dynamics of business ecosystems mean for strategy, innovation and sustainability*. Harvard Business School Press.

Institut de gouvernance numérique (IGN). (2019). *Registres distribués, l'évolution de la chaîne de blocs. Impacts, enjeux et potentiels pour le Québec*. Repéré à <https://ign.quebec/livreblanc>

Liyanage, S. (1995). Breeding innovation clusters through collaborative research networks. *Technovation*, 15(9), 553-567. doi:10.1016/0166-4972(95)96585-h.

OCDE. (2018). *Oslo Manual 2018. Guidelines for collecting, reporting and using data on innovation* (4^e éd.). Paris (France) : Éditions OCDE. doi:10.1787/9789264304604-en <https://www.oecd.org/science/oslo-manual-2018-9789264304604-en.htm>

OCDE. (2019). *Digital innovation: Seizing policy opportunities*. Paris (France) : Éditions OCDE. <https://doi.org/10.1787/a298dc87-en>

Olleros, F. X. et Zhegu, M. (2016). Digital transformations: An introduction. Dans F. X. Olleros et M. Zhegu (dir.), *Research Handbook on Digital Transformations* (p. 1-19), Cheltenham (Royaume-Uni) : Edward Elgar.

Schumpeter, J. A. (1942). *Capitalism, Socialism and Democracy* (1^{re} éd.). Londres (Royaume-Uni) : Routledge.

Notes

1. La définition utilise le terme générique *unité* pour décrire l'acteur responsable des innovations. Celui-ci fait référence à toute unité institutionnelle dans n'importe quel secteur.
2. Il s'agit d'une expression qui représente la résistance de la part du personnel d'une organisation face à l'introduction d'une innovation ou d'une invention venant de l'externe.
3. Statistique Canada a des normes bien précises quant à la qualité des données. Des informations complémentaires peuvent être consultées dans son site Web, à l'adresse suivante : <https://www.statcan.gc.ca/fra/aperçu/politique/info-usager>.
4. Voir la note 3.
5. Une campagne de sociofinancement qui n'atteint pas au minimum 100 % de son objectif après une durée établie dès son lancement (généralement quelques semaines) sera considérée comme un échec et les personnes qui appuyaient le projet n'auront pas à déboursier les sommes convenues. Il est possible, lorsqu'un projet suscite beaucoup d'intérêt, que les contributions dépassent l'objectif initial.
6. Pour plus de détails, consulter le site Web suivant : <http://www.haricot.ca/page/about>.
7. Voir la note 3.

Section 2.2

Le marché du travail et la formation face à la transformation numérique





Chapitre 7

POINT DE VUE

L'IMPORTANCE DES MATHÉMATIQUES ET DE LA NUMÉRATIE POUR LE QUÉBEC

Luc Vinet

Directeur du Centre de recherches mathématiques (CRM)
de l'Université de Montréal, chercheur et fellow au CIRANO

Ce texte est dédié à Alexandra Filipescu.

Résumé

Deux sujets intimement liés, la numératie et la recherche mathématique, sont discutés. La première est présentée comme l'une des pierres de touche essentielles à la formation et à la culture de nos concitoyens et au développement concurrentiel du Québec. Par la suite, un argumentaire soulignant l'importance économique et générale de la recherche mathématique est offert. Le Québec est fort bien servi à ces deux égards par l'initiative « En avant math! » et le CRM respectivement, et, pour cette raison, ces deux organisations méritent tout le soutien possible pour le positionner stratégiquement.

Introduction

C'est avec un certain sentiment d'imposture que je me mets à écrire ce texte en réponse à l'invitation qui m'a été faite d'offrir un point de vue sur l'importance des mathématiques dans le cadre de cette édition de l'ouvrage *Le Québec économique*, édité par le CIRANO, et qui porte cette année sur la transformation numérique. Mon domaine est celui de la physique mathématique et je n'ai aucune expertise en sciences économiques. Mes propos seront donc ceux d'un praticien qui a été *provost* (vice-recteur) de l'Université McGill et recteur de l'Université de Montréal, et qui a le privilège de diriger le Centre de recherches mathématiques (CRM) de l'Université de Montréal, un centre qui, fort d'une tradition de plus de 50 ans, fait partie de l'élite internationale des instituts de recherches en sciences mathématiques. Le CRM a été, au fil des ans, l'instigateur de plusieurs initiatives structurantes, dont Mitacs et, plus récemment, en collaboration avec le CIRANO, « En avant math! ».

Je discuterai principalement de deux sujets reliés : l'importance de la numératie et celle des mathématiques. J'entendrai par « recherche mathématique », pour faire court, « recherche en sciences mathématiques ». Pour ce qui est de la numératie, j'adopterai la définition de l'encyclopédie Wikipédia, qui se lit comme suit : « Capacité à utiliser, à appliquer, à interpréter, à communiquer, à créer et à critiquer des informations et des idées mathématiques de la vie réelle »; aussi, « tendance d'un individu à réfléchir mathématiquement dans différentes situations professionnelles, personnelles, sociales et culturelles » (Wikipédia, 2020a).

L'avènement fracassant de l'apprentissage profond et plus généralement de l'intelligence artificielle a beaucoup contribué à faire apprécier le rôle transformateur de certaines avancées en sciences mathématiques et leurs impacts sur différents aspects individuels et collectifs de nos vies. De plus en plus de gens réalisent que les mathématiques sont partout. La crise de la COVID-19 a mis à l'avant-scène de notre quotidien la notion de courbe (exponentielle) et a sensibilisé une fraction importante de la population de la planète à l'importance des données, de leur analyse statistique et de la modélisation de phénomènes comme la propagation de virus. Ces développements ont aussi fait prendre conscience, peut-être avec plus d'acuité que jamais, combien nécessaire est cette numératie, cette maîtrise du numérique, pour s'inscrire dans le futur de nos sociétés, y prendre une part

active et le façonner. Ces constatations ont pour corollaires de nombreux défis en éducation, en recherche et innovation, en stratégie industrielle, en éthique et en diplomatie. De l'orchestration de tout cela et de la façon dont ces défis seront relevés dépendra considérablement notre développement collectif.

La section qui suit portera sur l'importance de la numératie sur les plans individuel et sociétal. La suivante sera consacrée à l'importance de la recherche mathématique. Enfin, la dernière section, témoignant de biais que j'assume, offrira quelques suggestions d'actions à entreprendre dans le cadre d'une stratégie québécoise sur « le numérique ». Si je peux présomptueusement me permettre une métaphore économique inspirée d'un échange avec mon collègue Claude Montmarquette, pour me résumer, je pourrais dire que consommation, production, investissement et rendement seront à la clé de mon point de vue. Pour ce qui est de promouvoir la numératie et les mathématiques, il s'agira d'étayer le plaisir qu'il y a respectivement à consommer et à produire des mathématiques. Quant aux efforts à consentir, l'on fera valoir que le rendement sur les investissements est extraordinaire, et ce, tant sur le plan individuel que collectif.

Numératie

Importance individuelle

Les avantages de la numératie pour les individus sont manifestes, de nature diverse en emploi comme dans la vie personnelle, et largement documentés. Offrons-en un survol rapide.

Les bénéfices économiques sont largement validés. Les connaissances mathématiques sous-tendent des compétences recherchées qui se traduisent par une rémunération conséquente (OCDE, 2016). On peut penser que l'habileté à manier les outils informatiques sera précieuse dans un marché de l'emploi post-COVID-19 qui sera transformé par les expériences de télétravail. Elle s'avérera bien utile aussi dans le quotidien, par exemple afin d'avoir accès de manière efficace à la télémédecine.

Au-delà des connaissances, la pratique des mathématiques sur tous les plans confère des qualités qui seront vraisemblablement parmi les plus demandées par les employeurs, à savoir la capacité d'apprendre, d'affronter

des situations nouvelles et de décider. Telles sont les observations des rapports de la RBC (2018) et de Mitacs (2020). Les mathématiques jouent un rôle que le latin a pu remplir autrefois : elles servent de gymnastique pour le développement de l'esprit. Il est bien connu que l'entraînement à appliquer les mathématiques pour résoudre des problèmes est de nature à accroître la facilité à faire des analyses et à affûter le sens critique, qui repose sur la méthode scientifique et les données probantes. Cela impose une discipline intellectuelle et une structuration du raisonnement. Cette formation rend aussi les citoyens susceptibles d'utiliser optimalement les nouvelles technologies et de mieux comprendre les politiques publiques fondées sur l'expertise scientifique comme les campagnes de vaccination. Cette familiarité avec les mathématiques aiguise aussi le sens stratégique en ce qu'elle aura établi l'habitude d'élaborer un plan pour accomplir des tâches.

La numératie donne aussi confiance en soi, puisqu'elle offre le sentiment d'être équipé pour comprendre et réaliser. Ici, cependant, j'en ai contre une confiance qui serait fondée sur le sentiment d'avoir cette « bosse des maths » que d'autres n'ont pas. Je suis en désaccord avec l'utilisation des mathématiques comme matière servant à différencier et à orienter les jeunes.

Il serait faux d'affirmer que les cours de mathématiques ne peuvent pas être compris par tous les élèves. Cela ne saurait être acceptable dans la mesure où l'on vient d'expliquer que les mathématiques sont importantes pour tout le monde. L'attitude générale vis-à-vis de cette matière devrait prendre ce parti. Il est sûr, néanmoins, que l'enseignement des mathématiques a ses exigences. Le défi principal, à mon sens, tient au fait que les mathématiques constituent un édifice à plusieurs étages que l'on commence à construire en bas âge. S'il arrive qu'un étage ait été un peu négligé, il devient difficile d'aller plus haut. Il importe alors d'être vigilant à chaque étape et de n'en brûler aucune.

Enseignants et élèves doivent s'imposer d'avoir les idées claires, et si un décalage s'opère entre eux, il y a nécessité de se ressaisir et de trouver le moyen d'optimiser l'ensemble des ressources disponibles pour ce faire. Une chose fort importante à cet égard est d'instiller le plaisir de « consommer » des mathématiques et de mettre en évidence l'aspect ludique de cette matière. Rares sont ceux qui n'aiment pas jouer à des jeux vidéo ou de société, or, ceux-ci, typiquement, ont, comme les mathématiques, une

dimension d'analyse et de raisonnement. Un des problèmes de l'enseignement des mathématiques est que, trop souvent, l'on évacue le plaisir. La base générale devrait être la suivante : on apprend les règles et on joue au jeu. L'Association québécoise des jeux mathématiques¹ est une ressource remarquable à cet égard. Je souhaite que l'on cesse de démobiler des jeunes en disant : « Je n'avais pas la bosse des mathématiques », car on l'a tous, cette bosse. Puisque j'en suis à parler d'éducation, tout imbu que je suis de l'importance de la numératie, je trouve aberrant que l'on doive choisir, en quatrième secondaire, entre l'histoire et les sciences. Je pourrais discuter longuement là-dessus ; je me limiterai à dire que je considère que l'on ne saurait bien éduquer les jeunes sans s'appuyer solidement sur ces socles de la culture humaine que sont les lettres, l'histoire, les sciences et les mathématiques, et que l'on devrait songer à établir des liens dans le cursus entre toutes ces matières. Par ailleurs, passer ici sous silence l'enjeu du décrochage scolaire et ceux de la diversité et de l'inclusion serait une grave erreur ; j'y reviendrai plus loin.

Un autre apport non négligeable de la numératie sur le plan personnel est l'enrichissement culturel qu'elle induit. Celle-ci permet de suivre les développements scientifiques, mais aussi d'être sensible à la beauté que l'on trouve, par exemple, sous forme géométrique ou arithmétique dans la nature ou encore dans l'architecture, dans la poésie et dans la musique.

Avec l'intérêt de ses citoyens à l'esprit, le Québec devrait donc ambitionner d'être une société qui se distingue par son niveau élevé de numératie. Pour ce faire, il est nécessaire de mettre en place des méthodes et des mécanismes appropriés pour informer les citoyens et leur permettre de développer leur motivation vis-à-vis des mathématiques. Il faut saluer les différentes initiatives déjà mises de l'avant et s'employer à les soutenir, à les élargir et à les coordonner. L'organisation « En avant math ! », dont nous parlerons plus loin, est une initiative instaurée pour prendre part à ces efforts dans un esprit collaboratif ; elle a pour ambition d'aider à leur croissance.

Importance sociétale

On connaît les besoins de main-d'œuvre majeurs qui affectent présentement le Québec. Il s'agit d'un problème complexe et, dans plusieurs cas, les emplois à pourvoir ne requièrent pas une formation avancée. Faudrait-il

pour autant minimiser l'importance de la numératie dans l'élaboration de stratégies ? Ce serait, je crois, fort hasardeux. Dans un rapport de l'Institute for the Future publié par Dell Technologies (2019), il est prédit que 85 % des emplois qui existeront en 2030 n'ont pas encore été inventés ! On peut prendre ces prédictions avec un grain de sel, mais il est très plausible, comme je l'ai déjà mentionné, que la capacité d'apprendre aura probablement plus de valeur que les connaissances acquises. Il est donc avisé, dans cette perspective, de préparer les générations montantes en développant solidement chez celles-ci une telle agilité par la pratique des mathématiques qui sont, de surcroît, la pierre d'assise des développements à venir. Au vu des bouleversements du travail et de la technologie, le rapport *Assemblage requis : compétences en STGM et productivité économique du Canada* (Conseil des académies canadiennes, 2016) tire les mêmes conclusions et recommande des investissements soutenus et à long terme en numératie, et ce, depuis la maternelle jusqu'au secondaire.

On sait, d'une part, que la demande de personnel hautement qualifié en technologies de l'information est immense, et ce, depuis longtemps. Les études abondent à cet égard. Tous ces emplois requièrent évidemment de solides habiletés mathématiques. La carence endémique met un frein au développement d'un secteur porteur et limite du coup les retombées bénéfiques pour toute la population. Il en va de même pour la plupart des grappes industrielles du Québec. Le cas de l'intelligence artificielle est aussi très frappant. Nous avons, au Québec, comme on sait, certains chefs de file mondiaux de ce domaine effervescent aux applications multiples. Des compagnies ont été créées et de grandes sociétés multinationales se sont installées pour se coller à ces innovateurs. Pourrons-nous maintenir l'avantage unique conféré par nos succès en recherche si le pipeline de matière grise ne suffit pas à alimenter ces entreprises ? Resteront-elles au Québec dans ce cas ? Des moyens palliatifs à court et à moyen termes s'imposent. Diverses organisations, dont IVADO et SCALE AI, se penchent sur des solutions pour l'immédiat. Une croissance générale de la numératie au Québec est requise à cet égard au cours de la prochaine décennie.

D'autre part, les mathématiques sont devenues omniprésentes. On sait bien qu'elles constituent le langage des sciences et des domaines quantitatifs, mais elles se présentent aujourd'hui dans des champs d'activité où l'on n'aurait pas a priori soupçonné leur pertinence ou même leur caractère essentiel. Et ce sera encore plus vrai demain. Mentionnons, par exemple, le domaine des arts, pensons à la SAT, chez nous, aux archives et à l'histoire,

à l'analytique du sport, à la sécurité, à l'écologie, à la zoologie, à l'aviation et j'en passe. Le Australian Mathematical Sciences Institute (AMSI), que l'on devrait émuler, fait un travail remarquable pour communiquer l'importance de la formation mathématique à l'école à partir du secondaire, et il a décrit, dans un document vraiment bien fait, une multitude d'occupations pour lesquelles, de manière manifeste ou méconnue, la numératie est de mise (AMSI, 2019). Ce même AMSI poursuit un programme intitulé *CHOOSEMATHS* (en français : « Choisissez les maths ») qui a pour objectif de modifier la perception des mathématiques afin de revigorer, en Australie, l'intérêt et la motivation pour l'étude de celles-ci et de développer le pipeline mathématique allant de l'école à l'université puis vers l'industrie et le milieu du travail. Ainsi a-t-on vu, à Melbourne, à Sydney et à Perth, des autobus et des tramways peints aux couleurs de *CHOOSEMATHS* (AMSI, 2017), de même qu'à travers le pays, le long des routes, de grands panneaux publicitaires (Cheng, s.d.) avec des modèles de personnes jouant le rôle d'ambassadeurs du programme indiquant qu'elles ont « choisi les maths ». À quand une campagne similaire au Québec ?

La responsabilité des gouvernements d'assurer le bien-être d'une société doit s'appuyer sur l'optimisation de la qualité de vie des individus qui la composent. Au vu des avantages personnels que procure la numératie, son développement collectif ne peut pas dès lors être un choix, il s'agit d'une responsabilité sociale et il est impératif que ce développement se fasse sur une base d'équité et de justice et porte une attention spéciale aux personnes défavorisées.

De plus, en ce qui a trait à la diversité et à l'inclusion, il est aussi important d'accroître le niveau de numératie des Noirs, des Autochtones et de toutes nos minorités. Les efforts ne sont actuellement pas à la hauteur. L'intégration de tous nos concitoyens dans ce mouvement d'élévation s'impose tant sur une base d'équité que pour assurer la contribution de tous au progrès social.

Le taux de participation des femmes à l'« économie numérique » est aussi très insatisfaisant. On estime que moins de 20 % des emplois basés sur les sciences, les technologies, l'ingénierie et les mathématiques sont occupés par des femmes. Force est de croire que cet effet systémique est le résultat de préjugés insidieux. Il faut s'attaquer vigoureusement à ce biais préoccupant qui nous prive malheureusement d'apports critiques.

Bref, à l’instar des sociétés qui se sont démarquées par un haut niveau culturel, un Québec qui saura accroître son niveau de numératie tout en résolvant vaillamment ces derniers problèmes se sera doté d’un avantage important sur la scène mondiale.

Recherche mathématique

Importance économique

Plusieurs études produites récemment font état de l’impact grandissant des mathématiques sur les économies nationales. Je mentionnerai ici quelques-unes de ces constatations. Un rapport produit par le National Research Council américain, intitulé *The Mathematical Sciences in 2025* (2013), indique que la recherche mathématique devient de plus en plus une composante intégrale et essentielle des avancées dans un ensemble grandissant de champs tels la biologie, la médecine, les sciences sociales, les affaires, le climat, la finance, les nouveaux matériaux, etc. Il y est observé que toutes ces activités sont cruciales pour la croissance économique, la compétitivité et la sécurité nationale. Jean-Pierre Bourguignon, alors président du Conseil européen de la recherche, abondait dans le même sens dans une entrevue offerte en 2014 et intitulée « Un nouvel âge d’or pour les mathématiques en entreprise ? » (Bourguignon, 2014). Une étude menée par CMI a aussi conclu : « Nos travaux démontrent l’impact socio-économique fort des mathématiques en France, comparable aux pays voisins : 9 % des emplois impactés (versus 10 % pour le Royaume-Uni, 11 % pour les Pays-Bas), emplois à forte valeur ajoutée (15 % du PIB français versus 16 % pour le Royaume-Uni), emplois davantage porteurs de croissance (+0,9 % pour les emplois fortement impactés par les mathématiques vs 0,5 % pour la moyenne française) » (CMI, 2015). Les chiffres fournis pour le Royaume-Uni se trouvent dans le dossier réalisé par Deloitte (2012) pour l’Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), le bailleur de fonds britannique de la recherche.

Importance intrinsèque de la recherche mathématique

Il y a consensus, à l'évidence, sur l'importance et l'impact des mathématiques pour ce qui est de ses applications telles la formule de Black-Scholes pour l'évaluation d'options ou le système de cryptographie inventé par Rivest, Shamir et Adleman (RSA), sur lequel repose toute la sécurité bancaire. Toutefois, un examen des activités des mathématiciens professionnels à travers le monde pourrait donner l'impression que les recherches d'un grand nombre de ceux-ci ne sont pas très importantes. On noterait qu'en général, les articles de ces chercheurs ont relativement peu de citations étant donné le très haut niveau de spécialisation. Pour fin d'illustration, je vous pose la question : quelle fraction d'entre vous, lecteurs de cet article, pourrait énoncer un théorème démontré il y a moins de 50 ans, en particulier si l'on exclut celui de Fermat? Ou encore : vous empressez-vous de demander à un ami mathématicien de vous expliquer ses derniers résultats lors de rencontres sociales? Dans les faits, la plupart des mathématiciens ne travaillent pas sur des problèmes avec des applications directes, et cela est vrai même pour ceux qui s'intéressent à des sujets apparemment utiles. Prétendre que ce n'est pas le cas pour dire que la recherche mathématique est importante serait fallacieux. Suis-je alors en train de torpiller mon plaidoyer en faveur des mathématiques? Non. Ce n'est pas parce qu'individuellement le mathématicien typique n'a pas comme première motivation d'être utile que les mathématiques prises comme un tout ne sont pas extrêmement utiles. Mon propos est précisément d'éviter le piège de réduire ou d'asservir la recherche mathématique à ses applications. Je veux affirmer que cette recherche mathématique est importante de façon holistique même si elle semble comprendre des dimensions apparemment superflues.

Une première évidence, la recherche mathématique coûte peu si l'on compare, par exemple, aux sciences expérimentales, et, comme en attestent les études citées au début de cette section, le rendement sur ces investissements est fantastique. S'ajoute à cela le fait que les personnes impliquées dans la recherche mathématique forment aussi quantité d'élèves brillants qui utiliseront leur formation pour contribuer à l'économie mondiale.

Pas de doute, les mathématiques sont importantes. Néanmoins, un ministre des Finances soucieux de réduire ses dépenses pourrait se demander s'il ne pourrait pas obtenir les mêmes bénéfices à des coûts

encore moindres en éliminant le financement de la recherche dans ce domaine « inutile ». Timothy Gowers, médaillé Fields et professeur à la University of Cambridge, répond de manière magistrale à ce ministre dans une conférence intitulée justement « The Importance of Mathematics », et prononcée à l'occasion des fêtes du millénaire du Clay Mathematics Institute of Cambridge. Il indique avec conviction les nombreux sophismes sur lesquels repose une telle proposition en illustrant sa présentation de pépites mathématiques judicieusement choisies. Je vous en recommande fortement l'écoute² et me permettrai de résumer quelques-uns des thèmes qu'il aborde.

Tout d'abord, il est illusoire de penser pouvoir déterminer les domaines qui seront porteurs de retombées économiques. Je rappellerai que les travaux sur les réseaux neuronaux qui ont conduit aux percées retentissantes en apprentissage profond ont longtemps été perçus comme étant inutiles. Mais ne pourrions-nous pas éliminer ce qui a peu de chance d'aboutir à quelque chose ? Erreur encore, car les progrès dans la résolution de problèmes compliqués sont parfois rendus possibles par des emprunts d'idées ou de méthodes associés à des domaines très différents. Ainsi ai-je pu moi-même prouver une conjecture fameuse en combinatoire algébrique par la résolution de la dynamique quantique d'un modèle à plusieurs corps. Cette richesse des connexions entre divers domaines mathématiques est fascinante et précieuse. Gowers fait un parallèle entre l'idée de purger les mathématiques de ses parties jugées moins utiles et celle d'éliminer des entrées d'une encyclopédie ou les livres d'une bibliothèque qui sont moins utilisés. Les dommages que cela occasionnerait aux parties considérées plus utiles des mathématiques se comparent à l'appauvrissement de l'encyclopédie ou de la bibliothèque à la suite de ces retraits. De plus, s'il arrive que des problèmes très différents soient reliés, on voit aussi des situations où des problèmes qui semblent distincts sont en fait le même problème, et où la solution obtenue, dans un cas possiblement moins utile, peut être transférée à un autre peut-être très important. Pour prendre un exemple de ce type parmi mes travaux : j'ai montré et exploité récemment la correspondance entre l'étude de l'intrication de chaînes de fermions et la limitation en temps et fréquences de signaux.

Il importe aussi de dire que les connaissances méritent d'être développées pour leur valeur intrinsèque. C'est souvent à cette aune que les sociétés sont jugées. Jean Dieudonné, l'un des membres du groupe Nicolas Bourbaki, a intitulé *Pour l'honneur de l'esprit humain*³ son livre sur

l'histoire des mathématiques. J'aime beaucoup ce titre qui reflète bien l'importance humaniste de l'entreprise mathématique. Il est, en fait emprunté, à une phrase de Jacobi dans une lettre à Legendre en 1830. Dans cette perspective, la recherche mathématique a souvent comme moteur une quête de la beauté.

Une appréciation de celle-ci est généralement déterminante dans la résolution de problèmes en ce qu'elle permet de définir ou de rejeter des plans d'attaque sur la base de leur élégance. On a typiquement le sentiment fort qu'on est sur la bonne voie quand les résultats qui se dégagent sont beaux. Si les mathématiques ne se résument qu'à la résolution de problèmes, avec le temps, celles-ci deviendraient de plus en plus chaotiques et opaques. Or, il arrive régulièrement que la reconnaissance de similarités entre des sujets disparates permette de les réunir dans une théorie plus générale qui accroît notre compréhension et permet de faire de nouvelles découvertes. Le succès à décrire ainsi la complexité de manière simple et non triviale est l'une des sources des réactions esthétiques dont je parle, et cela illustre pourquoi il y a une grande corrélation entre les mathématiques qui sont belles et celles qui sont importantes. Cette beauté se manifeste aussi, pour reprendre les mots du prix Nobel Eugene Wigner, dans « l'efficacité déraisonnable des mathématiques en sciences naturelles » (Wigner, 1960), qui permettent, par exemple, de décrire des phénomènes comme les trous noirs et les ondes gravitationnelles par la géométrie de l'espace-temps. C'est ce qui a passionné le jeune homme que j'étais au cégep, et cette fascination demeure aujourd'hui toujours aussi vive. Créer de la beauté et s'en imbiber élève l'âme ; nous avons aussi le devoir de permettre au plus grand nombre, jeunes et moins jeunes, d'apprécier cette plénitude dans les expressions naturelles, artistiques et mathématiques de la beauté.

Conclusion : deux grands chantiers pour le Québec

L'avenir est mathématique

Quel est le futur des mathématiques ? Brillant, à n'en pas douter, mais la question, d'intérêt, porte plus loin. Elle a été posée régulièrement dans le passé. Souvent, elle est motivée par la volonté de repérer des problèmes particulièrement difficiles dont la solution pourrait entraîner un changement

de paradigme ; ainsi a-t-on eu le programme d'Erlangen de Klein (Wikipédia, 2020b), les problèmes de Hilbert (Wikipédia, 2020c), le programme de Langlands (Wikipédia, 2020d) (ce dernier étant un ami du CRM), ou encore, récemment, les problèmes du prix du millénaire (Clay Mathematics Institute, s.d.) pour la solution desquels l'institut lui-même vous donnera un million de dollars.

Par ailleurs, s'il est toujours périlleux de tenter de prédire l'avenir, on sait qu'au fil des siècles, les mathématiciens se sont toujours employés à élargir leur discipline, de manière à pouvoir attaquer différentes questions prégnantes. Je prends pour exemple l'initiative « Mathématiques de la planète Terre », lancée par Christiane Rousseau et le CRM, qui est devenue un mouvement mondial visant à mobiliser les mathématiciens vis-à-vis des grands défis environnementaux auxquels notre planète fait face. Ainsi pouvons-nous penser, avec Keith Devlin, de Stanford, que les « mathématiques de 2100 » (Devlin, s.d.) seront largement façonnées par la société elle-même dans une actualisation de l'incessant questionnement de l'humanité pour tenter de répondre aux questions du célèbre tableau de Gauguin *D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?* (Wikipédia, 2020e). Autant de raisons d'épouser les mathématiques!

À ce point-ci, j'espère avoir mis de l'avant des arguments suffisamment convaincants pour que l'on convienne qu'il est important : 1. de soutenir vigoureusement la recherche en sciences mathématiques en donnant davantage de visibilité aux organisations qui la servent, tel le CRM, et 2. de se donner et de réaliser des objectifs très ambitieux à l'égard de la numératie ; en cela, l'initiative « En avant math! » devrait être pérennisée. Il s'agit là d'un vaste programme et il y a tout un plan à développer pour ce faire.

Le Centre de recherches mathématiques (CRM)

Le Québec est doté d'un institut en sciences mathématiques parmi les meilleurs au monde : le CRM⁴. Il regroupe les forces vives en recherche mathématique de tout le Québec et compte quelque 300 chercheurs répartis en 13 laboratoires. Ses travaux portent sur les mathématiques pures et appliquées, la physique théorique, la statistique, l'informatique théorique, la biologie mathématique et j'en passe. Il organise (normalement) une trentaine de réunions scientifiques chaque année et reçoit annuellement

plus de 2000 visiteurs. Il fait partie du club sélect des instituts financés par la fondation Simons et il est l'hôte d'une unité du CNRS français. Le CRM est une locomotive qui a réalisé quantité d'initiatives qui ont structuré la recherche au Québec et au Canada; comme je l'ai déjà mentionné, il est à l'origine de Mitacs et aussi de Calcul Québec, par exemple.

Son financement en provenance des organismes subventionnaires du Québec et du Canada n'a pas bougé depuis 10 ans et s'est donc érodé en raison de l'inflation et de l'augmentation des salaires. Il faut trouver de meilleures façons de faire pour permettre au CRM de livrer tout son potentiel et d'être mieux connu du public afin de servir cet objectif de promotion de la numératie. Les pouvoirs publics sont en mesure de jouer un rôle primordial dans cette entreprise de valorisation.

« *En avant math!* »

Le CRM et le CIRANO ont récemment invité le gouvernement du Québec à mettre sur pied une organisation qui, à l'instar de l'AMSI dont j'ai parlé à la section traitant de la numératie, aurait pour mission d'œuvrer en collaboration avec tous les acteurs déjà mobilisés pour un accroissement radical de la numératie au Québec par l'entremise de tous les ordres d'enseignement.

Nous nous réjouissons grandement que le gouvernement ait répondu positivement à notre proposition en finançant pour trois ans le projet pilote appelé « *En avant math!*⁵ », sous l'égide duquel des études fort pertinentes sont réalisées et des actions sont lancées sur le terrain à la suite d'appels de projets.

Fort de ces succès et dans la foulée des recommandations des experts qui, toutes, convergent sur la nécessité de soutenir fortement et à long terme la numératie, il serait approprié de prévoir dès maintenant la consolidation d'« *En avant math!* » en tant qu'organisation stable.

Conclusion

Je terminerai en indiquant que les deux sujets dont j'ai traité, la recherche mathématique et la numératie, sont intimement liés. Une croissance de cette dernière est bien évidemment de nature à susciter des vocations de chercheurs et la familiarité avec des modèles de rôle aura l'effet de créer

plus d'intérêt pour la culture mathématique et la numératie. Je nous invite à entretenir ce cercle vertueux et à devenir des champions des mathématiques et de la numératie!



Références

AMSI. (2017, août). *CHOOSEMATHS careers ambassadors hit the tracks*. Repéré à : <https://choosemaths.org.au/2017/08/08/choosemaths-careers-ambassadors-hit-tracks/>.

AMSI. (2019). *Careers Guide*. (22^e édition). Repéré à : <https://careers.amsi.org.au/wp-content/uploads/sites/59/2019/06/mathsadds.pdf>.

Bourguignon, J.-P. (2014, décembre). Un nouvel âge d'or pour les mathématiques en entreprise ? *La Jaune et la Rouge*. Repéré à : <https://www.lajauneetlarouge.com/wp-content/uploads/2014/12/700-page-060-063.pdf>.

Cheng, M. (s.d.). *Choose Maths*. Repéré à : <https://www.maritacheng.com/202-choose-maths.html?tmpl=component&type=raw>.

Clay Mathematics Institute. (s.d.). *Millenium problems*. Repéré à : <https://www.claymath.org/millennium-problems>.

CMI. (2015, mai). *Étude de l'impact socio-économique des mathématiques en France. Synthèse*. Repéré à : https://www.agence-maths-entreprises.fr/public/docs/faits-marquants/eisem/eisem20150527_Etude_de_l_Impact_SocioEconomiQue_des_Mathematiques_en_France_synthese_v1.4.pdf.

Conseil des académies canadiennes. (2016). *Assemblée requis : compétences en STGM et productivité économique du Canada*. Repéré à : https://rapports-cac.ca/wp-content/uploads/2018/10/stem_fullreport_fr_cip.pdf.

Deloitte. (2012, novembre). *Measuring the economic benefits of mathematical science research in the UK: Final report*. Repéré à : <https://epsrc.ukri.org/newsevents/pubs/deloitte-measuring-the-economic-benefits-of-mathematical-science-research-in-the-uk/>.

Devlin, K. (s.d.). *What will count as mathematics in 2100?* Repéré à : https://web.stanford.edu/~kdevlin/Papers/Math_in_2100.pdf.

Institute for the Future (2019). *Future of work: Forecasting emerging technologies' impact on work in the next era of human-machine partnerships*. Dell Technologies. Repéré à : https://www.delltechnologies.com/content/dam/digitalassets/active/en/unauth/industry-reports/solutions/realizing_2030_future_of_work_report_dell_technologies.pdf.

Mitacs. (2020, juin). *Compétences futures du personnel hautement qualifié : cartographie des défis*. Repéré à : https://www.mitacs.ca/sites/default/files/uploads/newsroom/skills_policy_paper_fr_2.pdf.

National Research Council. (2013). *The Mathematical Sciences in 2025*. The National Academies Press. doi.org/10.17226/15269

L'importance des mathématiques et de la numératie pour le Québec

OCDE. (2016). *L'importance des compétences. Nouveaux résultats de l'évaluation des compétences des adultes*. OCDE. Repéré à : <https://www.oecd.org/fr/competences/piaac/Limportance-des-competences-principaux-resultats.pdf>.

RBC. (2018, mars). *Humains recherchés. Facteurs de réussite pour les jeunes Canadiens à l'ère des grandes perturbations*. Repéré à : <https://leadershipavise.rbc.com/humains-recherches-facteurs-de-reussite-pour-les-jeunes-canadiens-lere-des-grandes-perturbations/>.

Wigner, P. E. (1960). The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13, 1-14. Repéré à : https://www.physik.uni-muenchen.de/lehre/vorlesungen/wise_12_13/r_rechenmethoden/skript/PDFS/Wigner-Unreasonable-Effectiveness-of-Mathematics.pdf.

Encyclopédie Wikipédia

Numératie. (2020a, 23 septembre). Dans *Wikipédia*. Repéré à : <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Num%C3%A9ratie&oldid=174650101>.

Programme d'Erlangen. (2020b, 20 septembre). Dans *Wikipédia*. Repéré à : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Programme_d%27Erlangen&oldid=174873778.

Problèmes de Hilbert. (2020c, 20 septembre). Dans *Wikipédia*. Repéré à : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Probl%C3%A8mes_de_Hilbert&oldid=174885889.

Programme de Langlands. (2020d, 16 juin). Dans *Wikipédia*. Repéré à : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Programme_de_Langlands&oldid=172060875.

D'où venons-nous ? Que sommes-nous ? Où allons-nous ? (2020e, 16 mai). Dans *Wikipédia*. Repéré à : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=D%27o%C3%B9_venons-nous_%3F_Que_sommes-nous_%3F_O%C3%B9_allons-nous_%3F&oldid=170934011.

Notes

1. Pour en apprendre davantage sur cette association sous l'égide de l'Université Laval, consulter son site Web : [https://aqjm.fsg.ulaval.ca/accueil/?no_cache=1].
2. Pour voir la présentation, aller à : <https://www.youtube.com/watch?v=YoL3LfY3ogg>
3. On peut télécharger quelques extraits de ce texte, dont l'un sur l'inutilité, sur le site suivant : <http://www.normalesup.org/~sage/Reflexions/Maths/JDhonneur.pdf>.
4. Pour plus d'information, consulter son site Web : <http://www.crm.umontreal.ca/fr/index.shtml>.
5. Pour en apprendre davantage sur « En avant math! », consulter son site Web : enavantmath.org.

Chapitre 8

TRANSFORMATION NUMÉRIQUE ET FORMATION CONTINUE

Benoit Dostie

Professeur titulaire à HEC Montréal, chercheur et fellow au CIRANO, et directeur académique du Centre interuniversitaire québécois de statistiques sociales (CIQSS)

Genevieve Dufour

Directrice des grands projets de collaboration au CIRANO et coordonnatrice du livre *Le Québec économique 9*

Avec la collaboration de Marius Vigne

Résumé

Dans un contexte de transformation du marché de l'emploi, avec l'utilisation toujours croissante des nouvelles technologies numériques, la formation structurée liée à l'emploi, parrainée par l'employeur ou non, devrait prendre de plus en plus d'importance (OCDE, 2019). Cependant, nous avons peu de renseignements récents sur la participation à la formation au Québec, les dernières données les plus complètes à ce sujet se trouvant dans l'Enquête sur le milieu de travail et sur les employés (EMTE) de Statistique Canada qui a cessé en 2006. Il semble important d'identifier rapidement les lacunes en matière de formation structurée liée à l'emploi, cette dernière aidant les employés à acquérir de nouvelles compétences et à s'adapter aux changements organisationnels et technologiques. La présente recherche utilise donc les données de l'Étude longitudinale et internationale des adultes de 2014 et de 2016 pour documenter les moyens utilisés par les employés pour rehausser leurs compétences, les façons dont ces moyens varient selon certaines caractéristiques des employés qui ont accès à de la formation structurée en entreprise, les objectifs de ces formations, leur durée et l'efficacité perçue^{1, 2}.

Introduction

On constate présentement une explosion des recherches sur l'impact de la transformation numérique et de l'intelligence artificielle sur le marché de l'emploi. D'après Jansen, White, Dhuey, Foster et Perlman (2019), à partir de 2006, plus de 80 gouvernements, groupes de réflexion (*think tanks*) ou autres groupes ont étudié l'aspect perturbateur des nouvelles technologies, incluant l'intelligence artificielle. Les auteurs ajoutent que plus de la moitié des rapports ainsi publiés l'ont été depuis le début de 2017.

La quasi-totalité de ces études présentent une image plutôt pessimiste de l'impact de la transformation numérique sur l'emploi. En effet, elles tendent à montrer des effets négatifs importants de cette transformation sur le nombre et la précarité des emplois disponibles, ainsi qu'une modification des tâches rendant difficile pour certains individus le maintien en emploi. Il nous semble donc utile, au premier abord, de mettre ces prédictions en contexte. La plupart d'entre elles ne sont valables qu'à court terme. De plus, elles ne tiennent pas compte d'effets positifs potentiels de la transformation numérique parce qu'il est particulièrement complexe, voire impossible de les modéliser et de les capter au moyen d'analyses statistiques.

Parmi les répercussions positives potentielles, notons en premier l'effet « demande », lié à l'impact de l'innovation numérique sur la structure de coûts des entreprises. Étant donné que cette innovation amène des gains de productivité qui se reflètent en baisses de coûts pour les consommateurs, ces derniers vont demander de plus grandes quantités de biens et services ainsi offerts à coût réduit. Cette hausse de la demande va alors provoquer un accroissement de l'emploi dans les secteurs où ces entreprises évoluent.

Une belle illustration de l'effet demande est rapportée par Bessen (2015) à propos de l'introduction des guichets automatiques au début des années 1970. Certains prédisaient alors la fin des emplois en succursales bancaires. Bessen montre qu'au contraire, cette catégorie d'emplois a légèrement augmenté en nombre sur une période de 30 ans, entre 1980 et 2010. L'explication repose en partie sur la baisse des frais d'exploitation d'une succursale bancaire en raison de l'arrivée de la nouvelle technologie, ce qui avait mené à une forte augmentation du nombre de succursales.

Deux points sont à noter ici. Premièrement, bien que le nombre de succursales ait augmenté, le nombre d'employés par succursale a diminué. Deuxièmement, les tâches qui sont effectuées en succursale maintenant sont bien différentes de celles du début des années 1980. Aujourd'hui, l'accent est mis sur la construction de la relation avec le client et la vente de produits de crédit et d'investissement.

Acemoglu et Restrepo (2018) présentent les résultats d'une des rares études de l'impact de la transformation numérique qui tient compte de l'effet demande. Leur modèle montre que les répercussions sur l'emploi sont alors bien moindres qu'escompté, et qu'elles peuvent même être nulles sous certaines hypothèses. D'après ces auteurs, la création d'emplois dépend étroitement d'un impact positif de la technologie sur la productivité, sans lequel aucune baisse de coût (et d'effet demande) n'est possible.

Un deuxième impact potentiellement positif, qui n'est pris en compte dans aucune étude, est celui des nouvelles technologies sur la création de nouvelles catégories d'emplois. On peut évaluer son incidence en cataloguant tous les emplois contemporains qui n'existaient pas ou à peine il y a 50 ans. Pensons aux domaines de l'intelligence artificielle, de la protection des données ou encore du jeu vidéo, pour ne donner que quelques exemples. Bien que cet effet soit impossible à prévoir outre qu'en extrapolant sur le passé, combiné à l'effet demande, il nous permet d'avoir une vision plus optimiste par rapport aux répercussions que peuvent avoir les nouvelles technologies sur le marché de l'emploi.

Cependant, il est important de retenir que, pour permettre à une économie de profiter de ces deux effets, il est nécessaire que le marché du travail soit flexible, afin que les travailleurs, s'ils voient la valeur de leurs compétences diminuer à la suite d'une baisse de la demande pour les tâches qui composent leur emploi, puissent compter sur un système d'éducation et de formation continue en mesure de leur enseigner les nouvelles compétences en demande. Groshen et Holzer (2019) définissent ainsi la formation continue comme le principal moyen pour les travailleurs de s'adapter aux changements dans le marché du travail apportés par les nouvelles technologies telle l'intelligence artificielle.

En fait, de façon contrastée par rapport aux études faisant des prédictions divergentes quant à l'impact de la transformation numérique sur l'emploi, celles où les chercheurs s'intéressent plutôt aux stratégies d'adaptation

font toutes état du rôle important que devrait jouer la formation (Rainie et Anderson, 2017; World Economic Forum, 2018; Munro, 2019; OCDE, 2019; Spaulding, Montes, Chingos et Hecker, 2019). Malgré cette recommandation unanime, il n'existe que peu d'études portant directement sur l'incidence de la formation et des politiques d'éducation dans un contexte de transformation numérique. Nous décrivons brièvement cette mince littérature dans la prochaine section.

Notons que notre attention dans le présent texte se concentre sur la formation continue ou en cours d'emploi. Il apparaîtra clairement que la réponse politique optimale nécessite des données probantes sur la formation en cours et son efficacité. Nous verrons cependant dans la section suivante que nous manquons cruellement de données au sujet de la formation reçue par les travailleurs.

Ce manque d'information peut évidemment avoir des conséquences importantes. D'une part, identifier les individus qui n'ont pas accès à la formation mais qui en auraient besoin permet de connaître les types de personnes qui n'auront aucun moyen de s'adapter à la transformation numérique. D'autre part, nommer les raisons pour lesquelles des individus participent à une formation peut indirectement nous informer sur leur perception des effets de la transformation numérique sur leur emploi. Finalement, l'identification des impacts de la formation permet de juger si elle semble réellement améliorer les compétences.

Pour jeter un peu de lumière sur ces questions, nous poursuivons avec une analyse des données de l'Étude longitudinale et internationale des adultes (ELIA) afin de dresser un portrait récent de la participation à la formation des travailleurs québécois en comparaison avec ceux du reste du Canada, et de l'impact perçu de cette formation sur les compétences. Une analyse de la prévalence de l'utilisation de la formation permet de vérifier si les travailleurs utilisent de façon concrète cette méthode comme moyen d'adaptation en contexte de transformation numérique. Nous terminons en tirant les conclusions de cet exercice.

Qui a besoin de formation ?

Étant donné que les effets continus de l'innovation numérique sur le marché du travail sont incertains et qu'il est difficile de prévoir avec précision de quelles compétences le marché du travail aura besoin, il est nécessaire d'avoir en place un système d'éducation et de formation adaptatif et résilient qui sache répondre à des besoins changeants chez différentes clientèles.

Nous distinguons trois catégories d'individus pour qui les besoins en matière de formation pourraient différer : (1) les individus ayant de la difficulté à intégrer le marché du travail, (2) les individus au chômage à la suite d'une perte d'emploi et (3) les travailleurs en emploi. Notre centre d'intérêt ici sera sur la dernière catégorie, plus nombreuse, soit les travailleurs en emploi.

Formation pour les travailleurs

Pour cette catégorie d'individus, l'adaptation aux nouvelles technologies numériques passe principalement par la formation prodiguée en cours d'emploi, qu'elle soit soutenue par leur employeur ou non. Du côté des travailleurs, Rainie et Anderson (2017) mentionnent les résultats d'un sondage représentatif effectué aux États-Unis dans lequel 86 % des travailleurs interrogés mentionnent qu'il sera essentiel pour eux de recevoir de la formation et de développer de nouvelles compétences pour rester à jour dans leur milieu de travail.

Pour les employeurs, en contexte de pénurie de main-d'œuvre, une stratégie de développement des compétences de leurs employés semble essentielle. Les stratégies de promotion à l'interne semblent d'ailleurs être de plus en plus favorisées par les employeurs pour combler leurs besoins à des postes clés (World Economic Forum, 2018).

On pourrait penser que les bénéfices de la formation en cours d'emploi ne sont plus à démontrer. La formation parrainée par l'employeur, en particulier, a un impact positif sur les salaires des travailleurs (Haelermans et Borghans, 2012) ou sur la performance de l'entreprise, que ce soit en matière de productivité (Dostie, 2013) ou d'innovation (Dostie, 2018a).

Formation et changements technologiques

Cependant, peu d'études portent directement sur la formation dispensée dans une optique de mise à niveau des compétences ou de réorientation professionnelle dans un contexte de changement technologique plus rapide. En grande partie, cette lacune est due à la rareté des banques de données contenant de l'information à la fois sur les technologies employées par les entreprises et leurs investissements en formation, ainsi que sur les caractéristiques de leurs travailleurs.

Une étude pionnière sur le sujet est celle de Bartel et Sicherman (1998), qui ont utilisé les données américaines du National Longitudinal Survey of Youth pour documenter le fait que les travailleurs des industries ayant des taux de changement technologique plus élevés étaient plus enclins à recevoir de la formation de la part de leur employeur. Un autre résultat intéressant est que l'écart de participation entre les travailleurs plus et moins éduqués s'amenuise à mesure que les changements technologiques augmentent.

Cependant, outre cette étude novatrice, ce domaine de recherche sur l'interaction entre formation et changement technologique a été peu actif en économie dans les années qui ont suivi. Cette situation semble en voie de changement et nous portons notre attention sur deux études récentes qui exploitent des sources de données allemandes pour jeter un nouvel éclairage sur cette question.

Dans la première, Tamm (2018) examine si le fait de suivre une formation change directement les tâches effectuées par le travailleur. Il utilise des données sur les employeurs et les employés provenant de l'Allemagne pour la période allant de 2007 à 2010 et trouve qu'effectivement, la formation pousse les travailleurs à substituer à leurs tâches dites habituelles des tâches non routinières, lesquelles précisément sont moins susceptibles d'être remplacées par la technologie ou l'automatisation.

Tamm (2018) identifie aussi clairement le rôle crucial de la formation comme mécanisme d'ajustement qui facilite l'adaptation des travailleurs aux changements apportés par le progrès technologique. Plus précisément, il classifie chaque emploi selon sa composition en distinguant cinq types de tâches différents : manuelles non routinières, manuelles routinières,

analytiques non routinières, cognitives routinières et interactives non routinières. Il semble y avoir un lien entre la formation et une modification dans la composition des tâches de l'emploi vers des tâches non routinières.

Cependant, l'auteur ne peut écarter une autre explication, selon laquelle les changements technologiques modifient directement les tâches à effectuer, la formation servant alors de mécanisme d'adaptation permettant au travailleur de réaliser correctement ses nouvelles tâches. Par exemple, Mohr, Troltsch et Gerhards (2016) montrent qu'il est possible que la relation aille effectivement dans l'autre sens, car les travailleurs dont les tâches principales sont non routinières sont aussi plus enclins à suivre de la formation. Cela étant dit, la formation constitue dans les deux cas un mécanisme d'adaptation ou de coadaptation aux changements technologiques.

Dans la seconde étude récente examinant les interactions entre formation et changement technologique, Nedelkoska et Quintini (2018) portent une attention particulière aux liens entre formation et automatisation. Ils obtiennent des résultats mitigés. D'une part, ils trouvent que les travailleurs plus à risque de perdre leur emploi sont moins enclins à participer à de la formation en emploi ou à des formations externes à l'emploi. D'autre part, ils trouvent que les travailleurs qui, de leur côté, participent à de la formation sont plus enclins à se déplacer vers des emplois moins susceptibles d'être automatisés. Ce résultat, qui tient peu importe la formation suivie, est très encourageant quant au rôle de la formation comme outil permettant de migrer vers des emplois plus stables et moins à risque de disparaître en raison des nouvelles technologies. Cependant, il y a tout lieu de s'interroger sur les raisons qui font en sorte qu'une catégorie de travailleurs plus susceptibles de perdre leur emploi ne tirent pas avantage de ce moyen.

Formation et compétences

Ces études récentes montrent également que tous les types de formation ne permettent pas de faire la transition vers des tâches non routinières avec succès. Tamm (2018) note que la formation en communications et autres compétences générales a des impacts importants sur les tâches non routinières interactives effectuées, alors que les formations techniques ou administratives n'ont que peu d'impact. La formation technique, au contraire,

a des répercussions notables sur les tâches non routinières manuelles. Ce résultat milite donc contre une approche généraliste d'aide à la formation et plutôt pour l'encouragement de types de formations spécifiques.

En outre, rappelons que, pour que les systèmes d'éducation et de formation continue arrivent à offrir une réponse appropriée et adaptée à la transformation numérique, il est primordial de noter pour quelles compétences la demande est croissante. Les avis sur la question divergent et cette incertitude met en évidence l'importance d'avoir un système de formation et d'éducation flexible et adaptatif.

Rainie et Anderson (2017) distinguent deux grands ensembles de compétences pour lesquelles la demande augmente : humaines d'un côté et, de l'autre, celles qui se rapportent aux sciences, à la technologie, à l'ingénierie et aux mathématiques (ci-après nommées « compétences STIM »). Parmi les compétences humaines, mentionnons les capacités de réseautage, la gestion des relations publiques, l'intelligence sociale et émotionnelle, la sensibilité interculturelle, l'initiative, la collaboration, l'empathie, la compassion, le jugement, la résolution de conflits, la capacité de motivation et de mobilisation, l'innovation, la pensée critique, la créativité, la multidisciplinarité, etc. Parmi les compétences STIM, mentionnons la capacité de coder et de programmer, la modélisation 3 D, l'analyse de données, etc.

Pour sa part, Munro (2019) argumente que les systèmes de perfectionnement professionnel, de formation et d'apprentissage continu devraient plutôt mettre l'accent sur les compétences de base, permettant aux travailleurs de bâtir sur celles-ci pour en acquérir de nouvelles.

Quant à Tamm (2018), il remarque aussi qu'il y a des inégalités importantes entre les personnes qui reçoivent les formations. Il est bien connu que les femmes (dans le secteur privé), les immigrants, les individus moins éduqués ou plus âgés, et les travailleurs dans les petites et moyennes entreprises reçoivent moins de formation (Dostie et Montmarquette, 2007). Comme il s'agit souvent des mêmes catégories de personnes qui sont plus susceptibles d'être affectées par les changements technologiques, il importe de leur porter une attention particulière.

L'interaction entre les changements technologiques et les systèmes de formation reste essentielle. La question demeure : existe-t-il actuellement un système de formation formelle et informelle qui peut répondre aux besoins des individus présentement sur le marché du travail ? Ce système pourra assurément évoluer si les acteurs misent sur certains développements technologiques ; par exemple, plusieurs prévoient une montée des systèmes de formation en ligne et d'autoformation (Rainie et Anderson, 2017). La qualité et l'efficacité de ces formations en ligne pourraient aussi d'ailleurs bénéficier des avancées liées à l'intelligence artificielle et à la réalité virtuelle ou augmentée. D'après Goodman, Melkers et Pallais (2018), l'arrivée sur le marché d'une panoplie de diplômes en ligne comme ceux offerts par des micro ou même des nanoprogrammes suggère qu'il y a une demande substantielle pour l'éducation de la part des travailleurs en milieu de carrière.

Historique des données sur la formation au Québec et au Canada

Compte tenu de l'accent renouvelé sur l'importance de la formation continue, il est inquiétant de constater que nous avons très peu d'informations fiables sur la participation des travailleurs aux activités de formation en général et à la formation en entreprise en particulier.

La très grande majorité des articles sur le sujet pour le Québec et le Canada utilisent des données récoltées par Statistique Canada, soit les données de l'Enquête sur l'éducation et sur la formation des adultes (EEFA) ou de l'Enquête sur le milieu de travail et les employés (EMTE).

L'EEFA est une enquête en coupes transversales qui a été menée à quatre reprises, en 1992, en 1994, en 1998 et en 2003 comme supplément à l'Enquête sur la population active. L'EMTE est une enquête longitudinale sur les employeurs et les employés qui couvre la période de 1999 à 2006. Alors que les deux enquêtes permettaient d'avoir une idée approximative des taux de participation à la formation continue pour certains types de formation et d'estimer ses conséquences sur le travailleur (salaire, durée d'emploi, satisfaction, etc.), l'EMTE contenait aussi de l'information sur les investissements de l'entreprise dans les nouvelles technologies et permettait donc également d'estimer les effets sur l'employeur (productivité par travailleur, innovation).

En matière d'incidence, tout dépendant du type de formation, il est permis de dire que de 30 % à 40 % des adultes ont participé à un épisode de formation annuel durant la période couverte par ces enquêtes (Hart, 2019). Les taux varient évidemment selon le type de formation. Au Québec, par exemple, pour la dernière vague de l'EMTE en 2005, Dostie (2015) rapporte que les pourcentages moyens de travailleurs recevant de la formation en classe dans les petites, moyennes et grandes entreprises étaient respectivement de 12 %, de 23 % et de 43 %. Pour la formation en cours d'emploi, les taux correspondants étaient de 18 %, de 30 % et de 33 %.

L'Institut de la statistique du Québec (ISQ) a aussi tenu quelques enquêtes sur le sujet, par exemple l'Enquête sur les pratiques de formation en emploi (EPFE), qui a été menée en 2011 et en 2014 pour le compte d'Emploi Québec (voir ISQ, 2016). On y apprend notamment que, parmi les moyennes et les grandes entreprises (avec une masse salariale de plus de 1 million de dollars), près de 14 % ont investi moins de 1 % de leur masse salariale en formation³.

Bien que plus récente, cette enquête porte seulement sur les pratiques de formation des entreprises avec une masse salariale de plus de 250 000 dollars. Elle ne permet donc pas d'avoir une image globale de la participation de l'ensemble des travailleurs à diverses formations. De plus, les données de cette enquête ne sont pas présentement disponibles pour les chercheurs, limitant grandement leur utilité.

L'Étude longitudinale et internationale des adultes

Il est particulièrement utile que Statistique Canada ait dans les dernières années mis à la disposition des chercheurs une nouvelle enquête : l'ELIA. Cette enquête recueille des renseignements auprès de répondants au Canada sur leur travail, leur éducation, leur santé et leur famille. Les données de l'ELIA ont été récoltées en 2012, en 2014, en 2016 et en 2018, bien que les données de cette dernière vague ne soient pas encore disponibles.

Cette enquête a plusieurs particularités intéressantes, notamment le fait qu'un sous-ensemble des répondants était présent d'une vague à l'autre, ce qui permet des analyses longitudinales. Puisque les données sont

appariées aux fichiers fiscaux, il est aussi possible d'obtenir de l'information sur les revenus des répondants. Deux composantes de l'ELIA sont particulièrement pertinentes pour ce chapitre : Formation structurée liée à l'emploi et Autoévaluation de l'amélioration des compétences. Nous en décrivons les résultats dans la section qui suit.

Résultats : compétences et formation

Les données de l'ELIA nous apprennent que 60 % des travailleurs canadiens ont affirmé que leur niveau général de compétences utilisées au travail avait augmenté en 2014 (57 % en 2016). En 2016 toujours, au Québec, 44 % des travailleurs disaient que leur niveau de compétences s'était amélioré un peu, par exemple qu'ils étaient capables d'accomplir de nouvelles tâches, et 55 % disaient s'être beaucoup améliorés, étant capables de faire beaucoup plus de choses ou de nouvelles choses à un niveau plus élevé. Les résultats sont inversés pour les travailleurs du reste du Canada, alors que 55 % d'entre eux disaient que leurs compétences avaient peu augmenté et 44 %, qu'elles s'étaient beaucoup améliorées.

Les travailleurs ont par la suite été interrogés sur les moyens qu'ils ont utilisés pour améliorer leur niveau de compétences. Les répondants pouvaient indiquer plusieurs choix simultanément parmi les 10 méthodes de formation illustrées dans le graphique 8-1 pour 2016. Notons que nous classifions dans les graphiques 8-1 et 8-2 les différents types de formations selon qu'on les qualifie de formelles ou d'informelles. Cette classification se veut un écho de celle faite par la Loi favorisant le développement et la reconnaissance des compétences de la main-d'œuvre en vigueur au Québec. Cependant, tous les types de formations ne comptent pas aux fins de la loi. Nous avons rassemblé sous l'étiquette « formelle » celles qui étaient, à nos yeux, les plus susceptibles d'être reconnues aux fins de la loi dite « du 1 % ». Cette catégorisation est présentée dans le tableau 8-1. Ainsi, la catégorie « formelle » comprend, par exemple, la participation à des ateliers, la formation scolaire et toute formation se donnant hors des lieux de travail.

Types de formations	
Type	Activités pouvant contribuer à une amélioration du niveau de compétences
Formation formelle	Vous avez assisté à des ateliers, à des séances de tutorat et à des colloques (mis à votre disposition par votre employeur).
	Vous avez suivi une formation assistée par ordinateur, des cours par correspondance ou une formation en ligne (mis à votre disposition par votre employeur).
	Vous avez suivi une formation hors du lieu de travail de votre employeur.
	Vous avez suivi une formation scolaire.
Formation informelle	Vous avez fait de l'autoformation.
	On vous a montré comment accomplir une tâche.
	On vous a fait travailler avec une autre personne pour obtenir des instructions ou des conseils.
	Vous avez lu des manuels, des notes de formation ou d'autres documents.
	Vous avez acquis des connaissances ou des compétences pertinentes à l'emploi par des discussions ou des rencontres.

Tableau t/2020-c8-1

Notons aussi que cette classification diffère de celle habituellement utilisée par les économistes ; ceux-ci parlent en effet de formations générales ou spécifiques. La formation dite générale est perçue comme étant « portable » d'un employeur à l'autre, améliorant les compétences et la productivité des travailleurs chez tous les employeurs. Des formations en littératie ou numératie de base entreraient dans cette catégorie.

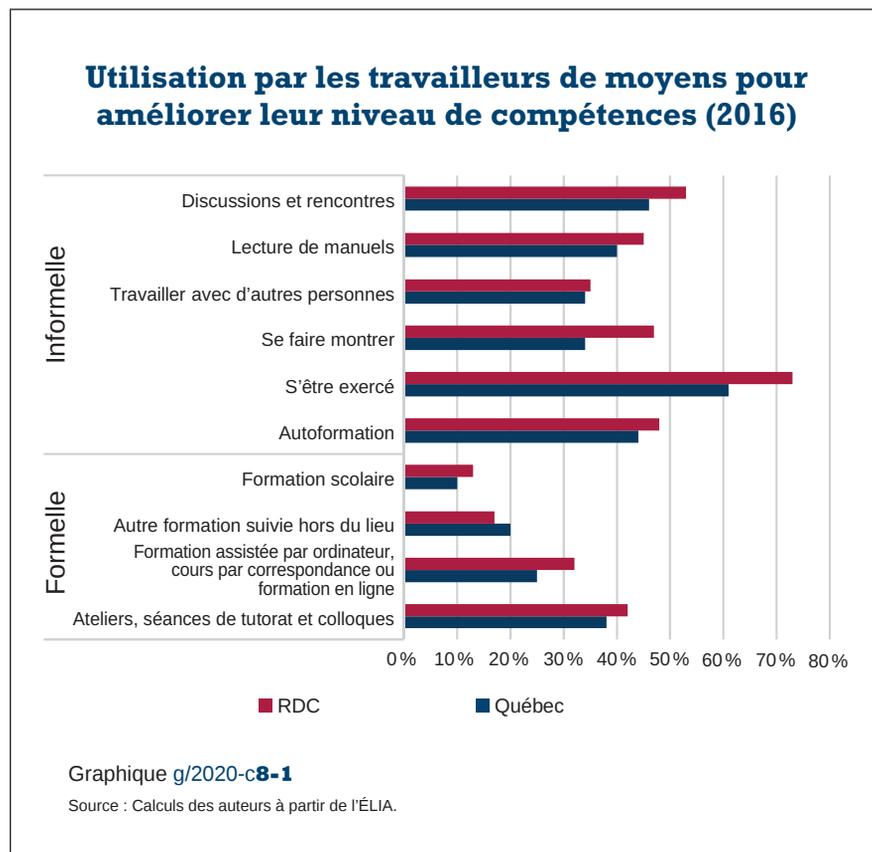
La formation dite spécifique est présumée augmenter la productivité d'un travailleur seulement dans une entreprise donnée. Pensons alors à une formation sur un logiciel qui n'est pas utilisé à l'extérieur de l'entreprise par exemple. Pour la plupart des auteurs dans ce domaine, la formation formelle est plus générale et la formation informelle est plus spécifique.

Il est traditionnellement admis qu'une formation générale a plus de répercussions sur le salaire qu'une formation spécifique (Mincer, 1984), même s'il est maintenant reconnu que les deux types de formation peuvent influencer les salaires à la hausse (Acemoglu et Pischke, 1998). Quant à l'effet des formations sur la productivité, il est généralement admis que

c'est la formation formelle qui a le plus d'impact (Lynch, 1996 ; Barrett et O'Connell, 2001). Cependant, pour certains sujets, Dostie (2013) montre que les répercussions sur les salaires sont les mêmes peu importe le type de formation. Le tableau 8-1 sépare les formations de type formel des formations de type informel.

Les moyens les plus utilisés pour améliorer le niveau de compétences ?

Parmi les moyens utilisés illustrés dans le graphique 8-1, « s'être exercé » est celui qui revient le plus fréquemment, particulièrement dans le reste du Canada où, pour les deux périodes étudiées, plus de 70 % des gens l'ont choisi.

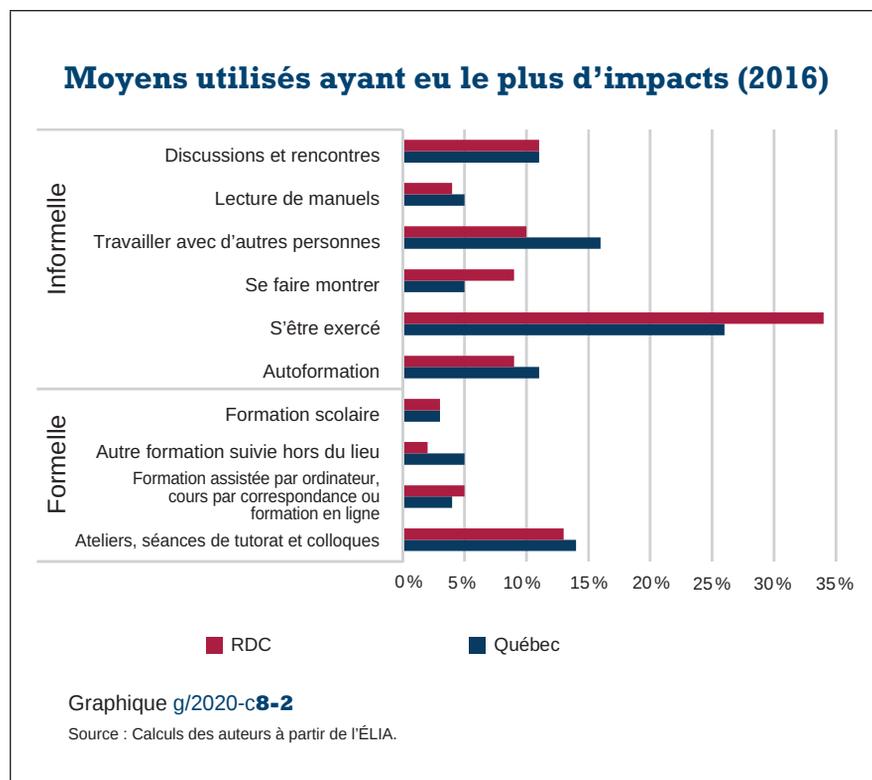


Au Québec, les travailleurs ont utilisé à 74 % des formations informelles, par exemple « s'être exercé » (61 %), les « discussions et rencontres » (46 %), l'« autoformation » (44 %) et la « lecture de manuels » (40 %), alors que 26 % se sont prévalus de formations formelles. Dans le reste du Canada, l'ordre des réponses les plus populaires est similaire. « S'être exercé » (73 %) est la réponse la plus fréquente, suivie de « discussions et rencontres » (53 %), « autoformation » (48 %), « se faire montrer » (47 %) et « lecture de manuels » (45 %). Cependant, le pourcentage de travailleurs ayant utilisé des formations formelles y est plus bas, avec 23 %.

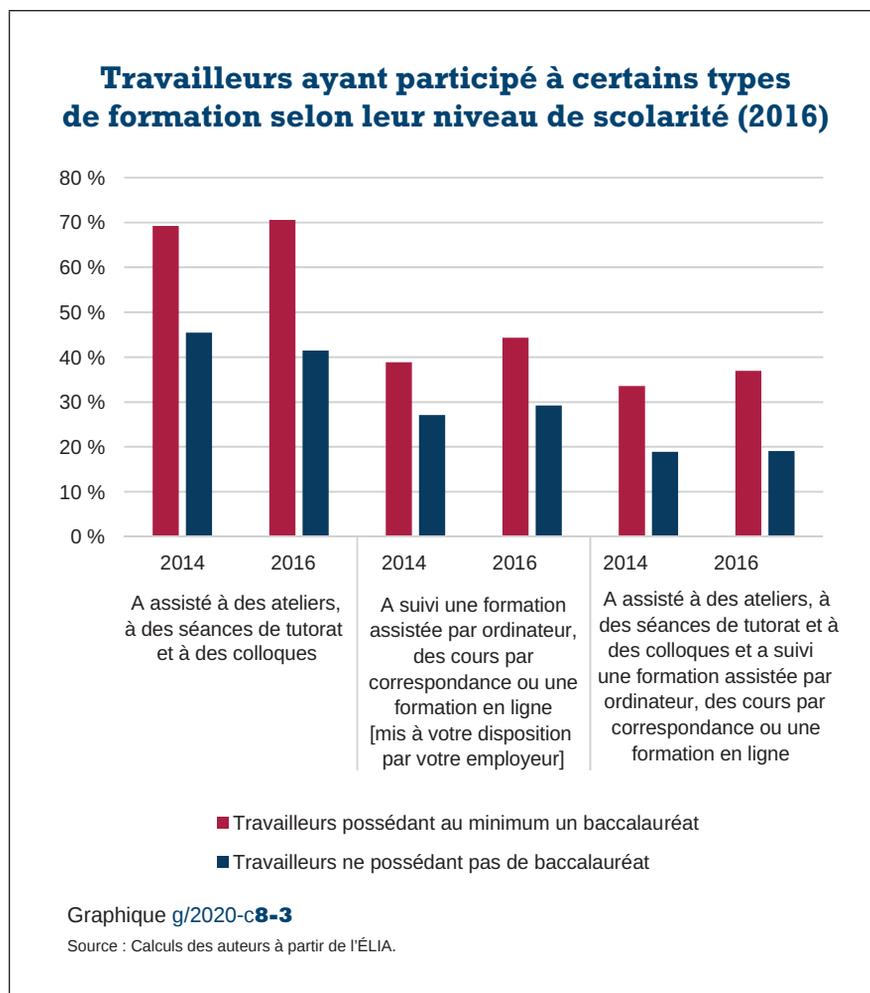
Nous remarquons que, dans l'ensemble, les travailleurs du reste du Canada utilisent une plus grande variété de moyens, c'est-à-dire qu'ils participent à des formations plus diverses pour augmenter leur niveau de compétences; la moyenne y est de 37 %, comparativement à 32 % au Québec.

Quel est le type de formation ayant le plus d'impacts sur l'amélioration du niveau de compétences ?

On constate, en observant le graphique 8-2, que c'est grâce au moyen « s'être exercé » que les travailleurs notent les plus grands impacts sur leur niveau de compétences, particulièrement dans le reste du Canada, avec 34 %, comparativement à 26 % au Québec. Ce moyen domine nettement les autres méthodes de formation. Les autres formations identifiées comme ayant eu le plus d'impacts sur les compétences sont « a assisté à des ateliers, à des séances de tutorat et à des colloques », avec respectivement 14 % au Québec et 13 % dans le reste du Canada, « avoir acquis des connaissances ou des compétences pertinentes à l'emploi par des discussions ou des rencontres », avec 11 % tant au Québec que dans le reste du Canada, et l'« autoformation », avec 11 % au Québec et 9 % dans le reste du Canada.



Au Québec, on note que, parmi les travailleurs détenant au minimum un baccalauréat, 71 % avaient suivi des ateliers, bénéficié de séances de tutorat ou participé à des colloques, comparativement à 41 % pour ceux n'en détenant pas. Cette corrélation entre participation à la formation et éducation est observée dans toutes les études sur le sujet et est typiquement expliquée par une complémentarité entre les deux types d'investissement en capital humain.

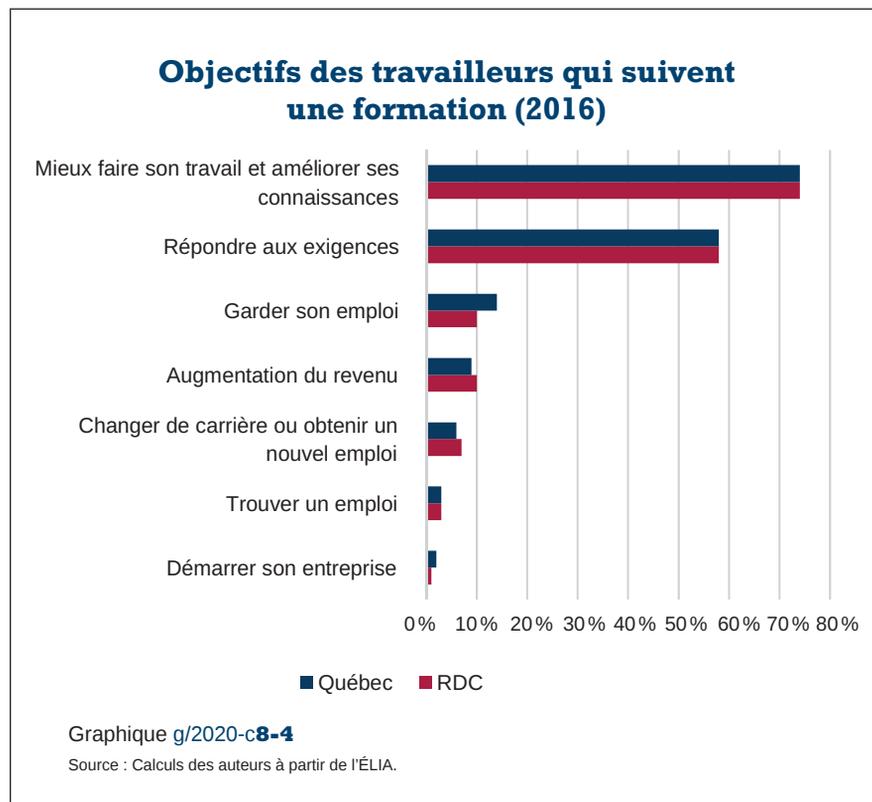


L'accès à la formation assistée par ordinateur devrait prendre de plus en plus d'importance dans l'avenir, étant donné l'offre grandissante et les coûts de livraison plus faibles. On remarque déjà une augmentation entre 2014 et 2016, de 31 à 34 % au Québec et de 38 à 42 % dans le reste du Canada (non illustré). On peut voir dans le graphique 8-3 qu'en 2016, 44 % des travailleurs détenant au minimum un baccalauréat ont suivi ce type de formation, alors que 29 % des travailleurs n'ayant pas de baccalauréat l'ont fait. Comme dans le cas de la formation par ateliers, tutorat ou colloques, parmi ceux qui n'ont pas suivi de formation assistée par ordinateur, de cours par correspondance ou de formation en ligne, dans 90 % des cas, ce type de formation n'avait pas été offert par l'employeur.

Les objectifs pour lesquels les travailleurs suivent une formation

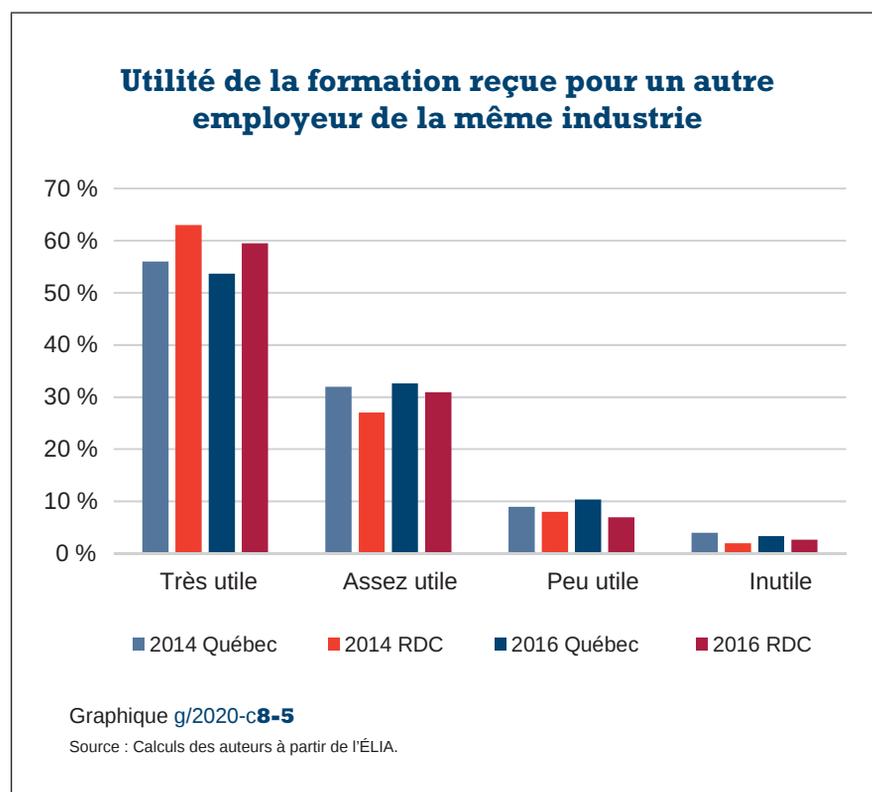
Il est très intéressant de constater que près de 75 % des travailleurs au Québec, comme dans le reste du Canada, avaient parmi leurs objectifs l'amélioration de leur performance. La seconde raison de suivre une formation, mentionnée par près de 60 % des travailleurs, est de répondre aux exigences liées à leur emploi.

« Démarrer son entreprise » ou « trouver un emploi » font rarement partie des raisons pour lesquelles les travailleurs suivent une formation ; moins de 4 % ont choisi ces réponses. L'« augmentation du revenu » comme objectif a connu une légère baisse entre 2014 et en 2016, alors que « garder son emploi » a augmenté de près de 5 % entre les deux périodes étudiées. Le graphique 8-4 illustre les objectifs nommés par les travailleurs qui les incitent à suivre une formation. Notons que les travailleurs pouvaient en choisir plus d'un.



La création de nouveaux postes ou de nouveaux emplois ne semble pas être actuellement une raison pour laquelle les employés se forment. On peut cependant penser que leur emploi et possiblement le titre de l'occupation changent, mais que pour l'employé il ne s'agit que de la transformation de son emploi, et qu'il doit s'ajuster pour rester efficace. En conséquence, il est possible que ces travailleurs donnent comme objectifs de la formation de répondre aux exigences ou de mieux faire leur travail, plutôt que d'obtenir un nouvel emploi. Les données actuelles ne nous permettent pas de documenter ce phénomène.

D'autres données intéressantes sont présentées dans le graphique 8-5. Même si, pour les deux tiers des travailleurs, la formation liée à l'emploi reçue était axée sur des méthodes, des produits, des logiciels ou du matériel spécifiques à l'employeur, plus de 90 % affirment que cette formation pourrait être assez utile ou très utile s'ils devaient travailler pour un autre employeur dans la même industrie.

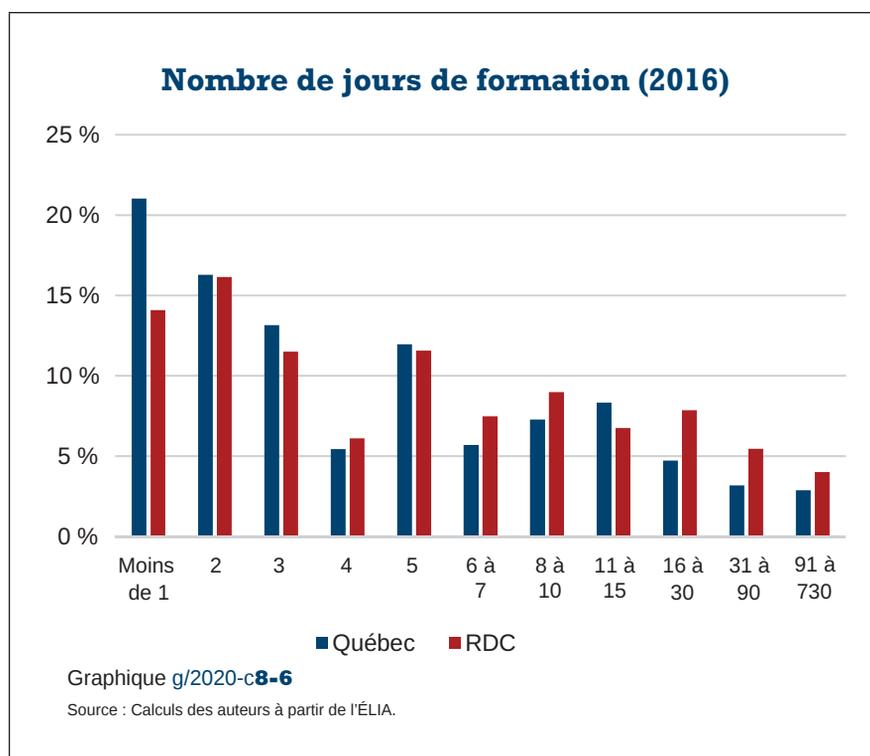


Une autre information intéressante de l'enquête porte sur les horaires des formations et n'est pas illustrée dans le graphique. Au Québec, 68 % des répondants ont indiqué avoir reçu une formation exclusivement pendant leurs heures de travail, alors que dans le reste du Canada seulement 59 % des répondants ont reçu leur formation durant cette période. Cependant, dans le reste du Canada, 28 % des travailleurs ont suivi des formations à la fois pendant leurs heures de travail et en dehors de ces heures. Au Québec, 17 % des travailleurs ont eu un tel horaire de formation.

La durée de la formation liée à l'emploi

Finalement, nous pouvons aussi examiner la durée des formations suivies avec deux types de données : la durée moyenne de la formation pour les travailleurs en fonction de l'unité de mesure avec laquelle ils ont répondu. Au Québec, les proportions de travailleurs ayant répondu avec un nombre de jours ou avec un nombre d'heures sont équivalentes (49 %-51 %), alors que dans le reste du Canada plus de travailleurs ont donné un nombre de jours qu'un nombre d'heures (56 %-44 %).

En 2016, la durée moyenne de la formation était de 17 jours au Québec comparativement à 24 jours pour le reste du Canada, et ce, pour les travailleurs ayant répondu en nombre de jours, alors que, pour ceux ayant répondu en nombre d'heures, la formation liée à l'emploi avait duré en moyenne 35 heures au Québec comparativement à 24 heures dans le reste du Canada. Les travailleurs recevant plus de formation ont davantage répondu en donnant un nombre de jours, alors que ceux qui en recevaient moins ont donné un nombre d'heures.



Dans le graphique 8-6, nous présentons le pourcentage de travailleurs selon le nombre de jours de formation reçus au cours des deux années précédentes, pour les travailleurs ayant répondu en jours seulement. Nous sommes forcés de constater qu'un pourcentage important de travailleurs reçoivent moins d'une journée de formation annuellement et que la majorité d'entre eux en reçoivent entre un et cinq jours.

Conclusion

Bien qu'il soit hasardeux de faire des prédictions sur la manière dont le processus continu d'innovation technologique va influencer le marché du travail, notamment par rapport au nombre d'emplois, il est certain que les tâches qui composent un emploi vont continuer à évoluer. Certaines vont devenir désuètes, et la demande pour les compétences nécessaires

accomplir ces tâches va diminuer. L'innovation numérique est, par contre, complémentaire à d'autres tâches, et la demande pour les compétences nécessaires afin d'accomplir ces tâches va augmenter.

Bien qu'on puisse distinguer trois grandes catégories d'individus – les chômeurs, les inactifs et les travailleurs –, chacune avec des besoins différents, nous avons porté notre attention, dans ce chapitre, sur les travailleurs, pour qui le principal moyen d'investir dans leurs compétences passe par la formation en emploi, parrainée ou non par l'employeur.

Pour pouvoir présenter un bon état de la situation quant à la participation à la formation en emploi, il est nécessaire d'avoir des données sur le sujet. Cependant, plusieurs des enquêtes des agences nationales de statistique à propos de la formation sont terminées et n'ont pas été reconduites ces dernières années.

Heureusement, nous pouvons compter sur l'ELIA, menée par Statistique Canada en 2014 et en 2016. Notre analyse de ces données montre que près de 60 % des travailleurs déclarent améliorer leurs compétences chaque année. Même qu'à l'avantage du Québec, 33 % des répondants disent avoir beaucoup augmenté leurs compétences, comparativement à 26 % dans le reste du Canada, alors que le reste des répondants rapportent avoir augmenté leurs compétences seulement un peu.

Par contre, au Canada, la prévalence de l'utilisation des différents moyens de se former est plus élevée pour tous les moyens, sauf pour « Autre formation suivie hors des lieux de travail ». Quant au moyen le plus efficace pour améliorer ses compétences, « s'être exercé » remporte la palme à la fois au Québec et dans le reste du Canada. Cette auto-perception du moyen le plus efficace pour améliorer ses compétences tranche avec ce qui est typiquement encouragé par les gouvernements, qui ciblent des formations plus formelles. Les autres types de formations valorisés par les employés incluent la participation à des « ateliers », à des « séances de tutorat », à des « colloques » ou à des « discussions et rencontres », ainsi que l'« autoformation ».

En ce qui a trait à l'impact de la formation, l'ELIA ne contient que de l'information fragmentaire. On y apprend par exemple que près de 10 % des travailleurs ont suivi des formations pour garder leur emploi et que près de 60 % l'ont fait pour répondre aux exigences de l'emploi. Par ailleurs, et de

façon complémentaire, 75 % des travailleurs effectuent de la formation pour améliorer leur performance. Il sera utile de voir comment les raisons ainsi invoquées évolueront dans le temps, pour faire un lien avec l'influence des changements technologiques. Cela pourra être fait grâce aux résultats des prochaines vagues de l'enquête.

Si on peut ainsi inférer une amélioration des compétences des travailleurs à la suite de formations, il serait aussi utile d'avoir une idée plus précise du type de compétences améliorées ou de savoir quel était le sujet des formations. Le problème, ici, c'est que l'enquête ne comporte pas d'information objective sur la performance de l'employé ou de l'entreprise qui l'emploie. Une analyse complète des déterminants et des impacts de la formation en entreprise demanderait des données à la fois du côté de l'employé et de l'employeur.

Aussi, comme nous l'avons mentionné précédemment, les décisions des entreprises touchant l'offre de formation se prennent simultanément avec des décisions d'investissement en nouvelles technologies, et il y a tout lieu de croire que ces investissements sont complémentaires. L'utilisation de données portant sur les employeurs et sur les employés permettrait potentiellement d'avoir de l'information sur les investissements complémentaires et fourniraient de l'information objective sur la productivité de l'employé.

Des études supplémentaires seraient utiles pour savoir comment les innovations technologiques peuvent influencer sur les moyens d'offrir les formations nécessaires. Les données semblent montrer une hausse de la participation aux formations en ligne, qui sont déjà plus populaires au Québec que dans le reste du Canada. Il serait à propos que, au moment où il est primordial d'investir dans ses compétences pour conserver son emploi ou répondre aux exigences qui y sont liées, le coût pour le faire baisse.

Sur le plan des politiques publiques, face à l'accélération de ces changements, nous avons présenté des éléments dans ce chapitre sur la nécessité d'avoir en place un système d'éducation qui donne des bases solides pour s'adapter à cette évolution, et un système de formation continue qui permet aux individus de continuer à investir dans les compétences nécessaires pour se maintenir en emploi.

Transformation numérique et formation continue

Aussi, les gouvernements devraient adapter leurs politiques d'aide à la formation face à ces changements appréhendés. En particulier, les secteurs de l'éducation et de la formation continue devraient avoir des rôles de premier plan dans une réflexion sur les politiques gouvernementales d'adaptation aux changements technologiques.

Notons finalement que plusieurs employeurs font face à un défi double. Tout d'abord, ils doivent utiliser des processus de production et de gestion tirant parti le plus possible des nouvelles technologies, au risque de se faire dépasser par leurs concurrents. Simultanément, il est nécessaire qu'ils disposent d'une force de travail qui sache utiliser ces nouvelles technologies. Alors que des politiques gouvernementales favorisant la formation et l'investissement dans les nouvelles technologies existent, et ce, afin de permettre aux entreprises d'obtenir le meilleur rendement pour leurs investissements, il est primordial que ces politiques soient conçues en parallèle ou, au minimum, qu'une certaine coordination soit mise en place entre les différents programmes (Dostie 2018b).

Pour une innovation réussie en entreprise, il importe donc de former les employés à l'utilisation des nouvelles technologies. Les politiques gouvernementales qui visent à favoriser l'adoption des nouvelles technologies par les entreprises devraient être accompagnées d'autres politiques d'aide à la formation des employés qui auront soit à utiliser ces technologies, soit à migrer vers d'autres catégories occupationnelles.



Références

- Acemoglu, D. et Pischke, J. S. (1998). Why do firms train? Theory and evidence. *The Quarterly Journal of Economics*, 113(1), 79-119. doi:10.1162/003355398555531.
- Acemoglu, D. et Restrepo, P. (2018). The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment. *American Economic Review*, 108(6), 1488-1542. doi:10.1257/aer.20160696.
- Barrett, A. et O'Connell, P. J. (2001). Does training generally work? The return to in-company training. *Industrial & Labor Relations Review*, 54(3), 647-662. doi:10.1177/001979390105400307.
- Bartel, A. P. et Sicherman, N. (1998). Technological change and the skill acquisition of young workers. *Journal of Labor Economics*, 16(4), 718-755. doi:10.1086/209904.
- Bessen, J. (2015). Toil and technology. *Finance and Development*, 52(1). Repéré à <https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/2015/03/pdf/bessen.pdf>.
- Dostie, B. (2018a). The impact of training on innovation. *ILR Review*, 71(1), 64-87. doi:10.1177/0019793917701116.
- Dostie, B. (2018b). Complementarities between firm-sponsored training and information technology use. *Applied Economics Letters*, 25(19), 1364-1367. doi:10.1080/13504851.2017.1420881.
- Dostie, B. (2015). Do train-or-pay schemes really increase training levels? *Industrial Relations: A Journal of Economy & Society*, 54(2), 240-255. doi:10.1111/irel.12092.
- Dostie, B. (2013). Estimating the returns to firm-sponsored on-the-job and classroom training. *Journal of Human Capital*, 7(2), 161-189. doi:10.1086/671186.
- Dostie, B. et Montmarquette, C. (2007). Employer-sponsored training in Canada: Synthesis of the literature using data from the workplace and employee survey. *Learning Research Series*. Ressources humaines et Développement social Canada. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2007/hrsdsc-rhdsc/HS28-124-2007E.pdf.
- Goodman, J., Melkers, J., et Pallais, A. (2018). An elite grad-school degree goes online. *Education Next*, 18(3). <https://doi.org/10.1086/698895>.
- Groshen, E. L. et Holzer, H. J. (2019). Improving employment and earnings in twenty-first century labor markets: An introduction. *RSF: The Russell Sage Foundation Journal of the Social Sciences*, 5(5) 1-19. doi:10.7758/rsf.2019.5.5.01.
- Haelermans, C. et Borghans, L. (2012). Wage effects of on-the-job training: A meta-analysis. *British Journal of Industrial Relations*, 50(3), 502-528. doi:10.1111/j.1467-8543.2012.00890.
- Hart, S. A. (2019). L'apprentissage de la formation en milieu de travail. *Bulletin de l'Observatoire compétences-emplois*, 9(3). Repéré à <https://oce.uqam.ca/wp-content/uploads/2019/06/La-formation-en-milieu-de-travail-5.pdf>.
- ISQ. (2016). *Résultats de l'Enquête sur les pratiques de formation en emploi au Québec en 2014*. Rapport de la division Travail et rémunération.
- Jansen, A. J., White, L. A., Dhuey, E., Foster, D. et Perlman, M. (2019). Training and skills development policy options for the changing world of work. *Canadian Public Policy/Analyse de politiques*, 45(4), 460-482.

Transformation numérique et formation continue

Lynch, Lisa M. (1996). Human Capital Investments and Productivity. *American Economic Review Papers and Proceedings*, 86(2), 263-267.

Mincer, J. (1984). Human capital and economic growth. *Economics of Education Review*, 3(3), 195-205. doi:10.1016/0272-7757(84)90032-3.

Mohr, S., Troeltsch, K. et Gerhards, C. (2016). Job tasks and the participation of low-skilled employees in employer-provided continuing training in Germany. *Journal of Education and Work*, 29(5), 562-583. doi:10.1080/13639080.2015.1024640.

Munro, D. (2019). *Compétences, formation et apprentissage continu*. Forum des politiques publiques. Repéré à <https://ppforum.ca/wp-content/uploads/2019/03/Comp%C3%A9tencesFormatioEt-ApprentissageContinu-FPP-MARS2019-FR.pdf>.

Nedelkoska, L. et Quintini, G. (2018). *Automation, skills use and training*. Documents de travail de l'OCDE sur les questions sociales, l'emploi et les migrations, 202. Paris (France) : Éditions OCDE. doi:10.1787/2e2f4eea-en.

OCDE. (2019). *Getting Skills Right: Future-Ready Adult Learning Systems*. Paris (France) : Éditions OCDE. doi:10.1787/9789264311756-en.

Rainie, L. et Anderson, J. (2017). *The Future of Jobs and Jobs Training*. Pew Research Center. Repéré à https://www.pewresearch.org/internet/wp-content/uploads/sites/9/2017/05/PI_2017.05.03_Future-of-Job-Skills_FINAL.pdf.

Spaulding, S., Montes, M., Chingos, M. et Hecker, I. (2019). *What would it take to enable all workers to develop the skills to succeed in a changing labor market?*. Urban Institute. Repéré à https://next50.urban.org/sites/default/files/2019-04/2019.04.11_Next50%20Lifelong%20Learning%20report_finalized.pdf.

Tamm, M. (2018). Training and changes in job tasks. *Economics of Education Review*, 67, 137-147. doi:10.1016/j.econedurev.2018.09.007.

World Economic Forum. (2018). *Toward a Reskilling Revolution: A Future of Jobs for All*. Repéré à http://www3.weforum.org/docs/WEF_FOW_Reskilling_Revolution.pdf.

Notes

1. Ce chapitre est tiré d'un rapport de recherche, traitant du sujet de façon plus exhaustive, à paraître au CIRANO en 2021.
2. Les analyses contenues dans ce texte ont été réalisées au Centre interuniversitaire québécois de statistiques sociales (CIQSS), membre du Réseau canadien des centres de données de recherche (RCCDR). Les activités du CIQSS sont rendues possibles grâce à l'appui financier du Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH), des Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC), de la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), de Statistique Canada, du Fonds de recherche du Québec – Société et culture (FRQSC), du Fonds de recherche du Québec – Santé (FRQS) ainsi que de l'ensemble des universités québécoises qui participent à leur financement. Les idées exprimées dans ce texte sont celles des auteurs et non celles des partenaires financiers.
3. Rappelons que la « loi du 1 % » oblige les grandes entreprises (avec une masse salariale supérieure à 2 millions de dollars) à investir l'équivalent d'au moins 1 % de leur masse salariale en activités de formation. Le seuil d'assujettissement à la *Loi favorisant le développement et la reconnaissance des compétences de la main-d'œuvre* est de 2 millions de dollars depuis 2016.

Chapitre 9

CHANGEMENTS TECHNOLOGIQUES ET POLARISATION DES SALAIRES AU QUÉBEC

Benoit Dostie

Professeur titulaire à HEC Montréal, chercheur et fellow
au CIRANO et directeur académique du Centre interuniversitaire
québécois de statistiques sociales (CIQSS)

Résumé

La polarisation des salaires survient lorsque les salaires du haut et du bas de la distribution des salaires augmentent plus rapidement que ceux du milieu. La raison citée fréquemment pour expliquer cette polarisation est le « changement technologique biaisé vers la routine ». Ce changement est caractérisé par la création de capital technologique, comme des ordinateurs, des robots ou des algorithmes, pouvant effectuer des tâches routinières, et ainsi se substituer à certains travailleurs dans des occupations à haute teneur en tâches routinières et requérant une quantité moyenne de connaissances, plus souvent rémunérées dans le milieu de la distribution des salaires. Ce chapitre explore à quel point ce phénomène de polarisation des salaires a été présent au Québec entre 1995 et 2015 à l'aide des données du recensement. Nous concluons en discutant de l'évolution de la structure industrielle du Québec au chapitre de l'emploi et de quelques implications de celle-ci en matière de politique économique^{1, 2}.

Une classification utile des emplois sur le marché du travail est celle qui est faite selon les tâches qui leur sont associées. On peut ainsi distinguer trois types de tâches : les tâches cognitives (impliquant de la pensée abstraite), les tâches routinières (répétitives et laissant peu de place aux décisions indépendantes) et les tâches manuelles ou de services (impliquant souvent des interactions sociales).

Notons qu'on associe typiquement les tâches cognitives à des compétences élevées (demandant beaucoup de connaissances), les tâches routinières à des compétences moyennes, et les tâches manuelles ou de services à de plus faibles compétences.

Quelle est la différence entre la polarisation des emplois et la polarisation des salaires ?

On parle de polarisation du marché de l'emploi lorsque les parts des emplois dans l'économie demandant des compétences élevées et celles demandant moins de compétences croissent au détriment de la part des emplois demandant des compétences moyennes.

Cette polarisation du marché pourrait être à l'origine d'une restructuration de l'activité économique. Le poids dans l'économie du secteur manufacturier, qui compte plus d'emplois routiniers, baisserait alors au profit d'autres branches d'activité, comme celle des services (de proximité ou d'ingénierie), qui fait appel à des emplois peu ou hautement spécialisés.

Parallèlement, on peut définir le concept de polarisation des salaires, qui survient lorsque les salaires, dans le haut et le bas de la distribution des salaires, augmentent plus rapidement que ceux du milieu de la distribution.

La polarisation du marché de l'emploi n'entraîne pas nécessairement la polarisation de la distribution des salaires, et vice versa. Par contre, dans le cas le plus probable, les deux phénomènes peuvent être observés simultanément. C'est le cas si les emplois dans le haut de la distribution des salaires ont tendance à être associés à des tâches cognitives (ou intensives en connaissances), ceux du milieu de la distribution à des tâches routinières, et ceux du bas de la distribution à des tâches manuelles ou de services (pour un avis plus nuancé, voir Hunt et Nunn, 2019).

La raison la plus fréquemment citée pour expliquer cette polarisation est la création de capital technologique, tel que des ordinateurs, des machines ou des algorithmes, qui peuvent effectuer des tâches routinières et ainsi se substituer à certaines catégories de travailleurs dans des occupations à haute teneur en tâches routinières et moyennement intensives en connaissances. Cette hypothèse porte le nom de « changement technologique biaisé vers la routine (CTBR) » (Acemoglu et Autor, 2011).

En plus du changement technologique, il est bien connu (p. ex., Acemoglu et Autor, 2011) que, théoriquement, la délocalisation des activités de production des entreprises peut aussi mener au même genre de phénomène sur le marché du travail. Aussi, Oldenski (2014) trouve, effectivement, que la délocalisation des activités de production cause une hausse de la demande pour les emplois intensifs en connaissances et une baisse de la demande pour les emplois plus routiniers. Cependant, cette auteure ne peut dissocier le rôle de la délocalisation de celui du progrès technologique.

Il semble donc que, théoriquement, les phénomènes de délocalisation et de CTBR soient intimement liés, les emplois routiniers étant plus susceptibles à la fois d'être délocalisés et d'être remplacés par de nouvelles technologies. Empiriquement, Goos, Manning et Salomons (2014) calculent une corrélation d'environ 0,5 entre une mesure du contenu en tâches routinières d'un emploi et un indice de facilité de la délocalisation appliqué au même emploi. Ces auteurs tentent par ailleurs de distinguer la plus importante de ces deux explications et concluent sans équivoque au rôle prépondérant du CTBR. Ce résultat est confirmé par Beverelli *et al.* (2019). Nous poursuivons ce chapitre avec une discussion détaillée de la littérature récente sur le sujet, incluant les rares études sur le Canada. Nous décrivons ensuite le travail de préparation de données des recensements et les résultats pour le Québec pour la période 1990-2015, avant de conclure.

Quelques études sur la polarisation du marché du travail

Plusieurs études ont été publiées sur le sujet. Nous portons notre attention principalement vers les études sur la polarisation du marché du travail canadien, mais nous exposons d'abord quelques résultats d'études ayant un point de vue international. Nous terminons cette revue de littérature en abordant les rares articles où sont examinées les différences interprovinciales.

Un phénomène très bien documenté aux États-Unis...

Plusieurs travaux empiriques (Cortes *et al.*, 2017 ; Acemoglu et Autor, 2011 ; Brynjolfsson et McAfee, 2011) montrent une tendance soutenue à la polarisation des emplois dans la plupart des économies avancées, surtout aux États-Unis.

Mais ce sont Goos et Manning (2007) qui font office de pionniers dans l'étude de la polarisation. Ils furent en effet les premiers à montrer que les parts des emplois dans le haut et le bas de la distribution des salaires avaient augmenté au Royaume-Uni à partir des années 1970. Ils proposent une explication basée sur la technologie informatique, selon laquelle les emplois du milieu de la distribution des salaires sont plus routiniers et plus susceptibles d'être éliminés par cette technologie.

Les États-Unis demeurent certainement le pays où le phénomène de la polarisation du marché de l'emploi a été le plus étudié. Autor, Katz et Kearney (2006, 2008) donnent le ton à cette littérature en classifiant les emplois selon leur position dans la distribution des salaires au début des années 1980. Ils constatent que, pendant les années 1980, plus haut un emploi était situé dans la distribution, plus sa part dans le marché de l'emploi augmentait. Dans les années 1990, c'est la part des emplois du milieu de la distribution qui diminue à l'avantage des emplois du bas et du haut de la distribution des salaires.

Cortes (2016) est le premier à utiliser des données longitudinales (pour la période de 1976 à 2007) pour montrer, de façon très convaincante, que les travailleurs qui ont des emplois qualifiés de routiniers ont vu leur salaire diminuer au cours des dernières décennies par rapport à celui des travailleurs qui ont des emplois non routiniers. De plus, cette baisse est présente que les emplois routiniers demandent de hautes compétences ou non. Ces résultats sont importants, car, alors que Autor *et al.* (2006, 2008) trouvaient des preuves de polarisation depuis 1990, Cortes (2016), en concordance avec les études européennes, montre que le phénomène est en cours depuis beaucoup plus longtemps.

De plus, même si ce phénomène de polarisation peut s'observer au cours des trois dernières décennies, Cortes (2016) ne constate pas d'accélération récente du phénomène. Dans le cas de la période 1997-2007, ses résultats montrent même une stagnation de la croissance des emplois non routiniers à compétences élevées, un résultat conforme à celui trouvé

par Beaudry, Green et Sand (2013). Cette stagnation est cohérente avec l'hypothèse voulant que les progrès de la technologie permettent maintenant de remplacer des emplois demandant plus de compétences qu'avant.

Cortes *et al.* (2017) tentent d'expliquer les liens entre polarisation des salaires et polarisation des emplois. Ils montrent clairement que la disparition des emplois intensifs en tâches routinières du milieu de la distribution des salaires a été compensée par des hausses dans le haut et le bas de la distribution.

Cependant, les questions de l'accélération et de l'ampleur du phénomène de polarisation de l'emploi dans les dernières années restent d'intéressants sujets de discussion. Deux études récentes font remonter le phénomène jusqu'au début des années 1950 (Barany et Siegel, 2018; Atalay *et al.*, 2020). En particulier, Atalay et ses collègues, en utilisant une méthodologie totalement différente basée sur l'analyse des offres d'emploi dans trois grands journaux américains entre 1950 et 2000, confirment la présence d'une polarisation sur le marché de l'emploi et affirment que les changements qui ont eu lieu dans le marché du travail ont une plus grande ampleur que celle qui est généralement estimée. Parmi les autres résultats pertinents, mentionnons Rutledge et Guan (2015), qui examinent le marché du travail pour les travailleurs plus âgés. On pourrait penser que ce phénomène de polarisation du marché de l'emploi est particulièrement défavorable pour ces travailleurs, plus susceptibles de se retrouver dans le milieu de la distribution des salaires. Rutledge et Guan (2015) montrent que ce n'est pas le cas : ces travailleurs subissent autant le phénomène de la polarisation que les plus jeunes, et ce phénomène ne les pousse pas à quitter le marché du travail, mais les entraîne plutôt vers des emplois à faibles ou à hautes compétences.

Finalement, encore une fois dans le cas des États-Unis, Autor *et al.* (2016) montrent que, même si l'érosion du salaire minimum en termes réels joue un certain rôle pour expliquer l'augmentation de la polarisation dans le bas de la distribution des salaires, ce n'est pas le facteur explicatif prépondérant. Cela rejoint le consensus chez les économistes, selon lequel les facteurs institutionnels n'expliquent, en général, qu'une petite partie de la hausse des inégalités.

... et en Europe

Plusieurs études font le même constat dans une variété d'autres contextes internationaux. Par exemple, Kampelmann et Rycx (2011) obtiennent aussi des résultats montrant une polarisation du marché du travail allemand entre le milieu des années 1980 et l'année 2008.

Goos, Manning et Salomons (2014) montrent que, pour 16 pays de l'Union européenne, la polarisation du marché du travail a augmenté entre 1993 et 2006. Michaels, Natraj et Van Reenen (2014) examinent aussi le marché de l'emploi en Europe et arrivent à un constat similaire.

Par contre, l'explication basée sur les changements technologiques n'a pas la faveur de tous les auteurs. Par exemple, Adermon et Gustavsson (2015) documentent cette polarisation en détail pour la Suède entre 1975 et 2005. Selon eux, les avancées technologiques ne peuvent expliquer les changements concourants dans la distribution des salaires au cours de la période 1990-2005, peut-être à cause de la présence d'institutions du marché du travail menant à un processus de détermination des salaires plus centralisé.

Le Canada : un cas intermédiaire entre l'Europe et les États-Unis ?

Il est évidemment possible que les conclusions tirées des études précédemment citées ne puissent pas s'appliquer directement au Canada. Il est attendu que les institutions et les différences dans les structures de fonctionnement des marchés du travail peuvent moduler différemment l'impact des changements technologiques sur le marché du travail (Card, Kramarz et Lemieux, 1999).

Notons qu'il existe aussi des différences importantes dans la structure économique du marché de l'emploi et dans la réglementation du marché du travail entre les provinces (Deslauriers, Dostie et Gagné, 2010). Il est donc possible que les changements dans le degré de polarisation ne soient pas uniformes d'une province à l'autre.

Green et Sand (2015), dans leur revue de littérature, ajoutent d'ailleurs que la polarisation des salaires est surtout un phénomène qui a été mesuré aux États-Unis dans les années 1990. Ces auteurs argumentent aussi que le

principal modèle explicatif de l'augmentation de la polarisation du marché de l'emploi, qui met l'accent sur une augmentation de la demande à la fois pour les professions intensives en compétences cognitives et celles intensives en tâches manuelles, éclaire bien la situation aux États-Unis pendant cette décennie. Cependant, les auteurs concluent que sa pertinence pour les autres pays, ou pour les États-Unis au cours d'autres décennies, reste à déterminer et nécessite des études plus poussées.

La première étude à porter une attention particulière au phénomène de la polarisation du marché du travail au Canada est celle de Green et Sand (2015). Ces derniers ont utilisé les données des recensements et des enquêtes sur la population active entre 1970 et 2010, et ont remarqué que les parts des emplois du haut et du bas de la distribution des salaires ont augmenté plus vite que la part des emplois du milieu de la distribution.

Il s'ensuit donc que ces mouvements contrastés montrent une polarisation sans équivoque de l'emploi. Les auteurs notent que cette polarisation des emplois est similaire à celle observée aux États-Unis et, dans une certaine mesure, comparable à celle observée en Europe et au Royaume-Uni.

Concernant les salaires, Green et Sand (2015) montrent une augmentation constante des inégalités au cours de la période, les bas salariés voyant leurs salaires diminuer par rapport aux travailleurs ayant un salaire plus près de la moyenne, et ces derniers observant aussi une baisse par rapport aux hauts salariés. Ils concluent donc à une hausse des inégalités à la fois dans le haut et dans le bas de la distribution des salaires.

Ces mouvements des salaires diffèrent de la polarisation observée aux États-Unis dans les années 1990 mais sont similaires à ce qui est observé en Europe et au Royaume-Uni au cours de la même période. C'est seulement à partir de 2005 que Green et Sand (2015) constatent certains résultats montrant une tendance à la polarisation dans les salaires canadiens. Ils attribuent toutefois cette dernière non pas aux changements technologiques, mais plutôt au boom des ressources naturelles.

Compte tenu de ces mouvements divergents entre les salaires et les emplois, les auteurs concluent que l'expérience canadienne des dernières décennies diverge de celle des États-Unis, où la polarisation des salaires a augmenté fortement tout au long de cette période, et que les explications pour

les changements observés aux États-Unis (notamment les changements causés par les chocs technologiques) ne s'appliquent pas entièrement au Canada pour cette période.

Finalement, un constat surprenant et plus récent est que le degré de polarisation du marché de l'emploi n'est pas aussi important dans les années 2000 que dans les années 1990, et ce, à la fois au Canada et aux États-Unis. Le phénomène derrière ce constat n'est non pas une résurgence des emplois du milieu de la distribution des salaires, mais une diminution de la demande pour les emplois à hautes compétences (Beaudry, Green et Sand, 2013).

Green (2015) conclut de ces observations que, bien que le Canada semble avoir subi l'impact des changements technologiques sur la polarisation du marché du travail (à la Acemoglu et Autor, 2011), il importe de bien tenir compte des évolutions différenciées interprovinciales (notamment causées par la force de l'industrie extractive et les variations du salaire minimum) pour avoir une image plus complète de l'évolution du marché du travail canadien au cours des dernières années.

En conclusion, le marché canadien semble avoir suivi la tendance internationale avant les années 1990, c'est-à-dire la polarisation des emplois et l'augmentation des inégalités salariales. Au cours des années 1990, les mouvements de polarisation des emplois se poursuivent, mais ce n'est qu'aux États-Unis et dans certaines provinces qu'ils sont accompagnés d'une forte polarisation des salaires, même si celle-ci demeure plus forte aux États-Unis. Finalement, depuis 2000, la situation au Canada continue de se complexifier, de telle façon qu'il faut analyser l'évolution des salaires au niveau provincial pour avoir une idée juste des mouvements en cours (Foley et Green, 2015).

Données : recensements canadiens 1990-2015

Nous utilisons, pour estimer la distribution des salaires, les données des fichiers confidentiels détaillés pour le Québec dans les recensements canadiens. Ces données comportent de l'information détaillée sur les caractéristiques démographiques (par exemple l'âge et le sexe) des individus, leur niveau d'éducation, leur salaire, leurs revenus, ainsi que le nombre

de semaines pendant lesquelles ils ont travaillé dans l'année précédant le recensement. Il est donc possible de calculer une mesure du salaire hebdomadaire de façon similaire à Beaudry, Green et Sand (2013) à partir de ces données.

Nous comparons les changements dans cette distribution pour les années 1991, 1996, 2006 et 2016. Notons que l'examen de l'évolution des salaires avant 1991 est plus complexe à cause des changements effectués par Statistique Canada dans la codification des occupations. Notons aussi qu'à partir de 2006, les répondants pouvaient, au lieu de répondre aux questions sur leur revenu, donner la permission à Statistique Canada d'aller chercher cette information dans les fichiers d'impôt. En 2006, 80 % des répondants se sont prévalus de cette option (Statistique Canada, 2008).

Cependant, les comparaisons des revenus entre les recensements sont tout de même fiables pour les travailleurs présentant un fort attachement au marché du travail, exactement la catégorie sur laquelle nous portons notre attention dans ce chapitre (Statistique Canada, 2008). Soulignons que les données du recensement ont aussi été utilisées par Beaudry, Green et Sand (2013) pour examiner l'évolution des salaires au Canada. Ces derniers argumentent que ces données sont les plus appropriées pour comparer les mouvements des salaires et des revenus dans le temps pour la période 1991-2006.

Cette conclusion ne tient pas nécessairement pour 2011, étant donné les changements méthodologiques importants qui ont été faits lors du « recensement » de 2011, remplacé plutôt par l'Enquête nationale sur les ménages. Rappelons que le principal changement a été de rendre volontaire la participation à la forme longue du recensement, celle dans laquelle on récoltait l'information sur les salaires et les revenus de la façon la plus détaillée.

Ce changement a été fortement décrié par les parties intéressées (voir entre autres Dillon, 2010; Green et Milligan, 2010; Veall, 2010; et ISQ, 2015). Le retour à la forme longue obligatoire a eu lieu en 2016, à la suite d'un changement de gouvernement. Les données de 2011 ne sont donc pas utilisées dans les résultats présentés plus bas.

L'échantillon utilisé est obtenu en conservant les individus âgés de 18 à 64 ans qui ont travaillé un nombre positif d'heures dans la dernière semaine et qui étaient salariés. Comme Green et Sand (2015), lorsque nous faisons

référence au salaire, il s'agit en fait du salaire hebdomadaire des travailleurs à temps plein. Notons que cette restriction aux travailleurs à temps plein est nécessaire, étant donné l'absence d'information sur les heures de travail annuelles, et est fréquemment faite dans cette littérature (Beaudry, Green et Sand, 2013 ; Boudarbat, Lemieux et Riddell, 2010).

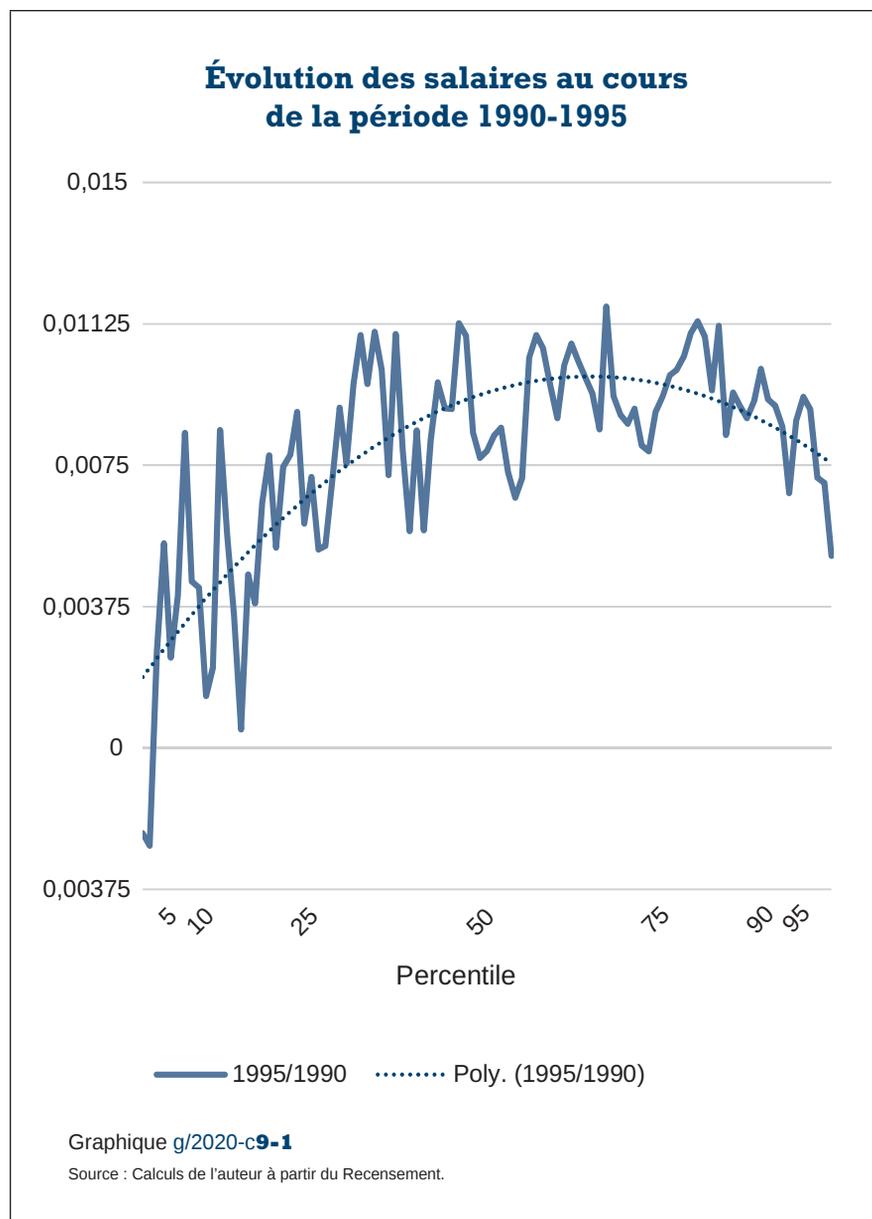
Notons au passage que la proportion de travailleurs à temps plein est relativement stable dans le temps, étant toujours légèrement supérieure à 80 %. Notre sélection des travailleurs à temps plein aurait pu être problématique si cette proportion avait montré plus de variations dans le temps.

Nous utilisons l'information sur les salaires pour calculer le salaire hebdomadaire pour les travailleurs à temps plein. Tous ces salaires sont ramenés en dollars de 2002 à l'aide de l'indice des prix à la consommation. Comme Card et Lemieux (2001), nous laissons tomber les observations où le salaire hebdomadaire est inférieur à 75 dollars en dollars de 2002.

Résultats : évolution des salaires au Québec

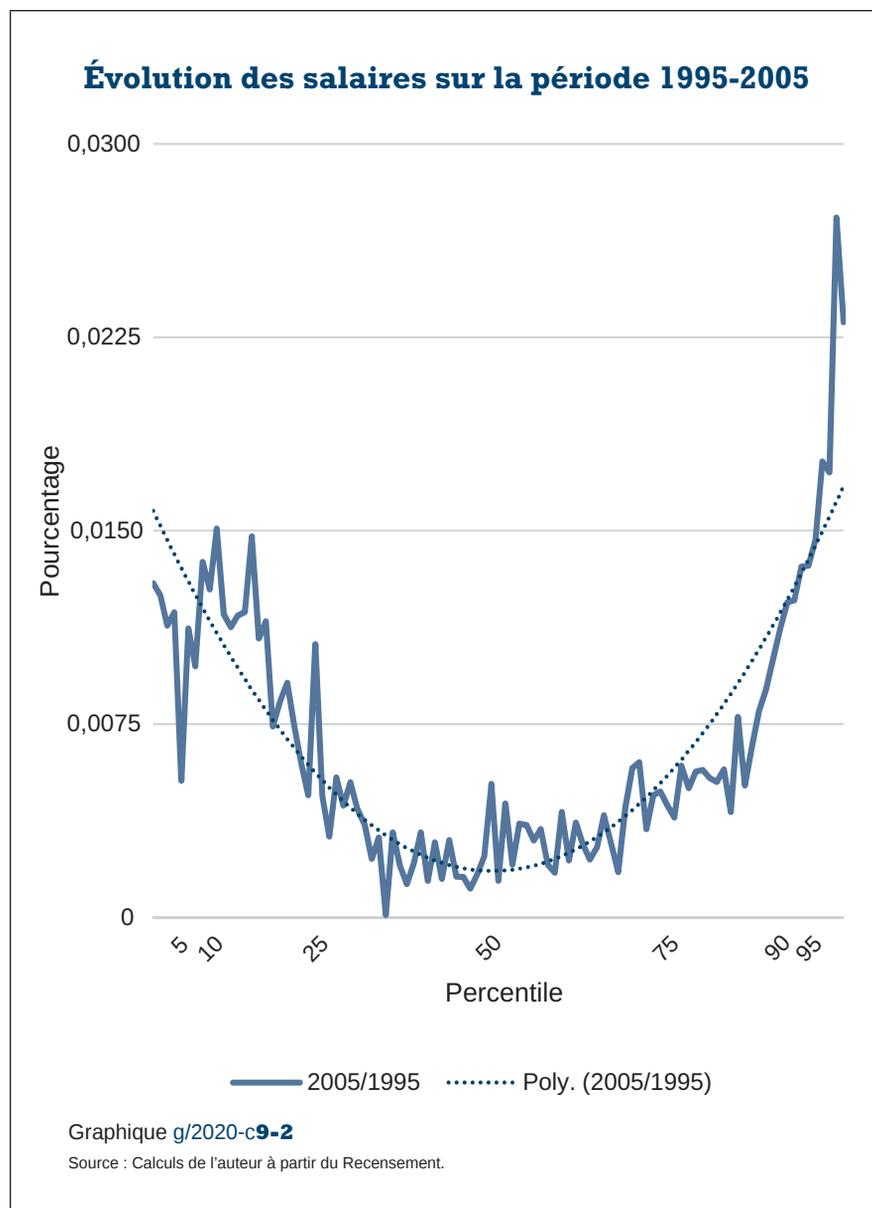
Le graphique 9-1 montre le changement de log du salaire réel hebdomadaire entre les recensements de 1990 et de 1995 pour les données du Québec ainsi qu'une approximation polynomiale de deuxième ordre. Les chiffres négatifs indiquent une décroissance des salaires, et les positifs une hausse au cours de la période. Nous portons notre attention sur les changements entre les 5^e et 95^e centiles. Pour mieux illustrer les changements, nous avons aussi ajouté (en pointillé) une courbe polynomiale de deuxième degré de meilleur ajustement.

Comme le changement en log du salaire réel en ordonnée peut s'interpréter approximativement comme un changement en pourcentage, cela implique donc que les salaires réels ont en général très peu augmenté au cours de cette période, les augmentations variant de 0 % à 1,1 % au maximum. En fait, la croissance du salaire réel hebdomadaire moyen a été en général très faible, voire négative, tout au long de la période 1980-2000, comme nous le confirment les graphiques suivants (Morissette, Picot et Lu, 2012).



L'évolution des salaires pendant la période 1990-1995 est donc plus conforme avec l'hypothèse d'un changement technologique biaisé vers les compétences : plus on se déplace dans le haut de la distribution des salaires, plus les emplois demandent de compétences. La demande accrue pour ces compétences vient donc affecter plus fortement les salaires des emplois dans le haut de la distribution.

Le graphique suivant montre l'évolution des salaires pour les 10 ans qui suivent, soit les années 1995-2005. Contrairement au graphique précédent, où plus les salaires étaient élevés, plus les augmentations sur la période étaient grandes, ce nouveau graphique montre des augmentations plus élevées dans le bas et le haut de la distribution, comparativement au milieu de la distribution. La période 1995-2005 illustrée au graphique 9-2 montre la polarisation la plus évidente. On y voit que les salaires entre le 5^e et le 25^e centile ainsi que ceux en haut du 70^e centile ont augmenté plus rapidement que ceux autour de la médiane (50^e centile), ce qui indique une polarisation des salaires au cours de la période.



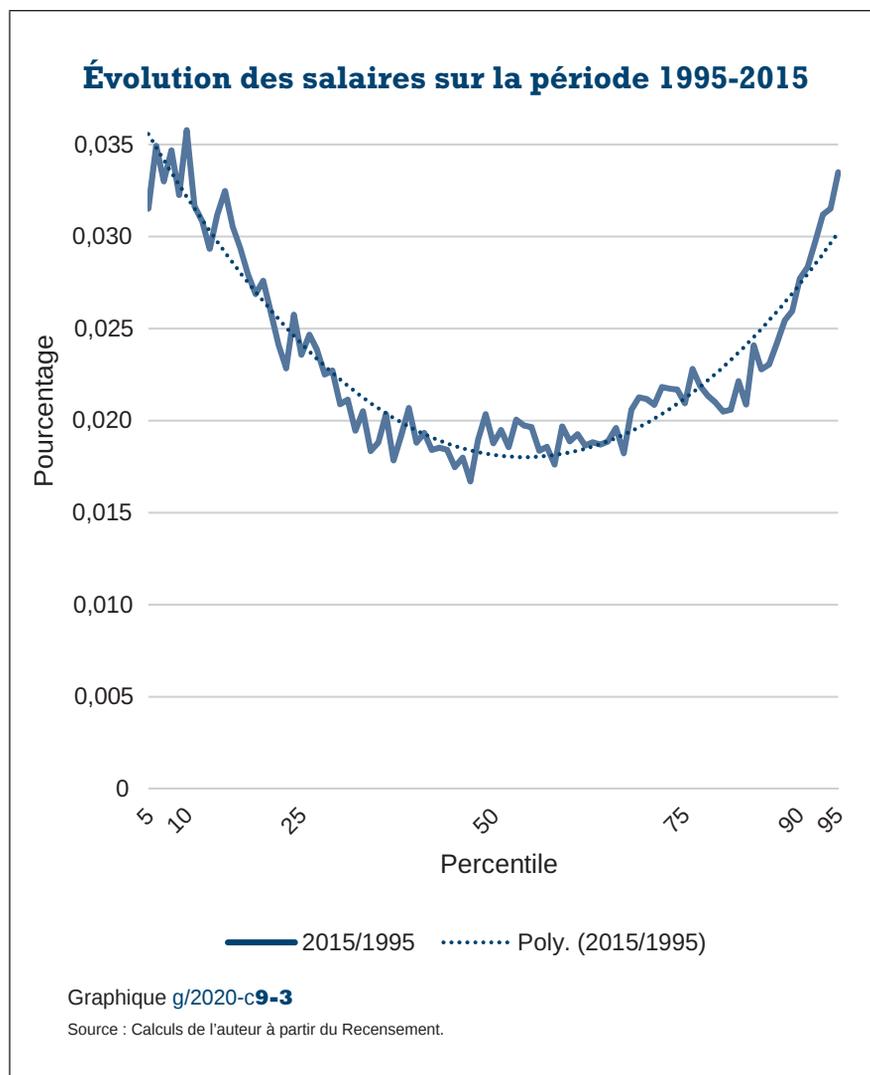
Notons qu'il est difficile de tirer des conclusions générales sur l'évolution des inégalités en contexte de polarisation des salaires. En particulier, dans ce contexte, les inégalités augmentent dans le haut de la distribution, mais

diminuent dans la moitié du bas de la distribution. Ceci pourrait expliquer en partie une certaine anxiété dans la classe moyenne, qui voit ainsi les plus riches s'éloigner et les plus pauvres se rapprocher, en termes de croissance salariale.

La forme convexe de la courbe illustre bien le phénomène de polarisation des salaires. La forme de la courbe est très semblable à celle rapportée par Acemoglu et Autor (2012) pour la période 1988-2008 aux États-Unis.

Finalement, le graphique 9-3 montre les changements de log du salaire réel hebdomadaire en incluant la période la plus récente, soit 1995-2015³. Le phénomène de polarisation des salaires est toujours bien mis en évidence dans ce graphique. Notons que, par rapport au graphique précédent, les augmentations de salaire réel sont toutes plus élevées, conformément à une croissance salariale substantielle bien documentée au cours de la période (Riddell, 2018). La forme de U moins prononcée est aussi conforme au fait que les inégalités salariales ont moins augmenté au cours de la période au Canada (Riddell, 2018).

Un phénomène potentiellement inquiétant mis en évidence par le graphique 9-3 est que le point d'inflexion de la courbe, représentant le salaire à partir duquel les changements de salaire recommencent à augmenter, semble se déplacer vers la droite. Ceci est cohérent avec un progrès technologique qui vient remplacer des emplois de plus en plus élevés dans la distribution des salaires.



Une hypothèse intéressante est proposée par Beaudry, Green et Sand (2013), qui argumentent que le tournant des années 2000 coïncide avec la maturité de la dernière vague de changements technologiques. Cette maturité aurait entraîné une baisse de la demande pour les travailleurs qualifiés. Par contre, comme l'offre de ce type de travailleurs a continué à augmenter, ceux-ci se sont retrouvés dans des postes à des échelons inférieurs de l'échelle de compétence, provoquant des pressions à la

baisse sur les salaires à tous les échelons. Les changements pour la période 2005-2010 sont aussi cohérents avec cette dernière explication, les hausses salariales dans le haut de la distribution commençant à être moins prononcées par rapport à la médiane.

Finalement, remarquons dans le graphique 9-3 que le phénomène de polarisation est maintenant observé sur une période de près de 20 ans, ce qui nous permet de dire que c'est un phénomène de long terme. Ainsi le Québec n'est pas différent à ce sujet d'autres pays où ce phénomène est aussi observé sur de longues périodes (Bachman *et al.*, 2019).

Conclusion et implications

Dans ce chapitre, nous avons examiné les changements du marché du travail québécois au cours de la période 1990-2015 à l'aide des données des recensements pour la période 1990-2005 et 2015.

Nous avons trouvé qu'effectivement, au moins à partir de 1995, la distribution des salaires québécois montre une tendance très nette vers la polarisation. Pour la période précédente (1990-1995), l'évolution des salaires était plutôt compatible avec l'hypothèse de changements technologiques biaisés vers les compétences qui augmentaient les inégalités.

Nous montrons que le marché du travail est marqué par une forte polarisation des salaires pour la période 1995-2005, et que cette polarisation semble légèrement plus faible sur la plus longue période 1995-2015. Notons que les changements pour cette dernière période seraient compatibles avec la théorie d'un renversement de la demande pour les compétences énoncée par Beaudry, Green et Sand (2013).

Ce chapitre n'a pas abordé les impacts des changements technologiques sur la structure industrielle du Québec en matière d'emploi. Ces impacts sont abordés par Dostie (2018), qui montre l'évolution de la structure industrielle québécoise en termes de part de marché des heures travaillées.

L'auteur identifie ainsi les industries perdantes et les gagnantes en matière d'emploi sur la période 1990-2010. Par exemple, on y note des pertes d'emplois continues, allant même en s'accroissant, pour les industries manufacturière et agricole et d'autres industries primaires, alors que l'industrie des soins de santé et services sociaux et celle des communications et autres services sont gagnantes sur toute la période. D'autres

industries comme l'éducation ou la construction gagnent des parts de marché au regard des heures travaillées dans la plupart des sous-périodes étudiées.

Dostie (2018) identifie aussi des retournements de tendance pour la période 1990-2010 : deux secteurs qui gagnaient des parts de marché dans les années 1990 (transport et entreposage, et commerce de gros) ont vu leurs parts de marché diminuer par la suite dans les années 2000. Alternativement, deux secteurs auparavant perdants dans les années 1990 (gouvernement, et intermédiaires financiers et assurances) voient leurs parts de marché augmenter dans les années 2000.

Il remarque aussi que, si l'on classe les industries par le salaire hebdomadaire moyen, on constate que les industries gagnantes de la période 1990-2000 se situent un peu partout dans la distribution : transport et entreposage dans le bas du tiers supérieur, commerce de gros au milieu, et soins de santé et services sociaux dans le haut du tiers supérieur.

Par contre, pour la période 2000-2010, les industries gagnantes des parts de marché dans le total des heures travaillées se situent presque toutes dans la moitié supérieure des industries ayant un salaire hebdomadaire plus élevé. Seule l'industrie des soins de santé et services sociaux se situe (toujours) dans la moitié inférieure.

Nous concluons que ce phénomène de polarisation ne vient en rien diminuer le rôle important de l'éducation pour soutenir la croissance économique. Cette conclusion s'appuie principalement sur Acemoglu et Autor (2012), qui notent avec raison que, même si les changements technologiques demeurent biaisés contre les tâches routinières, la croissance économique n'en sera pas nécessairement affectée négativement, pourvu que l'offre de travailleurs capables d'effectuer les tâches cognitives demandées par cette nouvelle économie continue d'augmenter. Acemoglu et Autor (2012) notent au passage que les travailleurs plus scolarisés ont des rémunérations supérieures pour tous les emplois qu'ils occupent, même si ces derniers sont plus routiniers. Cela suggère que l'éducation est utile pour augmenter l'efficacité économique aussi dans les tâches routinières.

Ce dernier constat met l'accent sur le maintien d'un système d'éducation postsecondaire performant, permettant de maintenir l'offre de ce type de travailleurs. Goldin et Katz (2010) mentionnent entre autres qu'il est alors important pour les gouvernements de s'assurer que l'aide financière est

disponible et généreuse pour les étudiants désirant poursuivre à un niveau postsecondaire. Il vaut la peine d'ajouter qu'un système performant de recyclage de compétences et de formation continue est plus approprié que jamais compte tenu des changements dans le marché du travail que nous venons de documenter (voir Dostie et Dufour, 2020).



Références

- Acemoglu, D. et Autor, D. H. (2011). Skills, tasks and technologies: Implications for employment and earnings. Dans D. E. Card et O. C. Aschenfelter (dir.), *Handbook of Labor Economics* (4, p. 1043-1171). Elsevier B.V.
- Acemoglu, D. et Autor, D. H. (2012). What does human capital do? A review of Goldin and Katz's the race between education and technology. *Journal of Economic Literature*, 50(2), 426-463.
- Adermon, A. et Gustavsson, M. (2015). Job polarization and task-biased technological change: Evidence from Sweden, 1975-2005. *Scandinavian Journal of Economics*, 117(3), 878-917.
- Atalay, E., Phongthientham, P., Sotelo, S. et Tannenbaum, D. (2020, à paraître). The evolution of work in the United States. *American Economic Journal: Applied Economics*.
- Autor, D. H., Katz, L. F. et Kearney, M. S. (2006). The polarization of the U.S. labor market. *American Economic Review*, 96(2), 189-194.
- Autor, D. H., Katz, L. F. et Kearney, M. S. (2008). Trends in U.S. wage inequality: Revising the revisionists. *Review of Economics and Statistics*, 90(2), 300-323.
- Autor, D. H., Manning, A. et Smith, C. L. (2016). The contribution of the minimum wage to US wage inequality over three decades: A reassessment. *American Economic Journal: Applied Economics*, 8(1), 58-99.
- Bachmann, R., Cim, M. et Green, C. (2019). Long-run patterns of labour market polarisation: Evidence from german micro data. *British Journal of Industrial Relations*, 57(2), 350-376.
- Barany, Z. et Siegel, C. (2018). Job polarization and structural change. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 10(1), 57-89.
- Beaudry, P., Green, D. A. et Sand, B. M. (2013). The great reversal in the demand for skill and cognitive tasks. Cahier de recherche du NBER, 18901. Cambridge (MA) : National Bureau of Economic Research.
- Beverelli, C., Rubinova, S., Stolzenburg, V. et Woessner, N. R. (2019). *Revisiting the role of trade and automation in US labor market polarization*. Robert Schuman Centre for Advanced Studies Global Governance Programme-356.
- Boudarbat, B., Lemieux, T. et Riddell, W. C. (2010). The evolution of the returns to human capital in Canada, 1980-2005. *Canadian Public Policy/Analyse de politiques*, 36(mars), 63-89.

Changements technologiques et polarisation des salaires au Québec

Brynjolfsson, E. et McAfee, A. (2011). *Race Against the Machine: How the Digital Revolution is Driving Productivity, Accelerating Innovation, and Irreversibly Changing Employment and the Economy*. Digital Frontier Press.

Card, D., Kramarz, F. et Lemieux, T. (1999). Changes in the relative structure of wages and employment: A comparison of the United States, Canada, and France. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 32(4), 843-877.

Card, D. et Lemieux, T. (2001). Can falling supply explain the rising return to college for younger men? A cohort-based analysis. *Quarterly Journal of Economics*, 116, 705-746.

Cortes, G. M. (2016). Where have the middle-wage workers gone? A study of polarization using panel data. *Journal of Labor Economics*, 34(1), 63-105.

Cortes, G. M., Jaimovich, N. et Siu, H. (2017). Disappearing routine jobs: who, how and why? *Journal of Monetary Economics*, 91, 69-87.

Deslauriers, J., Dostie, B. et Gagné, R. (2010, décembre). *Les effets des normes du travail sur la performance économique*. Centre sur la productivité et la prospérité, HEC Montréal.

Dillon, L. (2010). The value of the long form canadian census for long term national and international research. *Canadian Public Policy/Analyse de politiques*, 36(3), 389-393.

Dostie, B. (2018). *Polarisation du marché du travail, structure industrielle et croissance économique* [rapport de recherche]. CIRANO, RP-02. Repéré à : <http://www.cirano.qc.ca/fr/sommaires/2018RP-02>.

Dostie, B. et Dufour, G. (2020). *Transformation numérique et formation continue*. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (8, p. 221-246). CIRANO.

Foley, K. et Green, D. A. (2015). Why more education will not solve rising inequality (and may make it worse). Dans D. A. Green, C. Riddell et F. St-Hilaire, *Income Inequality. The Canadian Story*. Institut de recherche en politiques publiques.

Goldin, C. et Katz, L. (2010). *The Race between Education and Technology*. Bellknap Press.

Goos, M. et Manning, A. (2007). Lousy and lovely jobs: The rising polarization of work in Britain. *Review of Economics and Statistics*, 89(1), 118-133.

Goos, M., Manning, A. et Salomons, A. (2014). Explaining job polarization: Routine-biased technological change and offshoring. *American Economic Review*, 104(8), 2509-2526.

Green, D. A. (2015). Inequality in Canada: Symposium introduction. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 48(2), 647-654.

Green, D. A. et Milligan, K. (2010). The importance of the long form census to Canada. *Canadian Public Policy/Analyse de politiques*, 36(3), 383-388.

Green, D. A. et Sand, B. M. (2015). Has the canadian labour market polarized? *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 48(2), 612-646.

Hunt, J. et Nunn, R. (2019). *Is Employment Polarization Informative about Wage Inequality and Is Employment Really Polarizing?* Cahier de recherche du National Bureau of Economic Research, 26064.

ISQ. (2015). *Enquête nationale auprès des ménages de 2011 : ses portées et limites*. Bilan de la consultation de l'Institut de la statistique du Québec auprès des ministères et organismes gouvernementaux du Québec. Gouvernement du Québec.

Kampelmann, S. et Rycx, F. (2011). *Task-Biased Changes of Employment and Remuneration: The Case of Occupations*. IZA Discussion Papers, 5470. Institute for the Study of Labor (IZA).

Michaels, G., Natraj, A. et Van Reenen, J. (2014). Has ICT polarized skill demand? Evidence from eleven countries over twenty-five years. *Review of Economics and Statistics*, 96(1), 60-77.

Morissette, R., Picot, G. et Lu, Y. (2012). *Wage Growth over the Past 30 Years. Changing Wages by Age and Education*. Economic Insight, 008. Statistique Canada, 11-626-X.

Oldenski, L. (2014). Offshoring and the polarization of the U.S. labor market. *ILR Review*, 67(4), 287-334.

Riddell, C. (2018). The labor market in Canada 2000-2016. *IZA World of Labor*, 432.

Rutledge, M. et Guan, Q. (2015). *Job Polarization and Labor Market Outcomes for Older, Middle-Skilled Workers*. Center for Retirement Research at Boston College Working Paper.

Statistique Canada. (2008). *Guide de référence sur le revenu et les gains*. Recensement de 2006. Catalogue 97-563-GWE2006003.

Veall, M. R. (2010). 2B or Not 2B? What should have happened with the canadian long form census? What should happen now? *Canadian Public Policy/Analyse de politiques*, 36(3), 395-399.

Notes

1. Ce chapitre s'appuie en partie sur un document publié au CIRANO et sur sa mise à jour (Dostie, 2018).
2. Les analyses contenues dans ce texte ont été réalisées au Centre interuniversitaire québécois de statistiques sociales (CIQSS), membre du Réseau canadien des centres de données de recherche (RCCDR). Les activités du CIQSS sont rendues possibles grâce à l'appui financier du Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH), des Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC), de la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), de Statistique Canada, du Fonds de recherche du Québec – Société et culture (FRQSC), du Fonds de recherche du Québec – Santé (FRQS) ainsi que de l'ensemble des universités québécoises qui participent à leur financement. Les idées exprimées dans ce texte sont celles de l'auteur et non celles des partenaires financiers nommés ici.
3. Tous les changements sur une période de 5 ans entre les recensements montrent le phénomène de polarisation depuis 1995. Voir Dostie (2018).

Section 2.3

Les données et la transformation numérique



Chapitre 10

POINT DE VUE

L'ACCESSIBILITÉ AUX DONNÉES DES ADMINISTRATIONS PUBLIQUES

Catherine Haeck

Professeure agrégée à l'Université
du Québec à Montréal, chercheuse
et fellow au CIRANO

Marie Connolly

Professeure titulaire à l'Université
du Québec à Montréal, chercheuse
et fellow au CIRANO

Résumé

Ce point de vue présente l'accessibilité des données des administrations publiques en portant une attention particulière aux données fiscales ainsi qu'aux données des deux plus grands postes de dépenses du gouvernement du Québec, soit la santé et l'éducation. Les données fiscales ont permis des avancées importantes dans l'étude de la mobilité intergénérationnelle du revenu au Canada et au Québec. Les données administratives de la santé en cours de développement à travers le pays vont révolutionner la capacité des chercheurs en santé. Finalement, les données en éducation, bien qu'existantes, tardent à être mises à la disposition des chercheurs malgré l'importance des retombées que pourrait procurer l'accès à ces données. Ces trois thèmes sont abordés tour à tour et montrent la position du Québec relativement aux développements qui ont lieu dans d'autres provinces canadiennes, notamment l'Ontario et la Colombie-Britannique.

Ce chapitre dresse un portrait sommaire¹ de l'accessibilité des données des administrations publiques, en portant une attention particulière aux données fiscales ainsi qu'à celles qui se rapportent aux domaines de la santé et de l'éducation, les deux plus grands postes de dépenses du gouvernement du Québec. Nous ne sommes certainement pas les premiers à parler du potentiel des données de source administrative : nommons, parmi d'autres, les écrits de Grusky, Hout, Smeeding et Snipp (2019), Card, Chetty, Feldstein et Saez (2010), Einav et Levin (2014), Statistique Canada (2009) et Connelly, Playford, Gayle et Dibben (2016). Les vertus de l'analyse quantitative pour outiller les décideurs avaient déjà été mises en avant par Amos Tversky et Daniel Kahneman (prix Nobel d'économie) il y a de cela 40 ans (Lewis, 2016).

Notre contribution consiste ici à présenter le point de vue de chercheurs québécois² et de discuter de l'accès aux données des administrations publiques canadiennes et québécoises. Dans ce texte, nous mettons l'accent sur les microdonnées administratives anonymisées sur les individus. Les données agrégées sont plus facilement accessibles, mais ne permettent pas de répondre à l'ensemble des questions que l'on peut se poser afin de mieux comprendre le fonctionnement de notre société. Ce point de vue dresse l'état de nos connaissances sur le sujet à l'heure d'écrire ces lignes ; il est évident que l'accès aux données évolue continuellement à travers le Canada, et que nous ne sommes pas en mesure de couvrir l'ensemble des initiatives dans chaque province.

Au Canada, l'accès aux microdonnées fiscales a permis des avancées importantes dans l'étude de la distribution des revenus et de la mobilité intergénérationnelle du revenu. Dans le domaine de la santé, les données sur les individus provenant des systèmes d'information sont utilisées depuis plusieurs années, mais la démocratisation de l'accès à ces données pour fins de recherche pourrait engendrer d'importantes retombées en ce qui a trait à l'amélioration de la santé des populations. Quant aux données en éducation, bien qu'elles existent, elles tardent à être mises à la disposition des chercheurs malgré l'importance des progrès qui pourraient être réalisés grâce à un accès à ces données. Au Québec, plus de 25 % des jeunes n'obtiennent pas leur diplôme d'études secondaires en sept ans. Ce ratio est inacceptable. Il faut exploiter le pouvoir des microdonnées pour repérer plus rapidement les futurs décrocheurs ainsi que les meilleures pratiques en enseignement, et ce travail doit être réalisé par des individus qui ne sont

pas impliqués dans la création des programmes. L'accès et la disponibilité des données fiscales, de santé et d'éducation seront abordés tour à tour et nous dresserons un portrait de la position du Québec relativement aux développements qui ont eu lieu dans d'autres provinces canadiennes, notamment le Nouveau-Brunswick, l'Ontario et la Colombie-Britannique.

Accès aux données et environnement sécurisé

Garantir l'anonymisation des microdonnées dans un environnement hautement sécurisé est une condition préalable à l'ouverture de leur accès. Sur ce point, le Canada est certainement un chef de file dans le monde. Créé en 2001, le Réseau canadien des Centres de données de recherche (RCCDR) héberge les microdonnées confidentielles de Statistique Canada dans des laboratoires informatiques hautement sécurisés. Cette infrastructure de recherche assure la protection des renseignements personnels. Les chercheurs n'ont pas les données en leur possession, celles-ci n'étant accessibles qu'à l'intérieur des laboratoires, sous surveillance constante et uniquement aux chercheurs autorisés. Les ordinateurs qui les contiennent ne sont pas connectés à Internet, et il est impossible d'utiliser des clés USB pour sauvegarder des informations. Les résultats tirés de l'analyse des données doivent toujours être validés par un analyste de Statistique Canada qui s'assure que l'information divulguée ne permet pas d'identifier un individu. De plus, la structure des ensembles de données ne permet pas d'obtenir en quelques clics seulement des renseignements sur un individu en particulier. Les ensembles de données se décomposent en centaines de sous-ensembles qui ne sont pas tous accessibles aux chercheurs. Seules les données pertinentes au projet en cours le sont.

En pratique, le RCCDR réunit plus de 32 laboratoires à travers le Canada situés en milieu universitaire³, dont 5 se trouvent au Québec, dans le réseau du Centre interuniversitaire québécois de statistiques sociales (CIQSS). Ces laboratoires permettent l'accès à plusieurs types de données, incluant les données d'enquêtes, les données de recensement et certaines données des administrations publiques. Il est aussi possible d'effectuer des couplages de données grâce au soutien de Statistique Canada, ce qui permet d'enrichir des bases de données existantes. Ces couplages sont réalisés par Statistique Canada, car les clés d'appariement ne sont jamais

rendues disponibles aux chercheurs. Durant la dernière décennie, un effort soutenu de la part de Statistique Canada et du RCCDR a permis la création d'une banque offerte pour la recherche comprenant un large éventail de données des administrations publiques. Bien que les progrès faits soient importants, certains types de données sont plus accessibles que d'autres, notamment en fonction de leur province d'origine.

Au Québec, l'ISQ offre l'accès à des données d'enquête et à certains ensembles de données administratives dans ses centres d'accès aux données de recherche (appelés CADRISQ). Le fonctionnement des laboratoires de l'ISQ est extrêmement similaire à celui des laboratoires de Statistique Canada. Au Nouveau-Brunswick, le New Brunswick Institute for Research, Data and Training (NB-IRDT) est un chef de file au pays en ce qui concerne le développement de l'utilisation de données de nature administrative, particulièrement dans le domaine de la santé. Plusieurs modifications de lois entourant la protection des renseignements personnels pour des fins de recherche et l'adoption de deux lois (connues d'abord comme le projet de loi n° 57, adopté en mai 2017, et le projet de loi n° 29, adopté en juin 2019) ont permis à NB-IRDT de recevoir des données anonymisées, mais munies d'un identifiant unique rendant possible le couplage entre les diverses sources de données.

Il est évident que les infrastructures permettant un accès sécurisé existent déjà. Les avancées récentes dans l'accès aux données du Québec suggèrent une certaine ouverture du gouvernement, mais pour offrir un réel accès aux chercheurs, celui-ci devra en faire plus, en commençant notamment par une réforme de la Loi sur l'accès à l'information pour des fins de recherche et de la Loi sur l'Institut de la statistique du Québec.

Données fiscales pancanadiennes

Des microdonnées fiscales longitudinales sont disponibles à l'échelle canadienne, notamment par la Banque de données administratives longitudinales (DAL), la Base de données sur la mobilité intergénérationnelle du revenu (BDMIR) ainsi que l'Étude longitudinale et internationale des adultes (ELIA). Ces ensembles de données sont disponibles dans tous les centres de données de recherche du RCCDR. Les données fiscales reposent sur les « fichiers T1 des familles », lesquels proviennent du fichier de données fiscales recueillies chaque année auprès de tous les

contribuables canadiens dans le cadre de leur déclaration de revenus, et les archives sont disponibles à partir de 1982. Ainsi, il est possible de suivre les trajectoires de revenus de milliers de Canadiens et d'étudier les facteurs influençant les inégalités de revenus ou bien la mobilité économique d'une génération à l'autre.

Nos propres travaux basés sur la BDMIR ont permis de démontrer que, parallèlement à une hausse des inégalités de revenus depuis le début des années 1980, le Canada a connu une hausse du degré auquel ces inégalités se perpétuent d'une génération à l'autre (Connolly, Haeck et Lapierre, 2019). Que ce soit pour l'ensemble du pays ou pour chacune des provinces, la transmission intergénérationnelle du revenu, soit le pouvoir explicatif du revenu parental sur le revenu d'un jeune à l'âge adulte, a augmenté entre les cohortes nées au début des années 1960 et celles du milieu des années 1980. Autrement dit, la mobilité socioéconomique intergénérationnelle est en baisse : si l'on visualise la distribution des revenus comme une échelle, non seulement les échelons sont devenus plus distants l'un de l'autre, mais il est plus difficile de gravir ces échelons. Un tel travail de recherche, basé sur des millions de jeunes et leurs parents, n'est réalisable que grâce à l'accès aux données fiscales. Celles-ci fournissent également une source d'information fiable quant aux revenus, et leur couplage avec d'autres données est très utilisé par Statistique Canada. Un bon exemple est celui du Recensement canadien de la population : plutôt que de demander aux répondants « quel est votre revenu » comme c'est le cas pour une enquête, Statistique Canada couple les données du Recensement avec des données de l'Agence du revenu du Canada afin d'avoir des informations beaucoup plus exactes sur le revenu. Ceci réduit le fardeau de réponse et augmente la précision des résultats.

Santé, un grand chantier en cours

À notre connaissance, la première province à avoir créé un centre de recherche pour étudier des questions de santé à partir de données médico-administratives (les réclamations des médecins et des hôpitaux) est le Manitoba. Marchessault (2011) documente que, dès les années 1970, les docteurs Noralou Roos et Paul Henteleff se rencontrent pour discuter et commencer le développement de ce qui va devenir en 1991 le Centre des politiques de santé du Manitoba (*Manitoba Centre for Health Policy*). Dès le départ, leur modèle utilise les données du monde réel (« *real-world*

data ») pour étudier des questions de santé. On parle aujourd'hui de *pragmatic clinical trial*, mais cette idée ne date pas d'hier. Plusieurs facteurs ont contribué au développement du modèle manitobain. Les données étant colligées à un seul endroit par une seule organisation, une relation de collaboration et de partage d'information entre les chercheurs et les administrateurs publics a pu être établie plus facilement. De plus, la petite taille démographique de la province, à une époque où les capacités d'analyse des données administratives n'étaient pas celles que l'on connaît aujourd'hui, a aussi facilité ce développement. La compétence des personnes engagées dans ce projet novateur, ainsi qu'un financement stable, ont grandement contribué au succès du projet.

Depuis plus de 25 ans, l'Ontario a développé un centre de recherche, aujourd'hui connu sous le nom de Institute for Clinical Evaluative Sciences (ICES), pour étudier des questions de santé à partir de données administratives. L'ICES est aujourd'hui considéré comme un chef de file non seulement au Canada, mais aussi à l'international. Ce regroupement de plus de 250 chercheurs cliniciens de haut calibre mène des recherches sur des thèmes variés en santé des populations avec les données médico-administratives de la province. L'ICES est un dépositaire légal des données, lesquelles sont obtenues à la source. L'institut reçoit un financement de base du ministère de la Santé de l'Ontario qui lui assure une stabilité financière et lui permet de préparer les données pour des fins de recherche. L'institut travaille en partenariat avec ce ministère afin de répondre à certaines questions. Depuis près de cinq ans, les données médico-administratives sont complémentées par des données sociales, provenant pour certaines des autres ministères. L'ICES gère aussi les données de santé de certains groupes autochtones avec qui il travaille en étroite collaboration. De manière générale, les données de l'ICES sont accessibles à tout chercheur qui en fait la demande. En pratique, les coûts d'accès sont très élevés et peuvent constituer un frein au développement de la recherche pour les chercheurs ne faisant pas directement partie du regroupement.

Un autre exemple d'initiative provinciale est donné par le Nouveau-Brunswick. Le NB-IRDT permet l'accès et la fusion d'un remarquable éventail de données longitudinales : Citizen Database, Physician Billing, Vital Statistics, NB Suicide Registry, NB Cancer Registry, Healthy Toddler Assessment, NB Prescription Drug Program, et la liste continue⁴. La base de données Citizen Database inclut des données démographiques

et géographiques (par exemple le code postal) sur tous les résidents du Nouveau-Brunswick. La base de données Physician Billing inclut tous les paiements faits aux médecins par patient, les paiements réciproques et les salaires versés aux professionnels de la santé. Cette base de données est similaire à celle de la Régie de l'assurance maladie du Québec, à la différence qu'elle est entièrement accessible dans le laboratoire du NB-IRDT et peut-être facilement jumelée avec d'autres sources de données (jumelage réalisé par l'analyste sur place). La base de données Vital Statistics est similaire à celle des fichiers de naissances accessibles dans les laboratoires de l'ISQ. Mais, encore une fois, au Nouveau-Brunswick, il est possible de lier la base de données avec d'autres sources, ce qui n'est pas le cas à l'ISQ, sauf à grands frais et de manière moins automatisée. Enfin, le Healthy Toddler Assessment inclut les résultats de l'évaluation volontaire des enfants de 18 mois en ce qui a trait à la santé visuelle, dentaire et auditive, au développement langagier, à la croissance, aux habiletés physiques et aux relations sociales. Ces données rappellent celles collectées par les CLSC durant la petite enfance, mais qui ne sont pas rendues accessibles à des fins de recherche. L'accès et le couplage de données du NB-IRDT sont gratuits pour les chercheurs universitaires, et ce, même pour les données médico-administratives.

À l'échelle pancanadienne, il existe une plateforme pour les données sur les médicaments, C-NODES. Le futur réside dans le développement d'une plateforme nationale des données médico-administratives. Les Instituts de recherche en santé du Canada (IRSC) financent C-NODES ainsi que le développement d'une plateforme pancanadienne pour les microdonnées de santé au moyen de la Stratégie de recherche axée sur le patient (SRAP). Il existe plusieurs unités de SRAP, dont une se trouve au Québec. Par contre, la fusion de ces données à l'échelle canadienne est loin d'être réalisée, et il semble bien que ce projet de couplage ne se concrétisera pas avant plusieurs années.

Au Québec, certains groupes de chercheurs ont des accès privilégiés aux données administratives de la santé, quoique rien n'ait l'ampleur de l'ICES. L'ISQ a récemment développé une entente avec le ministère de la Santé pour gérer l'accès aux microdonnées, et le processus vient d'être mis en application. De nouvelles modalités ont été mises en œuvre à la suite du lancement, en juin 2019, du nouveau Guichet d'accès aux données de recherche. Celles-ci sont maintenant accessibles dans les CADRISQ, dont un est situé en milieu universitaire, et à distance de manière sécurisée⁵. Ce

modèle va cependant devoir évoluer pour permettre un accès plus simple aux chercheurs en délimitant le rôle de la Commission d'accès à l'information dans l'approbation des demandes d'accès. Certains doutent de la qualité des données administratives, puisque celles-ci ne sont pas collectées pour des fins de recherche, mais pour des fins administratives, par exemple pour le paiement des médecins. Lorsque l'objectif est purement administratif, le montant facturé doit être juste, l'intervention facturée doit aussi l'être puisqu'elle est associée au montant facturé. En revanche, le diagnostic associé à l'intervention, par exemple, n'entre pas dans la facturation et peut donc être considéré comme une donnée de moindre qualité. Bien entendu, si ces données commencent à être utilisées par les chercheurs cliniciens pour suivre l'évolution de certaines conditions et faire des analyses sur des données réelles (*real-world data*), alors de là naîtra l'incitatif pour améliorer la qualité des données. On sait que les expériences contrôlées ont par ailleurs aussi leurs limites. Obtenir des résultats dans l'ensemble de la population est la voie de l'avenir. Le Québec doit miser sur ses expertises en recherche et utiliser de manière démocratique le fort potentiel des données administratives réparties dans ses différents ministères pour répondre à des questions qui touchent directement le bien-être de sa population.

Éducation et petite enfance, les enfants pauvres des données

Pour ce qui est des études postsecondaires, la Plateforme de liens longitudinaux entre l'éducation et le marché du travail (PLEMT) est un excellent exemple de ce qui peut être fait à l'échelle canadienne. Cette source de données est une plateforme qui permet le couplage de plusieurs sources d'information. Au cœur de cette plateforme se trouvent le Système d'information sur les étudiants postsecondaires, qui contient des données sur chaque étudiant dans tous les établissements postsecondaires canadiens (principalement les universités), ainsi que le Système d'information sur les apprentis inscrits, lequel fournit des renseignements similaires, mais pour les programmes de formation de qualification professionnelle et d'apprentissage. Ces données, disponibles depuis 2009 pour l'ensemble des provinces canadiennes, permettent le suivi du nombre de diplômés par établissement et par programme. La plateforme contient également des clés de couplage permettant de faire le lien avec les données fiscales contenues dans les fichiers de déclarations de revenus. Il est donc possible de suivre

les jeunes diplômés sur le marché du travail et d'évaluer, par exemple, le rendement de l'éducation universitaire selon le profil socioéconomique de chacun (Frenette, 2019). Cette plateforme est remarquable en ce sens que toutes les institutions postsecondaires sans exception y participent. Grâce à un degré de coopération nationale peu observé dans d'autres domaines, les chercheurs et les décideurs ont accès à des informations d'une portée jusqu'ici inégalée.

En revanche, il existe un grand vide concernant les microdonnées de l'éducation primaire et secondaire, ou même de la petite enfance. Pourtant, le discours du budget fédéral prononcé le 22 mars 2016 par le ministre des Finances Bill Morneau faisait explicitement référence à l'importance des données sur les enfants : « Il est impossible de mettre en œuvre des politiques efficaces sans prendre appui sur des données rigoureuses. Si nous souhaitons sortir les enfants de la pauvreté, nous devons d'abord en comprendre la cause » (Morneau, 2016). Or, les données pancanadiennes sur les enfants et les jeunes sont rares. Celles provenant des systèmes d'information des ministères le sont encore plus.

Sur ce point, le Nouveau-Brunswick et la Colombie-Britannique semblent devancer les autres provinces canadiennes. Les microdonnées du système d'éducation primaire et secondaire sont récemment devenues accessibles au Nouveau-Brunswick, et leur documentation est en cours d'élaboration. À l'heure actuelle, ces données longitudinales individuelles peuvent facilement être couplées avec tous les ensembles de données administratives du NB-IRDT présentés précédemment, les clés de couplage existant déjà. L'accès aux données et leurs couplages sont gratuits pour les chercheurs universitaires. Ce modèle en faveur de la recherche est différent du modèle en vigueur au Québec. En admettant que les données deviennent disponibles, le modèle québécois n'a pas créé des environnements de couplage entre les sources administratives, et quand des couplages sont effectués, les chercheurs doivent assumer des coûts importants pour les financer. De plus, les fichiers de recherche ainsi créés doivent par la suite être détruits (bien que les clés soient conservées). Ce modèle constitue un frein pour la recherche et engendre une redondance de coûts pour les contribuables québécois.

En Colombie-Britannique, les politiciens ont décidé de mettre les enfants au cœur de leurs priorités et, pour ce faire, ils se sont donné des outils pour pouvoir évaluer leur parcours de vie durant le primaire et le secondaire.

Depuis plus de 10 ans, les chercheurs ont accès aux microdonnées du ministère de l'Éducation de la province pour la période allant de 1995 à 2016. Ces renseignements concernent l'ensemble des enfants inscrits à l'école en Colombie-Britannique, et un identifiant unique est attribué à chacun afin de pouvoir le suivre durant tout son parcours primaire et secondaire. Chaque année, pour chaque élève, plusieurs informations sont recueillies, dont les suivantes : (1) des variables démographiques personnelles (sexe, langue parlée à la maison, identité autochtone, date de naissance, code postal), (2) des informations sur le programme d'études (année d'études, langue seconde, éducation spécialisée, immersion française, cours suivis au secondaire, nombre de reprises de cours), (3) des informations sur l'école (identifiant unique anonymisé de l'école au 30 septembre, école publique ou indépendante), (4) les résultats aux tests provinciaux et les notes par matière (participation, rang centile, etc.) en 4^e, 7^e, 10^e et 12^e années, le nombre d'écoles où l'enfant a été inscrit durant son parcours et l'état d'obtention du diplôme, et (5) des caractéristiques du quartier de résidence (valeur moyenne des maisons, pourcentage de personnes vivant sous le seuil de faible revenu, pourcentage de personnes par type de diplôme, etc.). Ces données sont accessibles aux chercheurs universitaires par l'entremise de PopData BC et éventuellement Statistique Canada. L'accès est conditionnel à ce que le projet soit d'intérêt public. Pour environ 20 % des enfants de 4^e, 7^e, 10^e et 12^e années, il est possible d'accéder aux informations collectées en 2016 et en 2017 lors d'une enquête de satisfaction effectuée auprès des jeunes et de leurs parents.

Ces données font partie d'un projet plus vaste qui vise à comprendre le parcours des enfants. En pratique, elles peuvent être couplées avec un large éventail de données administratives qui sont également sous la responsabilité de PopData BC, et peuvent ainsi être fusionnées avec celles du système d'éducation postsecondaire, des fichiers de naissance ainsi que du système d'assurance sociale. En théorie, elles peuvent aussi être couplées aux données du système de santé, mais il semblerait que cela ne soit pas possible, en pratique, à court terme. Le couplage des données n'est, pour l'instant, pas gratuit en Colombie-Britannique.

Au Québec, il est, à l'heure actuelle, quasiment impossible d'obtenir les microdonnées administratives de l'éducation primaire et secondaire. L'ISQ mène des enquêtes portant sur les jeunes, l'une des plus connues étant l'Étude longitudinale du développement des enfants du Québec

(ELDEQ). Cette enquête longitudinale se concentre sur une cohorte de personnes nées en 1998. D'autres, telles que l'Enquête québécoise sur le développement des enfants à la maternelle (EQDEM), offrent aussi des portraits statistiques transversaux de différentes cohortes d'enfants à un moment de leur vie. Bien que ces données soient riches et pertinentes, elles ne permettent pas de comparer le Québec aux autres provinces canadiennes ou d'étudier les trajectoires de plusieurs cohortes d'enfants.

Nous avons besoin de microdonnées comparables et représentatives des enfants de chaque province. Au-delà des données scolaires, il serait utile d'en avoir également sur leur parcours de vie, leur bien-être, leur réussite à l'école, leur développement comportemental et cognitif, leur milieu familial, leur milieu scolaire, etc. Ces données continuellement mises à jour permettraient aux chercheurs d'évaluer les programmes et les politiques qui touchent les enfants et de voir si ceux-ci en sortent gagnants ou perdants. Historiquement, le Canada avait l'Enquête longitudinale nationale sur les enfants et les jeunes (ELNEJ) de Statistique Canada, une enquête d'une richesse peu commune, couvrant plusieurs cohortes d'enfants âgés de 0 à 11 ans et suivis sur plusieurs années de manière longitudinale. La variété des questions couvertes et d'informations recueillies permettait d'aborder plusieurs points concernant les enfants. Cette enquête a débuté en 1994 et a été discontinuée en 2008. Elle avait entre autres permis l'analyse du programme québécois des services de garde (par exemple mentionnons Baker, Gruber et Milligan (2008), Lefebvre et Merrigan (2008), Haeck, Lefebvre et Merrigan (2015) et Haeck, Lebihan et Merrigan (2018)). Aucune autre enquête pancanadienne n'offre la richesse de l'ELNEJ depuis. Il est évident que les provinces doivent collaborer pour parvenir à instaurer un système d'information comparable à travers le Canada.

Conclusion

Le gouvernement fédéral a fait des avancées importantes en matière d'accès aux données administratives au cours des cinq dernières années. L'environnement de couplage des données créé par Statistique Canada permet de limiter le coût des fusions de données et d'augmenter les possibilités de recherche. Un exemple remarquable est la possibilité de couplage avec des données fiscales (comme pour le recensement) et les

bases de données dérivées des fichiers fiscaux (comme la Banque de données administratives longitudinales). Par contre, les données portant sur la santé et l'éducation sont de propriété provinciale.

Les administrations publiques du Québec, incluant celles opérant dans les domaines de la santé et de l'éducation, collectent une très grande quantité d'informations. Le manque d'accessibilité à ces sources pour des fins de recherche menée par des chercheurs universitaires et non financée par le secteur privé freine les travaux et la capacité de ces chercheurs à informer nos dirigeants. La recherche se fait donc souvent à partir de données collectées au moyen d'enquêtes financées par des fonds publics, mais qui, la plupart du temps, demeurent la propriété des chercheurs ayant obtenu la subvention. Il y a, par conséquent, une multiplication des enquêtes. Cette situation n'est pas justifiée dans un environnement où les données sont anonymisées et disponibles uniquement dans des laboratoires sécurisés comme ceux du CIQSS.

De plus, si le Québec ne participe pas aux initiatives pancanadiennes pour la création d'ensembles de données à grande échelle, il devient impossible pour les chercheurs de faire des analyses comparatives en santé et en éducation. Pour rendre ces données accessibles et utiles, il faut une volonté politique à l'échelle provinciale et, surtout, il faut réformer la Loi sur l'accès à l'information ainsi que les lois constitutives des ministères, des organismes et de l'ISQ. Le Québec est la seule province au Canada qui exige des chercheurs de passer par deux paliers d'approbation pour accéder à des données : il faut premièrement une autorisation de la part de la Commission d'accès à l'information, et deuxièmement une autre de la part du ministère concerné et détenteur des données. Même l'ISQ doit se plier à cet exercice, ce dont est dispensé Statistique Canada. La Commission d'accès à l'information n'est pas outillée pour faire face à des demandes utilisant des méthodologies statistiques complexes impliquant plusieurs sources de données. Le processus d'accès est un labyrinthe de formulaires et de démarches qui semble sans fin lorsque les sources de données sont multiples. La Loi sur l'accès à l'information devrait être réformée pour permettre à l'ISQ de faire avancer le Québec en suivant le modèle du Nouveau-Brunswick. Le Plan économique du Québec de mars 2018 mentionnait explicitement la promotion de l'accès aux données de

L'accessibilité aux données des administrations publiques

recherche (Gouvernement du Québec, 2018, section 5.6.2), et des sommes ont été octroyées en ce sens à l'ISQ, ce qui témoigne d'une certaine ouverture sur cette question. Mais il reste encore du travail à faire.

Bien entendu, il faut absolument un environnement sécurisé où le couplage des différentes bases de données est contrôlé par divers processus pour en assurer la confidentialité. Statistique Canada et l'ISQ ont une vaste expertise dans ce domaine, acquise sur plusieurs décennies. L'accès à leurs données est contrôlé et exclut l'information identificatrice (nom, prénom, adresse de résidence, numéro d'assurance sociale). La réglementation et l'infrastructure physique pour accéder à des données confidentielles existent déjà. Il faut maintenant que le gouvernement réforme la Loi sur l'accès à l'information et donne le mandat aux différents ministères de rendre leurs microdonnées accessibles, et ce, uniquement dans les environnements sécurisés existants.

Le potentiel de retombées est vaste. L'accès à des données de qualité permet aux chercheurs québécois de tirer le maximum de leurs travaux, favorisant ainsi un rayonnement à l'échelle canadienne et internationale. Il permet également la formation de la relève en recherche au Québec dans les techniques de pointe. Les nouveaux diplômés ont ainsi de meilleures perspectives professionnelles et peuvent davantage contribuer à notre société et à la croissance économique. Finalement, sans données, nous ne pourrions jamais apprendre de nos erreurs et tirer profit de réussites, afin de mieux guider nos politiques et d'améliorer le bien-être de notre société.



Références

Baker, M., Gruber, J. et Milligan, K. (2008). Universal child care, maternal labor supply, and family well-being. *Journal of Political Economy*, 116(4), 709-745. doi:10.1086/591908

Candas, B. (2016). *Constitution et utilisation des banques de données intégrées en santé : tour d'horizon international des modèles et des pratiques exemplaires*. Institut national de la santé publique du Québec. Repéré à : https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2188_banques_donnes_sante_modeles_pratiques.pdf

Card, D., Chetty, R., Feldstein, M. S. et Saez, E. (2010). Expanding access to administrative data for research in the United States. *American Economic Association, Ten Years and Beyond: Economists Answer NSF's Call for Long-Term Research Agendas*. doi:10.2139/ssrn.1888586

Connelly, R., Playford, C. J., Gayle, V. et Dibben, C. (2016). The role of administrative data in the big data revolution in social science research. *Social Science Research*, 59, 1-12. doi:10.1016/j.ssresearch.2016.04.015

Connolly, M., Haeck, C. et Lapierre, D. (2019). Social mobility trends in Canada: Going up the Great Gatsby curve. Cahier de recherche n° 19-03, Groupe de recherche sur le capital humain, mai 2019 (version révisée). Repéré à : <https://econpapers.repec.org/paper/grcwpaper/19-03.htm>

Einav, L. et Levin, J. (2014). Economics in the age of big data. *Science*, 346(6210). doi:10.1126/science.1243089

Frenette, M. (2019). *Do Youth from Lower-and Higher-income Families Benefit Equally from Postsecondary Education?* Statistique Canada, Analytical Studies Branch Research Paper Series. Repéré à : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/en/pub/11f0019m/11f0019m2019012-eng.pdf?st=1ynUaiEo>

Gouvernement du Québec. (2018). *Le plan économique du Québec*. Budget 2018-2019. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. Repéré à http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2018-2019/fr/documents/PlanEconomique_18-19.pdf

Grusky, D. B., Hout, M., Smeeding, T. M. et Snipp, M. (2019). The american opportunity study: A new infrastructure for monitoring outcomes, evaluating policy, and advancing basic science. *RSF: The Russell Sage Foundation Journal of the Social Sciences*, 5(2), 20-39. doi:10.7758/rsf.2019.5.2.02

Haeck, C., Lebihan, L. et Merrigan, P. (2018). Universal child care and long-term effects on child well-being: Evidence from Canada. *Journal of Human Capital*, 12(1), 38-98. doi:10.1086/696702

Haeck, C., Lefebvre, P. et Merrigan, P. (2015). Canadian evidence on ten years of universal Preschool Policies: The good and the bad. *Labour Economics*, 36C, 137-157. doi:10.1016/j.labeco.2015.05.002

Lefebvre, P. et Merrigan, P. (2008). Child-care policy and the labor supply of mothers with young children: A natural experiment from Canada, *Journal of Labor Economics*, 26(3), 519-548. doi:10.1086/587760

Lewis, M. (2016). *The undoing project: A friendship that changed our minds*. W.W.Norton and Company.

Marchessault, G. (2011, février). The Manitoba Centre for Health Policy: A case study. *Healthcare Policy*, 6(numéro spécial), 29-43. doi:10.12927/hcpol.2011.22117

L'accessibilité aux données des administrations publiques

Morneau, B. (2016, 22 mars). *Rétablir l'espoir pour la classe moyenne : le budget fédéral de 2016*. Notes de discours de l'honorable Bill Morneau, C.P., député, à l'occasion de la présentation du budget fédéral de 2016. Repéré à : <https://www.budget.gc.ca/2016/docs/speech-discours/2016-03-22-fr.html>

Statistique Canada. (2009). Lignes directrices concernant la qualité. Cinquième édition – octobre 2009. Repéré à : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/pub/12-539-x/12-539-x2009001-fra.pdf?st=Pv13etHV>

Notes

1. Une version plus détaillée de ce texte est disponible sur le site <https://grch.esg.uqam.ca/>, dans la rubrique Publications, en tant que Cahier de recherche n° 19-04 du Groupe de recherche sur le capital humain.
2. Notre point de vue, mais aussi celui de plusieurs : des opinions glanées au fil du temps, ainsi que d'autres ayant fait l'objet d'études (par exemple Candas, 2016).
3. Certains ensembles de données sont également disponibles à distance, entre autres par le Système d'accès à distance en temps réel (voir <https://www.statcan.gc.ca/fra/adtr/adtr>).
4. Voir la liste complète en visitant ce site Web : <https://www.unb.ca/nbirdt/data-holdings/holdings.html>.
5. Les fichiers accessibles à distance sont toutefois différents de ceux disponibles dans les CADRISQ, car certaines informations peuvent avoir été modifiées pour satisfaire les obligations de l'ISQ en matière de protection des renseignements personnels.

Chapitre 11

SCIENCE DES DONNÉES, RÉSEAUX SOCIAUX ET POLITIQUES PUBLIQUES

Benoit Aubert

Professeur titulaire à HEC Montréal,
chercheur et fellow au CIRANO

Thierry Warin

Professeur titulaire à HEC Montréal,
chercheur et fellow au CIRANO

Nathalie de Marcellis-Warin

Professeure titulaire à Polytechnique
Montréal et présidente-directrice
générale du CIRANO

Résumé

Dans le contexte de la transformation numérique, la fréquence d'utilisation des moteurs de recherche et des réseaux sociaux ne cesse d'augmenter, ce qui génère un grand nombre de données. La science des données permet de traiter, de visualiser et d'analyser de tels ensembles de données non structurées, incluant les données issues de textes. Les gouvernements ont accès à ces nouvelles sources de données, à ces nouveaux modèles d'analyse et à une puissance de calcul sans précédent qu'ils peuvent utiliser pour mieux comprendre certains phénomènes sociétaux actuels et ainsi renforcer l'efficacité des politiques publiques. Dans ce chapitre, nous présentons ces nouvelles sources de données et les nouvelles méthodologies d'analyse ainsi que les enjeux à prendre en compte. Plusieurs exemples d'analyses de données non structurées issus de travaux de recherche effectués au CIRANO sont présentés à titre d'illustration, notamment des exemples dans le contexte de la COVID-19.

Introduction

Selon Marco Iansiti et Karim Lakhani, deux chercheurs de la Harvard Business School, les données sont un atout stratégique à la fois pour la prise de décisions au sein des entreprises et pour l'efficacité organisationnelle, mais aussi pour la survie des entreprises dans le contexte de la révolution numérique (Iansiti et Lakhani, 2020). La science des données et la disponibilité de différents types de données – structurées et non structurées – modifient ce que nous pouvons mesurer et comment nous pouvons le mesurer. Les sources d'information se transforment rapidement et les données non structurées peuvent améliorer notre compréhension de certains phénomènes, ce qui favorise une meilleure prise de décision par exemple en matière de politiques publiques.

Les données structurées sont des données pouvant être clairement identifiées et codifiées. Les données d'un tableur sont typiquement des données structurées. On peut comprendre leur signification en croisant les titres de la ligne et de la colonne dans laquelle se trouvent les données. Ces données répondent à une codification qui permet de les classer et d'en tirer une information. Les systèmes d'analyse algorithmique ont depuis toujours été développés afin de traiter ce genre de données. L'ère des données massives permet surtout un traitement de grande ampleur et en temps réel de ces données (Alaoui, 2018).

Les données non structurées ne répondent pas à une codification permettant d'extraire mécaniquement une information. Il n'y a pas d'autres moyens que de lire les gazouillis (*tweets*) pour en extraire le sens. C'est ensuite en analysant le contenu des messages que l'on structure l'information. Des exemples de types de données non structurées sont des fichiers textes, des images, des fichiers audio ou vidéo et toute autre information issue d'un signal analogique. Les données non structurées représentent actuellement la grande majorité de l'information, mais encore la partie la moins exploitée. En mettant en place des outils de collecte et d'analyse de données massives efficaces, cette information devient exploitable (Warin et De Marcellis-Warin, 2014).

Par exemple, dans le contexte de la pandémie de COVID-19, il était important d'analyser en très peu de temps un grand volume de références scientifiques en épidémiologie. Pour ce faire, la première étape était de

collecter les références et de structurer une base de données afin de la rendre analysable. Warin (2020) a développé un logiciel permettant d'avoir accès à plus de 85 000 publications médicales sur les coronavirus et d'intégrer ces données dans le langage d'analyse statistique *R*. Une analyse bibliométrique, une analyse de réseau et un calcul des indices de similitude peuvent être réalisés au moyen de ce logiciel. Il offre entre autres la possibilité d'associer des recherches sur un protocole médical à un réseau de chercheurs à la pointe sur ce protocole. Cela peut ainsi aider à gagner du temps dans cette course contre le virus.

Les réseaux sociaux de contenu favorisent la publication d'un contenu original, destiné à être partagé avec la communauté. Pour exister dans un environnement fortement concurrentiel, ces réseaux sociaux adoptent souvent un positionnement original. Twitter, par exemple, a misé sur la publication de messages courts. Ces messages sont un exemple de données qui peuvent être exploitées pour améliorer la prise de décision lorsqu'elles sont jumelées à d'autres sources d'information. Selon le NETendance 2018, 65 % des adultes québécois se sont connectés au moins une fois par jour aux réseaux sociaux¹, et selon le Baromètre CIRANO 2018, les réseaux sociaux sont la troisième source d'information des adultes québécois².

Nous allons présenter ces nouvelles sources de données et les nouvelles méthodologies d'analyse ainsi que des enjeux à prendre en compte. Plusieurs exemples d'analyses de données non structurées issus de travaux de recherche effectués au CIRANO seront présentés à titre d'illustration, notamment des exemples dans le contexte de la COVID-19.

Nouvelles sources de données pour les politiques publiques

Les nouvelles sources de données susceptibles d'être utilisées sont très variées, par exemple les recherches sur Internet, mais aussi de plus en plus des données issues de textes à l'image des conversations sur les réseaux sociaux, des textes de discours ou des rapports annuels. Pour les chercheurs en sciences sociales, l'information codée dans un texte est un complément riche aux types de données plus structurées traditionnellement utilisées dans la recherche, et ces dernières années ont vu une explosion de la recherche utilisant le texte comme données.

Ces données sous forme de textes peuvent être utilisées pour prévoir une variété d'événements ou pour mieux comprendre certains phénomènes (Gentzkow, Kelly et Taddy, 2019). Dans le domaine de la finance, les textes issus des actualités financières, des médias sociaux et des rapports déposés par les entreprises peuvent être utilisés pour prévoir les mouvements des prix des actifs et étudier l'impact causal des nouvelles informations (Warin et De Marcellis-Warin, 2014). Nyman et Ormerod (2020) donnent plusieurs autres exemples d'utilisation des données textes : en macroéconomie, le texte peut être utilisé pour prévoir les variations de l'inflation et du chômage et estimer les effets de l'incertitude politique. En analyse des médias, le texte des nouvelles et des médias sociaux est utilisé pour étudier les moteurs et les effets de l'orientation politique. En organisation industrielle et en marketing, les textes des publicités et des revues de produits sont utilisés pour étudier les facteurs de décision des consommateurs. En économie politique, le texte des discours des hommes politiques est utilisé pour étudier la dynamique des programmes et des débats politiques.

La principale différence entre le texte et les types de données souvent utilisées en économie est que le texte inclut plusieurs dimensions. Par exemple, un message sur Twitter comporte 280 caractères (depuis 2017), mais on peut aussi lui associer des métadonnées (nom de l'utilisateur, localisation GPS, etc.) ainsi que les mots-clés (*hashtags*) utilisés.

Données de recherches sur Internet

En raison de l'émergence des moteurs de recherche, les termes de recherche peuvent fournir un aperçu des intérêts actuels dans de nombreux domaines, tels que l'économie, la politique, la santé, etc. La recherche sur Google du mot « recession » a atteint un pic un mois avant le début de la récession américaine de septembre 2008 (Tkacz, 2013).

Choi et Varian (2012) ont montré comment utiliser les données des moteurs de recherche pour prévoir les valeurs à court terme des indicateurs économiques. Il s'agit par exemple des ventes d'automobiles, des demandes d'indemnités de chômage, de la planification des destinations de voyage et de la confiance des consommateurs. Wu et Brynjolfsson (2013) ont d'ailleurs utilisé les données des recherches sur Google pour prévoir les prix des logements, car les recherches sur des termes tels que « immobilier » ou « prix des logements » sont corrélées avec les intentions des acheteurs ou

des vendeurs. Les données de recherche Google ont également été utilisées avec succès pour la production de prévisions sur le marché du travail, et leur utilité en tant qu'indicateurs économiques avancés a été étudiée par certaines banques centrales (Tkacz, 2013). Plusieurs recherches sont en cours au CIRANO afin d'analyser l'activité économique au Québec en utilisant les données de recherche sur les mots clés « emploi », « taux de chômage », « investissement », « consommation », etc.

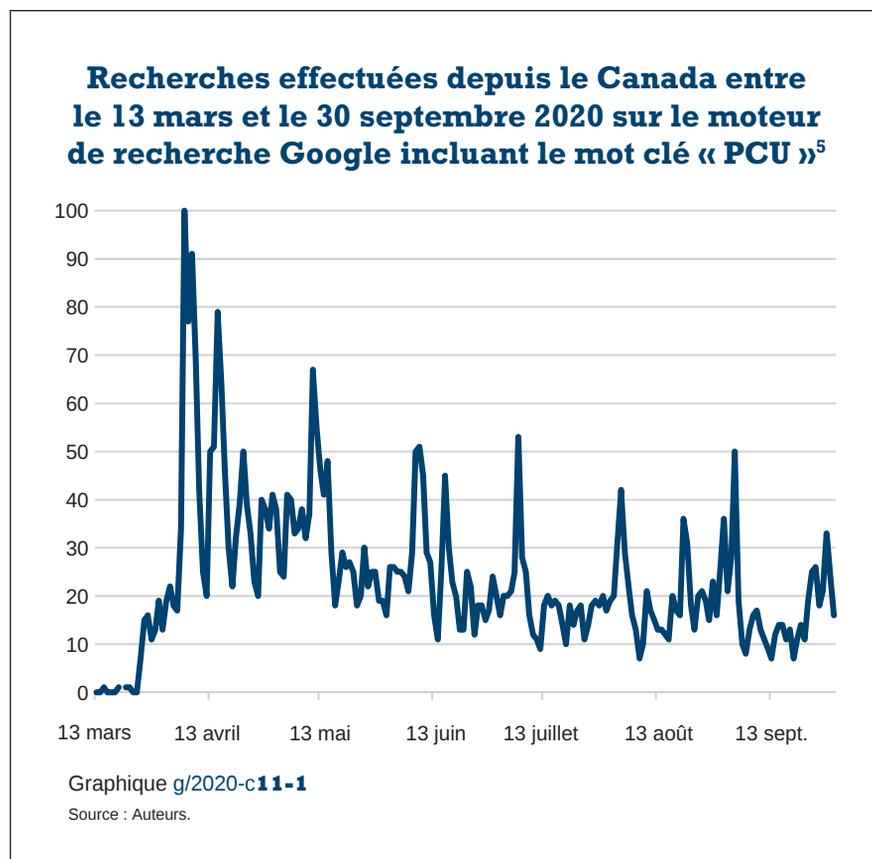
Un autre exemple d'intérêt pour la santé publique concerne les recherches sur les symptômes de grippe pour estimer le nombre de personnes atteintes. On présume qu'une personne faisant des recherches utilisant les termes « fièvre », « mal de tête » ou « grippe » est probablement atteinte par ces symptômes, ou fait la recherche pour un proche qui souffrirait de ces symptômes. Les données des recherches au Canada ont montré que cet algorithme permet d'avoir une idée de la propagation du virus bien avant les données officielles rapportées par les autorités médicales et peut donc améliorer les interventions publiques. L'algorithme est toutefois vulnérable. Une médiatisation de la saison de grippe tend à exagérer le nombre de cas (Tkacz, 2013). De plus, comme l'algorithme a été construit en utilisant les données de grippe saisonnière, il est moins précis pour prédire des souches inhabituelles, comme lors de l'épidémie de H1N1 (Eisenstein, 2018). Pour le système de santé, ces indicateurs peuvent néanmoins permettre d'anticiper des crises potentielles et de mieux se préparer à y faire face.

La plateforme statistique *Google Trends* permet de mesurer la proportion de recherches portant sur un mot clé donné dans une région et pour une période spécifique, par rapport à la région où le taux d'utilisation de ce mot clé est le plus élevé (valeur de 100). Ainsi, une valeur de 50 signifie que le mot clé a été utilisé moitié moins souvent dans la région concernée et une valeur de 0 signifie que les données pour ce mot clé sont insuffisantes. Dans le contexte de la crise de la COVID-19, de nombreux termes ont été recherchés sur les moteurs de recherche³. « Coronavirus » a fait partie des mots les plus recherchés dans le monde avec un pic entre les 13 et 15 mars 2020. Les recherches associées à ce mot clé soulevaient certaines questions, par exemple : *quels sont les symptômes du coronavirus à l'origine de la pandémie ayant débuté en 2019 ? Quand la COVID-19 va-t-elle se terminer ? Qu'est-ce que la COVID-19 ? Combien de personnes sont mortes du coronavirus ? Le coronavirus s'affaiblit-il ?* Aux États-Unis, les questions étaient surtout reliées aux symptômes et au vaccin : *la nausée est-elle un symptôme de la COVID-19 ? Le vomissement est-il un symptôme*

de la COVID-19? L'éternuement est-il un symptôme de coronavirus? Le mal de gorge est-il un signe de la COVID-19? Existe-t-il un vaccin contre les coronavirus?

Les questions posées permettent de déterminer, dans ce contexte précis, quelles sont les préoccupations de la population. De nombreuses autres questions ont été posées dans les recherches concernant le port du masque et aussi les impacts économiques du confinement, notamment le chômage. Le nombre de recherches avec le mot « chômage » a considérablement augmenté au Canada après le 13 mars 2020 avec un pic observé durant la semaine du 22 mars 2020, soit après l'annonce du confinement⁴. À partir du 2 mai 2020 et jusqu'à la fin août 2020, le nombre de recherches relatives a été équivalent à celui de la période précédant le 13 mars 2020.

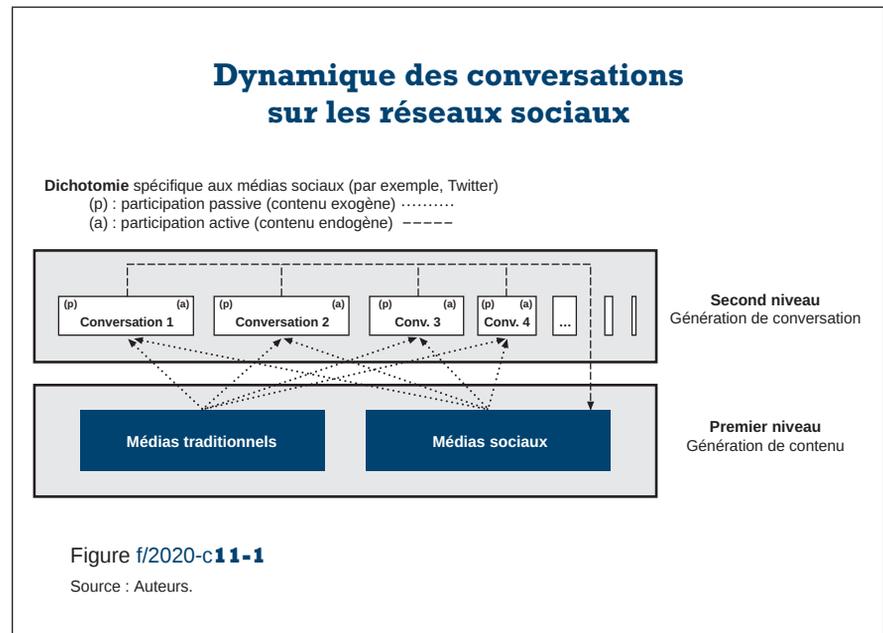
Pour le Canada, le mot clé « PCU » (pour « prestation canadienne d'urgence ») ainsi que le mot clé « CERB » (correspondant au terme en anglais, « Canada Emergency Response Benefit ») ont été aussi beaucoup recherchés. Le graphique 11-1 reprend l'évolution des recherches « PCU » sur le moteur de recherche Google avec sur l'axe des abscisses la date de la recherche sur le moteur de recherche et sur l'axe des ordonnées le taux de recherche du mot clé depuis le Canada.



Le graphique 11-1 compare le nombre relatif de recherches par jour au Canada. On observe notamment des pics qui suivent les annonces du gouvernement fédéral. Le premier pic est survenu durant la semaine du 5 au 11 avril 2020⁶, et c'est celui avec le plus haut taux d'utilisation (valeur de 100). Ensuite, la recherche reste élevée avec d'autres pics. Les sujets les plus associés à cette recherche étaient « étudiant », « Service Canada », « ARC ». La province où le mot clé « PCU » a été le plus recherché est le Québec. Pour le mot clé « CERB », on observe presque exactement la même courbe, avec les mêmes pics en avril, mais des pics moins élevés par la suite⁷. La province où on a le plus consulté ce mot clé est Terre-Neuve-et-Labrador, suivie de la Colombie-Britannique et du Manitoba ; le Québec est la dernière pour la recherche du terme en anglais (valeur de 20).

Données issues des conversations sur les réseaux sociaux

Presque tous les journaux, chaînes de télévision, stations de radio et magazines publient leur contenu pertinent sur les réseaux sociaux et notamment Twitter, ce qui génère de nombreuses données et aussi des réactions. Il existe également sur Twitter une autre source d'information générées par des personnes (« la foule ») et portant sur des sujets qui n'ont peut-être pas (encore) été couverts par les médias traditionnels. Ces deux sources d'information constituent la première couche des gazouillis. Au-dessus de cette couche, nous trouvons des gazouillis qui peuvent être regroupés autour de certains sujets qui ont pris naissance dans la première couche. C'est ce qu'on appelle généralement le « buzz », ou battage médiatique. En fait, ces groupes sont des conversations. Les conversations peuvent être définies comme la dynamique du partage d'informations – éditorialisées ou non – sur un sujet spécifique. Nous avons représenté cette dynamique sur la figure 11-1.



En réalité, Twitter est une plateforme qui correspond précisément à cette définition. En effet, on trouve sur Twitter une première couche d'informations, matérialisée par des gazouillis, et les utilisateurs peuvent sélectionner un sujet, le lire et y contribuer de deux manières : (1) en commentant et/ou (2) en rediffusant les gazouillis (« *retweet* »). Au risque de trop simplifier, la première correspond à une participation active à la conversation, tandis que la seconde correspond davantage à une participation passive à la conversation. La participation passive est une contribution importante de Twitter. Qu'ils soient actifs ou passifs, ces gazouillis ajoutent de manière endogène du contenu à la première couche d'information.

Twitter a intégré sur sa plateforme des mots-clics et quelques fonctionnalités qui permettent aux chercheurs de décortiquer un échantillon de gazouillis en différentes dimensions. Par exemple, nous pouvons isoler les gazouillis provenant de médias traditionnels ou d'utilisateurs réguliers, ceux appartenant à la première couche, et ceux appartenant à la deuxième couche. Il y a également un autre aspect à prendre en compte : la dimension endogène par rapport à la dimension exogène. La couche de génération de contenu (la première couche) est d'abord composée d'informations exogènes provenant des médias traditionnels et sociaux. Ensuite, les utilisateurs génèrent les conversations de manière active (éditorialisée) et passive (rediffusion des gazouillis, par exemple). Ainsi, le contenu éditorialisé alimentera la première couche de notre taxonomie, car il correspond à une nouvelle génération de contenu – bien que connexe. La figure 11-1 illustre la dimension endogène de Twitter. Cette déconstruction est un outil puissant pour étudier la dynamique d'une conversation, en particulier lorsque cela ne peut se faire autrement.

Les messages publiés sur les réseaux sociaux fournissent une source d'information très intéressante pour connaître l'état des lieux dans plusieurs domaines. Par exemple, l'utilisation des commentaires rendus publics par des pêcheurs récréatifs permet de mieux comprendre l'état des écosystèmes. Les états des stocks de poissons peuvent être estimés en utilisant le nombre et la taille des prises qui ont été diffusés sur les réseaux sociaux (parfois avec des photos, des commentaires ou des mots-clics). Ces données sont disponibles, et peuvent être plus fiables que des données de sondage. Elles sont, de plus, gratuites (Monkman, Kaiser et Hyder, 2018).

L'analyse de textes sur les réseaux sociaux offre trois avantages (Nyman et Ormerod, 2020). Premièrement, il y a un avantage théorique. La théorie économique est construite sur le principe de la préférence révélée. Les enquêtes qui suscitent des opinions et des réponses à des questions hypothétiques ne sont pas aussi solidement fondées que les actions observées des agents. Les agents révèlent leurs préférences par leurs décisions. De la même manière, dans les conversations, les agents révèlent leurs émotions et leurs attitudes. Deuxièmement, elle peut être réalisée en temps réel plutôt qu'avec les décalages qu'impliquent les méthodes d'enquête classiques. Troisièmement, elle est beaucoup moins coûteuse à construire que les mesures basées sur les techniques d'enquête conventionnelles.

Il y a aussi des pièges à éviter qui, souvent, sont de la même nature que ceux des méthodes traditionnelles, mais qui peuvent aussi être d'une tout autre nature. Par exemple, il y a les biais d'échantillonnage. Il y a également les phénomènes d'amplification créés par les robots. Il est, en effet, possible pour une organisation de programmer un robot qui va émettre des gazouillis ou relancer des conversations sur des sujets qui intéressent cette organisation. Dans l'analyse des conversations sur les réseaux sociaux, il faut donc faire particulièrement attention à la collecte des données et au traitement des biais dans ces données. Il faut être particulièrement attentif aux phénomènes d'amplification créés artificiellement par des algorithmes.

Les premières analyses des conversations sur les réseaux sociaux ont été faites lors de campagnes électorales. Il est intéressant de comprendre si une thématique – jugée importante et prioritaire pour un pays – est bien comprise par la population. Lors des élections générales de 2015 au Canada, de nombreux messages ont été échangés sur Twitter. En utilisant une approche ordonnée d'un ensemble de données massives collectées sur Twitter (3,5 millions de gazouillis), Sanger et Warin (2017) ont développé deux méthodologies pour caractériser la façon dont les candidats et les différents partis ont été perçus sur les réseaux sociaux pendant la campagne électorale et notamment lors des débats télévisés. Tout d'abord, une analyse des sentiments a été réalisée pour chaque leader politique, puis, en utilisant l'ensemble des données, différents sujets électoraux ont été associés à chaque leader. Les conversations ont été analysées lors de deux débats en utilisant les mots-clés suivants : #polcan #Polcan2015, #Elxn42 et #elxn2015.

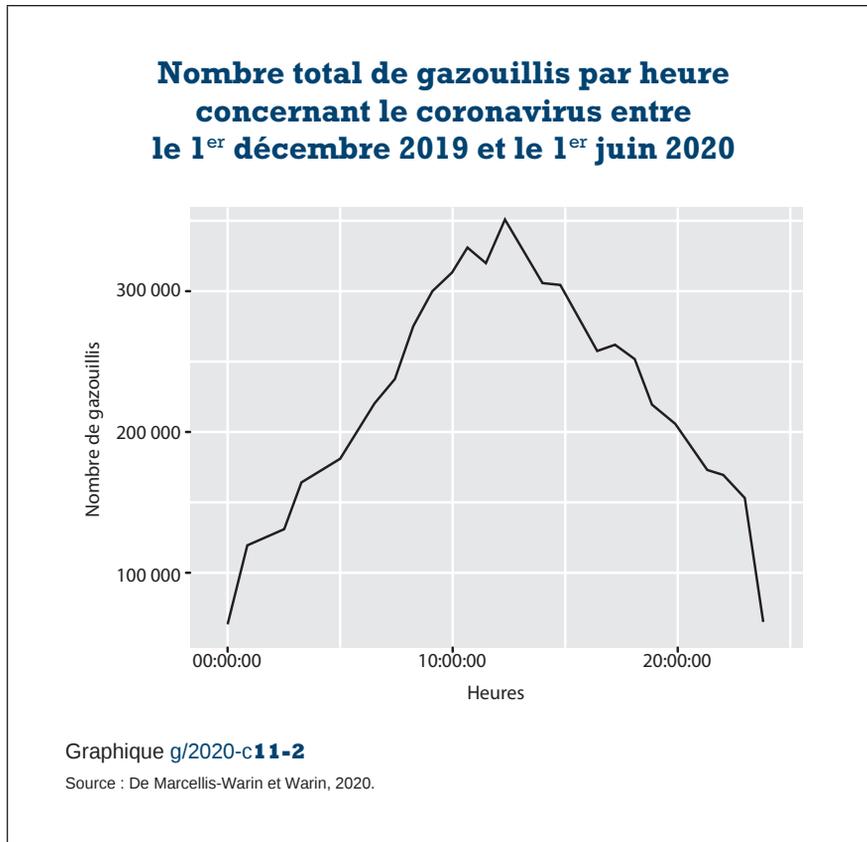
Pour chacun des débats, plus de 100 000 messages ont été collectés, avec des pics à 1 000 gazouillis par minute pour certaines parties du débat. Des thématiques ont été abordées par les utilisateurs de Twitter et nous pouvons déterminer si certains sujets électoraux provoquent plus de réactions que d'autres, et surtout si ces réactions sont restreintes dans le temps ou perdurent après la période accordée à ces sujets. Lors du débat des chefs en anglais, deux pics de messages correspondent à des mots-clés sur l'environnement (De Marcellis-Warin et Warin, 2017). En analysant un peu plus le contexte de ce débat et en essayant de trouver la raison des deux pics, nous avons remarqué qu'une campagne avait été préparée par l'organisme 350.org Canada⁹ avant le débat pour inciter les utilisateurs de Twitter à communiquer un message spécifique pendant le débat. Cet organisme a fourni un exemple de gazouillis : « La science du climat n'est pas un débat. Les actions en faveur du climat signifient une économie propre et des sables bitumineux gelés. #ClimatELXN #globedebate⁹ ». Plus de 860 000 personnes ont eu connaissance de cette campagne, toutes faisant partie des réseaux des 1 138 personnes ayant répondu à la demande de 350.org Canada.

Lors des élections fédérales de 2019, un groupe de chercheurs canadiens dirigé par le professeur Jean-François Savard de l'ENAP a analysé spécifiquement l'attention portée aux enjeux autochtones dans Twitter par les candidats au cours de la campagne¹⁰. Les mots « *indigenous* » et « autochtones » ont toujours conservé une place importante dans les discussions. Les gazouillis en français concernant les Premières Nations ont mis l'accent sur les enjeux climatiques, la réconciliation et les enjeux liés aux enfants à prendre en compte par le futur gouvernement.

D'une façon plus générale, l'émergence des plateformes de médias sociaux a permis aux citoyens ordinaires d'exprimer leurs inclinations idéologiques en adoptant le lexique des élites politiques. Les chercheurs disposent ainsi d'une nouvelle source de données très riche pour l'étude de l'idéologie politique (Temporão, Kerckhove, van der Linden, Dufresne et Hendrickx, 2018). Ainsi, que ce soit le contenu des conversations ou les moments des pics de messages, Twitter permet de bien comprendre les perceptions des citoyens et les dynamiques sociales. Lors du printemps 2012 et du conflit autour de la hausse des droits de scolarité au Québec, divers observateurs ont suggéré que les plateformes du Web 2.0, notamment Facebook et Twitter, auraient joué un rôle de premier plan dans cette crise (Latzto-Toth, Pastinelli et Gallant, 2017). Toutefois, en analysant

les traces d'activité archivées dans l'historique du compte Facebook de plusieurs jeunes, Latzo-Toth et ses collaborateurs (2017) ont montré qu'en dépit de certains traits récurrents, les usages et les représentations de la plateforme sont loin d'être homogènes au sein de ce groupe d'âge et qu'ils reflètent les divers clivages sociaux.

Entre le 1^{er} décembre 2019 et le 1^{er} juin 2020, De Marcellis-Warin et Warin (2020) ont recueilli près de 6,5 millions de gazouillis liés aux coronavirus en utilisant un ensemble de termes de recherche prédéfinis (« COVID-19 », « coronavirus » ou « 2019-nCoV »)¹¹. Six langues ont été sélectionnées pour la collecte des gazouillis : anglais, espagnol, chinois, allemand, français et italien. Les rediffusions de gazouillis ont été repérées et supprimées de l'analyse, ainsi que la ponctuation, les mentions des utilisateurs de Twitter (@nom d'utilisateur), les chiffres, les liens HTML, les liens vers des photos et les petits mots tels que « *an* » et « *the* » (aussi appelés mots-stops)¹². Les mots clés utilisés pour télécharger les gazouillis ont également été supprimés afin de mieux mettre en évidence les mots les plus récurrents. En outre, différentes formes d'un même mot (par exemple « voyages », « *traveling* » et « *travel's* ») ont été converties en un seul mot principal (par exemple « *travel* ») à l'aide du logiciel en langage R intitulé « *udpipe* » (*package R udpipe*). Une analyse exploratoire des données des gazouillis postés en fonction de la date, de l'heure, du pays, de la langue et d'autres paramètres a été effectuée. On observe notamment que les pics de publication de messages étaient autour de 11 h et de 12 h, ce qui correspond, pour certains pays, aux heures des conférences de presse des gouvernements (graphique 11-2).



L'analyse des mots clés a aussi révélé une vue d'ensemble de l'appréhension de la pandémie dans le monde. Le nuage de mots (qui ne conserve pas les accents) a été représenté à la figure 11-2 à l'aide de la plateforme Nüance-R (Warin, 2019).

pour les politologues et les économistes (Grimmer et Stewart, 2013). Ces techniques permettent d'extraire et de recréer de l'information à partir d'un corpus de textes (classification, analyse, tendance, etc.).

Par exemple, ces méthodes ont permis d'analyser l'évolution de la communication de la Banque centrale européenne (BCE) à travers le temps, en considérant ses trois présidents successifs (W. Duisenberg, J. C. Trichet et M. Draghi) et la période précédant et suivant la crise financière de 2008. Warin et Sanger (2020) ont analysé les discours des banquiers centraux en utilisant des techniques de pointe d'apprentissage automatique et des analyses de sentiments afin de mesurer la polarité des messages afin de déterminer s'ils étaient plutôt positifs ou plutôt négatifs. Ces analyses ont permis de saisir l'évolution de la compréhension de la situation économique réelle par la BCE et de mesurer le niveau de stress à la BCE dans le temps. Un autre exemple d'analyse textuelle, pour des discours de l'Assemblée générale des Nations Unies, a permis d'identifier des enjeux de politique internationale ainsi que les positions adoptées par différents pays (Watanabe et Zhou, 2020).

L'analyse des données textuelles permet également de mieux comprendre comment les lois et les règlements sont appliqués au fil du temps. Par exemple, les données de transcription d'assemblées délibératives en Inde ont mis au jour les inégalités au sein des assemblées de villages ; notamment, les femmes, qui sont moins entendues et qui ont moins d'occasions de déterminer les sujets de discussions que les hommes, sont pénalisées (Parthasarathy, Rao et Palaniswami, 2019). Les jugements des cours chinoises ont aussi été numérisés. Grâce à l'analyse de ces documents, on peut voir comment les citoyens utilisent le système légal, et comment certaines poursuites permettent de contester certaines décisions de l'État (Liebman, Roberts, Stern et Wang, 2017). Les forums internationaux rassemblent des données améliorant notre compréhension des enjeux mondiaux.

L'utilisation d'algorithmes a aussi permis d'analyser le contenu de tous les résumés des brevets disponibles des 40 autorités mondiales de délivrance des brevets et des publications scientifiques en intelligence artificielle (IA) (Warin, Le Duc et Sanger, 2017). Cela a permis de voir l'évolution du nombre de brevets par année et par zone géographique, ainsi que d'extraire les catégories décrivant le mieux chaque sous-domaine de l'IA en les classant par secteur industriel. La base de données utilisée a rassemblé

un total de 55 109 brevets et 29 225 articles scientifiques. Dans les deux cas, l'analyse d'une telle quantité d'informations ne serait pas possible sans une puissance de calcul dédiée. L'objectif était d'avoir une perspective et une compréhension plus approfondies des différents développements de l'IA dans le temps et l'espace. L'analyse géographique a fourni un portrait des principales régions et des principaux pays contribuant à l'innovation en matière d'IA et d'apprentissage automatique : la Chine, les États-Unis et le Japon.

Nouvelles méthodologies d'analyse

Les données non structurées ont à l'origine plutôt une nature qualitative. Pourtant, elles sont codées en format numérique pour pouvoir être utilisées sur les appareils électroniques (téléphones intelligents, tablettes, ordinateurs, etc.). Le fait que des informations qualitatives soient traduites en format numérique permet de les analyser de façon quantitative. Il faut pour cela structurer ces données. Un exemple plus complexe est celui de l'analyse sémantique : il s'agit par exemple de permettre la conversation dans une langue entre deux personnes et d'être capable d'analyser si cette conversation est de nature positive, négative, joyeuse, agressive, etc. Des modèles d'analyse des données quantitatives existent déjà depuis les premiers travaux sur les probabilités et l'analyse stochastique et n'ont eu de cesse d'être améliorés à travers le temps. Des outils d'analyse de très grosses bases de données avec une puissante capacité de calculs ont été développés.

De plus, pour aller explorer et chercher des données, les méthodes de fouille de données sont un point de départ évident, mais il faut aussi tenir compte des spécificités des données (Gama, Sebastião et Rodrigues, 2009). Les méthodes d'apprentissage automatique sont un autre point de départ évident. Très populaires dans les années 1970, elles ont été aussi améliorées par les modèles d'économétrie (Choi et Varian, 2012). La disponibilité d'une puissance de calcul importante avec le développement de nouveaux ordinateurs avait permis ce développement.

Gentzkow et ses collaborateurs (2019) donnent un aperçu des méthodes d'analyse des textes et des applications actuelles en sciences sociales et, plus spécifiquement, en économie. Considérant la nature des données et leur disponibilité massive, les méthodes issues de l'apprentissage automatique

trouvent des domaines d'application intéressants ; par exemple, les arbres de régressions ou les analyses factorielles sont parfois plus efficaces que les modèles d'économétrie de première génération. Les modèles d'économétrie de deuxième génération avec des estimations non linéaires s'ajoutent à la panoplie des outils à la disposition des analystes de données massives. Un nombre croissant d'études ont appliqué les modèles d'apprentissage automatique à la prévision macroéconomique. Nakamura (2005) a montré l'utilité des réseaux de neurones pour la prévision de l'inflation. Les réseaux neuronaux surpassent les modèles autorégressifs univariés en moyenne pour des horizons courts d'un et de deux trimestres.

Néanmoins, pour rendre analysables de telles données, il faut développer des méthodes de structuration. En effet, il ne s'agit pas seulement d'utiliser une série de techniques économétriques ou d'algorithmes provenant des sciences de l'information, mais il faut aussi s'assurer que les meilleures méthodes des différents champs disciplinaires intéressés sont connues et utilisées pour analyser les données massives avec toutes leurs spécificités.

Analyse de la géolocalisation des messages et des textes

La géolocalisation des messages et des textes peut offrir un outil précieux d'analyse. En complément des recherches sur les moteurs de recherche que nous avons présentées précédemment, une étude a montré que l'utilisation de messages publiés sur Twitter a déjà permis d'améliorer le suivi en temps réel de l'évolution géographique de l'épidémie de grippe, notamment en établissant la propagation de la grippe et les foyers d'éclosion de neuf États américains (Reynard et Shirgaokar, 2019). Utiliser ces données localisées permet aux autorités publiques de réagir de façon plus ciblée.

Dans l'éventualité d'un désastre naturel ou d'une crise grave, il est souvent possible d'établir la position géographique de l'auteur d'un message émis sur les médias sociaux, que ce soit par une donnée GPS, par l'identification d'un point de repère ou par l'analyse du texte du message. Les messages relayés sur les réseaux sociaux permettent à la fois d'informer la population de l'état de la situation et de recueillir de l'information sur l'état du terrain. Les autorités publiques sont alors en mesure de recevoir,

de la part des citoyens, des images ou des descriptions décrivant toute situation difficile (inondation, arbre tombé, panne électrique, etc.) (Reynard et Shirgaokar, 2019).

Analyse des réseaux

Des analyses de réseaux basées sur des données issues de réseaux sociaux peuvent permettre de repérer des communautés d'utilisateurs au sein de Twitter et de les articuler avec les principaux thèmes mobilisés dans le cadre d'un débat. Par exemple, Smyrniotis et Ratinaud (2014) montrent comment articuler une analyse des réseaux avec une analyse des discours sur Twitter dans le contexte de la ratification du Traité du pacte budgétaire européen à l'automne 2012 en se basant sur la couverture française. Leurs résultats montrent que les conversations mêlent des messages informatifs avec une gamme d'expressions diverses (ironie, critique, humour, indignation, etc.). Les échanges sont dominés par ceux qui adoptent une position de forte opposition au traité, couplée, souvent, à des discours de dénonciation qui vont influencer les positions des internautes.

L'évaluation de l'influence sur les réseaux sociaux est au cœur d'une nouvelle tendance dans les sciences humaines et sociales. Twitter est devenu un espace privilégié pour le secteur de la finance. Les opérateurs de marché (*traders*) dits « 2.0 » s'informent sur Twitter. De Marcellis-Warin, Sanger et Warin (2017) ont évalué l'influence de certains utilisateurs concernant des conversations financières sur Twitter. Ces conversations sont très spécifiques, car les utilisateurs utilisent des mots-clés formés avec les noms des compagnies. Pour cette étude, les chercheurs ont constitué deux ensembles de données comprenant respectivement 489 000 et 280 000 gazouillis financiers. Si le fait d'obtenir des adeptes supplémentaires peut donner un aperçu d'une popularité croissante, cela ne se traduit pas nécessairement par une position plus influente. Les résultats de l'étude suggèrent que le nombre de suiveurs n'est qu'un élément de ce qui est considéré comme influent. En effet, le nombre de messages peut être biaisé par ce que l'on peut qualifier d'utilisateurs « bruyants ». Le nombre de rediffusions de gazouillis est un indicateur plus précis de l'influence. Enfin, par exemple, les mesures de centralité dans le réseau de rediffusions des gazouillis fournissent des informations privilégiées à toute personne qui suit ces utilisateurs. Il est aussi possible de comparer les impacts des actions

mentionnées par chaque type d'utilisateur. À partir de ces résultats, de telles méthodes d'évaluation de l'influence sur Twitter permettent d'acquérir des signaux privilégiés dans un contexte financier.

En utilisant les mêmes méthodologies d'analyse de réseaux, Warin et Sanger (2018) se sont concentrés sur la connectivité et la proximité entre les institutions financières. Ils ont examiné les réseaux potentiels entre les institutions financières par le biais de leurs conseils d'administration. Pour cela, ils ont constitué un large échantillon de représentants de conseils d'administration (43 399 personnes) pour 2 209 institutions dans 52 pays en utilisant la base de données du Bureau van Dijk. L'article identifie des regroupements de conseils d'administration montrant – dans une certaine mesure – le niveau de concentration au sein du système financier dans des régions du monde en particulier. La principale contribution de cet article est de mettre en évidence des propriétés précises du système financier international qui pourraient être critiques, notamment en ce qui a trait au risque systémique.

Analyse de sentiments

L'analyse de sentiments vise à déterminer les sentiments des gens en analysant leurs messages et différentes actions qu'ils posent sur les réseaux sociaux. Elle consiste à classer les messages selon les différents sentiments opposés qu'ils transmettent, qui peuvent être positifs ou négatifs. Cette forme d'analyse pourrait être divisée en deux catégories principales (Warin et Sanger, 2018) : l'analyse lexicale, qui vise à calculer la polarité dans un document à partir de l'orientation sémantique des mots ou des phrases qu'il contient, et l'apprentissage automatique, qui vise à construire des modèles à partir des données d'apprentissage étiquetées (instances de textes ou de phrases) afin de déterminer l'orientation d'un document.

Bollen, Pepe et Mao (2009) ont utilisé des analyses de sentiments sur les messages publiés sur Twitter. Pendant toute la durée de leur étude, ils ont extrait des messages sous six dimensions de sentiments : tension, dépression, colère, vigueur, fatigue et confusion. Ils ont ensuite comparé leurs résultats aux fluctuations des marchés financiers, au prix du pétrole et à des perturbations ponctuelles créées par des situations exceptionnelles comme l'élection présidentielle américaine du 4 novembre 2008. Ils ont constaté que les événements dans les domaines sociaux, politiques,

culturels et économiques ont un effet très significatif sur les six dimensions d'humeur de la population. Les auteurs suggèrent que l'information présente dans les réseaux sociaux peut être utilisée comme indicateur pour les opinions publiques.

Les firmes utilisent aussi l'analyse de sentiments pour évaluer l'image des marques qu'elles distribuent (Culotta et Cutler, 2016). En effet, elles considèrent que ces approches sont moins coûteuses que les méthodes traditionnelles (par exemple, les enquêtes), dont les résultats, de surcroît, peuvent rapidement devenir obsolètes. Ce type d'analyse peut être utilisée pour mesurer l'image associée à certaines politiques publiques, prévenant (ou à tout le moins prévoyant) ainsi des protestations vives qui pourraient venir de citoyens en fort désaccord avec une politique spécifique. Cela peut être très utile aux organismes gouvernementaux pour comprendre les besoins et les problèmes des sociétés et formuler des politiques publiques efficaces pour y répondre (Charalabidis, Maragoudakis et Loukis, 2015).

Modèles prédictifs

Les données des réseaux sociaux peuvent améliorer les modèles prédictifs. Ces derniers peuvent faire en sorte, par exemple, de comprendre les sentiments des investisseurs. Étant donné que les variations à court terme de la valeur des actions dépendent à la fois d'éléments fondamentaux et rationnels que d'éléments moins tangibles, dont la peur ou la confiance dans les marchés, cette analyse permet d'intégrer les sentiments des investisseurs et d'améliorer les modèles prédictifs (Attigeri, Manohara Pai, Pai et Nayak, 2015 ; Wang et Wang, 2016).

Les données publiées sur Twitter peuvent également être utilisées pour prédire les mouvements de foule. En effet, comme on l'a vu précédemment, les publications de gazouillis sont souvent géolocalisées. Leur analyse peut aider à anticiper, par exemple, les pics d'utilisation des transports (Ni, He et Gao, 2016). Les réseaux sociaux permettent également la prévision de mouvements à plus long terme. Grâce à de telles données, des études ont pu prévoir à l'avance les fluctuations du nombre de touristes sur une certaine période (Xin, Bing, Law et XianKai, 2017).

Stevanovic (2020) montre que l'accessibilité des données massives et l'avancement des techniques d'apprentissage automatique ont considérablement changé la façon d'approcher le problème de prévision macroéconomique. De nombreux chercheurs travaillent à améliorer les techniques utilisées (Coulombe, Leroux, Stevanovic et Surprenant, 2020).

Les enjeux à prendre en compte

Ce chapitre n'avait pas comme objectif de faire une revue exhaustive de la littérature sur le sujet. Toutefois, les exemples présentés montrent bien le potentiel des données non structurées et des nouvelles méthodes d'analyse, notamment l'apprentissage automatique. Cela va permettre entre autres de mieux éclairer les décisions publiques et, surtout, d'obtenir de l'information sur une base continue et de façon moins coûteuse. Toutefois, certains enjeux sont parfois soulevés quant à la nature des données, à la véracité des données ainsi qu'aux biais possibles dans les échantillons de données. Nous pourrions également ajouter une analyse des stratégies et des modèles d'affaires des plateformes de réseaux sociaux. Dans l'espace limité de ce chapitre, nous allons aborder les enjeux liés aux biais dans les données. Il est important de les définir dès le début de l'analyse pour pouvoir trouver des solutions.

La nature et la qualité des données

Que ce soit pour les données structurées ou pour les données non structurées, la qualité des données reste toujours primordiale. Selon Statistique Canada, on mesure la qualité des données par le niveau (ou degré) de confiance à leur égard ainsi que par la capacité d'utilisation (la pertinence, l'exactitude, l'actualité, l'accessibilité, la possibilité d'interprétation et la cohérence)¹³. Pour les données relayées sur les réseaux sociaux, la qualité doit être évaluée en fonction de la provenance. On peut parfois avoir l'impression qu'une opinion issue de Twitter est fortement partagée, alors qu'elle provient d'un nombre limité de personnes, qui sont toutefois positionnées de manière stratégique dans le réseau, influençant ainsi fortement la conversation (Jungherr et Jürgens, 2014).

De plus, l'argument souvent apporté est que les utilisateurs de Twitter ne forment probablement pas un échantillon représentatif de la population, mais qu'ils sont plutôt une population en soi. L'avantage de cette situation est que l'on peut extraire tous les gazouillis sur un sujet, ce qui veut dire qu'avec suffisamment de puissance de calcul, il est possible d'utiliser toute la population sans faire d'échantillonnage. La question est ensuite de savoir si l'on peut néanmoins généraliser à l'ensemble de la population, incluant les conversations hors Twitter, en fonction de ce que l'on trouve dans Twitter. La littérature est partagée sur le sujet. Une des dynamiques sur les réseaux sociaux en général est la polarisation. Il n'y a pas un seul village mondial sur Internet, mais des villages de gens qui se sont regroupés par affinités culturelles, thématiques, démographiques, etc. Il y a donc un biais d'échantillon si l'on cherche à en tirer une quelconque généralisation. En revanche, il est intéressant d'analyser une conversation en particulier et de chercher les variables de contrôle de nature culturelle, thématique, démographique, etc. C'est à ce stade qu'il est possible de faire ressortir quelques lois générales sur la population au sens large du terme (De Marcellis-Warin et Warin, 2017).

La véracité des données : les « fausses » informations

Les réseaux sociaux servent à transmettre toutes sortes d'informations, vraies ou fausses. De fausses données ont été relayées dans toutes sortes de domaines comme les vaccins, la nutrition ou les informations boursières (Lazer *et al.*, 2018). Les fausses informations se répandent facilement sur le Web, pouvant devenir virales et influencer l'opinion publique et ses décisions (Bondielli et Marcelloni, 2019). Ces fausses nouvelles sont majoritairement relayées par des robots de recherche (*bots*) qui tentent de répandre largement ces faussetés (Al-Rawi, Groshek et Zhang, 2019). Dans certains cas, elles font leur chemin jusqu'aux médias traditionnels, qui vont alors jusqu'à les relayer. De plus, on remarque un risque d'écho. Une grande partie des personnes suivant les publications des journalistes sont d'autres journalistes (Bane, 2019). Il est donc possible que le même message soit répété à partir d'une seule source, simplement parce que les journalistes s'alimentent aux mêmes sources.

En parallèle à cette production de fausses nouvelles, l'étude de Grinberg, Joseph, Friedland, Swire-Thompson et Lazer (2019) suggère que la proportion de fausses nouvelles à laquelle un citoyen est exposé reste faible (même si elle est réelle). En utilisant les données de la campagne américaine de 2016, ces auteurs ont estimé que 6 % des utilisateurs relayant de l'information politique ont partagé du contenu faux. Cela aurait représenté un peu plus de 1 % du contenu consulté (Grinberg *et al.*, 2019). Il ne faut toutefois pas sous-estimer le problème. En réalité, les zones d'ombre ou de demi-vérité sont peut-être plus importantes que les fausses nouvelles.

Le défi de la véracité des données n'est pas seulement de savoir reconnaître les fausses nouvelles. Il s'agit aussi d'authentifier les vraies nouvelles. Plusieurs médias se sont vus accusés de publier de « fausses nouvelles » quand celles-ci ne plaisaient pas aux politiciens en place, et ce, même quand les faits publiés étaient avérés. Les médias sociaux servent alors à discréditer des sources « fiables » d'information qui doivent alors défendre leur légitimité (Lischka, 2019). Les recherches suggèrent par exemple qu'entre 250 000 et 300 000 membres du parti chinois alimentent les réseaux sociaux de messages choisis par le gouvernement en utilisant différents pseudonymes afin de créer l'illusion que ces messages sont légitimes (King, Pan et Roberts, 2017).

Par ailleurs, cet enjeu de l'authenticité est difficile à évaluer, puisqu'il n'existe pas de critère établi pour la détection de vraies ou de fausses nouvelles. L'intérêt pour les techniques de détection efficaces a donc augmenté très rapidement ces dernières années (Bondielli et Marcelloni, 2019).

L'endogénéité des données non structurées et les biais historiques

Certaines sources de données sont vulnérables à la manipulation. Par exemple, on estime que la moitié des messages transmis sur Twitter sont générés par des robots (Al-Rawi *et al.*, 2019). Ainsi dans certains cas, la manipulation des données pourrait venir « polluer » les algorithmes d'apprentissage automatique.

Les approches fondées sur les données mettent souvent à contribution l'intelligence artificielle. Ces algorithmes utilisent les données historiques afin de prédire le futur. Ils travaillent généralement en « boîte noire », une méthode ne permettant pas d'avoir une vue explicite des règles qui sont extraites de l'analyse des faits passés. Ce mode de fonctionnement présente des risques élevés de reproduction de biais historiques. Par exemple, un système utilisé par les cours de justice américaines pour prédire les risques de récidives prévoyait (erronément) un risque deux fois supérieur de récidive pour les prisonniers de race noire comparé aux prisonniers de race blanche (Buranyi, 2017). Les biais peuvent venir autant d'une représentation biaisée du problème à l'étude que de biais incrustés dans les données historiques (Roselli, Matthews et Talagala, 2019). Dans ce contexte, baser des politiques publiques sur de simples corrélations est très risqué. Il existe des pistes de solution pour limiter ces biais. On peut penser notamment à l'utilisation d'une tierce partie pour les évaluer, au développement d'un indice d'équité, ou à l'exploration des données à la recherche de ces modèles biaisés (Veale et Binns, 2017). Malheureusement, aucune solution n'est simple ou facile à automatiser. Bien que des techniques informatiques émergent pour répondre à certaines de ces préoccupations grâce à l'exploration de données en connaissance de cause ou encore à l'apprentissage machine de l'équité, de la responsabilité et de la transparence, la mise en œuvre pratique des solutions se heurte à des défis réels. Il faut donc procéder prudemment si ces systèmes sont utilisés de manière non supervisée.

Conclusion

Les réseaux sociaux peuvent servir de courroies de transmission pour les groupes qui veulent s'opposer à certaines politiques publiques, ou au contraire inciter un gouvernement à agir dans certaines circonstances (Larson, Nagler, Ronen et Tucker, 2019). Les réseaux sociaux deviennent également des outils pour recevoir des commentaires sur des éléments de politiques. Quand les sujets intéressent les citoyens, ceux-ci vont souvent commenter les rapports ou les actions gouvernementales publiquement, en utilisant les réseaux sociaux. Par exemple, sur l'environnement et les changements climatiques, la publication d'un rapport peut générer des conversations sur le contenu du rapport de même que sur les réponses du gouvernement par rapport aux enjeux soulevés dans le rapport (Pearce, Holmberg, Hellsten et Nerlich, 2014).

L'utilisation des médias sociaux n'augmente pas automatiquement la confiance que les citoyens ont envers leur gouvernement. Quand elle accroît la perception de transparence du gouvernement, à partir de ce moment seulement, il y a un accroissement de la confiance (Song et Lee, 2016).

Une étude des communications de 75 gouvernements de proximité a montré que la communication se fait maintenant dans les deux sens (Bonsón, Torres, Royo et Flores, 2012). Les citoyens utilisent les médias pour informer les gouvernements, que ce soit à propos de leurs opinions, de leurs observations, de leurs activités quotidiennes ou même de leurs souhaits. Ils peuvent transmettre des commentaires, des photos ou des vidéos, et ils deviennent des collaborateurs actifs plutôt que simplement les utilisateurs d'un service. On remarque aussi que les médias traditionnels se fient aux comptes Twitter associés aux organisations publiques, et qu'ils les traitent maintenant comme des sources officielles (Moon et Hadley, 2014). Les politiciens font également partie du paysage des réseaux sociaux. Ils commentent les choix de politiques publiques et alimentent le débat. La recherche montre que les politiciens qui prônent des positions extrêmes sur le plan idéologique tendent à avoir plus d'abonnés que ceux qui sont plus modérés (Hong et Kim, 2016). Ceci rend plus difficiles l'atteinte de compromis et la discussion constructive.

Références

- Alaoui, I. E. (2018). *Transformer les big social data en prévisions. Méthodes et technologies : application à l'analyse de sentiments* [thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Université d'Angers; Université IbnTofail. Faculté des sciences de Kénitra]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02060594/document>.
- Al-Rawi, A., Groshek, J. et Zhang, L. (2019). What the fake? Assessing the extent of networked political spamming and bots in the propagation of #fakenews on Twitter. *Online Information Review*, 43(1), 53-71. <https://doi.org/10.1108/OIR-02-2018-0065>.
- Attigeri, G. V., Manohara Pai, M. M., Pai, R. M. et Nayak, A. (2015). Stock market prediction: A big data approach. *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference*. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2015.7373006>.
- Bane, K. C. (2019). Tweeting the agenda. *Journalism Practice*, 13(2), 191-205. <https://doi.org/10.1080/17512786.2017.1413587>.
- Bollen, J., Pepe, A. et Mao, H. (2011). Modeling public mood and emotion: Twitter sentiment and socio-economic phenomena. *Proceedings of the Fifth International AAAI Conference on Weblogs and Social Media (ICWSM 2011)*. file:///C:/Users/vedes/AppData/Local/Temp/0911.1583.pd.
- Bondielli, A. et Marcelloni, F. (2019). A survey on fake news and rumour detection techniques. *Information Sciences*, 497, 38-55. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.05.035>.
- Bonsón, E., Torres, L., Royo, S. et Flores, F. (2012). Local e-government 2.0: Social media and corporate transparency in municipalities. *Government Information Quarterly*, 2(29), 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2011.10.001>.
- Buranyi, S. (2017, 8 août). Rise of the racist robots – how AI is learning all our worst impulses. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/inequality/2017/aug/08/rise-of-the-racist-robots-how-ai-is-learning-all-our-worst-impulses>.
- Charalabidis, Y., Maragoudakis, M. et Loukis, E. (2015). Opinion mining and sentiment analysis in policy formulation initiatives: The EU-community approach. Dans E. Tambouris, P. Panagiotopoulos, Ø. Sæbø, K. Tarabanis, M. A. Wimmer, M. Milano et T. Pardo (dir.), *Electronic Participation* (p. 147-160). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22500-5_12.
- Choi, H. et Varian, H. (2012). Predicting the present with Google trends. *Economic Record*, 88(s1), 2-9. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4932.2012.00809.x>.
- Coulombe, P. G., Leroux, M., Stevanovic, D. et Surprenant, S. (2020). How is machine learning useful for macroeconomic forecasting? *CIRANO Scientific Series*, 2019s(22). <https://cirano.qc.ca/fr/sommaires/2019s-22>.
- Culotta, A. et Cutler, J. (2016). Mining brand perceptions from Twitter social networks. *Marketing Science*, 35(3), 343-362. <https://doi.org/10.1287/mksc.2015.0968>.
- De Marcellis-Warin, N., Sanger, W. et Warin, T. (2017). A network analysis of financial conversations on Twitter. *International Journal of Web Based Communities*, 13(3). <https://doi.org/10.1504/IJWBC.2017.086588>.

De Marcellis-Warin, N. et Warin, T. (2017). Les sciences des données et la perception des risques naturels et climatiques : Analyse des conversations sur Twitter. Dans Bernard Motulsky, Jean Bernard Guindon et Flore Tanguay-Hébert (dir.), *Communication des risques météorologiques et climatiques*. Presses de l'Université du Québec.

De Marcellis-Warin, N. et Warin, T. (2020). *Twitter Analysis on Covid-19 Pandemic*. <https://warin.ca/posts/article-tweets-covid/>.

Eisenstein, M. (2018). Cloudy with a chance of flu. *Nature*, 555(7695). doi : 10.1038/d41586-018-02473-5.

Gama, J., Sebastião, R. et Rodrigues, P. P. (2009). Issues in evaluation of stream learning algorithms. *Proceedings of the 15th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 329-338. <https://doi.org/10.1145/1557019.1557060>.

Gentzkow, M., Kelly, B. et Taddy, M. (2019). Text as data. *Journal of Economic Literature*, 57(3), 535-574. <https://doi.org/10.1257/jel.20181020>.

Grimmer, J. et Stewart, B. M. (2013). Text as data: The promise and pitfalls of automatic content analysis methods for political texts. *Political Analysis*, 21(3), 267-297. <https://doi.org/10.1093/pan/mps028>.

Grinberg, N., Joseph, K., Friedland, L., Swire-Thompson, B. et Lazer, D. (2019). Fake news on Twitter during the 2016 U.S. presidential election. *Science (New York, N.Y.)*, 363(6425), 374-378. <https://doi.org/10.1126/science.aau2706>.

Hong, S. et Kim, S. H. (2016). Political polarization on Twitter: Implications for the use of social media in digital governments. *Government Information Quarterly*, 33(4), 777-782. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2016.04.007>.

Iansiti, M. et Lakhani, K. R. (2020, 1 janvier). Competing in the Age of AI. *Harvard Business Review, January-February 2020*. <https://hbr.org/2020/01/competing-in-the-age-of-ai>.

Jungherr, A. et Jürgens, P. (2014). Stuttgart's Black Thursday on Twitter: Mapping political protests with social media data. Dans M. Cantijoch, R. Gibson et S. Ward (dir.), *Analyzing Social Media Data and Web Networks* (p. 154-196). Palgrave Macmillan UK. https://doi.org/10.1057/9781137276773_7.

King, G., Pan, J. et Roberts, M. E. (2017). How the chinese government fabricates social media posts for strategic distraction, not engaged argument. *American Political Science Review*, 111(3), 484-501.

Larson, J. M., Nagler, J., Ronen, J. et Tucker, J. A. (2019). Social networks and protest participation: Evidence from 130 million Twitter users. *American Journal of Political Science*, 63(3), 690-705. <https://doi.org/10.1111/ajps.12436>.

Latzo-Toth, G., Pastinelli, M. et Gallant, N. (2017). Usages des médias sociaux et pratiques informationnelles des jeunes Québécois : le cas de Facebook pendant la grève étudiante de 2012. *Recherches sociographiques*, 58(1), 43-64. <https://doi.org/10.7202/1039930ar>.

Lazer, D. M. J., Baum, M. A., Benkler, Y., Berinsky, A. J., Greenhill, K. M., Menczer, F., Metzger, M. J., Nyhan, B., Pennycook, G., Rothschild, D., Schudson, M., Sloman, S. A., Sunstein, C. R., Thorson, E. A., Watts, D. J. et Zittrain, J. L. (2018). The science of fake news. *Science (New York, N.Y.)*, 359(6380), 1094-1096. <https://doi.org/10.1126/science.aao2998>.

Liebman, B. L., Roberts, M. E., Stern, R. E. et Wang, A. Z. (2017). *Mass Digitization of Chinese Court Decisions: How to Use Text as Data in the Field of Chinese Law*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.2985861>.

Lischka, J. A. (2019). A badge of honor? *Journalism Studies*, 20(2), 287-304. <https://doi.org/10.1080/1461670X.2017.1375385>.

Monkman, G. G., Kaiser, M. J. et Hyder, K. (2018). Text and data mining of social media to map wildlife recreation activity. *Biological Conservation*, 228, 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.10.010>.

Moon, S. J. et Hadley, P. (2014). Routinizing a new technology in the newsroom: Twitter as a news source in mainstream media. *Journal of Broadcasting & Electronic Media*, 58(2), 289-305. <https://doi.org/10.1080/08838151.2014.906435>.

Nakamura, E. (2005). Inflation forecasting using a neural network. *Economics Letters*, 86(3), 373-378. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2004.09.003>.

Ni, M., He, Q. et Gao, J. (2016). Forecasting the subway passenger flow under event occurrences with social media. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1-10. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2611644>.

Nyman, R. et Ormerod, P. (2020). Text as Data: Real-time Measurement of Economic Welfare. *arXiv:2001.03401 [econ, q-fin]*. <http://arxiv.org/abs/2001.03401>.

Parthasarathy, R., Rao, V. et Palaniswamy, N. (2019). Deliberative democracy in an unequal world: A text-as-data study of South India's village assemblies. *American Political Science Review*, 113(3), 623-640. <https://doi.org/10.1017/S0003055419000182>.

Pearce, W., Holmberg, K., Hellsten, I. et Nerlich, B. (2014). Climate change on Twitter: Topics, communities and conversations about the 2013 IPCC working group 1 report. *PLOS ONE*, 9(4), e94785. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094785>.

Reynard, D. et Shirgaokar, M. (2019). Harnessing the power of machine learning: Can Twitter data be useful in guiding resource allocation decisions during a natural disaster? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 449-463. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.03.002>.

Roselli, D., Matthews, J. et Talagala, N. (2019). Managing bias in AI. *Companion Proceedings of The 2019 World Wide Web Conference*, 539-544. <https://doi.org/10.1145/3308560.3317590>.

Sanger, W. et Warin, T. (2017). The 2015 canadian election on Twitter: A tidy algorithmic analysis. *2017 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 910-915. <https://doi.org/10.1109/CSCI.2017.158>.

Smyrnaios, N. et Ratinaud, P. (2014). Comment articuler analyse des réseaux et des discours sur Twitter. L'exemple du débat autour du pacte budgétaire européen. *TIC & Société*, 7(2). <https://doi.org/10.4000/ticetsociete.1578>.

Song, C. et Lee, J. (2016). Citizens' use of social media in government, perceived transparency, and trust in government. *Public Performance & Management Review*, 39(2), 430-453. <https://doi.org/10.1080/15309576.2015.1108798>.

Stevanovic, D. (2020). Préviation macroéconomique dans l'ère des données massives et de l'apprentissage automatique. Dans N. De Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9 : Opportunités et défis de la transformation numérique*. Montréal, Québec : CIRANO.

Science des données, réseaux sociaux et politiques publiques

Temporão, M., Kerckhove, C. V., van der Linden, C., Dufresne, Y. et Hendrickx, J. M. (2018). Ideological scaling of social media users: A dynamic lexicon approach. *Political Analysis*, 26(4), 457-473. <https://doi.org/10.1017/pan.2018.30>.

Tkacz, G. (2013). *Predicting recessions in real-time: Mining Google trends and electronic payments data for clues*. C.D. Howe Institute.

Veale, M. et Binns, R. (2017). Fairer machine learning in the real world: Mitigating discrimination without collecting sensitive data. *Big Data & Society*. <https://doi.org/10.1177/2053951717743530>.

Wang, Y. et Wang, Y. (2016). Using social media mining technology to assist in price prediction of stock market. *2016 IEEE International Conference on Big Data Analysis (ICBDA)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICBDA.2016.7509794>.

Warin, T. (2019). Nüance-R: A Technological Platform for Data Science in Higher Education. Figshare. https://figshare.com/articles/software/N_ance-R/8870174 .

Warin, T. (2020). Global research on coronaviruses: An R package. *Journal of Medical Internet Research*, 22(8), e19615. <https://doi.org/10.2196/19615> .

Warin, T. et De Marcellis-Warin, N. (2014). *Un état des lieux sur les données massives* (Rapport Bourgogne n° 2014-RB 01). CIRANO.

Warin, T., Le Duc, R. et Sanger, W. (2017). Mapping innovations in artificial intelligence through patents: A social data science perspective. *2017 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 252-257. <https://doi.org/10.1109/CSCI.2017.40> .

Warin, T. et Sanger, W. (2018). Connectivity and closeness among international financial institutions: A network theory perspective. *International Journal of Comparative Management*, 1(3). <https://doi.org/10.1504/IJCM.2018.094479> .

Warin, T. et Sanger, W. (2020). The speeches of the European Central Bank's presidents: An NLP study. *Global Economy Journal*, 1-31. <https://doi.org/10.1142/S2194565920500098> .

Watanabe, K. et Zhou, Y. (2020). Theory-driven analysis of large corpora: Semisupervised topic classification of the UN speeches. *Social Science Computer Review*, 0894439320907027. <https://doi.org/10.1177/0894439320907027> .

Wu, L. et Brynjolfsson, E. (2013). The future of prediction: How Google searches foreshadow housing prices and sales (SSRN Scholarly Paper ID 2022293). *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2022293> .

Xin, L., Bing, P., Law, R. et XianKai, H. (2017). Forecasting tourism demand with composite search index. *Tourism Management*, 59, 57-66.

Notes

1. Les résultats complets du sondage NETendance sont disponibles en ligne : <https://cefrio.qc.ca/fr/enquetes-et-donnees/netendances2018-medias-sociaux/>.
2. Le site Internet du Baromètre CIRANO regroupe l'ensemble des données des sondages effectués auprès de la population du Québec sur la perception des risques : <https://barometre.cirano.qc.ca/>.
3. La plateforme statistique Google Trends a mis en place une page spéciale pour décrire les recherches faites sur le moteur de recherche Google concernant la COVID-19 : https://trends.google.com/trends/story/US_cu_4Rjdh3ABAABMHM_en (page consultée le 8 août 2020).
4. La plateforme statistique Google Trends permet de voir le nombre de recherches associées au mot clé « chômage », mais aussi les recherches par région, par sujet associé, ou par requête associée : <https://trends.google.ca/trends/explore?geo=CA&q=chomage> (page consultée le 8 août 2020).
5. Le graphique 11-1 a été généré en utilisant le mot clé « PCU » : <https://trends.google.com/trends/explore?date=2020-03-13%202020-09-30&geo=CA&q=PCU> (page consultée le 30 septembre 2020).
6. La Loi sur la prestation canadienne d'urgence a été adoptée le 25 mars 2020. La prestation canadienne d'urgence pour étudiants (PCUE) a été instaurée le 28 avril 2020. La première période s'est étendue du 15 mars au 11 avril 2020 et la deuxième du 12 avril au 9 mai 2020. Plusieurs autres périodes se sont échelonnées par la suite jusqu'à l'automne 2020.
7. La page suivante permet de voir les recherches avec le mot clé « CERB » : <https://trends.google.com/trends/explore?date=2020-03-13%202020-09-30&geo=CA&q=CERB> (page consultée le 30 septembre 2020).
8. Cet organisme se définit, sur son site Web, comme construisant « un mouvement mondial pour le climat ».
9. La phrase originale était en anglais : « *Climate science isn't a debate. Climate actions mean a clean economy & freezing tar sands. #ClimatELXN #globedebate* ».
10. Les auteurs ont mis en place un site Internet avec toutes les données : <http://pcmg.enap.ca/elections2019/francais/>
11. Le nombre total exact est de 6 664 956 gazouillis. Pour plus d'informations, voir : <https://www.warin.ca/posts/article-tweets-covid/> (page consultée le 31 juillet 2020).
12. Les données textuelles contiennent des éléments qui ne donnent pas d'informations et augmentent la complexité de l'analyse. Il est important de les éliminer avant de les analyser.
13. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/12-539-x/2019001/ensuring-assurer-fra.htm>.

Chapitre 12

PRÉVISION MACROÉCONOMIQUE DANS L'ÈRE DES DONNÉES MASSIVES ET DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

Dalibor Stevanovic

Professeur titulaire à l'École des sciences
de la gestion de l'Université du Québec
à Montréal, chercheur et fellow au CIRANO

Avec la collaboration de Hugo Couture et de Maxime Leroux

Résumé

L'accessibilité des données massives et l'avancement des techniques d'apprentissage automatique ont considérablement changé la façon d'approcher le problème de prévision macroéconomique. L'utilisation des techniques d'apprentissage automatique et de l'inclusion des composantes principales dans les modèles standards à l'application des réseaux de neurones est cependant une succession de boîtes noires. Ce chapitre dresse le portrait des avancées récentes dans le domaine de la prévision macroéconomique dans un contexte de données massives et de l'apprentissage automatique. Nous y présentons différents groupes de modèles de prévision basés sur la réduction de dimension, la régularisation, les ensembles et la non-linéarité. Nous discutons des défis qu'ils présentent pour les praticiens. Finalement, nous appliquons ces méthodes pour la prévision de la croissance de l'économie québécoise.

Introduction

Prévision macroéconomique et apprentissage automatique

Traditionnellement, la modélisation macroéconométrique a été guidée par le principe de parcimonie, et les modèles simples avec peu de paramètres à estimer étaient souvent préférés à des modèles non linéaires comprenant un nombre élevé de paramètres (Swanson et White, 1997 ; Stock et Watson, 1999 ; Teräsvirta, 2006). Or, l'accessibilité des données massives et l'avancement des techniques d'apprentissage automatique (machine learning ou ML ; aussi « apprentissage machine ») ont considérablement changé la façon d'approcher le problème de prévision macroéconomique (Kotchoni, Leroux et Stevanovic, 2019 ; Goulet Coulombe, Leroux, Stevanovic et Surprenant, 2019). Par contre, ces changements causent aussi deux problèmes. Premièrement, les données massives accessibles se résument à un très grand nombre de séries temporelles, et non à une hausse des périodes observées. Dans une régression prédictive linéaire, ceci implique plusieurs paramètres inconnus, ce qui rend leur estimation par les moindres carrés ordinaires (MCO) impossible¹. Deuxièmement, l'accessibilité des algorithmes d'apprentissage automatique hautement complexes augmente le risque d'une utilisation naïve et d'une interprétation erronée de leurs résultats (Mullainathan et Spiess, 2017).

Les méthodes d'apprentissage automatique s'avèrent particulièrement utiles lorsque nous n'avons pas beaucoup d'information sur la forme et la complexité du vrai modèle. Pour illustrer cette situation, prenons y_{t+h} , la variable macroéconomique, à prévoir h périodes en avance. L'indice t représente la fréquence d'observation, qui peut être mensuelle ou trimestrielle. L'ensemble d'information disponible en période t est donné par X_t , un vecteur contenant N prédicteurs. Dénotons par $g^*(X_t)$ le vrai modèle (inconnu par l'utilisateur) et par $g(X_t; \theta)$ la forme fonctionnelle spécifiée par l'économètre. À noter que la fonction $g(\cdot)$ peut être paramétrique ou non, et que le vecteur θ contient tous les paramètres du modèle. De plus, définissons le modèle estimé et sa prévision par $\hat{g}(X_t; \hat{\theta})$ et \hat{y}_{t+h} respectivement, où $\hat{\theta}$ est l'estimateur de θ . Par conséquent, l'erreur de prévision se décompose comme suit :

$$y_{t+h} - \hat{y}_{t+h} = \underbrace{g^*(X_t) - g(X_t; \theta)}_{\text{erreur d'approximation}} + \underbrace{g(X_t; \theta) - \hat{g}(X_t; \hat{\theta})}_{\text{erreur d'estimation}} + \varepsilon_{t+h} \quad (1).$$

L'erreur intrinsèque à la prévision, ε_{t+h} , n'est pas réductible, c'est-à-dire qu'elle est due aux mouvements stochastiques imprévisibles. L'erreur d'estimation peut être contrôlée par l'économètre en ajoutant plus d'observations et en choisissant des estimateurs plus efficaces. La contribution des méthodes de ML se manifeste dans la réduction de l'erreur d'approximation en permettant des formes fonctionnelles $g(\cdot)$ très flexibles. Par contre, cette flexibilité vient habituellement avec le risque élevé de surajustement² et une régularisation performante doit accompagner le choix de $g(\cdot)$.

L'impact du choix d'une fonction $g(\cdot)$ peut être illustré à travers le cadre d'analyse suivant, où le choix des valeurs des paramètres θ vise à minimiser la fonction de coût L définissant la prédiction optimale (Hastie, Tibshirani et Friedman, 2017, p. 168) :

$$\min_{g \in G} \{L(y_{t+h}, g(X_t; \theta)) + \text{pen}(g; \tau)\} \quad (2).$$

Ce cadre d'analyse est constitué de quatre caractéristiques importantes :

- G : l'espace de fonctions possibles $g(\cdot)$ combinant les données pour construire la prévision. En particulier, $g(\cdot)$ peut être linéaire ou non linéaire, paramétrique ou non paramétrique ;
- $\text{pen}(\cdot)$: la pénalité associée à la fonction $g(\cdot)$. Plusieurs méthodes nécessitent une forme de régularisation pour contrôler le risque de surajustement dû à la prolifération des paramètres et/ou aux formes complexes de nonlinéarité. En général, il s'agit de la pénalité de type Bridge ou de la réduction de dimension par composantes principales (modèle à facteurs) ;
- τ : les formes spécifiques de la fonction $g(\cdot)$ et de la pénalité $\text{pen}(\cdot)$ sont déterminées par un ensemble d'hyperparamètres τ . Le problème consiste à choisir une méthode efficace pour fixer τ .
- L : la fonction de coût qui définit la prévision optimale. La majorité du temps, elle est quadratique, mais certains modèles d'apprentissage automatique utilisent d'autres formes.

L'intelligence artificielle (IA) est constituée de combinaisons de ces ingrédients, qui composent les algorithmes d'apprentissage automatique, où chacun résout un problème de prévision spécifique.

Puisque la formulation (2) est très générale et abstraite, voyons sous quelles conditions nous pouvons obtenir un simple modèle prédictif. Supposons que L est quadratique, et que, par conséquent, la prévision optimale est l'espérance conditionnelle $E(y_{t+h}|X_t)$. Supposons que $g(\cdot)$ est une fonction linéaire et paramétrique, de sorte que $E(y_{t+h}|X_t)$ soit approximée par $X_t\theta$. Si le nombre de coefficients dans θ n'est pas très grand, la pénalité peut être ignorée et le modèle devient simplement $y_{t+h} = X_t\theta + e_{t+h}$. Les coefficients sont ensuite estimés efficacement (sous conditions additionnelles) par MCO et la prévision est obtenue par $\hat{y}_{t+h|t} = X_t\hat{\theta}$. Si X_t contient les valeurs retardées de y_t , alors le modèle devient une autorégression $y_{t+h} = \rho(L)y_t + e_{t+h}$, où $\rho(L)$ est un polynôme d'ordre fini p . Manifestement, les coefficients autorégressifs s'estiment par MCO pour une valeur de p donnée. Donc, p est un hyperparamètre qui est habituellement déterminé par un critère d'information.

Dans ce qui suit, nous dressons le portrait des avancées récentes dans le domaine de la prévision macroéconomique. Les contributions importantes seront présentées à travers le prisme prédictif dans l'équation (2), en particulier du choix de la fonction $g(\cdot)$.

Revue des développements récents

C'est l'apprentissage statistique non supervisé qui a été le plus utilisé et étudié sur le plan de la prévision macroéconomique, et ce, depuis les travaux de Stock et Watson (2002a, b). Cette analyse, basée sur la réduction de dimension de l'espace des prédicteurs à l'aide du modèle à facteurs, a été proposée comme première solution au problème de malédiction de dimensionnalité³. En ce qui concerne la problématique présentée dans l'équation (2), la fonction $g(\cdot)$ est linéaire en prédicteurs et θ , la régularisation $pen(\cdot)$, est un modèle à facteurs, les hyperparamètres sont typiquement choisis par un critère d'information, et la fonction de coût est quadratique. Cette forme de régularisation est présentée dans la sous-section intitulée « Autorégressif augmenté par les indices de diffusion ».

Une autre solution au problème de dimensionnalité consiste à choisir une pénalité permettant une sélection de variables parmi tous les N éléments de X_t , tout en estimant le modèle de régression prédictive linéaire sous L quadratique. Les hyperparamètres sont souvent sélectionnés par la validation croisée. Cette famille de modèles apparaît sous l'appellation « Elastic net » et sera présentée en détail plus loin dans le chapitre. Plusieurs travaux ont comparé ces techniques dans différents contextes de prévision macroéconomique et, de manière générale, la modélisation factorielle est préférable. Les exercices récents les plus complets sont disponibles dans Giannone, Lenza et Primiceri (2018) et dans Kotchoni *et al.* (2019).

Les deux méthodes précédentes ont utilisé seulement un aspect des grands changements survenus depuis les années 2000, soit l'accessibilité à des données massives. La fonction $g(\cdot)$ est toujours supposée linéaire, tandis que les méthodes d'apprentissage automatique servent justement à réduire l'erreur d'approximation dans l'équation (1) en choisissant les formes fonctionnelles pour $g(\cdot)$ les plus flexibles. La littérature sur ces tentatives est beaucoup moins volumineuse et plus récente. Les réseaux de neurones (*neural networks*), l'approche d'apprentissage automatique la plus prometteuse dans plusieurs domaines d'application de l'IA, ont été peu utilisés pour la prévision macroéconomique, puisqu'ils nécessitent l'estimation d'une quantité phénoménale de (hyper) paramètres. De plus, les premières tentatives se sont avérées peu fructueuses (voir, par exemple, Swanson et White, 1997). Néanmoins, les réseaux de neurones ont servi à améliorer la prévision de l'inflation et du taux de chômage dans les travaux de Nakamura (2005), de Cook et Hall (2017) et de Joseph (2019), et celle des rendements d'actifs dans Gu, Kelly et Xiu (2019). Plusieurs formes de régularisation sont nécessaires, non seulement pour pénaliser l'estimation des paramètres du modèle, mais aussi pour l'optimisation numérique (Gu *et al.*, 2019).

Une autre méthode populaire pour choisir $g(\cdot)$ est celle des forêts aléatoires (*random forests*). Cette méthode consiste en une analyse non linéaire et non paramétrique basée sur la régression par arbre. Medeiros, Vasconcelos, Veiga et Zilberman (2019) ont utilisé cette approche pour prévoir l'inflation, tandis que Ng (2014) et Döpke, Fritsche et Pierdzioch (2017) modélisent les probabilités de récession. Goulet Coulombe (2020) propose, quant à lui, de modéliser les changements structurels à l'aide des forêts aléatoires. Comme c'est une méthode qui tend naturellement vers le surajustement, elle est accompagnée par plusieurs approches de régularisation.

Finalement, la régression par vecteurs supports (*support vector regression*, ou SVR) a été populaire surtout dans les cas de problèmes de classification, mais elle est maintenant de plus en plus utilisée pour la prévision des séries temporelles. La SVR utilise habituellement une fonction $g(\cdot)$ non linéaire et la pénalité de type Ridge. Mais la plus grande différence par rapport aux autres modèles est le changement de la fonction de perte L , qui est insensible aux erreurs de prévision dans un intervalle particulier. Sermpinis, Stasinakis, Theolatos et Karathanasopoulos (2014) et Joseph (2019) ont appliqué cette méthode à la prévision de l'inflation et du taux de chômage, tandis que Colombo et Pelagatti (2020) l'ont utilisée pour améliorer grandement la prédiction des taux de change.

La plupart de ces travaux ne comparent qu'un nombre restreint de modèles et considèrent la prévision d'un petit groupe de variables à peu d'horizons. Quelques comparaisons de modèles à plus grande échelle ont été réalisées (Kim et Swanson, 2018; Milunovich, 2019; Chen, Dunn, Hood, Driessen et Batch, 2019). Une autre exception est le cas de Goulet Coulombe et ses collaborateurs (2019), qui ont étudié l'importance des quatre propriétés énumérées dans (2) pour la prévision macroéconomique. Ils ont conclu que la non-linéarité de la fonction $g(\cdot)$, combinée avec la réduction de dimension par le modèle à facteurs, améliorent nettement la capacité des modèles à prévoir les fluctuations cycliques. Ces auteurs ont montré que la meilleure pratique de sélection des hyperparamètres est la validation croisée standard (de type K-fold), et la fonction de perte quadratique est préférée à celle utilisée par le modèle de régression par vecteurs supports.

Que peut faire l'apprentissage machine ?

Il est important de souligner que l'apprentissage machine est un outil de prévision, tel que nous l'avons décrit dans (2). Il sert à gérer les données massives et à approximer des modèles inconnus par des formes fonctionnelles très flexibles, tout en contrôlant le risque de surajustement grâce aux techniques de régularisation. C'est donc un puissant outil d'analyse de données qui ne demande pas beaucoup de connaissances *a priori* sur leur structure ni sur la forme du modèle.

Par contre, cette grande flexibilité ne permet pas (à ce jour) à l'apprentissage machine de reconnaître les mécanismes fondamentaux derrière les fluctuations macroéconomiques. Pour le faire, il sera nécessaire d'adapter le ML à l'analyse causale en incorporant des restrictions économiques et en permettant la modélisation en équilibre général. Des avancées en analyse causale ont été récemment réalisées en microéconomie par Chernozhukov et ses collaborateurs (2018) et par Athey, Tibshirani et Wager (2019). Il est donc évident que l'apprentissage automatique causal est la prochaine grande étape dans l'analyse empirique des phénomènes économiques.

Application à la prévision de l'activité économique

Afin d'illustrer les concepts plutôt abstraits discutés précédemment, nous allons appliquer la modélisation basée sur l'apprentissage automatique à la prévision de l'activité macroéconomique québécoise. Pour ce faire, il faut avant tout préciser la cible y_{t+h} et l'ensemble de prédicteurs X_t . Ensuite, il faut choisir les modèles de prévision et spécifier les paramètres de l'exercice permettant d'évaluer leurs capacités prédictives.

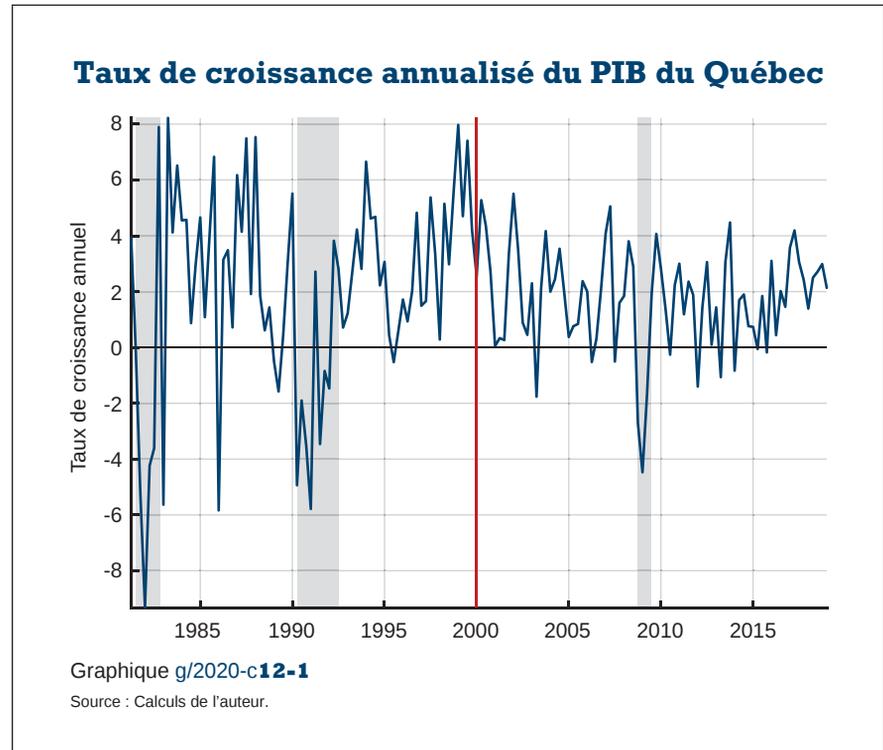
Variable d'intérêt

La variable d'intérêt sera simplement le plus important agrégat macroéconomique : le PIB. Avant de poursuivre, il faut déterminer plus précisément la cible. Soit Y_t , le PIB réel trimestriel désaisonnalisé. La cible est définie comme suit :

$$y_t = \log \left(\frac{Y_t}{Y_{t-1}} \right).$$

Donc, l'objectif est de prévoir le taux de croissance h trimestres en avance, y_{t+h} . La série temporelle de la cible, en taux annualisé, est illustrée sur le graphique 12-1. Les zones ombragées représentent les périodes de récession au Canada, telles que les déclare l'Institut C.D. Howe⁴. On remarque que le PIB réel du Québec plonge durant les récessions, et que les expansions affichaient des taux de croissance plus élevés au début de l'échantillon par rapport à ce qui a été noté à compter de 2005. Depuis la dernière récession, la croissance stagne, mais il y a une tendance nette à la hausse à partir de 2015. Le taux de croissance du PIB est habituellement

difficile à prévoir, et c'est le modèle autorégressif simple qui est la référence, du moins pour le cas des États-Unis. Cet exercice sera aussi une occasion de documenter la prévisibilité du taux de croissance de l'économie québécoise⁵.



Ensemble de prédicteurs

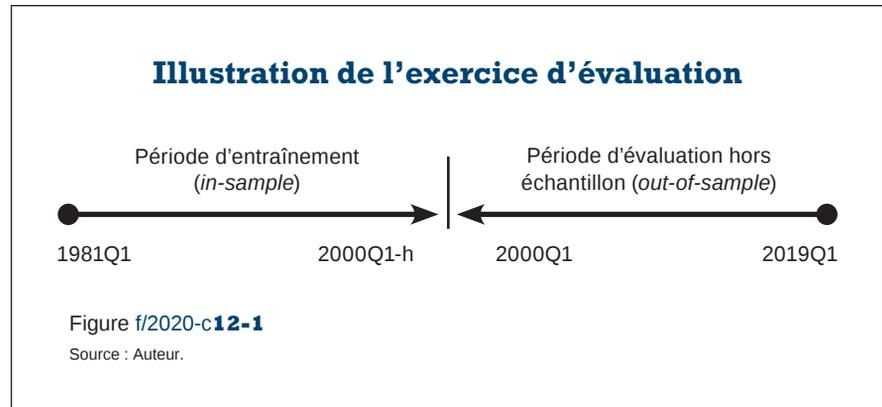
Les données, pour cette application, proviennent de deux sources. Premièrement, les variables canadiennes sont disponibles dans la grande base de données construite par Fortin-Gagnon, Leroux, Stevanovic et Surprenant (2018) contenant 349 séries temporelles trimestrielles observées entre 1981Q1 et 2019Q1⁶. Différents secteurs d'activités et variables économiques sont représentés : production, marché immobilier, fabrication, ventes, agrégats monétaires, marché de crédit, taux d'intérêt, commerce international, prix et marché financier. La deuxième base de

données contient 248 variables macroéconomiques américaines et provient de McCracken et Ng (2016)⁷. La composition sectorielle est semblable à celle de la base de données canadienne et la même période est couverte.

Au total, en enlevant les doublons, il y a 590 candidats prédicteurs exogènes. En plus, lorsque quatre retards de la cible et des prédicteurs sont ajoutés dans l'ensemble d'informations, X_t contiendra jusqu'à 2364 éléments. Il est donc évident que nous sommes dans le contexte de données massives et que la régularisation est nécessaire, puisque seulement 149 périodes temporelles sont disponibles. Certains modèles utiliseront les composantes principales extraites à partir des bases de données canadiennes et américaines séparément, dénotées par X_t^{CA} et X_t^{US} respectivement.

Exercice de prévision

La période de test, autrement dit hors échantillon (*pseudo-out-of-sample*) est 2000Q1 – 2019Q1 (voir la ligne rouge sur le graphique 12-1). Les horizons de prévision sont 1, 2, 4, 6 et 8 trimestres en avance. Donc, il y a 77 périodes d'évaluation pour chaque horizon. Les modèles sont estimés récursivement avec la fenêtre grandissante. Il est important de retenir ici l'esprit de l'exercice, tel qu'il est présenté à la figure 12-1. L'objectif est de vérifier la capacité des modèles à faire la prévision hors échantillon. En temps réel, le modèle est utilisé pour prévoir le futur, et l'erreur de prévision sera observée seulement une fois que la cible est réalisée. Pour approximer cette situation, l'échantillon est séparé en deux parties : période d'entraînement et période d'évaluation. Toutes les 77 cibles de la période d'évaluation sont prévues récursivement en ajoutant la dernière observation à la période d'entraînement lorsqu'elle devient disponible. Par exemple, pour $h=1$, la première cible est y_{2000Q1} étant donné l'information en 1999Q4. Un modèle est spécifié et estimé sur la période d'entraînement et, ensuite, la prévision $\hat{y}_{2000Q1|1999Q4}$ est produite. La prochaine cible est y_{2000Q2} , et l'ensemble d'information s'agrandit en ajoutant y_{2000Q1} dans la période d'entraînement puisque cette observation est maintenant supposée connue. Le modèle peut, en principe, être spécifié et estimé au cours de la nouvelle période d'entraînement, et la prévision $\hat{y}_{2000Q2|2000Q1}$ est obtenue. Ceci est répété jusqu'à la fin de l'échantillon, et ce, pour tous les modèles et pour tous les horizons de prévision.



Comme résultat, on a une erreur de prévision pour chaque période t , horizon h et modèle j :

$$\hat{e}_{t,h,j} = y_{t+h} - \hat{y}_{t+h|t,j}$$

avec $t = 2000Q1, \dots, 2019Q1$, $h \in \{1, 2, 4, 6, 8\}$ et $j = 1, \dots, J$, où J , est le nombre de modèles.

Métriques d'évaluation prédictive

La métrique standard dans la littérature est l'erreur quadratique moyenne (EQM), qui est le choix logique lorsque la fonction de perte est quadratique :

$$EQM_{h,j} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \hat{e}_{t,h,j}^2.$$

Pour tester la précision prédictive entre deux modèles, la méthode de Diebold et Mariano (1995) est habituellement utilisée⁸. Finalement, il est intéressant de vérifier la capacité des modèles à bien prévoir la direction que prendra la cible dans l'avenir : est-ce que le PIB québécois augmentera ou diminuera dans h trimestres ? S'il peut être difficile d'obtenir une bonne performance en ce qui a trait à l'EQM, les modèles peuvent avoir une capacité significative à prévoir le signe de la cible (Satchell et Timmermann, 1995). Le test de signe prédictif est proposé par Pesaran et Timmermann (1992). La statistique du test s'écrit :

$$S_n = \frac{\hat{p} - \hat{p}^*}{\sqrt{\text{Var}(\hat{p}) - \text{Var}(\hat{p}^*)}}$$

où \hat{p} est la proportion des prévisions ayant le bon signe et \hat{p}^* est la valeur estimée de son espérance. Sous l'hypothèse nulle, le signe de la prévision est indépendant de celui de la cible, et on n'a que $S_n \rightarrow N(0,1)$. Autrement dit, si un modèle n'a pas de pouvoir prédictif sur la direction de la cible, alors son taux de succès sera proche de 50 %, comme si on lançait une pièce de monnaie.

Optimisation d'hyperparamètres

Avant de montrer formellement les modèles de prévision, il est opportun de détailler comment les hyperparamètres seront sélectionnés. Rappelons l'exemple du modèle autorégressif AR de l'introduction, $y_{t+h} = \rho(L)y_t + e_t$, où l'ordre $\rho(L)$, p , est le seul hyperparamètre. Pour fixer p , l'approche standard est le critère de sélection. Dans cette application, nous utiliserons le critère d'information bayésien (*Bayesian Information Criterion*, ou BIC) :

$$\log\left(\frac{SCR_{p_j}}{T}\right) + p_j \cdot \frac{\log(T)}{T},$$

où SCR_{p_j} est la somme des carrés des résidus et où p_j dénote le choix de l'ordre autorégressif. Comme le premier terme est décroissant en p_j , le deuxième permet au BIC de régulariser le surajustement en pénalisant avec le nombre de paramètres à estimer.

Pour illustration, supposons que la cible est y_{2000Q1} , soit un trimestre en avance. L'estimation du modèle AR requiert la sélection de son ordre p . La valeur estimée de p peut s'obtenir en appliquant le BIC sur toute la période d'entraînement de la figure 12-1 en testant de façon séquentielle tous les points de la grille $p_j = \{0,1, \dots, p_{max}\}$. Le point de la grille produisant la plus petite valeur du BIC sera l'estimation finale de l'ordre autorégressif. Il faut noter que cette procédure cache un hyperparamètre de second ordre, p_{max} ⁹.

Une autre façon de faire, surtout populaire en apprentissage automatique, est la validation croisée (*cross-validation*, ou CV). Tout comme le BIC, la CV choisit aussi l'ordre optimal p , mais en régularisant au moyen de la performance de prévision hors échantillon, tandis que la sélection par le BIC est basée uniquement sur la performance dans l'échantillon. La popularité de la CV tient aussi à sa simplicité, puisqu'elle peut être pratiquée même lorsque le critère d'information n'est pas disponible. Il existe plusieurs approches de CV, mais la plus populaire est basée sur un rééchantillonnage

aléatoire (K-fold) dans la période d'entraînement. Supposons que le nombre de plis (*fold*) est fixé à cinq (un autre hyperparamètre de second ordre). Ceci revient à séparer la période *in-sample*, de la figure 12-1, en cinq sous-échantillons de tailles égales. Ensuite, quatre sous-échantillons sont utilisés tour à tour pour estimer le modèle j de la grille présentée précédemment (formant la période d'entraînement, ou *training set*, en langage de ML), et un sous-échantillon sert à évaluer la performance hors échantillon avec, habituellement, l'EQM comme métrique. L'élément j de la grille produisant l'EQM minimale sera l'estimation de l'ordre optimal p .

Bien que la méthode K-fold soit très répandue dans les applications microéconomiques, elle paraît mal adaptée pour la prévision temporelle, comme dans cette application, et ce, pour deux raisons. Premièrement, l'ordre temporel n'est pas respecté lors du choix de K plis, et donc il est probable que les données futures soient utilisées pour prévoir le passé. Deuxièmement, les séries temporelles macroéconomiques sont souvent très persistantes, et K-fold brisera cette structure, impliquant un potentiel biais dans la sélection de p . Bergmeir, Hyndman et Koo (2018) montrent que la méthode K-fold CV peut être utilisée dans le cadre de l'autorégression tant que les résidus sont non corrélés. Sinon, la solution de rechange à la méthode K-fold est d'imiter l'exercice de prévision hors échantillon à l'intérieur même de la période d'entraînement (*pseudo-out-of-sample*, ou POOS CV). Ainsi, l'ordre temporel est respecté et la structure d'autocorrélation reste intacte. Par contre, le nombre d'observations pour évaluer la performance est grandement diminué relativement à la méthode K-fold, et ce, surtout en cas de petits échantillons dans les applications typiques en macroéconomie. Goulet Coulombe et ses collaborateurs (2019) suggèrent que, dans ces situations, la méthode K-fold est préférable justement à cause de la réduction de variance grâce à la plus grande taille des périodes d'évaluation. Ici, nous utilisons la méthode K-fold CV.

Modèles de prévision

Le modèle de référence est l'autorégressif direct (ARD) :

$$y_{t+h} = c + \rho(L)y_t + e_{t+h},$$

et l'ordre de $\rho(L)$ est choisi par le BIC. Un lecteur averti remarquera que la variable indépendante est retardée de h périodes par rapport à la cible, ce qui ne correspond pas au modèle autorégressif traditionnel. En fait, si $h=1$, les deux approches coïncident. Pour $h>1$, l'approche prédictive adoptée ici est dite *directe*, puisque la cible est projetée sur l'ensemble d'information et la prévision est faite directement à partir des observations les plus récentes. Ceci a comme avantage une plus grande robustesse aux changements structurels au coût de plus petite efficacité si le modèle est inutilement estimé pour chaque choix de h (Chevillon, 2007). Dans la majorité des modèles de ML, l'approche directe est la seule option.

Autorégressif augmenté par les indices de diffusion

Le premier modèle utilisant la régularisation comme dans l'équation (2) est l'autorégressif augmenté par les indices de diffusion (*Autoregressive Diffusion Indexes*, ou ARDI) de Stock et Watson (2002b) :

$$y_{t+h} = c + \rho(L)y_t + \beta(L)F_t + e_{t+h} \quad (3),$$

$$X_t = \Lambda F_t + u_t \quad (4),$$

où F_t contient K facteurs latents, et où $\rho(L)$ et $\beta(L)$ sont des polynômes d'ordre p^y et p^f respectivement. L'idée est d'estimer d'abord les facteurs par les composantes principales de X_t , pour ensuite les inclure comme prédicteurs dans l'équation (3). La réduction de dimension opère donc à l'équation (4), puisque l'ensemble des 590 prédicteurs contenus dans X_t sera réduit à un petit nombre de facteurs. Les hyperparamètres K , p^y et p^f seront déterminés par le BIC, bien que la validation croisée puisse aussi être utilisée.

Régressions pénalisées

La régularisation alternative est la régression linéaire pénalisée. Le cadre général est la régression Bridge, que voici :

$$\hat{\theta}_{Bridge} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} (y_{t+h} - X_t\theta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^N |\theta_j|^\eta, \quad \eta > 0 \quad (5),$$

où $\lambda > 0$ est un hyperparamètre contrôlant la force de la régularisation. Deux cas spéciaux sont considérés. Si $\eta = 2$, l'estimateur Ridge (Hoerl, Kennard et Baldwin, 1975) est obtenu :

$$\hat{\theta}_{Ridge} = (X'X + \lambda I_N)^{-1} X'Y \quad (6).$$

Dans le cas où $\eta = 1$, c'est l'estimateur Lasso (pour *Least Absolute Shrinkage Selection Operator*, de Tibshirani, 1996) qui est obtenu :

$$\hat{\theta}_{Lasso} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} (y_{t+h} - X_t \theta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^N |\theta_j| \quad (7).$$

La particularité de Ridge est d'avoir une solution intérieure et analytique étant donné λ . Si $\lambda = 0$, (7) se réduit à l'estimateur MCO. Si $\lambda > 0$, Ridge diminuera la valeur des coefficients des variables moins importantes vers zéro. À l'opposé, Lasso, simultanément, estime la régression prédictive et sélectionne les variables importantes, puisque la norme L_1 est employée comme pénalité. Autrement dit, le vecteur de coefficients estimés, $\hat{\theta}_{Lasso}$, contiendra des zéros. Comme Lasso ne gère pas très bien les données corrélées, deux alternatives ont été proposées¹⁰.

La première est Elastic net (EN, due à Zou et Hastie, 2004), qui combine Ridge et Lasso :

$$\hat{\theta}_{EN} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} (y_{t+h} - X_t \theta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^N (\alpha |\theta_j| + (1 - \alpha) \theta_j^2) \quad (8)$$

avec $\alpha = [0,1]$; fixer α à 1 ou à 0 génère Lasso ou Ridge, respectivement. La deuxième alternative est Adaptive Lasso (Zou, 2006) :

$$\hat{\theta}_{AdLasso} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} (y_{t+h} - X_t \theta)^2 + \lambda \sum_{j=1}^N \psi_j |\theta_j|, \quad (9),$$

où $\psi_j = \frac{1}{|\tilde{\theta}_j|^\gamma}$ sont les poids obtenus au préalable par un estimateur convergent $\tilde{\theta}_j$ et avec $\gamma > 0$.

Dans cette application, $\tilde{\theta}_j$ sont premièrement estimés par Ridge et $\gamma > 1$. À noter que γ peut être sélectionné par validation croisée.

La partie importante, dans ces quatre modèles, est l'optimisation de λ , puisque c'est la force de la régularisation. Ceci est habituellement effectué par validation croisée.

Régressions régularisées par sous-ensembles complets

La méthode par sous-ensembles complets (*complete subset regressions*, ou CSR) a été proposée par Elliott, Gargano et Timmermann (2013). C'est une solution au surajustement en présence d'un très grand nombre de prédicteurs. L'idée est de créer des prévisions à partir d'un grand nombre de petits modèles (en prenant des sous-ensembles de prédicteurs) potentiellement biaisés mais ayant une plus petite variance, et de construire la prévision finale comme la moyenne de ces prédictions. Formellement, soit $X_{t,m}$ un vecteur de L variables obtenues du tirage aléatoire $m = 1, \dots, M$. Pour chaque tirage m , la prévision est construite à partir d'une régression prédictive :

$$\hat{y}_{t+h|t,m} = \hat{c} + \hat{\rho}(L)y_t + \hat{\beta}X_{t,m} \quad (10)$$

et la prévision finale est obtenue en prenant la moyenne sur les M modèles :

$$\hat{y}_{t+h|t} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{y}_{t+h|t,m}. \quad (11).$$

Le nombre de tirages devrait être grand pour approximer toutes les $N!/(L! \cdot (N-L)!)$ possibilités. Une amélioration de ce modèle, qui a été proposée par Kotchoni et ses collaborateurs (2019), sera utilisée dans ce chapitre. Il s'agit de deux versions régularisées de la méthode par CSR.

La première consiste à présélectionner un sous-ensemble de prédicteurs exogènes dans X_t avant de procéder à la méthode par CSR comme dans les équations (10) et (11). La présélection se fait par le seuillage (*hard thresholding*) univarié suivant :

$$y_{t+h} = c + \rho(L)y_t + \beta_i X_{i,t} + \epsilon_{t+h}, i = 1, \dots, N \quad (12),$$

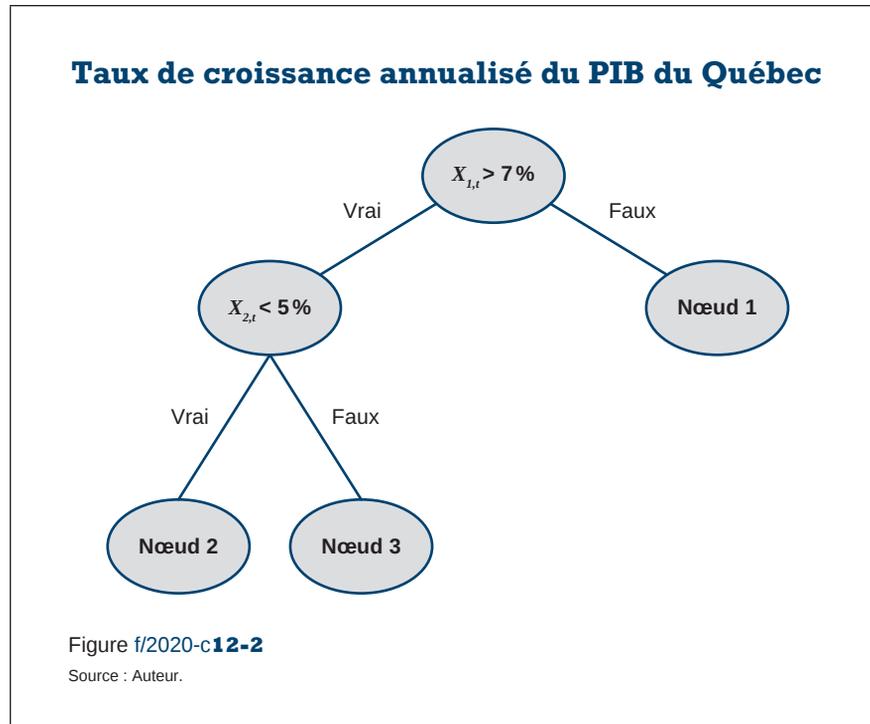
où la cible est projetée sur son passé (d'ordre p) et sur un prédicteur exogène à la fois. Le sous-ensemble $X_t^* \in X_t$ consiste en des variables correspondantes aux coefficients β_i ayant la statistique t_{β_i} plus grande qu'une valeur critique : $t_c : X_t^* = \{X_{i,t} \in X_t \mid |t_{\beta_i}| > t_c\}$. Après la présélection par (12), la prévision est obtenue en appliquant (10) et (11) à l'ensemble X_t^* . À noter que ce processus est appliqué pour chaque horizon de prévision. La valeur critique t_c est un hyperparamètre qui joue le même rôle de la force de régularisation que λ dans une régression pénalisée. Ce modèle sera nommé T-CSR.

La deuxième variante régularise la méthode par CSR quant aux modèles aléatoires (10). Au lieu d'estimer les coefficients par MCO, ils sont plutôt estimés par Ridge, comme dans l'équation (6). De cette façon, si $X_{t,m}$ contient plusieurs prédicteurs très corrélés ou des éléments non pertinents, la pénalité Ridge en tiendra compte. Pour rendre la procédure numériquement faisable, l'hyperparamètre de Ridge est sélectionné comme dans Hoerl, Kennard et Baldwin (1975). Ce modèle sera nommé CSR-R.

Plusieurs hyperparamètres doivent être fixés dans ces deux modèles. Le nombre de prédicteurs dans chaque tirage, L , sera fixé à 10 et à 20. Le nombre de sous-modèles $M = 2000$ et la valeur critique t_c est fixée à 1,65. Quatre retards de la cible sont utilisés dans l'équation (12).

Forêts aléatoires

Le premier modèle utilisant une approximation non linéaire est celui des forêts aléatoires (*random forests*, de Breiman, 2001), qui est basé sur les régressions par arbre. La figure 12-2 montre un exemple simple pour illustrer ce concept. Supposons deux prédicteurs pour y_{t+h} : taux de chômage ($X_{1,t}$) et taux d'intérêt ($X_{2,t}$). Premièrement, les observations sont triées par $X_{1,t}$. Celles qui se trouvent sous le seuil de 7 % sont affectées au nœud 1. Celles qui sont associées aux plus grandes valeurs du taux de chômage sont ensuite triées par $X_{2,t}$. Les observations qui satisfont $X_{1,t} > 7\%$, $X_{2,t} < 5\%$ remplissent le nœud 2, tandis que les cas $X_{1,t} > 7\%$, $X_{2,t} > 5\%$ se retrouvent dans le nœud 3.



Enfin, les prévisions des observations dans chaque partition sont définies comme la moyenne de la variable dépendante parmi les observations de cette partition. Formellement, la prévision d'un arbre avec B nœuds terminaux (partitions) et de profondeur L s'écrit :

$$g(X_t) = \sum_{b=1}^B c_b 1_{\{X_t \in P_b(L)\}}$$

où chaque partition est le produit de L fonctions indicatrices des prédicteurs. La constante associée au nœud b , B , est la moyenne de la cible pour les observations incluses dans ce nœud. L'exemple de la figure 12-2 peut aussi s'écrire comme une régression avec des variables binaires :

$$g(X_t) = c_1 1_{\{X_{1,t} < 7\% \}} + c_2 1_{\{X_{1,t} > 7\% \}} 1_{\{X_{2,t} < 5\% \}} + c_3 1_{\{X_{1,t} > 7\% \}} 1_{\{X_{2,t} > 5\% \}}.$$

Les prédicteurs et les seuils ont ici été choisis pour illustrer la situation où la prévision d'une cible macroéconomique dépend de l'état du cycle (la probabilité de récession est plus élevée si le taux de chômage est supérieur

à 7 %) et de la position de la banque centrale (taux d'intérêt). Le choix des prédicteurs et des seuils est plutôt déterminé en optimisant une métrique d'évaluation de la prévision.

Il ressort de cet exemple que la régression par arbres peut approximer le vrai modèle $g^*(X_t)$ grâce à sa flexibilité et à un grand nombre d'interactions possibles entre les prédicteurs. Par contre, cette flexibilité mène souvent au surajustement, et l'estimation non paramétrique requiert beaucoup d'observations.

La méthode souvent utilisée pour contrôler le surajustement consiste à combiner les prévisions provenant de beaucoup d'arbres qui sont créés de façon aléatoire (d'où le nom de « forêt aléatoire »). Dans cette application, le modèle procède en créant beaucoup d'arbres à partir des sous-échantillons aléatoires des observations. Par contre, cette astuce ne peut suffire si les prédicteurs sont très corrélés. Alors, une autre couche de randomisation est effectuée. Celle-ci consiste à choisir au hasard, pour chaque arbre, un sous-ensemble de M_{try} prédicteurs pour créer les branches. La prédiction finale est la moyenne des prévisions de tous les arbres aléatoires. Plusieurs hyperparamètres sont à spécifier. Le nombre d'arbres est généralement grand ; par exemple, dans cette application, il est de 1000. M_{try} est fixé à $N/3$, mais il pourrait aussi être déterminé par CV. Le nombre minimal d'observations dans chaque nœud terminal est fixé à cinq. La profondeur de l'arbre (L) et le nombre de nœuds terminaux (B) sont ainsi implicitement fonction de ces hyperparamètres.

Régression par vecteurs supports

La particularité du modèle de SVR réside dans le changement de la fonction de perte minimisée lors de l'estimation. Formellement, le problème primal d'un ϵ -SVR est donné par

$$\min_{\gamma} \frac{1}{2} \gamma' \gamma + C \left(\sum_{t=1}^T (\xi_t + \xi_t^*) \right)$$

$$\begin{cases} y_{t+h} - \gamma' \varphi(X_t) - c \leq \bar{\epsilon} + \xi_t \\ \gamma' \varphi(X_t) + c - y_{t+h} \leq \bar{\epsilon} + \xi_t^* \\ \xi_t, \xi_t^* \geq 0 \end{cases}$$

où $\varphi(\cdot)$ est une fonction de base implicitement définie par le noyau choisi, $(C, \bar{\epsilon})$ sont des hyperparamètres et (ξ_t, ξ_t^*) sont des variables d'écarts (*slack variables*). Soient (λ_j, λ_j^*) , les multiplicateurs de Lagrange associés aux deux premières contraintes présentées plus haut. Les poids optimaux sont $\hat{\gamma} = \sum_{j=1}^T (\lambda_j - \lambda_j^*) \varphi(X_j)$ et la prévision s'obtient comme suit :

$$\hat{y}_{t+h|t} = \hat{c} + \sum_{j=1}^T (\lambda_j - \lambda_j^*) \varphi(X_j) \varphi(X_t) = \hat{c} + \sum_{j=1}^T K(X_j, X_t) \quad (13),$$

où $K(\cdot)$ est une fonction noyau (*kernel function*)¹¹. Notez que le noyau gaussien (*radial basis function kernel*) sera utilisé afin d'introduire des non-linéarités :

$$K(X_j, X_t) := \exp\left(-\frac{\|X_j - X_t\|^2}{2\sigma^2}\right),$$

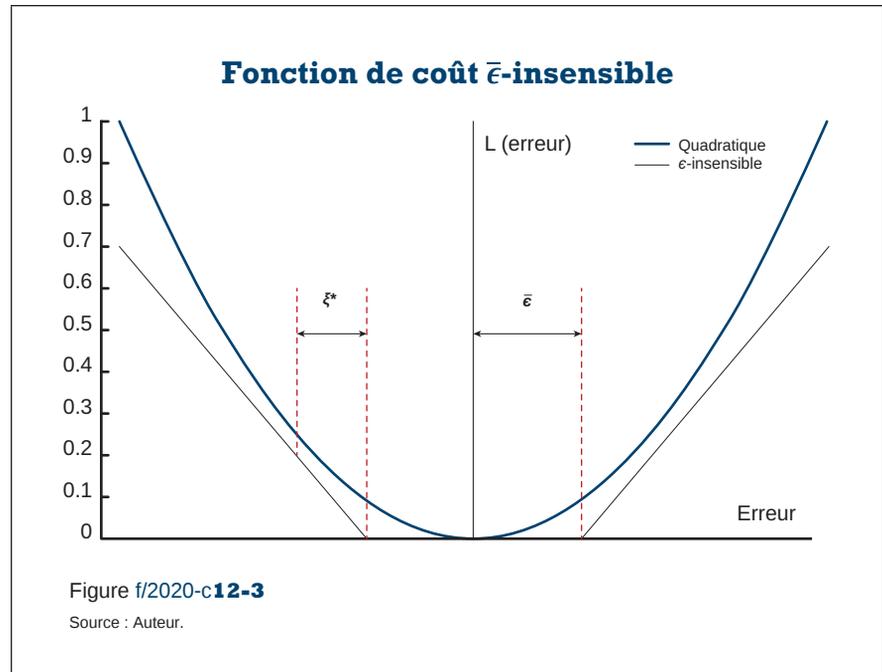
où σ^2 est un hyperparamètre.

Discutons maintenant de la fonction de perte particulière employée par les SVR. Le long des valeurs prédites dans l'échantillon d'estimation, il y a une zone d'insensibilité dont la largeur est donnée par l'hyperparamètre $\bar{\epsilon} > 0$. Formellement, la fonction de perte s'écrit comme suit :

$$L(e_{t+h}) = \begin{cases} 0 & \text{si } |e_{t+h}| \leq \bar{\epsilon} \\ |e_{t+h}| - \bar{\epsilon} & \text{sinon} \end{cases}.$$

La figure 12-3 compare les fonctions de perte quadratique et $\bar{\epsilon}$ -insensible. La zone d'insensibilité est déterminée par l'hyperparamètre $\bar{\epsilon}$, tandis que le coût à l'extérieur de cette zone est fonction des variables d'écart.

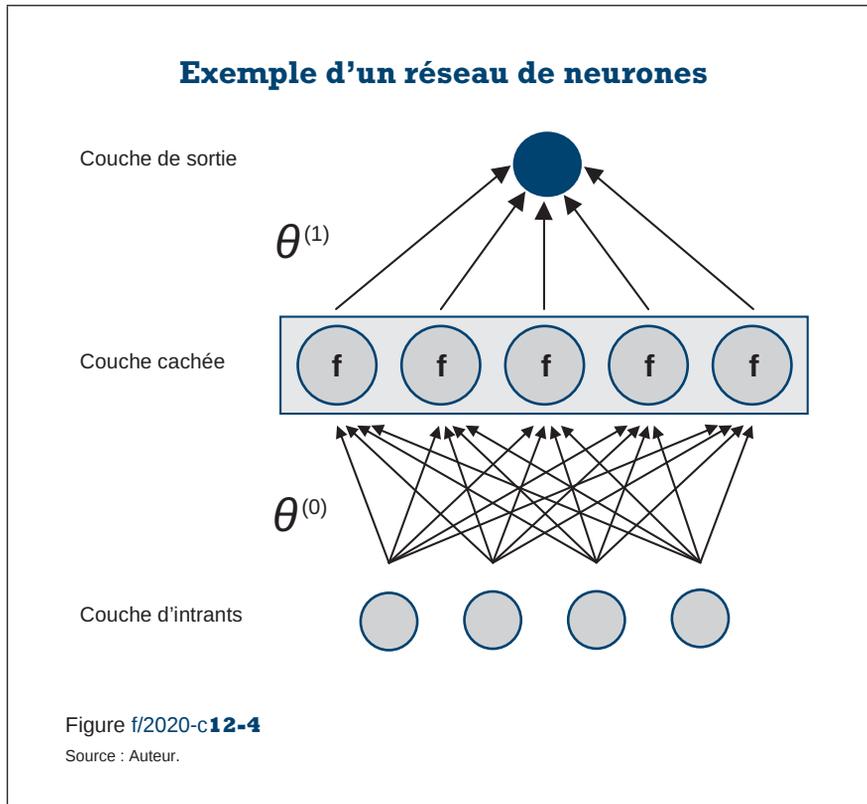
C'est cette insensibilité à une zone autour de la valeur prévue que Smola et Schölkopf (2004) appellent la parcimonie des SVR. En effet, seulement une partie des observations contribue concrètement à la valeur prédite¹².



Réseaux de neurones

La dernière classe de modèles considérée est celle des réseaux de neurones (*neural networks*, ou NN). Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, les premières tentatives de prévision macroéconomique avec ces modèles ont été peu fructueuses, probablement en raison de leur structure jadis très simple et du manque de puissance computationnelle et de données (Swanson et White, 1997). De nos jours, ce sont les modèles les plus prometteurs dans la plupart des domaines d'application d'apprentissage automatique. Leur utilisation en prévision macroéconomique est encore très sommaire en raison du manque d'observations, puisque ce sont des structures extrêmement paramétrées (des milliers de paramètres à estimer et beaucoup d'hyperparamètres à choisir) et ayant une fonction objective non convexe et habituellement non linéaire.

Inspirés du fonctionnement du cerveau humain, les réseaux de neurones sont en fait une succession de couches cachées contenant chacune un certain nombre de neurones. Dans le cas qui nous intéresse, comme le montre la figure 12-4, les neurones entre les couches sont tous interreliés.



Chaque θ représente le poids accordé aux extrants (*output*) de la couche précédente. Ce type de réseaux se nomme « perceptron multicouche » (*multilayer perceptron*, ou MLP). Il consiste en une couche d'intrants suivie par une ou plusieurs couches cachées qui transforment les combinaisons linéaires des différents intrants à l'aide d'une fonction d'activation f (souvent non linéaire), puis se termine avec une couche de sortie qui agrège l'information obtenue à partir des couches précédentes. Par exemple, dans le cas de la figure 12-4 le NN est représenté par une couche de quatre intrants tous connectés aux cinq neurones de la couche cachée, puis se termine par la mise en commun de l'information dans la couche de sortie.

Les réseaux de neurones apprennent à l'aide d'un algorithme de rétro-propagation. Cet algorithme permet d'effectuer une mise à jour des poids et des biais du modèle selon les erreurs de prévision obtenues à la couche finale. Lors de l'initialisation, les poids des modèles sont établis de manière aléatoire et $\hat{y}_{t+h|t}$ est prédit à l'aide de ces poids de départ. Les poids de la couche de sortie sont d'abord mis à jour selon l'erreur de prévision obtenue, puis à leur tour les poids de l'avant-dernière couche, et ainsi de suite jusqu'au poids de la couche d'intrants. Un cycle de la couche de sortie à la couche d'intrant est appelé cycle d'apprentissage (*epoch*). Le nombre de cycles d'apprentissage constitue un hyperparamètre du réseau, qui sera fixé à un maximum de 1 000. Cependant, un critère d'arrêt basé sur la valeur de l'erreur quadratique moyenne sera utilisé afin d'éviter les problèmes de surapprentissage.

La fonction d'activation est un morceau important de l'architecture des NN. Dans cette application, la fonction ReLU (*Rectified Linear Unit*) est utilisée, soit $\sigma(x) = \max(0, x)$. Celle-ci permet la réduction du nombre de neurones actifs et permet donc une estimation plus rapide (Gu *et al.*, 2019). Pour écrire formellement la prévision à l'aide du réseau de neurones, soit $M^{(l)}$, le nombre de neurones dans chaque couche $l = 1, \dots, L$, et $z_m^{(l)}$, l'extrait de chaque neurone m dans la couche l , avec $z^{(l)} = (1, z_1^{(l)}, \dots, z_{N^{(l)}}^{(l)})$. La couche d'intrants est initialisée avec les observations. L'extrait de couche cachée $l > 0$ est :

$$z^{(l)} = \max(0, z^{(l-1)'} \theta^{(l-1)}),$$

et la prévision est obtenue par la couche finale :

$$y_{t+h|t} = z^{(L-1)'} \theta^{(L-1)}.$$

Le nombre de couches cachées et de neurones représente des hyperparamètres importants des NN. Le nombre de paramètres à estimer augmente très rapidement avec ceux-ci, ce qui allonge considérablement les temps de calcul. Basée sur les travaux de Gu et ses collaborateurs (2019), une architecture en « pyramide » est souvent privilégiée. Ici, un maximum de 3 couches cachées et de 32 neurones sera considéré. Pour chaque couche cachée, le nombre de neurones est obtenu en divisant par 2 les nombres de la couche précédente. Par exemple, un réseau avec 2 couches cachées contiendra respectivement 32 et 16 neurones.

Dans cette application, le choix de la combinaison optimale des hyperparamètres est effectué par validation croisée, et ce, une seule fois pour chaque horizon au cours de la période allant de 1981Q1 à 2000Q1-*h*. Une pénalisation de type Lasso sur la valeur des poids θ est utilisée afin d'éviter les problèmes liés au surajustement. La valeur optimale de λ est sélectionnée par CV.

Les réseaux de neurones récurrents (*recurrent neural network*, ou RNN) sont également considérés. Ces réseaux peuvent conserver de l'information en mémoire. De cette manière, les RNN peuvent profiter de la structure temporelle des données, ce qui les rend différents des réseaux de neurones « *feed forward* » comme le MLP. En plus de tenir compte des intrants, il prend également ses décisions sur un certain nombre d'états cachés (*hidden states*). La prévision est ainsi calculée séquentiellement pour chaque valeur retardée de l'intrant. Ainsi, pour chaque retard, cet intrant intermédiaire sert d'intrant supplémentaire pour la prévision d'états cachés. Le modèle RNN contient donc autant d'états cachés (*hidden states*) qu'il y a de retards dans les intrants.

En particulier, un réseau de neurones récurrents à mémoire à court terme et à long terme (Long Short-Term Memory LSTM) est utilisé (Hochreiter et Schmidhuber, 1997). Ce qui est intéressant avec l'utilisation de cellules LSTM, comparativement aux RNN traditionnels, c'est qu'elles peuvent décider de garder ou non certaines informations passées grâce à des portes (*gates*) (Chung, Gulcehre, Cho et Bengio, 2014). La cellule LSTM contient essentiellement trois portes : *input gate*, *output gate* et *forget gate*. Ces portes peuvent apprendre durant l'entraînement quelles sont les informations provenant des états précédents qui sont pertinentes et les conserver, en oubliant les autres. L'*input gate*, de son côté, fait la mise à jour de l'état actuel de la cellule en y ajoutant de la nouvelle information. La *forget gate* décide de ce qui est à conserver des états précédents. Puis, l'*output gate* renvoie le prochain état, qui est la combinaison de la nouvelle information et de l'état précédent. Ce cycle est répété de manière récursive autant de fois qu'il y a de retards dans l'intrant. Comme chez Cook et Hall (2017), une combinaison des deux types de réseaux est également considérée. Ainsi, la première couche cachée est un réseau de type LSTM, puis, les autres couches cachées sont d'architecture MLP. Les hyperparamètres sont aussi les mêmes que pour les autres modèles.

D'un point de vue computationnel, l'algorithme d'apprentissage utilisé est Adam (pour *adaptive moment estimation algorithm*), avec le taux d'apprentissage fixé à 0,001 et la patience à 5.

Plus formellement, il y a trois types de réseaux de neurones qui contiennent chacun la même architecture « pyramidale ». Il y a les réseaux MLP (Dense), qui sont les réseaux multicouches interconnectés décrits plus haut. Puis, il y a les réseaux récurrents (LSTM), qui tiennent compte de l'aspect temporel des données. Ceux-ci sont constitués de couches cachées LSTM placées une à la suite de l'autre. Cependant, ces modèles se terminent par une couche de sortie interconnectée afin de convertir l'extrait dans le bon format. Finalement, le dernier type de réseaux considéré est une combinaison des deux précédents (LSTM-Dense). Ainsi, ces réseaux sont d'abord constitués d'une première couche cachée de type LSTM, puis les suivantes sont des couches cachées et interconnectées comme celles des MLP.

Combinaisons de prévisions

Avec tous ces modèles, il est aussi naturel de les combiner. La littérature en prévision macroéconomique constate depuis longtemps que l'agrégation des prédictions individuelles est une méthode très robuste (Bates et Granger, 1969; Hendry et Clements, 2004). Il existe, bien sûr, de nombreuses façons de combiner les prévisions, et plusieurs seront considérées ici.

La simple moyenne (*equal-weighted forecasts*, ou AVRG) est la méthode la plus utilisée; les prévisions de J modèles, $j = 1, \dots, J$, sont combinées à l'aide de poids égaux $\omega_{jt} = \frac{1}{J}$:

$$\hat{y}_{t+h|t} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \hat{y}_{t+h|t}^{(j)}$$

La moyenne est toutefois sensible aux valeurs extrêmes, c'est pourquoi plusieurs solutions de rechange sont proposées. La première (*trimmed average*, ou T-AVRG) enlève les prévisions les plus extrêmes en ordonnant les valeurs des prédictions en ordre croissant ($\hat{y}_{t+h|t}^{(1)} \leq \hat{y}_{t+h|t}^{(2)} \dots \leq \hat{y}_{t+h|t}^{(J)}$). Ensuite, une proportion ϑ est supprimée des deux côtés :

$$\hat{y}_{t+h|t} = \frac{1}{J(1-2\vartheta)} \sum_{j=[\vartheta J]}^{[(1-\vartheta)J]} \hat{y}_{t+h|t}^{(j)}$$

où $[\vartheta J]$ est le nombre entier immédiatement supérieur à ϑJ et $[(1 - \vartheta)J]$ est le nombre entier immédiatement inférieur à $(1 - \vartheta)J$. ϑ est un hyperparamètre et sera fixé à 15 %.

Une solution plus flexible consiste à produire les poids qui dépendent de la performance historique des modèles (Diebold et Pauly, 1987). Ici, l'approche de Stock et Watson (2004) est utilisée (*inversely proportional average*, ou IP-AVRG). Le poids sur la j^e prévision est :

$$\omega_{jt} = \frac{m_{jt}^{-1}}{\sum_{j=1}^J m_{jt}^{-1}},$$

où m_{jt} est l'erreur quadratique moyenne escomptée du modèle j :

$$m_{jt} = \sum_{s=T_0}^{t-h} \rho^{t-h-s} \left(y_{s+h} - y_{s+h|s}^{(j)} \right)^2,$$

et où ρ est le facteur d'escompte (hyperparamètre). Ici, deux valeurs seront considérées : $\rho = 1$ et $\rho = 0,8$.

Finalement, la simple médiane peut aussi être utilisée :

$$\hat{y}_{t+h|t} = \text{médiane} \left(y_{t+h|t}^{(j)} \right)_{j=1}^J.$$

Le tableau 12-1 résume tous les modèles utilisés dans cet exercice en spécifiant l'ensemble de prédicteurs utilisés. Les modèles utilisant les facteurs indicés par ARDI contiennent trois composantes principales extraites de chacune des bases de données X_t^{CA} et X_t^{US} séparément. Les hyperparamètres dans les modèles AR,BIC et ARDI,BIC sont sélectionnés par le BIC, tandis que pour tous les autres modèles, ils sont choisis par validation croisée.

Liste des modèles de prévision			
Modèle	Prédicteurs	Modèle	Prédicteurs
AR,BIC	$(1 + L + \dots L^{py})y_t$	CSR-R,20	$(1 + L + \dots L^4)y_t, X_t$
ARDI,BIC	$(1 + L + \dots L^{py})y_t, (1 + L + \dots L^{pf})F_t$	LSTM-Dense-AR	$(1 + L + \dots L^4)y_t$
ARDI,Lasso	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$	LSTM-AR	$(1 + L + \dots L^4)y_t$
ARDI,Ridge	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$	Dense-AR	$(1 + L + \dots L^4)y_t$
ARDI,EN	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$	LSTM-Dense-ARDI	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$
ARDI,ALasso	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$	LSTM-ARDI	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$
Lasso	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)X_t$	Dense-ARDI	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$
Ridge	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)X_t$	LSTM-Dense-X	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)X_t$
Elastic net	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)X_t$	LSTM-X	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)X_t$
Adaptative Lasso	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)X_t$	Dense-X	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)X_t$
RF-ARDI	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$	AVRG	
RF-X	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)X_t$	Médiane	
SVR-ARDI	$(1 + L + \dots L^4)y_t, (1 + L + \dots L^4)F_t$	T-AVRG,0.1	
T-CSR,10	$(1 + L + \dots L^4)y_t, X_t$	T-AVRG,0.2	
T-CSR,20	$(1 + L + \dots L^4)y_t, X_t$	IP-AVRG,1	
CSR-R,10	$(1 + L + \dots L^4)y_t, X_t$	IP-AVRG,0.8	

Tableau t/2020-c12-1

Source : Auteur.

Résultats

Le tableau 12-2 montre la performance prédictive des modèles présentés ci-dessus se rapportant à la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*root mean squared error*, ou RMSE). Pour simplifier la lecture, la RMSE de chaque modèle compétitif est divisée par celle du modèle de référence, AR,BIC. Les astérisques indiquent la significativité du test d'équivalence prédictive Diebold-Mariano. Lorsque le ratio est plus petit que 1, cela indique que le modèle fait mieux que la référence autorégressive. On remarque que plusieurs modèles font mieux que le modèle AR,BIC aux horizons d'un et deux trimestres en avance. Le meilleur candidat pour $h = 1$ est le modèle CSR-R, avec 10 modèles (voir la sous-section intitulée « Régressions régularisées par sous-ensembles complets »), suivi de près par Ridge (voir la sous-section intitulée « Régressions pénalisées », équation [6]), par CSR-R,20 et par les combinaisons de prévision. CSR-R,10 améliore la RMSE par rapport au modèle de référence de 13 %, tandis que les autres solutions de rechange sont aussi au-dessus de 10 %. La grande majorité des autres modèles fait mieux que le modèle AR,BIC, mais les améliorations sont plus modestes, quoique significatives.

Dans le cas de deux trimestres en avance, le meilleur modèle est LSTM-X, un réseau récurrent utilisant toutes les observables comme entrants. Il améliore la prévision du taux de croissance du PIB de 15 % par rapport à la référence. Il est suivi de près par LSTM-ARDI, dont la seule différence est de considérer les facteurs au lieu des observables. LSTM-AR affiche une bonne performance aussi, ce qui suggère que d'utiliser les couches LSTM est une meilleure idée que de se servir des couches standards MLP (Dense). CSR-R,10 est encore très résilient, ce qui indique que la moyenne sur beaucoup de prévisions est également une façon intéressante de prédire la cible.

À partir d'un an en avance, le pouvoir prédictif relatif au modèle de référence s'estompe. Les meilleurs modèles n'améliorent que de 5 % la prévisibilité et très peu de modèles affichent des performances significativement différentes. Parmi ces modèles, on trouve surtout les réseaux de neurones, en particulier LSTM-ARDI et Dense-ARDI. Ceci fait écho aux résultats obtenus par Goulet Coulombe et ses collaborateurs (2019), qui ont remarqué qu'augmenter le modèle à facteurs par la non-linéarité devenait plus important à long terme.

En résumé, la plupart des modèles font mieux que le modèle de base à court terme (un et deux trimestres en avance), tandis que leur performance pâlit à plus long terme. Les groupes de modèles les plus résilients d'un horizon à l'autre sont les régressions pénalisées par sous-ensembles complets (CSR-R) et les réseaux de neurones, en particulier LSTM-ARDI. Ceci suggère que la combinaison des prévisions et la non-linéarité sont les ingrédients clés dans la prévision du taux de croissance du PIB québécois.

La preuve précédente montre la performance moyenne sur toute la période de test. Or, l'environnement macroéconomique peut varier considérablement dans le temps, et Giacomini et Rossi (2010) ont adapté le test de Diebold-Mariano afin de comparer la performance de deux modèles en présence d'instabilité structurelle. La figure 12-5 montre les résultats pour quatre groupes de modèles : CSR régularisés, réseaux de neurones, forêts aléatoires et SVR, ainsi que pour les régressions pénalisées Elastic net. La statistique de test est construite récursivement comme une moyenne mobile sur 30 % de la période hors échantillon et, donc, les résultats commencent en 2006. Si la statistique est positive, cela signifie que le modèle fait mieux que le modèle AR,BIC. Les lignes horizontales représentent les valeurs critiques pour un niveau de 10 %. On remarque que les modèles CSR-R font significativement mieux autour de 2015, et entre 2010 et 2014, aux horizons d'un et deux trimestres respectivement. Les régressions pénalisées Ridge et Adaptive Lasso affichent des résultats semblables. Pour sa part, le modèle des forêts aléatoires réussit bien par rapport à tous les aspects observables seulement en 2015. Les réseaux de neurones montrent une performance plutôt stable. Un fait remarquable est la baisse commune de la performance de tous les modèles depuis 2016.

Bien que le tableau 12-2 et la figure 12-5 montrent que les modèles de ML améliorent significativement la prédiction du taux de croissance du PIB par rapport au modèle autorégressif standard, ceci ne dit rien sur leur capacité à prévoir cette variable, puisque le modèle AR,BIC peut être simplement incapable de bien prédire la cible. Une façon de vérifier la prévisibilité consiste à comparer les modèles selon le pseudo- R^2 , qui est simplement :

$$pseudo - R_{h,j}^2 = 1 - \frac{\sum \hat{e}_{t,h,j}^2}{\sum (y_t - \bar{y})^2} \quad (14),$$

où \bar{y} est la moyenne empirique de la cible jusqu'à $t - h$. Donc, ceci est proportionnel au ratio de l'EQM du modèle j , et l'EQM du modèle prédictif ne contenant que la constante, $y_{t+h} = c + e_{t+h}$. Galbraith (2003) suggère le pseudo- R^2 comme une mesure de prévisibilité d'une variable : si la forme fonctionnelle et l'ensemble d'information, $g(X_t; \theta)$, n'apportent pas de pouvoir prédictif en ce qui a trait à l'EQM, c'est-à-dire le pseudo- $R^2 < 0$, alors la variable est peu prévisible. Le tableau 12-3 présente les résultats. La situation est plutôt négative pour la plupart des modèles puisqu'il est très rare qu'une spécification améliore la prévision par rapport à la moyenne historique. Les modèles résilients présentés précédemment affichent quand même les pseudo- R^2 positifs. Ce constat n'est toutefois ni rare ni décourageant. Les PIB américain et canadien sont également difficiles à prévoir et la moyenne historique peut être un modèle raisonnable dans la mesure où la croissance de l'activité économique est stable à travers le temps. Les modèles alternatifs auront, dans ce cas, une utilité prédictive, surtout lors des grands changements, tels que les récessions et les reprises.

Une autre mesure de performance a été présentée dans la section intitulée « Métriques d'évaluation prédictive » : la capacité à prédire le changement de la cible. Dans le cas du PIB québécois, on vient de constater que la prévisibilité en ce qui concerne l'erreur quadratique moyenne est plutôt faible. Les modèles ont-ils une capacité significative à prévoir le signe de la direction que prendra le PIB à l'avenir ? Les résultats sont présentés dans le tableau 12-4. La proportion de signes correctement prédits est très élevée dans tous les cas. ARDI, Lasso domine pour les courts horizons tandis que les versions non linéaires du modèle à facteurs, les forêts aléatoires et les régressions par vecteurs supports, affichent la meilleure performance pour les quatre et les six trimestres en avance. Il faut cependant remarquer ici que le nombre de périodes hors échantillon étant petit, peu de cas sont significatifs et les ratios sont plutôt semblables d'un modèle à un autre.



Performance en termes de l'EQM REQM

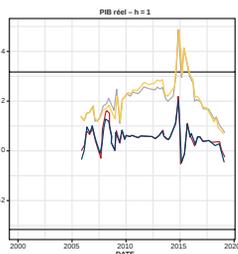
	h=1	h=2	h=4	h=6	h=8
AR,BIC (RMSE)	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
ARDI,BIC	0.92	1.02	1.15*	1.15*	1.06**
ARDI,Lasso	0.95*	0.97	1.06**	1.06	1.01
ARDI,Ridge	0.95**	0.91***	0.97	0.99	0.99
ARDI,EN	0.93**	0.91***	1.00	0.99	0.99
ARDI,ALasso	0.92***	0.91***	1.00	0.99	0.99
Lasso	0.97	0.93	1.09	1.00	0.98
Ridge	0.87**	0.91**	1.03	1.09	1.08
Elastic net	0.95**	0.91***	1.05**	1.01	1.00
Adap. Lasso	0.92***	0.91***	1.00	0.99	0.99
RF-ARDI	0.94	0.92	1.07	1.08*	1.02
RF-X	0.92**	0.94*	1.01	1.00	1.00
SVR-ARDI	0.96	0.96	1.00	1.07	1.03
T-CSR,10	0.95	1.09**	1.02	1.13*	1.04
T-CSR,20	0.97	1.20***	1.07	1.27**	1.08**
CSR-R,10	<u>0.87***</u>	0.89***	1.01	0.98	1.00
CSR-R,20	0.88***	0.91***	1.02	1.00	0.99
LSTM-Dense-AR	0.92***	0.90***	0.99	0.98	0.98
LSTM-AR	0.91***	0.89***	1.00	0.97	0.98
Dense-AR	0.94**	0.90***	1.03*	0.99	0.97*
LSTM-Dense-ARDI	0.90**	0.90***	0.98	0.98	0.99
LSTM-ARDI	0.90***	0.87***	<u>0.95</u>	0.97	<u>0.95*</u>
Dense-ARDI	0.98	1.12	1.26**	<u>0.97*</u>	1.04
LSTM-Dense-X	1.12	0.92**	1.03	0.99	0.97
LSTM-X	1.02	<u>0.85***</u>	1.00	0.98	0.98
Dense-X	0.91***	0.92**	1.00	0.97*	0.97*
AVRG	0.89**	0.92**	0.98	1.00	0.98
Médiane	0.90**	0.91***	0.98	1.00	0.99
T-AVRG,0.1	0.89**	0.92***	0.98	1.00	0.98
T-AVRG,0.2	0.90***	0.91***	0.98	1.00	0.98
IP-AVRG,1	0.89**	0.92***	0.98	1.00	0.98
IP-AVRG,0.8	0.89***	0.92***	0.98	1.00	0.98

Tableau t/2020-c12-2

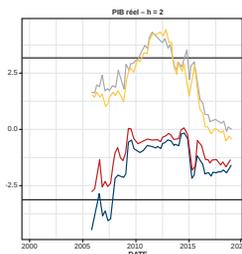
Source : Auteur.

Note : La première ligne contient la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (REQM) du modèle de référence AR,BIC. Les autres éléments sont les ratios de REQM de chacun des modèles alternatifs sur celui du modèle de référence. La valeur minimale pour chaque horizon est soulignée. Les astérisques indiquent la significativité du test Diebold-Mariano par rapport au modèle de base avec les niveaux de 1 %, de 5 % et de 10 %, respectivement représentés par *, ** et ***.

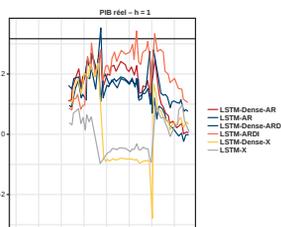
Performance à travers le temps



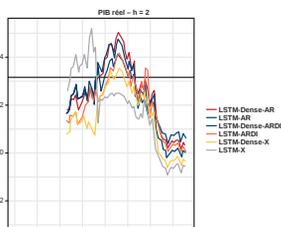
(a) CSR régularisé



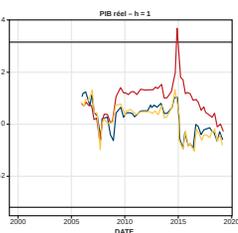
(b) CSR régularisé



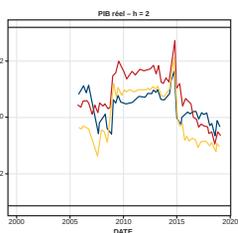
(c) Réseaux de neurones



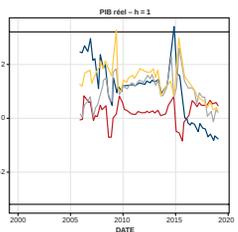
(d) Réseaux de neurones



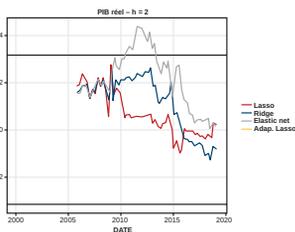
(e) Forêts aléatoires et SVR



(f) Forêts aléatoires et SVR



(g) Régressions pénalisées EN



(h) Régressions pénalisées EN

Figure f/2020-c12-5

Source : Auteur.

Note : La figure montre les résultats du *Fluctuation test* de Giacomini et Rossi (2010).

Pseudo- R^2

	h=1	h=2	h=4	h=6	h=8
AR,BIC	-0.21***	-0.28***	-0.04*	-0.07**	-0.04
ARDI,BIC	-0.02	-0.34**	-0.39*	-0.42*	-0.17**
ARDI,Lasso	-0.08	-0.20***	-0.18***	-0.21**	-0.05**
ARDI,Ridge	-0.08*	-0.07**	0.03	-0.05**	-0.03***
ARDI,EN	-0.05	-0.07*	-0.05*	-0.05**	-0.02***
ARDI,ALasso	-0.03*	-0.05*	-0.05*	-0.05**	-0.02***
Lasso	-0.14	-0.11	-0.25	-0.06	0.00
Ridge	<u>0.09</u>	-0.05	-0.11	-0.28*	-0.22*
Elastic net	-0.08*	-0.05*	-0.15***	-0.09***	-0.04
Adap. Lasso	-0.03*	-0.05*	-0.05*	-0.05**	-0.02***
RF-ARDI	-0.08	-0.08	-0.18	-0.26**	-0.09
RF-X	-0.02	-0.13*	-0.05	-0.08**	-0.03
SVR-ARDI	-0.11	-0.19	-0.04	-0.23	-0.11*
T-CSR,10	-0.10	-0.52***	-0.09	-0.38**	-0.12*
T-CSR,20	-0.13	-0.84***	-0.20	-0.73***	-0.21**
CSR-R,10	0.09	-0.02	-0.06**	-0.03**	-0.04*
CSR-R,20	0.07	-0.05	-0.08**	-0.06**	-0.02
LSTM-Dense-AR	-0.03*	-0.03	-0.02	-0.02	0.01
LSTM-AR	-0.01	-0.02	-0.05**	-0.02	0.00
Dense-AR	-0.08*	-0.03	-0.11**	-0.04	0.03
LSTM-Dense-ARDI	0.01	-0.04	-0.01	-0.03*	-0.02
LSTM-ARDI	0.02	0.02	<u>0.07</u>	-0.02	<u>0.06</u>
Dense-ARDI	-0.16*	-0.60*	-0.65**	<u>0.00</u>	-0.12**
LSTM-Dense-X	-0.51	-0.08*	-0.10*	-0.05	0.02
LSTM-X	-0.27*	<u>0.07</u>	-0.04	-0.02	0.00
Dense-X	0.01	-0.07**	-0.03	0.00	0.02
AVRG	0.05	-0.09**	-0.01	-0.08	0.00
Médiane	0.03	-0.05*	0.01	-0.06**	-0.02*
T-AVRG,0.1	0.04	-0.07*	-0.01	-0.07*	-0.01
T-AVRG,0.2	0.03	-0.06*	0.00	-0.07*	-0.01
IP-AVRG,1	0.04	-0.08**	-0.01	-0.08*	0.00
IP-AVRG,0.8	0.04	-0.08**	-0.01	-0.08*	0.00

Tableau t/2020-c12-3

Source : Auteur.

Note : Les entrées dans ce tableau représentent le pseudo- R^2 tel qu'il est présenté dans l'équation (14). La valeur maximale pour chaque horizon est soulignée. Les astérisques indiquent la significativité du test Diebold-Mariano avec les niveaux de 1 %, de 5 % et de 10 %, respectivement représentés par *, ** et ***.

Préviation de la direction du PIB

	h=1	h=2	h=4	h=6	h=8
AR,BIC	84.42	83.12	84.42	84.42	<u>84.42</u>
ARDI,BIC	83.12	81.82	84.42**	84.42	84.42
ARDI,Lasso	<u>85.71**</u>	<u>84.42</u>	83.12	84.42	84.42
ARDI,Ridge	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
ARDI,EN	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
ARDI,ALasso	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
Lasso	84.42**	81.82	81.82	83.12	84.42
Ridge	85.71**	83.12	83.12	81.82	81.82
Elastic net	84.42	84.42	84.42	83.12	84.42
Adap. Lasso	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
RF-ARDI	84.42	84.42	83.12	<u>85.71**</u>	84.42
RF-X	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
SVR-ARDI	83.12	83.12	<u>85.71**</u>	83.12	84.42
T-CSR,10	85.71**	80.52	84.42	85.71**	84.42
T-CSR,20	85.71**	79.22	83.12	80.52	84.42**
CSR-R,10	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
CSR-R,20	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
LSTM-Dense-AR	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
LSTM-AR	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
Dense-AR	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
LSTM-Dense-ARDI	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
LSTM-ARDI	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
Dense-ARDI	84.42	83.12	79.22	84.42	84.42
LSTM-Dense-X	84.42	84.42	81.82	83.12	84.42
LSTM-X	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
Dense-X	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
AVRG	85.71**	84.42	84.42	84.42	84.42
Médiane	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42
T-AVRG,0.1	85.71**	84.42	84.42	84.42	84.42
T-AVRG,0.2	85.71**	84.42	84.42	84.42	84.42
IP-AVRG,1	85.71**	84.42	84.42	84.42	84.42
IP-AVRG,0.8	84.42	84.42	84.42	84.42	84.42

Tableau t/2020-c12-4

Source : Auteur.

Note : Les entrées dans ce tableau représentent les ratios de succès (*success ratios*) de la prévision du signe de la cible, tel qu'ils ont été décrits dans la section intitulée « Métriques d'évaluation prédictive ». La valeur minimale pour chaque horizon est soulignée. Les astérisques indiquent la significativité du test de Pesaran et Timmermann (1992) avec les niveaux de 1 % , de 5 % et de 10 %, respectivement représentés par *, ** et ***.

Références

- Athey, S., Tibshirani, J. et Wager, S. (2019). Generalized random forests. *The Annals of Statistics*, 47(2), 1148-1178.
- Bates, J. et Granger, C. W. J. (1969). The Combination of Forecasts. *Operational Research Society*, 20(4), 451-468.
- Bergmeir, C., Hyndman, R. J. et Koo, B. (2018). A note on the validity of cross-validation for evaluating autoregressive time series prediction. *Computational Statistics and Data Analysis*, 120, 70-83.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Chen, J., Dunn, A., Hood, K., Driessen, A. et Batch, A. (2019). *Off to the Races: A comparison of machine learning and alternative data for predicting economic indicators*. Rapport technique, Bureau of Economic Analysis.
- Chernozhukov, V., Chetverikov, D., Demirer, M., Duflo, E., Hansen, C., Newey, W. et Robins, J. (2018). Double/debiased machine learning for treatment and structural parameters. *The Econometrics Journal*, 21, C1-C68.
- Chevillon, G. (2007). Direct multi-step estimation and forecasting. *Journal of Economic Surveys*, 21(4), 746-785.
- Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K., et Bengio, Y. (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. arXiv preprint arXiv:1412.3555
- Colombo, E. et Pelagatti, M. (2020). Statistical learning and exchange rate forecasting. *International Journal of Forecasting*, 36(4), 1260-1289.
- Cook, T. R. et Hall, A. S. (2017). *Macroeconomic indicator forecasting with deep neural networks*. Rapport technique, Federal Reserve Bank of Kansas City.
- Diebold, F. X. et Mariano, R. S. (1995). Comparing predictive accuracy. *Journal of Business and Economic Statistics*, 13, 253-263.
- Diebold, F.X. et Pauly, P. (1987). Structural change and the combination of forecasts. *Journal of Forecasting*, 6, 21-40.
- Döpke, J., Fritsche, U. et Pierdzioch, C. (2017). Predicting recessions with boosted regression trees. *International Journal of Forecasting*, 33(4), 745-759.
- Elliott, G., Gargano, A. et Timmermann, A. (2013). Complete subset regressions. *Journal of Econometrics*, 177(2), 357-373.
- Fortin-Gagnon, O., Leroux, M., Stevanovic, D. et Surprenant, S. (2018). *A large Canadian database for macroeconomic analysis*. CIRANO Working Papers, 2018s-25.
- Galbraith, J. (2003). Content horizons for univariate time series forecasts. *International Journal of Forecasting*, 19(1), 43-55.
- Giacomini, R. et Rossi, B. (2010). Forecast comparisons in unstable environments. *Journal of Applied Econometrics*, 25(4), 595-620.
- Giannone, D., Lenza, M. et Primiceri, G. E. (2018). *Economic Predictions with Big Data: The illusion of sparsity*. Rapport technique, Federal Reserve Bank of New York.

Prévision macroéconomique dans l'ère des données massives et de l'apprentissage automatique

Goulet Coulombe, P., Leroux, M., Stevanovic, D. et Surprenant, S. (2019). How is machine learning useful for macroeconomic forecasting. CIRANO Working Papers, 2019s-22.

Goulet Coulombe, P. (2020). *The Macroeconomy as a Random Forest*. Mimeo. University of Pennsylvania.

Gu, S., Kelly, B. et Xiu, D. (2019). *Empirical asset pricing via machine learning*. Rapport technique, Chicago Booth Research Paper No. 18-04; *The Review of Financial Studies*, 33, 2223-2273.

Hansen, P., Lunde, A. et Nason, J. (2011). The model confidence set. *Econometrica*, 79(2), 453-497.

Hastie, T., Tibshirani, R. et Friedman, J. (2017). *The Elements of Statistical Learning*. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag, New York.

Hendry, D. F. et Clements, M. P. (2004). Pooling of forecasts. *The Econometrics Journal*, 7(1), 1-31.

Hochreiter, S. et Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780.

Hoerl, A. E., Kennard, R. W. et Baldwin, K. F. (1975). Ridge regression: Some simulations. *Communications in Statistics*, 4(2), 105-123.

Joseph, A. (2019). *Shapley Regressions: A framework for statistical inference on machine learning models*. Rapport technique, document de travail, Bank of England, 784.

Kim, H. H. et Swanson, N. R. (2018). Mining big data using parsimonious factor, machine learning, variable selection and shrinkage methods. *International Journal of Forecasting*, 34(2), 339-354.

Kotchoni, R., Leroux, M., et Stevanovic, D. (2019). Macroeconomic forecast accuracy in a data-rich environment. *Journal of Applied Econometrics*, 34, 1050-1072.

McCracken, M. W. et Ng, S. (2016). FRED-MD: A monthly database for macroeconomic research. *Journal of Business and Economic Statistics*, 34(4), 574-589.

Medeiros, M. C., Vasconcelos, G. F. R., Veiga, A. et Zilberman, E. (2019). Forecasting inflation in a data-rich environment: The benefits of machine learning methods. *Journal of Business and Economic Statistics*. doi : [10.1080/07350015.2019.1637745](https://doi.org/10.1080/07350015.2019.1637745)

Milunovich, G. (2019). *Forecasting Australian Real House Price Index: A comparison of time series and machine learning methods*. Rapport technique, Macquarie University.

Mullainathan, S. et Spiess, J. (2017). Machine learning: An applied econometric approach. *Journal of Economic Perspectives*, 31(2), 87-106.

Nakamura, E. (2005). Inflation forecasting using a neural network. *Economics Letters*, 86(3), 373-378.

Ng, S. (2014). Boosting recessions. *Canadian Journal of Economics*, 47(1), 1-34.

Pesaran, H. et Timmermann, A. (1992). A simple nonparametric test of predictive performance. *Journal of Business and Economic Statistics*, 10(4), 461-465.

Satchell, S. et Timmermann, A. (1995). An assessment of the economic value of non-linear foreign exchange rate forecasts. *Journal of Forecasting*, 14(6), 477-497.

Schwert, G. W. (1989). Tests for unit roots: A Monte Carlo investigation. *Journal of Business and Economic Statistics*, 7, 147-159.

Serpinis, G., Stasinakis, C., Theolatos, K. et Karathanasopoulos, A. (2014). Inflation and unemployment forecasting with genetic support vector regression. *Journal of Forecasting*, 33(6), 471-487.

Smola, A. J. et Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 14(3), 199-222.

Stock, J. H. et Watson, M. W. (1999). A comparison of linear and nonlinear univariate models for forecasting macroeconomic time series (p. 1-44). Dans R. F. Engle et H. White (dir.), *Cointegration, Causality and Forecasting: A festschrift in Honour of Clive W. J. Granger*. Oxford : Oxford University Press.

Stock, J. H. et Watson, M. W. (2002a). Forecasting using principal components from a large number of predictors. *Journal of the American Statistical Association*, 97(460), 1167-1179.

Stock, J. H. et Watson, M. W. (2002b). Macroeconomic forecasting using diffusion indexes. *Journal of Business and Economic Statistics*, 20(2), 147-162.

Stock, J. H. et Watson, M. W. (2004). Combination forecasts of output growth in a seven-country data set. *Journal of Forecasting*, 23(6), 405-430.

Swanson, N. et White, H. (1997). A model selection approach to real-time macroeconomic forecasting using linear models and artificial neural networks. *The Review of Economics and Statistics*, 79(4), 540-550.

Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 58(1), 267-288.

Teräsvirta, T. (2006). Forecasting economic variables with nonlinear models (p. 413-457). Dans G. Elliott, C. Granger et A. Timmermann (dir.), *Handbook of Economic Forecasting*, vol. 1, Elsevier.

Zou, H. (2006). The adaptive lasso and its oracle properties. *Journal of the American Statistical Association*, 101(476), 1418-1429.

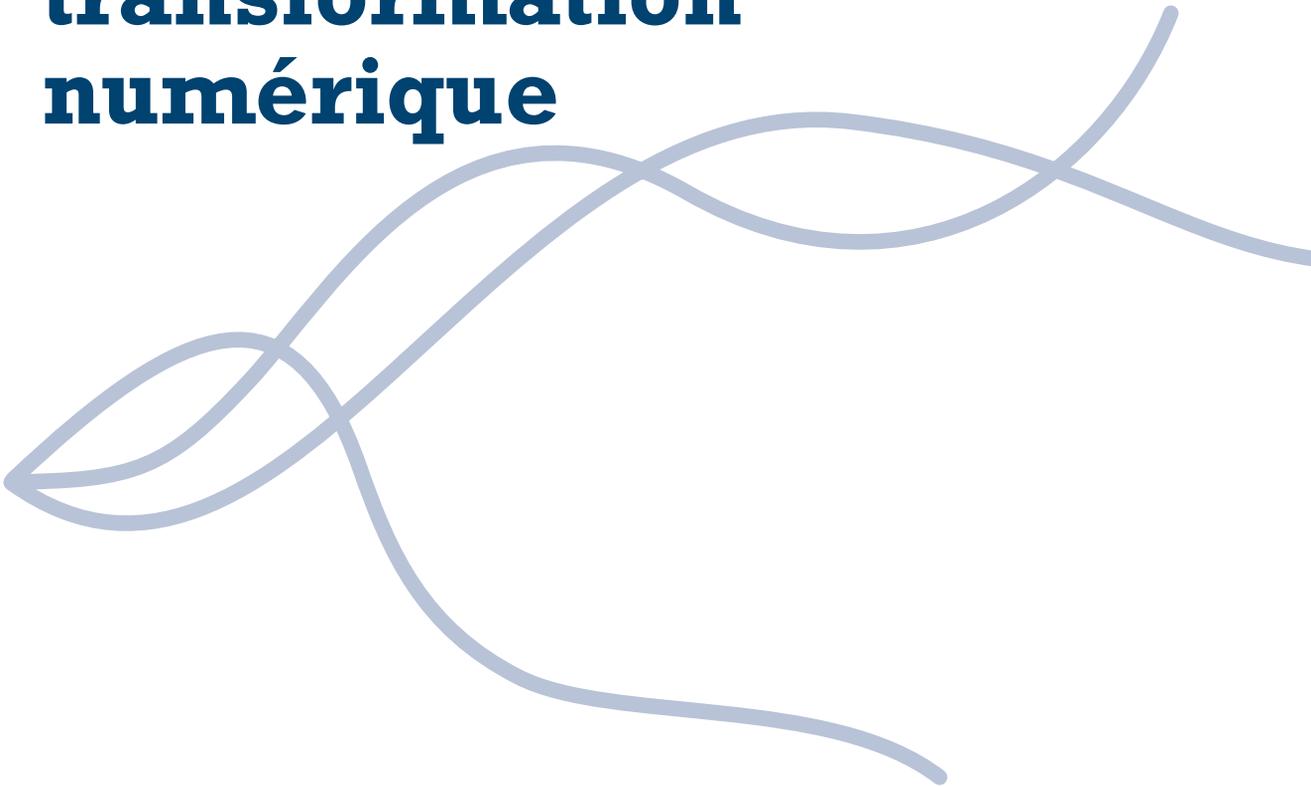
Zou, H. et Hastie, T. (2004). Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, 67(2), 301-320.

Notes

1. Ce problème est connu dans la littérature sous le nom de « malédiction de la dimensionnalité ».
2. Le surajustement (*overfitting*) survient lorsqu'une analyse statistique confond la variation résiduelle avec celle du modèle sous-jacent et, par conséquent, reproduit complètement (ou presque) la structure des données, mais produit une mauvaise performance prévisionnelle hors échantillon.
3. Le problème de malédiction de dimensionnalité (*curse of dimensionality*) est causé par un trop grand nombre de variables explicatives par rapport au nombre d'observations temporelles, rendant ainsi l'estimation par moindres carrés impossible.
4. <https://www.cdhowe.org/turning-points-business-cycles-in-canada-since-1926/19364>
5. La ligne rouge sépare l'échantillon en deux. La période à partir de 2000 sera hors échantillon dans l'exercice de prévision.
6. Les données canadiennes se trouvent à cette adresse : http://www.stevanovic.uqam.ca/DS_LCDM.html. La version LCDMA_Q_November_2019 a été utilisée dans ce chapitre.
7. Les données américaines se trouvent à cette adresse : <https://research.stlouisfed.org/econ/mccracken/fred-databases/>. La version 2019-12 a été utilisée ici.
8. En présence de nombreux modèles, la méthode Model Confidence Set (MCS), de Hansen, Lunde et Nason (2011), aurait pu être appliquée afin de sélectionner un groupe de modèles plus performants. Par contre, le nombre d'observations dans la période de test étant relativement petit, cette méthode n'a pas été utilisée.
9. À titre d'exemple, dans le cas de sélection de l'ordre autorégressif du test ADF par le BIC, Schwert (1989) suggère, pour les échantillons de petite taille, la borne supérieure
$$p_{max} = \left[12 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^{1/4} \right]$$
10. En présence des variables corrélées, Lasso a tendance à écarter les moins importantes, impliquant une sélection de variables non convergente. En fait, la régularisation Lasso joue sur l'arbitrage entre biais et variance, et peut donc induire un biais au profit de la diminution de la variance. C'est l'essence du contrôle du risque de surajustement.
11. Voir Smola et Schölkopf (2004) pour la dérivation des résultats brièvement montrés ici.
12. À noter que le tube peut être assez large pour exclure toutes les observations, auquel cas le modèle de SVR prévoit la moyenne historique.

Section 2.4

L'État et la transformation numérique



Chapitre 13

POINT DE VUE

LES DÉFIS FISCAUX ASSOCIÉS AU COMMERCE ÉLECTRONIQUE

Luc Godbout

Professeur titulaire à l'Université de Sherbrooke, titulaire de la Chaire de recherche en fiscalité et en finances publiques, chercheur et fellow au CIRANO

Michaël Robert-Angers

Professionnel de recherche à l'Université de Sherbrooke

Résumé

Au Québec comme ailleurs, les consommateurs effectuent de plus en plus d'achats en ligne. Cette tendance a d'ailleurs pris de l'ampleur dans le cadre de la crise pandémique. Ici, le commerce électronique est dominé par quelques géants américains, Amazon en tête. Ceux-ci détiennent d'importantes parts de marché. Le secteur du commerce de détail traditionnel se trouve par conséquent devant une concurrence étrangère de plus en plus importante. La consommation en ligne récupérée par les détaillants Web locaux étant relativement faible, on observe le remplacement de ventes locales par des importations. Si l'achat en ligne à l'extérieur du Québec constitue une tendance lourde, il est néanmoins possible d'en atténuer

l'impact sur les finances publiques. En complément aux mesures prises par le Québec dans le cadre du budget 2018-2019, une piste à considérer est l'application uniforme des taxes de vente sur les importations de biens tangibles. À l'aide des données statistiques disponibles, ce point de vue présentera un portrait du commerce en ligne au Québec, de son impact économique attendu et de son effet sur les finances publiques¹.

Contour du commerce électronique

Les consommateurs effectuent de plus en plus d'achats en ligne. Il s'agit d'un phénomène mondial qui transforme l'industrie du commerce de détail et qui a également cours au Canada et au Québec, même si le commerce électronique² s'y est développé plus tardivement, particulièrement du côté de l'offre (Entreprises Québec, s.d.). Le Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations (CEFRIO) estime que la valeur des achats en ligne effectués par les Québécois est passée de 3,4 milliards de dollars en 2009 à 10,5 milliards de dollars en 2018 (CEFRIO, 2010). Entre 2017 et 2018, tandis que la croissance du commerce de détail était de 2,9 %, celle des achats en ligne des Québécois fut de 15,4 % (tableau 13-1).

De son côté, Revenu Québec a évalué les proportions de ces achats effectués ailleurs au Canada et à l'étranger afin d'estimer les pertes fiscales liées à la taxe de vente du Québec (TVQ) engendrées par le commerce électronique. Selon cette évaluation, des achats en ligne représentant 3,2 milliards de dollars sont effectués sur des sites québécois, alors que les importations en ligne représentent 7,3 milliards de dollars.

Plus précisément, 34,7 % de la valeur des achats en ligne proviendrait du commerce interprovincial et 34,5 % des transactions hors Canada. C'est donc 69,2 % de la valeur des achats de produits et services en ligne qui proviennent de sites de l'extérieur de la province.

Les défis fiscaux associés au commerce électronique

	Estimation de la valeur des achats en ligne des Québécois effectués auprès de détaillants du Québec et de l'extérieur		
	2017	2018	Variation annuelle
Achats en ligne des cyberconsommateurs québécois	9,1 G\$	10,5 G\$	15,4 %
Achats effectués sur des sites québécois (sur la base des proportions estimées par Revenu Québec)	2,8 G\$	3,2 G\$	14,3 %
Écart	6,3 G\$	7,3 G\$	15,9 %
Part des importations, achats hors Québec (estimation de Revenu Québec pour 2017)	69,2 %		
Part des importations, achats hors Canada (estimation de Revenu Québec pour 2017)	34,5 %		
Commerce de détail – ventes	125,7 G\$	129,3 G\$	2,9 %
Achats en ligne en % des ventes de commerce de détail québécois	7,2 %	8,1 %	0,9 pt de %

Tableau t/2020-c**13-1**

Sources : CEFRIO (2018a). *Le commerce électronique au Québec*, édition 2018, vol. 9, n° 6, p. 5 ; Statistique Canada, tableau 2010-0008-01 ; et Québec (2018). *Le plan économique du Québec, renseignements additionnels 2018-2019*, p. B13.

Note : Les valeurs sont données en dollars courants.

Une part importante du commerce électronique échapperait par conséquent aux détaillants québécois.

Tandis qu'aux États-Unis, le commerce électronique provoque principalement une modification des canaux de distribution, passant des commerces « ayant pignon sur rue » aux détaillants en ligne, au Québec, cette transition est plus profonde : les données contenues dans le tableau 13-1 indiquent que les achats en ligne résultent en fuites économiques dans plus de deux cas sur trois. Si les achats en ligne au Québec représentaient 8 % des achats totaux en 2018, les données canadiennes indiquent que les ventes en ligne des entreprises canadiennes ne représentaient dans cette période que 3 % des ventes totales³.

Considérations économiques et fiscales

Parce qu'il ne constitue pas seulement une autre façon de distribuer et d'acquérir les biens et services, mais fait littéralement tomber les frontières en matière de commerce de détail, l'achat en ligne a des répercussions potentielles sur l'activité économique et la balance commerciale des États. Le Québec n'échappe pas au phénomène.

Aspects économiques du commerce en ligne

En théorie, le commerce électronique est synonyme de réduction de prix à la consommation et d'un éventail de choix plus important.

L'abaissement des barrières à la vente au détail génère une compétitivité accrue. Cet abaissement se produit en particulier par la réduction des coûts de distribution, car un détaillant peut vendre mondialement sans avoir à supporter les coûts liés à une multiplication de sa présence physique. Une hausse de la compétition entre détaillants devrait exercer une pression à la baisse sur leurs marges de profit et, conséquemment, entraîner des économies pour les consommateurs. À son tour, l'accroissement du revenu disponible des ménages devrait hausser la consommation et stimuler la production des manufacturiers locaux.

Dans certaines conditions, le commerce électronique pourrait donc provoquer une hausse du PIB, et ce, malgré un impact négatif sur les commerces de détail traditionnels « ayant pignon sur rue » (Cardona, Duch-Brown, Francois, Martens et Yang, 2015).

Toutefois, on peut se demander si cela peut être possible pour une petite économie ouverte comme celle du Québec dès lors que la compétitivité du commerce de détail domestique est insuffisante pour contrer les importations en ligne provenant des géants du Web. En effet, la concentration des parts de marché du commerce électronique entre les mains de quelques joueurs dominants (Organisation mondiale du commerce, 2018) rend passablement difficiles l'entrée en scène et le développement de détaillants en ligne locaux. À cet égard, une poignée de détaillants en ligne, pensons à Amazon ou à eBay, se partagent une large part des ventes mondiales par Internet, et certains de ceux-ci font partie intégrante des habitudes de consommation en ligne des Québécois (CEFRIO, 2018b).

D'ailleurs, 73 % des cyberacheteurs canadiens ont acheté à l'extérieur du pays en 2018⁴. Le Canada est par conséquent le pays du G7 pour lequel cette proportion est la plus élevée, beaucoup plus que celle de 49 % observée aux États-Unis ou celle de 39 % du Japon (la donnée pour l'Italie n'est pas disponible). Malheureusement, aucune donnée spécifique au Québec n'a pu être recensée (Pitney Bowes, s.d.).

Impacts du commerce électronique sur les finances publiques du Québec

Comparativement à ce qu'on voit chez les membres de l'OCDE, le poids de la fiscalité est relativement élevé au Québec, les prélèvements obligatoires de l'État y représentant 38,6 % du PIB, contre 34,3 % pour la moyenne des pays membres de l'OCDE (Collectif, 2020, p. 39) en 2018. Parmi les prélèvements fiscaux au Québec, 49,1 % sont effectués par l'administration provinciale et celle-ci tire une part plus importante de ses recettes fiscales de la taxe de vente (TVQ) qu'ailleurs au Canada et aux États-Unis, tout en étant fortement dépendantes des impôts sur le revenu des particuliers, des impôts des sociétés et, indirectement, des impôts fonciers (Collectif, 2020, p. 36, 48 et 65).

Or, le développement du commerce en ligne complexifie la perception liée à ces modes d'imposition. Au-delà des difficultés techniques et légales s'ajoute le fait que, dans certains cas, les assiettes d'imposition sur lesquelles sont prélevées ces recettes fiscales (revenu des travailleurs, profit des commerces de détail et utilisation des surfaces commerciales) se voient transférées dans d'autres juridictions.

En effet, d'une part, l'achat effectué auprès de détaillants en ligne de l'extérieur du Québec ralentit la création d'emplois dans le secteur du commerce de détail et, par conséquent, entraîne des pertes de revenus en matière d'impôt des particuliers. Ensuite, en ce qui concerne les importations en ligne des Québécois effectuées auprès de sociétés sans établissement stable au Québec, il est important de noter que ces sociétés ne sont pas assujetties à l'impôt sur les bénéfices des sociétés et aux cotisations au Fonds des services de santé, contrairement aux détaillants québécois. Enfin, les achats en ligne effectués auprès de détaillants étrangers influent sur la rentabilité du commerce de détail. L'Union des municipalités du

Québec (UMQ) estime que les importations en ligne ont occasionné la perte de 2000 commerces en 2016, soit l'équivalent de 3 milliards de dollars de valeur foncière pour les municipalités (UMQ, 2018).

L'effort fiscal des contribuables québécois étant déjà important, les autorités possèdent peu de marge de manœuvre pour compenser les pertes de recettes associées au commerce électronique par la levée de taxes supplémentaires. Cet élément accroît la pertinence d'analyser l'impact du commerce électronique sur les finances publiques du Québec.

Le tableau 13-2 montre que, bien que significatives dans le secteur du commerce de détail, les fuites fiscales associées au commerce électronique sont estimées à 518 millions de dollars globalement, soit moins de 1 % des revenus fiscaux en 2018.

L'on doit également signaler que les mesures prises par le gouvernement du Québec afin de récupérer une partie de la taxe de vente sur la fourniture de biens intangibles (et de biens tangibles provenant d'ailleurs au Canada) devraient réduire les fuites liées à cette source de revenus fiscaux (Ministère des Finances, 2018)⁵.

Les défis fiscaux associés au commerce électronique

Estimation des pertes fiscales associées aux achats en ligne effectués à l'extérieur du Québec			
	Perte fiscale	Proportion de l'ensemble des recettes fiscales du gouvernement du Québec (2018)	Commentaires
Taxe de vente du Québec (2017) (estimations de Revenu Québec et du Conseil québécois du commerce de détail) - Biens corporels (incluant l'impact du rehaussement de l'exemption de TVQ [53,3 M\$] sur les importations de biens corporels associées au nouvel Accord Canada–États-Unis–Mexique) - Biens incorporels et services	253,7 M\$	1,41 %	Cette évaluation constitue une borne supérieure, dans la mesure où : - le Québec perçoit dorénavant la TVQ sur les biens intangibles (et les biens tangibles provenant d'ailleurs au Canada) ; - l'impact du rehaussement éventuel du seuil de minimis d'application des taxes de vente à la douane, passant de 20 \$ à 40 \$, est pris en compte.
	69,5 M\$		
Impôt sur le revenu (estimation des auteurs)	72,1 M\$	0,23 %	Le Québec traversant une période de pénurie de main-d'œuvre, les emplois perdus dans le secteur du commerce de détail peuvent être compensés par ceux créés dans d'autres secteurs. Malgré le fait qu'il s'agisse d'une évaluation conservatrice, celle-ci constitue une borne supérieure.
Impôt des sociétés (estimations des auteurs) - Bénéfice - Fonds des services de santé (FSS)	38,3 M\$ 19,5 M\$	0,36 %	La base d'imposition du FSS est la masse salariale. Cette évaluation constitue par conséquent une borne supérieure (voir le commentaire sur l'impôt sur le revenu).
Impôt foncier (2016) (estimation de l'Union des municipalités du Québec)	65 M\$	0,65 %	On peut estimer qu'il s'agit d'une borne supérieure ici également, car une part importante des importations en ligne prises en compte dans le calcul vise les produits numériques. Ces ventes n'étant pas effectuées en magasin de toute façon, leur « perte » a un effet moindre sur l'utilisation de superficies commerciales.
Total	518,1 M\$	0,61 %	

Tableau t/2020-c13-2

Sources : Québec (2018) ; Côté, J. G., Homsy, M., Nantel, J. et Scarfone, S. (2015) ; Statistique Canada ; Union des municipalités du Québec (2018) ; Conseil québécois du commerce de détail (2018) et calculs des auteurs.

En contrepartie, il faut prendre en considération que les importations en ligne progressent au rythme annuel de 15 % comme indiqué au tableau 13-1, et que la crise pandémique a eu pour effet d'accélérer cette progression. Par conséquent, si la part des importations se maintient, les pertes associées au commerce en ligne sont appelées à augmenter.

Piste visant à limiter l'impact du commerce électronique sur les finances publiques du Québec

Si l'on convient que l'achat en ligne constitue une tendance lourde qui affectera graduellement davantage les finances publiques, est-il possible d'en atténuer l'impact dès maintenant ? Dans le cadre du budget 2018-2019 du Québec, le gouvernement a posé des gestes visant la perception de la TVQ sur les achats en ligne de biens tangibles provenant d'autres provinces⁶ et l'ensemble des fournitures taxables de biens incorporels et de services⁷. Y a-t-il maintenant d'autres modifications à explorer comme l'application uniforme des taxes de vente sur les importations de biens tangibles en vue de récupérer une partie des pertes liées au commerce électronique, tout en corrigeant une iniquité fiscale dénoncée par les détaillants québécois ?

Non-perception de taxes de vente sur les biens corporels en provenance de l'étranger

Les biens tangibles en provenance d'un fournisseur non résident⁸ achetés préalablement en ligne sont visés par une entente liant le Québec et l'Agence des services frontaliers du Canada (ASFC). La perception de la TVQ est effectuée dans les bureaux de douane en territoire québécois ou dans tout autre endroit lorsque ce type de biens est apporté ou reçu par poste ou messagerie (Commission d'examen sur la fiscalité québécoise, 2015).

La difficulté concerne principalement le manque de conformité dans les processus douaniers lorsque les biens sont importés au Canada par les services postaux. La taxe de vente sur les importations postales au Canada ne serait perçue que dans 25 % des cas (colis dont la valeur excède le seuil de minimis de 20 dollars canadiens), tandis que les droits

d'importation ne sont perçus que dans 6 % des cas (Basalisco, Gårdebrink, Facino et Okholm, 2017). De même, à la suite d'un audit visant la période du 1^{er} janvier 2014 au 15 février 2019, le Vérificateur général du Canada évalue que « la manière dont l'ASFC avait géré les données liées aux expéditions de faible valeur importées par les sociétés de messagerie au Canada avait injustement placé les entreprises canadiennes dans une position désavantageuse par rapport aux fournisseurs étrangers⁹ » (Bureau du Vérificateur général, 2019).

Revenu Québec évalue que la TVQ n'est appliquée que sur une fraction des biens corporels importés, la taxe de vente sur les fournitures de biens tangibles provenant de l'étranger n'ayant pas été perçue sur des achats d'une valeur de 1,6 milliard de dollars en 2017 (Ministère des Finances, 2017, p. 125).

Le prix étant le premier facteur intervenant dans la décision d'achat en ligne pour 62 % des consommateurs canadiens (PwC Canada, s.d.), il est pertinent de s'interroger sur l'effet qu'aurait eu la perception de la TPS et de la TVQ sur ces décisions d'achat. En effet, le même produit acheté en ligne ou en magasin au Québec aurait quant à lui été frappé de la TPS et de la TVQ, motivant la décision d'achat sur un site étranger.

Le tableau 13-3 illustre les écarts de prix pour différentes catégories de produits achetés en ligne au Canada et aux États-Unis. La première colonne montre la part des achats en ligne des Canadiens (en valeur) pour les différentes catégories de produits analysées, tandis que la seconde colonne indique l'ampleur de l'économie moyenne (transport pris en compte) réalisée lors de l'achat en ligne d'un produit de cette catégorie sur un site américain (en pourcentage du prix payé au Canada). Ainsi, tandis que la valeur des vêtements achetés en ligne représentait 10 % de la valeur de l'ensemble des achats en ligne, une commande en ligne aux États-Unis permettait de bénéficier d'une économie de 20 % avant taxes et droits d'importation par rapport à un produit identique au Canada. La troisième colonne mesure l'impact de la non-perception de la TVQ et de la TPS sur le prix à l'importation de ces produits (et donc l'économie réalisée en pourcentage du prix canadien, taxes incluses). On constate que l'économie pour le consommateur québécois passe à 29 % ou plus pour les produits analysés lorsque le marchand canadien perçoit les taxes tandis que le marchand américain ne les perçoit pas¹⁰.

Ces économies de 29 % ou plus portent notamment sur les vêtements et les chaussures ainsi que sur la catégorie comprenant les accessoires de décoration et les appareils électroniques. Il s'agit des catégories d'articles pour lesquelles Revenu Québec a évalué subir les pertes fiscales les plus importantes en lien avec le commerce électronique de biens corporels (Ministère des Finances, 2017, p. 127).

	Estimation de l'écart de prix des produits commandés en ligne au Canada et aux États-Unis		
	Part de l'ensemble des importations en ligne, en %	Économie réalisée à l'achat aux États-Unis, en % du prix canadien (taxes de vente exclues, coût d'expédition pris en compte)	Économie réalisée à l'achat aux États-Unis, en % du prix canadien (TPS et TVQ incluses au prix canadien)
Mobilier, accessoires d'ameublement, articles ménagers, appareils électroménagers et appareils électroniques à usage domestique	11,0	18,5	29,1
Vêtements	10,0	20,0	30,4
Chaussures	9,0	21,6	31,8
Produits de santé à usage domestique	6,0	30,5	39,5
Produits de soins pour bébés, de beauté et d'hygiène personnelle	5,0	26,0	35,6

Tableau t/2020-c13-3

Sources : PwC (2017) et calculs des auteurs.

Note : Les sites Internet Amazon.ca (Canada) et Amazon.com (États-Unis) ont été utilisés pour les comparaisons. Le site Amazon.com permet d'effectuer le paiement en dollars canadiens. Selon Balisco, Gårdebrink, Facino et Okholm (2017), l'observation de la perception des droits d'importation est moins élevée que celle des taxes de vente (livraison postale). Par conséquent, il est raisonnable de prendre pour acquis que les tarifs douaniers et les frais de manutention ne sont pas perçus lorsque la taxe de vente n'est pas perçue. Le recensement des prix a été effectué en 2016. La troisième colonne représente la différence entre le prix d'un panier canadien, taxes incluses, et le prix du même panier acheté en ligne sur un site des États-Unis qui ne perçoit pas les taxes de vente applicables au Québec, cette différence étant exprimée en proportion du prix de vente au Canada, taxes incluses.

Il est raisonnable d'estimer qu'une partie des achats sur lesquels les taxes de vente n'ont pas été perçues aurait été effectuée auprès de détaillants du Québec conditionnellement à une application adéquate des programmes de perception des taxes provinciales sur les importations non commerciales (Agence des services frontaliers du Canada, 2017). Or, une diminution des importations aurait permis non seulement de récupérer des recettes de TVQ, mais également d'élargir les autres assiettes fiscales du Québec.

Taxes à la consommation et plateformes numériques

L'OCDE considère le recours aux plateformes numériques en vue de faciliter la collecte des taxes à la consommation dans le cadre d'une transaction entre un consommateur et un vendeur situé à l'extérieur de la juridiction fiscale de consommation (OCDE, 2019). Cette organisation effectue le constat que le nombre élevé de ventes en ligne transfrontalières de biens tangibles complexifie la perception des taxes à la consommation par les autorités douanières nationales (OCDE, 2019, p. 17). La plateforme constituant le point de contact avec le consommateur, elle bénéficie d'une position privilégiée pour percevoir les taxes à la consommation de façon efficace et efficiente (OCDE, 2019, p. 16). La réglementation des transactions numériques sur ces plateformes permettrait également de rétablir les conditions d'une plus grande concurrence (approche symétrique) entre les grandes multinationales du numérique et les entreprises locales qui offrent des produits et services en ligne.

L'Australie et l'Union européenne ont adopté des législations visant à rendre les plateformes numériques responsables du recouvrement des taxes à la consommation sur les marchandises importées. Tandis que celle de l'Australie¹¹ est déjà en vigueur, la directive de l'Union européenne (UE) le sera à compter de 2021 (UE, 2017). Il faut toutefois souligner que cette avenue pose des difficultés : le risque de non-conformité des détaillants étrangers est considérable et les autorités fiscales auront peu ou pas de possibilités de faire respecter la législation par les entreprises étrangères.

En Australie, la législation est appuyée par des organisations telles que l'Australian Retailers Association et le Retail Council, qui font valoir qu'elle apporte une solution à « un risque significatif quant à l'intégrité du système fiscal » (Australian Retailers Association, 2017). Néanmoins, elle fait également l'objet de critiques¹². Alibaba, eBay et Amazon soulèvent notamment que la législation incite les petits vendeurs étrangers à se passer de leurs services et à vendre directement aux consommateurs australiens afin d'éviter l'assujettissement à la taxe de vente¹³.

Les grandes plateformes de commerce en ligne recommandent plutôt que la responsabilité de la perception des taxes de vente soit attribuée aux entités australiennes chargées du transport, telles que la poste australienne et les sociétés de messagerie (Amazon, 2017). Or, ceci sous-entend que chaque envoi expédié par la poste soit stoppé à la frontière pour dédouanement

(entraînant la problématique vécue au Canada)¹⁴. Évidemment, la poste australienne rejette la solution proposée par les plateformes. Chacun se renvoie la balle.

Suite à la mise en place de la loi, Amazon bloque dorénavant l'accès à amazon.com en Australie ; les Australiens souhaitant transiger par l'intermédiaire de la multinationale ne peuvent le faire que par l'intermédiaire de son site local (amazon.com.au).

La courte expérience du Québec en matière de taxation de biens meubles incorporels et de services étrangers semble se révéler positive (inscription au fichier de la TVQ pour les fournisseurs hors Québec)¹⁵. Cependant, en matière de biens corporels, le Québec devra nécessairement travailler en collaboration avec le fédéral.

L'exemple de l'Australie montre que résoudre les défis du commerce électronique peut s'effectuer dans l'adversité. Cependant, au vu du volume de colis traités par l'ASFC¹⁶, la perception des taxes de vente à la douane présente d'importantes limites. Le statu quo n'est donc pas une option. Chose certaine, si les législations déployées sont cohérentes entre elles, minimisent le fardeau administratif et, surtout, qu'une masse critique de juridictions les mettent de l'avant, les plateformes de commerce électronique devraient éventuellement s'y conformer.

En conclusion : ne pas rendre les importations plus attrayantes qu'elles ne le sont déjà

Le déplacement de l'activité économique vers le commerce électronique affecte les assiettes d'imposition traditionnelles. Les achats en ligne effectués par les Québécois sont là pour rester ; ils sont en progression rapide et ce canal d'achat est dominé par des entreprises étrangères. En 2018, l'impact de cette transformation de la consommation sur les recettes fiscales du Québec demeurerait marginal, celui-ci est certainement plus important en 2020 en contexte de crise pandémique et il continuera à prendre progressivement de l'ampleur, venant rétrécir les assiettes fiscales du Québec.

Une application incomplète de la perception de la TPS et de la TVQ sur les importations de biens tangibles a pour effet d'accroître l'attrait pour les importations. Le Vérificateur général du Canada soutient d'ailleurs que cette tendance se déploie au détriment de l'économie canadienne et « pourrait avoir incité les fournisseurs nationaux à déplacer leurs activités vers l'étranger, de même qu'elle pourrait avoir découragé l'investissement étranger au Canada » (Bureau du Vérificateur général, 2019).

Percevoir les taxes (et les droits de douane) dues permet non seulement d'assurer l'intégrité de ces assiettes fiscales, mais également d'aplanir une distorsion de marché affectant les décisions des consommateurs entre choix de consommation auprès d'un détaillant local ou d'un détaillant en ligne étranger. Remettre les produits des détaillants locaux et des détaillants étrangers sur un pied d'égalité aurait probablement des répercussions positives sur la croissance économique, ce qui permettrait d'élargir les assiettes fiscales de l'impôt sur le revenu des particuliers, des impôts des sociétés et de l'impôt foncier.

En ce sens, les travaux de l'OCDE visant à rendre les plateformes de vente en ligne responsables de l'application, de la collecte et de la remise de la taxe sur la valeur ajoutée (TVA) pour le compte des juridictions fiscales (en remplacement des agences douanières) s'avéreront particulièrement intéressants pour le Québec.



Références

Agence des services frontaliers du Canada. (2017). *Programmes de perception des taxes provinciales sur les importations non commerciales : mémorandum D2-3-6*.

Amazon. (2017). *Submission to the economics legislation comitee*. Repéré à : https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/Senate/Economics/GSTLowValueGoods/Submissions.

Assemblée nationale. (2019, 1^{er} mai). *Journal des débats de la Commission des finances publiques*, 45(20). 42^e législature, 1^{re} session

Australian Retailers Association. (2017). *Treasury laws amendment (GST low value goods) bill 2017*. Submission 13. Repéré à : https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/Senate/Economics/GSTLowValueGoods/Submissions

Basalisco, B., Gårdebrink, J., Facino, M. et Okholm, H. (2017). *Importations relatives au commerce électronique au Canada : taxe de vente et traitement douanier*. Repéré à : <https://www.copenhageneconomics.com/dyn/resources/Filelibrary/file/7/37/1488463650/copenhagen-economics-2017-e-commerce-imports-into-canada-sales-tax-and-customs-treatment-french.pdf>.

Bureau du Vérificateur général. (2019). *Rapport 3 : la taxation du commerce électronique*. Par. 3.14. Repéré le 9 mars 2020 à : http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/parl_oag_201905_03_f_43340.html.

Cardona, M., Duch-Brown, N., Francois, J., Martens, B. et Yang, F. (2015). *The Macroeconomic Impact of e-Commerce in the EU Digital Single Market*. Institute for Prospective Technological Studies Digital Economy. Repéré à : <https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/JRC98272.pdf>.

Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations (CEFRIO). (2010). *NETendances 2009 : un portrait de l'utilisation d'Internet au Québec*, 71. Repéré à : <https://cefrio.qc.ca/media/2034/netendances-2009.pdf>.

CEFRIO. (2018a). Le commerce électronique au Québec. *NETendances 2018*, 9(6), 5. Repéré à : https://cefrio.qc.ca/media/2083/netendances-2018_commerce_electronique.pdf.

CEFRIO. (2018b). *Portrait de la logistique en commerce électronique au Québec*, 15. Repéré à : https://cefrio.qc.ca/media/1906/cefrio_portrait_logistique_commerce_electronique_au_quebec.pdf.

Collectif. (2020). *Bilan de la fiscalité au Québec, édition 2020 : cahier de recherche 2020/01*. Chaire en fiscalité et finances publiques. Repéré à : https://cffp.recherche.usherbrooke.ca/wp-content/uploads/2020/01/cr_2020-01_bilanfiscalite2020.pdf.

Commission d'examen sur la fiscalité québécoise. (2015). *Se tourner vers l'avenir du Québec : volume 1. Une réforme de la fiscalité québécoise*, 181. Repéré à : http://www.groupes.finances.gouv.qc.ca/examenfiscalite/uploads/media/Volume1_RapportCEFQ_01.pdf.

Conseil québécois du commerce de détail. (2018). *Accord États-Unis–Mexique–Canada : les détaillants sont soulagés, mais demeurent préoccupés par l'équité*. Repéré le 23 août 2019 à : [http://cqcd.org/data/Communications/PDF/fr-CA/278_181001-CMP\(AEUMC\).pdf](http://cqcd.org/data/Communications/PDF/fr-CA/278_181001-CMP(AEUMC).pdf).

Côté, J. G., Homsy, M., Nantel, J. et Scarfone, S. (2015). *Le commerce en ligne au Québec : passer du retard à la croissance*. Institut du Québec.

Entreprises Québec. (s.d.). Commerce électronique. Repéré le 23 août 2019 à : <https://www2.gouv.qc.ca/entreprises/portail/quebec/marketing?lang=fr&g=marketing&sg=&t=s&m=aideConseils&e=330359016>.

Ministère des Finances. (2017). *Paradis fiscaux : plan d'action pour assurer l'équité fiscale*. Annexe 1. Repéré à : http://www.finances.gouv.qc.ca/documents/Autres/fr/AUTFR_ParadisFiscaux.pdf.

Ministère des Finances. (2018). *Le plan économique du Québec, renseignements additionnels 2018-2019*, B.17. Repéré à : http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2018-2019/fr/documents/RenseignementsAdd_1819.pdf.

Ministère des Finances. (2020). *Budget 2020-2021 : plan budgétaire*. Repéré à : http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2020-2021/fr/documents/PlanBudgetaire_2021.pdf.

Les défis fiscaux associés au commerce électronique

OCDE. (2019). *Le rôle des plateformes numériques dans la collecte de la TVA/TPS sur les ventes en ligne*. Éditions OCDE. doi:10.1787/0aef4c54-fr.

Organisation mondiale du commerce. (2018). *World trade report 2018*, p. 42. WTO Publications. Repéré à : https://www.wto.org/english/res_e/publications_e/world_trade_report18_e.pdf.

Organisation mondiale des douanes. (2015). *E-commerce and revenue collection*. Repéré à : <http://www.wcoomd.org/-/media/wco/public/global/pdf/topics/facilitation/activities-and-programmes/ecommerce/wco-news/ecommerce-and-revenue-collection-wco-news-78-october-2106.pdf?db=web>.

The Parliament of the Commonwealth of Australia. (2017). *Treasury laws amendment (GST low value goods) bill 2017*. Repéré à : https://parlinfo.aph.gov.au/parlInfo/download/legislation/ems/r5819_ems_4304999d-0509-477f-a6ee-665cfd7e5f7c/upload_pdf/620164.pdf;fileType=application%2Fpdf.

Pitney Bowes. (s.d.). *Country by country trends in cross-border commerce*. Repéré le 9 mars 2020 à : <https://www.pitneybowes.com/uk/ecommerce-study.html>.

PwC Canada. (s.d.). 2017 Canadian holiday outlook. Repéré le 22 octobre 2019 à : <https://www.pwc.com/ca/en/industries/retail-consumer/2017-holiday-outlook-canadian-insights.html>.

PwC. (2017). *Rise in Canada's de minimis threshold: Economic impact assessment*.

Québec. (2018). *Le plan économique du Québec, renseignements additionnels 2018-2019*, tableau B.3 ; Conseil québécois du commerce de détail [http://cqcd.org/data/Communications/PDF/fr-CA/278_181001-CMP\(AEUMC\).pdf](http://cqcd.org/data/Communications/PDF/fr-CA/278_181001-CMP(AEUMC).pdf) (consulté le 9 mars 2020)

Statistique Canada. *Tableaux 20-10-0072-01 et 20-10-0008-01*. Consultés le 23 août 2019.

Statistique Canada. *Tableaux 20-10-0066-01, 14-10-0204-01 et 36-10-0450-01*. Consultés le 9 mars 2020.

Union européenne (UE). (2017). *Directive (UE) 2017/2455 du conseil du 5 décembre 2017*. Journal officiel de l'Union européenne. Repéré à : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32017L2455>.

Union des municipalités du Québec (UMQ). (2018). *Économie numérique et changements démographiques : quel avenir pour l'impôt foncier ?*, p. 9. Repéré à : <https://umq.qc.ca/wp-content/uploads/2018/05/sommaire-etude-aviseo-umq-2018-impot-foncier-et-economie-numerique-1.pdf>.

Notes

1. Le sujet de ce chapitre a fait l'objet d'une présentation des auteurs au Colloque France-Québec de l'Association de planification fiscale et financière en 2019 et a été soumis en mars 2020. Les auteurs remercient la Chaire de recherche en fiscalité et en finances publiques de l'Université de Sherbrooke pour le soutien rendant possible la réalisation de ce texte.
2. Le gouvernement du Québec définit le commerce électronique comme étant « l'ensemble des activités commerciales qui sont effectuées par l'entremise d'Internet ». Au sens de la Loi de l'impôt sur le revenu (L.I.R.), une activité commerciale réfère à la notion d'entreprise, soit un projet comportant un risque ou les affaires de caractère commercial. Bien qu'il affecte l'économie du Québec, le commerce électronique entre sociétés (B2B) s'inscrit

dans une dynamique différente de celle des transactions entre entreprise et particulier (B2C) et, à moins d'indication contraire, n'est pas visé par ce texte, bien qu'il représente, et de loin, la grande majorité des transactions associées au commerce électronique.

3. Statistique Canada. *Tableaux 20-10-0072-01 et 20-10-0008-01*. En ligne : Statista, www.statista.com. Consulté le 23 août 2019.
4. Selon Pitney Bowes, une multinationale spécialisée dans l'affranchissement postal comptant 15 000 employés à travers le monde, 61 % des achats en ligne de Canadiens effectués auprès de détaillants étrangers sont effectués sur des *marketplaces* comme Amazon. Il est possible qu'une partie de ces achats vise des produits provenant de détaillants canadiens utilisant une plateforme de distribution en ligne étrangère. Voir : Pitney Bowes, *Country by country trends in cross-border commerce*. Repéré le 9 mars 2020 à : <https://www.pitneybowes.com/uk/ecommerce-study.html>.
5. Québec prévoit percevoir 28 millions de dollars en TVQ auprès des entreprises numériques hors Canada en 2019-2020.
6. Une nouvelle obligation vise les entreprises canadiennes résidentes du Québec et les entreprises étrangères enregistrées sous le régime de la TPS effectuant des fournitures taxables de biens tangibles auprès des consommateurs québécois. Tandis qu'avant le 1^{er} septembre 2019, le consommateur québécois devait verser la TVQ par autocotisation, ces fournisseurs doivent désormais percevoir la TVQ et la remettre à Revenu Québec.
7. *Loi sur la taxe de vente du Québec*, ch. VIII.1, Mesures de perception et de versement – Fournisseurs non résidents.
8. *Loi sur la taxe d'accise*, L.R.C. (1985), ch. E-15. Fournisseur non inscrit en TPS n'exploitant pas une entreprise au Canada et ne possédant pas un établissement stable au Canada.
9. Un projet pilote d'un an impliquant Revenu Québec, l'ASFC et Postes Canada en vue d'améliorer la perception de la TVQ sur les biens corporels provenant de l'extérieur du Canada s'est déroulé entre octobre 2018 et octobre 2019. Ce projet pilote n'a pas donné les résultats escomptés. Le Québec compte toujours percevoir la TVQ sur les biens meubles en provenance de l'étranger et travaillera avec le gouvernement fédéral pour la mise en place d'une solution harmonisée en 2021. Voir : Assemblée nationale. (2019, 1^{er} mai). *Journal des débats de la Commission des finances publiques*, 45(20). 42^e législature, 1^{re} session; et Ministère des Finances. (2020). *Budget 2020-2021 : plan budgétaire*, p. c.98. Repéré à : http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2020-2021/fr/documents/PlanBudgetaire_2021.pdf.
10. Calcul basé sur les données PwC, tableaux 5 (prix Canada) et 6 (écarts de prix produits et transport). Nous avons appliqué le taux combiné TPS-TVQ de 14,975 % au prix canadien. Le taux de 29 % minimum provient de la différence entre le prix américain (livraison incluse) et le prix canadien taxes incluses, en proportion du prix canadien (l'économie à l'achat).
11. *A New Tax System (Goods and Services Tax) Act 1999*, amendé par *Treasury Laws Amendment (GST Low Value Goods) Act 2017*. Repéré sur le site du Parlement du Commonwealth de l'Australie à : https://parlinfo.aph.gov.au/parlInfo/download/legislation/ems/rf5819_ems_4304999d-0509-477f-a6ee-665cfd7e5f7c/upload_pdf/620164.pdf;fileType=application%2Fpdf.

Les défis fiscaux associés au commerce électronique

12. Les documents de consultation déposés au Sénat australien relativement au projet de loi *Treasury Laws Amendment (GST Low Value Goods) Act 2017* sont disponibles en ligne : https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/Senate/Economics/GSTLowValueGoods/Submissions.
13. La loi australienne prévoit que les entreprises ayant des ventes inférieures à 75 000 dollars australiens sur une base annuelle ne sont pas tenues de s'enregistrer et de percevoir la taxe de vente.
14. Les systèmes électroniques de transmission de données permettant l'échange d'information entre opérateurs postaux des juridictions d'exportation et d'importation, qui permettent le prédédouanement et donc un traitement rapide et efficace d'importants volumes de colis, sont en développement, mais ne seront pas disponibles à court terme. Voir : Organisation mondiale des douanes 2015.
15. La liste des fournisseurs hors Québec inscrits au fichier de la TVQ est disponible en ligne : <https://www.revenuquebec.ca/fr/entreprises/taxes/tpstvh-et-tvq/situations-particulieres-liees-a-la-tpstvh-et-a-la-tvq/fournisseurs-hors-quebec/liste-des-fournisseurs-hors-quebec-inscrits-au-fichier-de-la-tvq/>. En date du 9 mars 2019, 525 fournisseurs hors Québec étaient inscrits.
16. Le Vérificateur général du Canada évalue que 46 millions d'expéditions ont été importées par messagerie au Canada au cours de l'exercice 2017-2018. De celles-ci, 16 millions avaient une valeur *déclarée* de 20 dollars ou moins, le nombre d'expéditions valant 20 dollars ou moins ayant augmenté de 4 millions par rapport à l'exercice précédent. Voir Bureau du Vérificateur général (2019).

Chapitre 14

TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES ET EFFICIENCE ORGANISATIONNELLE

Repenser l'organisation publique selon ses flux informationnels

Daniel J. Caron

Professeur à l'École nationale d'administration
publique (ÉNAP), chercheur et fellow au CIRANO

Avec la collaboration de Sara Bernardi

Résumé

Les technologies numériques font partie de l'environnement organisationnel depuis quelques décennies. Au Québec, plusieurs initiatives gouvernementales ont vu le jour afin de profiter de leur apport. S'il y a eu des succès, diverses expériences ont montré la complexité de réussir le virage numérique. Plusieurs recherches ont exposé comment les technologies numériques peuvent contribuer à améliorer l'efficacité organisationnelle alors que d'autres ont fait ressortir qu'elles ne sont pas l'unique facteur de succès. Elles en sont une condition essentielle, mais non suffisante. En partant d'une perspective microéconomique de l'organisation publique et du rôle central qu'y joue l'information, il devient manifeste que, pour améliorer l'efficacité gouvernementale par les technologies numériques, celles-ci doivent s'insérer dans le design organisationnel en tant qu'élément structurant. Ceci met en relief l'importance d'aborder la transformation de l'État en repensant préalablement l'organisation publique en tant que dispositif au service d'une mission.

Introduction

La transformation numérique des administrations publiques est en marche depuis de nombreuses années. Après les efforts qui avaient mené à des initiatives de prestation de services comme la création de Services Québec ou de Service Canada au début des années 2000, d'autres projets de transformation ont vu le jour à la suite de l'arrivée massive de technologies encore plus performantes qu'il est maintenant convenu d'appeler les « technologies numériques ». Il n'est pas imprudent d'avancer que plusieurs des grands changements organisationnels des dernières décennies ont été induits par l'évolution et la disponibilité de technologies qui facilitent différents aspects de la communication, de la création, du partage ou du stockage d'information. Il suffit de regarder du côté du secteur privé pour comprendre la toute-puissance des technologies numériques en tant que levier de transformation. Plusieurs secteurs, dont ceux de la musique, du transport, de l'hébergement ou encore du commerce de détail, ont été remodelés par l'implantation de ce type de technologies. Contrairement à la pure robotisation d'opérations, les technologies numériques ont souvent permis de refondre entièrement des processus d'affaires, voire une multitude de paramètres propres au fonctionnement de secteurs économiques entiers. Sur ce front, dans les organisations bureaucratiques comme les administrations publiques, les changements ont été plus lents à prendre forme pour de multiples raisons, dont une des principales est certainement le cadre juridique dans lequel opèrent ces organisations. Mais les administrations publiques n'ont pas été totalement en reste face à ces transformations. D'ailleurs, les premières grandes transformations du bureau se sont faites suite à l'arrivée d'outils bureautiques toujours plus sophistiqués, lesquels ont permis de donner davantage de marge de manœuvre à chacun des travailleurs de l'organisation (Mondoux, 2011 ; Vismann, 2008). À titre d'exemple, et même si la chose n'est pas aussi répandue qu'elle pouvait l'être avant la pandémie de la COVID-19, on parle de télétravail dans l'administration publique depuis plus de trente ans. Ce qu'il faut surtout retenir de tous ces cas, c'est que les technologies de l'information et de la communication permettent de redessiner l'organisation. Mais ce n'est pas tant les technologies que l'organisation elle-même qui est au cœur de la révolution, les premières jouant souvent le rôle d'instigateur, de levier. En rendant possibles de nouvelles manières de penser le travail, elles permettent aussi de reconsidérer complètement l'organisation. Les grands chantiers québécois de la transformation numérique de l'administration publique ont

commencé à s'articuler de manière plus vigoureuse au cours des années 2010. Avec différentes stratégies, par exemple *Rénover l'État* par les technologies de l'information et la Stratégie de transformation numérique gouvernementale 2019-2023, l'État québécois se rapproche progressivement d'une volonté de repenser l'organisation bureaucratique.

Le but de ce chapitre est de parcourir les diverses approches de transformation numérique des administrations publiques et de comprendre quelles sont les conditions essentielles à considérer dans une transformation numérique. Après avoir brossé un tableau des éléments essentiels à la transformation numérique de l'État et en avoir discuté, le chapitre s'intéressera aux défis et aux pistes de solution pour mener à bon port la transformation numérique de l'administration publique. Si on comprend qu'une telle transformation peut s'opérer à divers endroits de l'appareil bureaucratique, dont l'interface de services, les mécanismes de consultation citoyenne ou encore les processus de travail, il est aussi vrai que tous relèvent à leur manière d'outils de communication interdépendants et de la possibilité de créer, d'échanger, de sauvegarder et de retrouver données et informations. Ceci suggère un besoin de cohérence d'ensemble dans la conception des plans de transformation numérique, qui commence par la reconnaissance d'un besoin de refonte des processus de travail internes à travers les flux informationnels comme éléments structurants.

Quelques conditions et éléments essentiels à la transformation numérique de l'administration publique

Il y a plusieurs manières d'envisager et d'entreprendre la transformation numérique de l'administration publique. À titre illustratif, au Québec, la stratégie *Rénover l'État par les technologies de l'information* voyait la technologie comme levier principal pour la transformation de l'administration publique. Sans prétendre à une transformation numérique intégrale, la stratégie visait un accroissement de l'efficacité et de l'efficacités de l'administration publique par un usage plus étendu et plus raisonné des technologies de l'information et des communications. On y rassemblait aussi sous un même toit les différents acteurs de l'information, ce qui constituait un premier effort vers une gouvernance plus intégrée de la question de la transformation numérique de l'administration publique (Gouvernement

du Québec, 2015). Aujourd'hui, la Stratégie de transformation numérique gouvernementale vise d'abord et avant tout une transformation numérique au service des citoyens. Mieux servir le citoyen est au cœur de la stratégie, laquelle présente cette particularité d'aller au-delà de la seule prestation électronique de services pour s'ancrer plus profondément dans un effort de transformation du fonctionnement interne de l'administration publique (Gouvernement du Québec, 2019b). Ceci est assez nouveau. Le projet de loi 14 favorisant la transformation numérique de l'administration publique en est une manifestation assez éloquente. Ces deux exemples nous indiquent que la transformation numérique de l'administration publique peut être conçue de diverses façons à partir d'angles différents et qu'elle peut aussi se définir sur la base de priorités variées. Il n'y a pas de bons ou de mauvais efforts dans la mesure où l'ensemble demeure cohérent et permet d'agencer rigoureusement les interdépendances.

Cela étant, la question se pose de savoir quels sont les étapes incontournables et les ingrédients essentiels de la transformation numérique de l'administration publique. En effet, si on ne peut prétendre à une seule manière d'aborder cette question, il n'en demeure pas moins que certaines étapes doivent être franchies et que des conditions minimales doivent être présentes. De l'amont à l'aval du travail de l'administration publique, les diverses approches de transformation regroupent quelques conditions préalables mélangées à des actions concrètes de transformation en vue d'atteindre certains objectifs. Depuis la fin des années 1990, les finalités autour de la transformation numérique ont été tournées principalement vers la prestation de services et la participation citoyenne. À partir des conditions nécessaires à respecter pour la transformation numérique de l'interface gouvernement-citoyen, nous allons voir que la question de l'organisation interne est toujours en arrière-plan de ces finalités. Elle est toutefois quelque peu occultée.

L'organisation de l'information

Une des conditions essentielles à la transformation numérique est de s'assurer que l'information dont dispose l'institution est bien organisée dans un environnement où le support principal n'est plus le papier, mais le logiciel. Ceci représente un défi important étant donné que le support électronique crée une décentralisation importante en ce qui a trait à la création, au traitement, à la classification et au partage de l'information. Un

exemple classique de problème issu de cet environnement est l'existence de multiples versions d'un même document. Pour pouvoir communiquer efficacement, il est impératif que l'information ne soit pas ambiguë et qu'elle soit la même pour tous. Cette condition d'organisation de l'information est qualifiée de manière différente dans la littérature même si sa signification reste sensiblement la même : phase d'émergence (Nations Unies, 2001 ; citées dans Lusta et Aktas, 2017), phase de présence (Esteves, 2005 ; cité dans Bayona et Morales, 2017), phase de catalogage (Layne et Lee, 2001) ou encore phase d'information (Hiller et Bélanger, 2001). L'ensemble de ces qualifications renvoie à une même notion de classement de l'information qui permettra finalement au gouvernement de la diffuser et de la traiter par des canaux électroniques. L'organisation de l'information inclut aussi les décisions autour de ce qui sera partagé. Par extension, l'organisation pourrait devoir numériser des informations qui datent et qui se trouvent sur un support non compatible avec les technologies numériques. Des organisations comme Revenu Québec, la Société d'assurance automobile du Québec ou la Régie de l'assurance maladie du Québec traitent une quantité phénoménale de données et d'informations. Que ce soit pour permettre aux citoyens de suivre un dossier ou pour effectuer du travail interministériel, l'information doit être organisée correctement et accessible en format numérique. La transformation numérique ne peut faire l'économie de mettre toutes les informations qui feront partie des flux de travail en format compatible avec les outils logiciels qui seront utilisés. Plusieurs exemples montrent que la non-interopérabilité des systèmes rend plus difficile la réalisation de cette condition. Le secteur de la santé est représentatif de ce type de difficultés (Samson et associés, 2015).

Sans remettre en cause le fonctionnement interne d'une organisation, la nécessité d'utiliser un format compatible pour tous touche à la manière dont les travailleurs indexent et organisent leur information afin de la rendre accessible, par exemple par le biais d'un site Web (Lusta et Aktas, 2017). La question qui doit guider ce travail est directement liée aux instruments et aux pratiques de gestion de l'information et des données de l'organisation. Ces instruments de politiques administratives doivent être clairement énoncés et transcrits dans la construction des diverses plateformes qui serviront au traitement des informations. La production d'information en mode analogique était auparavant dictée par des règles bureaucratiques appliquées par les individus. La transformation numérique requiert que ces règles fassent maintenant partie des paramètres d'utilisation des outils bureautiques. C'est ce que nous appellerons « informer l'algorithme ».

La création d'espaces d'interaction

Le deuxième élément d'importance pour transformer l'administration publique est la création d'espaces d'interaction. Après avoir organisé l'information de manière à pouvoir la diffuser et la partager, l'objectif est de mettre en place un espace où la communication commence à s'effectuer de manière bidirectionnelle. Que ce soit par l'entremise de sites Web ou du courriel, les citoyens peuvent communiquer avec le gouvernement de manière entièrement électronique. On réfère habituellement à cette étape en parlant de la « phase de communication » (Scholta, Mertens, Kowalkiewicz et Becker, 2019 ; Hiller et Bélanger, 2001) ou encore d'une « phase d'interaction » (Baum et Di Maio, 2000 ; cités dans Lusta et Aktas, 2017). L'interaction entre le gouvernement et les citoyens se voit facilitée par la mise en place de dispositifs, d'outils ou de plateformes favorisant les échanges. Certains auteurs vont plus loin et suggèrent même que ces espaces d'interaction puissent offrir de l'information dynamique, spécialisée et mise à jour régulièrement. Certains modèles iront jusqu'à inclure dans cette phase des éléments de prestation de services électronique (par exemple le renouvellement de permis, l'obtention de documents officiels, etc.) (Lusta et Aktas, 2017). En clair, il s'agit de prendre appui sur les systèmes électroniques pour améliorer la prestation des services existants en utilisant un support plus performant.

En ce qui a trait au fonctionnement interne, cette seconde phase amène un questionnement et un repositionnement quant à la relation entre l'État et la population. En effet, le gouvernement est amené à assurer une présence et à offrir une écoute aux besoins et aux demandes des citoyens sur une multitude de plateformes. Cette nouvelle réalité exige, entre autres, une réflexion sur les besoins informationnels des citoyens de manière à diffuser en amont la bonne information. De plus, elle impose une réorganisation du travail administratif pour répondre à ces nouveaux flux informationnels.

La création d'espaces transactionnels

La création d'espaces interactionnels est habituellement suivie par la création d'espaces transactionnels. Pour la transformation numérique de l'administration publique, il s'agit d'une étape incontournable, car elle représente pour le citoyen la possibilité d'effectuer des transactions en ligne complètes de manière entièrement électronique. Les transactions

en ligne comportent plusieurs avantages. Pour le citoyen, il s'agit d'une manière simplifiée, autonome et conviviale d'avoir accès à des services gouvernementaux (Al-Hashmi et Darem, 2008). Pour le gouvernement, les transactions en ligne permettent des économies d'argent et de temps en plus de rendre la prestation de services plus efficace (Al-Hashmi et Darem, 2008). Cette innovation peut aussi mener à l'accroissement de l'efficacité par l'automatisation de certaines fonctions. Dans le même ordre d'idées, il faut souligner l'importance de considérer les données comme un élément stratégique pour l'organisation ainsi que comme un bien public. « De nouvelles façons d'agréger et d'analyser les données à l'intérieur du gouvernement et dans les limites des entités gouvernementales mèneront à de nouveaux services et à de nouveaux modèles de prestation de services [...] » (Van der Meulen, 2016 ; traduction libre). Les gouvernements doivent donc se questionner et reconsidérer leur façon d'offrir des services dans un environnement numérique.

Au gouvernement du Québec, les transactions en ligne sont présentes depuis plusieurs années déjà. Que ce soit pour le renouvellement des permis de conduire et d'immatriculation ou du côté des déclarations d'impôts (voir par exemple Revenu Québec, 2018), le Québec a connu plusieurs avancées. Cependant, l'ensemble des services gouvernementaux ne sont pas rendus au même point. Cette situation peut être attribuée à divers facteurs, notamment les exigences législatives auxquelles sont soumises les diverses entités ou encore les contraintes organisationnelles (Caron *et al.*, 2019a, 2019b). Dans certains cas, des documents originaux et autres formulaires, en format papier et transmis par la poste, sont encore exigés.

Cet exemple montre à nouveau que plusieurs défis sont à considérer en ce qui a trait au fonctionnement interne. De plus, les risques liés à la protection des renseignements personnels et de la confidentialité deviennent plus grands à cette étape (Andersen et Henriksen, 2006) et doivent être pris en compte dans la planification. Par ailleurs, des ressources informatiques récentes sont requises pour parvenir à un fonctionnement optimal. La vétusté des systèmes informatiques constitue souvent un obstacle au développement de services en ligne. Des barrières sur le plan humain, à l'interne, sont également à prendre en considération. La mise en place de nouveaux processus demande un plan de gestion du changement, le soutien de la haute direction ainsi qu'une offre de formation et de la sensibilisation pour le personnel. Quant aux citoyens, bien que la majorité veuille se tourner vers

les services en ligne, ils sollicitent un accompagnement humain personnalisé (Emploi et Développement social Canada, 2019). L'organisation doit donc tenir compte de ce changement.

Le manque d'intégration des services constitue l'une des principales barrières à la prestation de services gouvernementaux en ligne. Cela renvoie à la mise en commun de l'offre au moyen d'un accès unique pour le citoyen (Kernaghan, 2012). Il faudra instaurer une cohérence de haut niveau avec, entre autres, les instances juridiques, puis mettre en place un portail permettant aux citoyens d'accéder à l'ensemble des services sans se soucier du ministère qui en est responsable. La population bénéficiera alors d'une prestation de services unifiée.

Sur le plan du fonctionnement interne, l'intégration de la prestation de services nécessite une transversalité au sein de l'organisation. « La notion de "transversalité" s'applique à des dispositifs et des politiques réputés dépasser l'organisation historique de l'action publique par domaines d'intervention spécialisés » (Douillet, Lebrou et Sigalo Santos, 2019, p. 1). Afin d'offrir une prestation de services unifiée, il importe de se défaire du cloisonnement organisationnel pour mieux coordonner les démarches. La manière d'offrir les services doit également être repensée en conséquence.

À ce titre, plusieurs initiatives d'intégration des services ont vu le jour au Québec. Pensons par exemple à l'implantation du portail Québec.ca, qui regroupe de l'information sur l'ensemble des programmes gouvernementaux. Québec.ca agit comme un moteur de recherche permettant au citoyen de s'informer sur les services gouvernementaux en se rendant en un seul endroit. Toutefois, le portail renvoie ensuite le citoyen sur le site Web correspondant à sa demande. Il ne s'agit donc pas de transversalité, mais d'une intégration partielle pour l'instant. L'outil « Mon dossier citoyen » peut également être rattaché à la phase d'intégration. Celui-ci permet, par l'entremise d'un seul portail, d'avoir accès aux services en ligne de plusieurs ministères et organismes gouvernementaux (Gouvernement du Québec, 2019a).

La création d'espaces de participation citoyenne

Une participation citoyenne accrue est aussi un ingrédient déterminant de la transformation numérique de l'appareil public. L'objectif est de favoriser la participation des citoyens à des discussions en ligne leur permettant de

s'exprimer sur des enjeux touchant, entre autres, les nouvelles politiques et la législation. « Du point de vue de la communication et de la consultation publiques, Internet offre des avantages indéniables, dont la possibilité pour les autorités de diffuser et de recueillir de l'information à faible coût auprès des citoyens. Il permet aussi aux citoyens de s'informer et de s'exprimer sans avoir à se déplacer » (Boudreau et Caron, 2016, p. 172). Pour parler de cette participation citoyenne, certains modèles décrivent l'avènement d'une démocratie numérique. Plus précisément, il s'agit de l'implication directe des citoyens dans la prise de décisions.

Toutefois, les répercussions sur le fonctionnement interne sont ici très importantes. En effet, une croissance de la participation citoyenne demande à l'organisation des efforts pour faire participer la population et la mobiliser, et surtout pour s'assurer de la prise en compte de cette participation dans le processus de décision. Jusqu'à un certain point, la participation citoyenne redéfinit la gouvernance et la prise de décision. Au Québec, on discute depuis les années 2000 de « démocratie en ligne » (Gautrin, 2004, p. 35). Aux modes de participation traditionnels (dépôt de mémoires ou participation présentielle) s'ajoute pour les citoyens la possibilité de participer à des consultations publiques par le biais de sondages en ligne, de forums ou de formulaires de commentaires en ligne portant sur un enjeu particulier (Assemblée nationale du Québec, 2009). Cela dit, ces modes de participation sont encore trop souvent statiques et ne permettent pas la discussion ou la collaboration. La présence des entités gouvernementales québécoises sur les médias sociaux vient atténuer ce manque en favorisant davantage d'échanges entre le gouvernement et les citoyens.

Constatations préliminaires

Les éléments présentés précédemment sont tous importants dans un contexte de transformation numérique. L'organisation de l'information, la création d'espaces d'échanges et de transactions, l'intégration de l'offre de services ainsi que la participation citoyenne sont essentielles. Toutefois, les modèles de transformation issus de diverses manières d'assembler ces ingrédients préconisent pour la plupart des angles d'approche relationnels et substantiels, s'intéressant principalement aux relations entre le gouvernement et les citoyens et à la nature des changements qui ont lieu. Plus précisément, ils visent des objectifs fortement axés sur la prestation de services et ne formulent pas nécessairement la manière d'amorcer les

L'information et le bureau : au cœur de la transformation numérique de l'administration publique

Comme nous l'avons exposé dans la section précédente, la transformation numérique de l'administration publique fait appel à de multiples composantes du fonctionnement organisationnel et institutionnel. Il existe plusieurs modèles dont les objectifs varient. Toutes ces modélisations ont leurs mérites et permettent chacune à leur manière de modifier un ou plusieurs aspects du fonctionnement de l'administration publique. Nous avons aussi constaté que la transformation prend d'abord racine dans l'organisation, ce qui augmente les possibilités et permet de mieux comprendre le phénomène de transformation numérique qui est opéré. Cependant, les modèles sont souvent définis à partir d'une relation causale présumée effective sous forme d'hypothèse implicite, soit que l'implantation technologique mène nécessairement à une certaine transformation du modèle d'affaires. Cette hypothèse implicite, qui constitue un premier trait commun des modèles, soulève au moins un doute dont les répercussions sont importantes. D'abord, cette manière de concevoir la transformation numérique occulte les difficultés que pose la réalité du changement organisationnel au profit d'une modélisation plus mécanique, laquelle, sans être inexacte, demande à être approfondie par un regard plus systémique. Ensuite, avec l'arrivée de capacités analytiques plus sophistiquées issues de l'apprentissage machine et de l'intelligence artificielle, il devient très important de baliser et de calibrer l'introduction des technologies numériques afin d'éviter le remplacement aveugle de la délibération par une gouvernance par les nombres (Supiot, 2015). Cette dernière pourrait créer des dilemmes axiologiques pouvant mener à des décisions arbitraires non désirables. Comme toutes les organisations, les administrations publiques doivent respecter un cadre de valeurs et de principes qui leur est propre et qui demande souvent une part de délibération humaine. Un deuxième trait commun des modèles de transformation numérique est qu'ils sont généralement construits pour améliorer la prestation de services. Leurs objectifs visent l'amélioration de la relation entre l'administration publique et les services aux citoyens. Cet accent sur la prestation de services est prévisible étant donné les répercussions immédiates et attendues de ces changements pour le citoyen. Les gouvernements sont d'abord au service de la population. Toutefois, envisagée de la sorte, la transformation numérique est partielle et délaisse inopinément la transformation du fonctionnement interne de l'organisation

publique (GOV.UK, 2017). Lorsque ces modèles s'intéressent au fonctionnement interne de l'organisation, le principal aspect considéré est la gestion de l'information. Cet aspect du fonctionnement interne est important, mais incomplet.

Par ailleurs, et comme nous l'avons vu, le fonctionnement interne est présent dans presque toutes les conditions nécessaires recensées, ce qui, à notre avis, est un premier indice de l'intérêt que pose la question de la transformation du bureau communément appelé « *back office* » ou « arrière-boutique ». En effet, il semble que la transformation numérique de l'administration publique doit forcément inclure cette dimension pour au moins deux raisons, et peut-être même en devenir la pierre angulaire. Premièrement, puisque l'administration publique peut être analysée comme une organisation au sens classique du terme (Bernier, 2017), sa matière première vitale est l'information et les données. Conséquemment, il y a des bénéfices potentiels à revoir comment l'information est créée, récupérée, stockée ou partagée, d'une part (Goldfarb et Tucker, 2019). D'autre part, les technologies numériques ayant permis de faire un bond sans précédent dans la construction des flux d'information grâce à une connectivité devenue quasi illimitée, il apparaît important de porter un regard neuf sur la construction même de l'organisation, qui a longtemps dû s'appuyer sur des regroupements hiérarchiques faute d'une meilleure capacité de communication et d'échanges d'information autant verticaux qu'horizontaux et autant internes qu'externes. C'est du moins ce que proposent les analyses de plusieurs auteurs qui se sont intéressés au design organisationnel du point de vue de l'information (Galbraith, 1974; Burton, Obel et Døjbak Håkonsson, 2015). Deuxièmement, des interrogations légitimes surgissent quant à la nature des gains réalisés dans la transformation numérique de l'interface de services. En effet, que sont ces gains, et sont-ils optimisés étant donné la manière dont la transformation s'effectue, c'est-à-dire sans réelle transformation interne en amont du service rendu? Le gain réel de la reconstruction d'une interface de services est aussi lié au travail qui se fait en amont du service rendu, soit dans le fonctionnement interne de l'organisation en question. C'est toute la question de la transformation du bureau qui refait donc surface ici. Pour éviter que cette partie essentielle de la transformation numérique de l'administration publique soit négligée, il faut explorer la manière de la faire éclore et repérer les leviers ainsi que les responsables de cette partie du chantier de la transformation numérique de l'administration publique.

L'administration publique : une mise en commun de l'information et des données

La transformation numérique de l'administration publique nous ramène donc aux racines du fonctionnement d'une organisation, et plus spécifiquement d'une organisation publique. L'idée de créer une organisation est fondée en grande partie sur la nécessité de mettre en commun des expertises et des informations pour résoudre des enjeux complexes liés à l'existence d'incertitudes (Arrow, 1974). Les bureaucraties, dont l'administration publique est incontestablement l'emblème, ont été créées grâce et pour le partage de données et d'informations. Les administrations publiques sont en effet des organisations dont les mandats et les missions sont très complexes, au sens où elles ne peuvent généralement être remplacées par des mécanismes de marché. Leurs secteurs d'intervention s'y prêtent peu ou mal. En tant qu'organisations, elles ont aussi été sujettes à de multiples transformations engendrées par l'évolution des technologies rattachées à la création, au partage et au stockage de l'information et des données (Goody, 1986 ; Vismann, 2008). Dans ce contexte, on comprend que les initiatives de transformation numérique de l'administration publique ne seront complètes, cohérentes et pleinement fonctionnelles que si elles s'appuient, en amont, sur une transformation numérique du bureau. Deux aspects sont ici à considérer.

Premièrement, il faut repenser le traitement de l'information sous toutes ses facettes, dont la création, le stockage, la récupération et le partage. Ces informations et ces données sont la matière qui servira à la prestation de services. L'efficacité et l'efficacité avec lesquelles cette matière est traitée ont donc des incidences immédiates en ce qui a trait à la prestation de services. Avec l'introduction éclairée de technologies numériques, il est aujourd'hui possible de revoir les manières de traiter l'information dans l'administration publique afin de diminuer les coûts de traitement et d'améliorer l'efficacité organisationnelle. Au moins cinq aspects peuvent être considérés dans une refonte interne des procédés de traitement de l'information et des données, soit la recherche et la récupération d'information, le transfert d'information, l'information pour le suivi des activités, l'information servant à la vérification et la reproduction d'information. Chaque organisation aura des besoins particuliers en informations et en données selon sa mission et ses procédés. Ce premier regard sur la transformation interne peut se faire

en dehors même de toute refonte des processus d'affaires. Il s'agit avant tout d'une procédure d'automatisation d'opérations existantes à partir de technologies plus sophistiquées.

Toutefois, et deuxièmement, la transformation numérique de l'organisation devrait aussi s'articuler autour d'une refonte plus complète où les processus d'affaires seront modifiés. La conception d'une organisation peut se faire sur plusieurs bases. Globalement, deux facteurs seront toujours mis à contribution, soit, d'un côté, la hiérarchie et les équipes de travail et, de l'autre côté, les flux informationnels (Galbraith, 1974; Burton *et al.*, 2015). Comme l'information (sa création, sa disponibilité, sa valeur, etc.) est le socle sur lequel sera modelée l'organisation, les technologies de l'information et de la communication y joueront un rôle central. Avec la venue de technologies numériques de plus en plus raffinées et performantes, il est possible de faciliter les communications par l'agencement de flux informationnels optimisés en fonction de la mission de l'organisation et de la disponibilité des technologies numériques. Cet exercice est définitivement exigeant, mais c'est possiblement ici que se trouvent les plus grands gains pour la transformation de l'administration publique. Nous verrons que, si cela pose de multiples défis, il existe aussi des facteurs de succès qui sont tout à fait réalistes pour effectuer une telle opération.

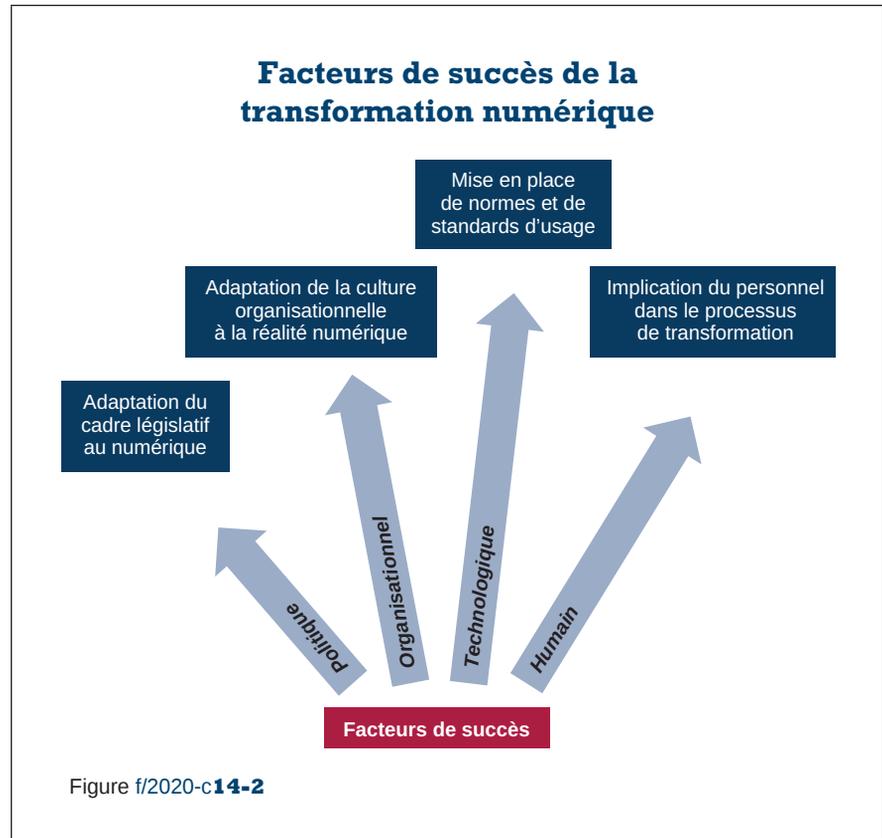
Défis et facteurs de succès de la transformation numérique

Il y a plusieurs défis à la transformation numérique de l'État. Il y a aussi de nombreux facteurs de succès, c'est-à-dire des actions à entreprendre ou des conditions à créer qui sont soit essentielles, soit facilitantes pour appuyer ce chantier. Nous avons regroupé les défis et les facteurs de succès sous quatre dimensions : politique, technologique, organisationnelle et humaine. La figure 14-2 indique le principal facteur de succès pour chaque dimension.

Premièrement, sur le plan politique, il est essentiel d'avoir des lois et des stratégies gouvernementales qui répondent aux exigences du numérique, mais aussi qui soient cohérentes entre elles. On remarque qu'il y a fréquemment des incohérences entre les politiques existantes et les attributs d'un univers de travail numérique (Caron et Bernardi, 2019). L'univers de la documentation et du partage d'information est certainement un exemple phare sur ce point. La sécurité de l'information est aussi un défi important

qui requiert l'attention des élus, car le cadre légal et administratif devra être modifié pour assurer cette sécurité. Cet enjeu est polymorphe. Ainsi, pour avoir un cadre législatif et administratif adapté au numérique, il est essentiel que les élus soient des partenaires engagés de la transformation numérique et qu'ils soient prêts à répondre aux demandes de l'administration et des citoyens pour adapter le cadre opérationnel en fonction des besoins au fur et à mesure que la transformation prend forme.

Deuxièmement, la dimension organisationnelle ainsi que la dimension humaine sont possiblement les endroits où les défis sont les plus grands. La transformation numérique nécessite un changement bureaucratique important qui force une réflexion sur les méthodes de travail en place et les meilleures façons de les optimiser grâce à la technologie en tant que support, mais non comme une fin en soi (Batara, Nurmandi, Warsito et Pribadi, 2017). La gouvernance des données et la gestion de l'information doivent être revues afin d'appuyer le décloisonnement des unités de travail et d'améliorer la communication transversale. Certains travaux soulignent en effet que la transformation numérique se voit entravée par le manque d'interopérabilité et de communication entre les instances gouvernementales, qui ont tendance à travailler de manière cloisonnée (Santiso, 2019). L'importance de mettre en place des mécanismes collaboratifs centrés sur le citoyen afin d'assurer une communication bidirectionnelle et une participation citoyenne accrue a été démontrée ; les nouvelles attentes envers le gouvernement numérique requerront des changements dans la manière d'opérer à l'interne. Un bel exemple de cette communication et de cette implication citoyenne est le besoin d'un plus grand partage des données dans l'organisation et en dehors afin d'en optimiser les usages avec les chercheurs. En fin de compte, un changement fondamental de culture doit être effectué pour que l'organisation s'adapte à l'univers numérique, qui requiert ouverture et collaboration.



Troisièmement, la dimension technologique demeure un enjeu de taille. Plusieurs organisations ont pris du retard dans la mise à niveau de leurs outils technologiques. Ceci est vrai même sans penser à la transformation numérique attendue. Plusieurs systèmes sont simplement obsolètes. Des investissements massifs seront donc nécessaires pour outiller les administrations publiques convenablement afin de pouvoir procéder à leur transformation numérique. Les administrateurs publics devront faire preuve de vision et avoir les discussions appropriées pour développer des normes et des standards d'usage qui viendront éclairer la mise à niveau du parc informatique. Il s'agit d'une sorte de stratégie du retard, mais prévoyante. En effet, si le cadre d'opération attendu est bien défini et réfléchi, les choix technologiques seront plus simples à faire et surtout possiblement plus appropriés à court et à moyen terme. Ceci veut aussi dire qu'une approche

différente doit être implantée au plus haut niveau de l'organisation en vue de la gouvernance de la transformation numérique, et que cela doit se faire avec toutes les parties ayant un rôle à jouer.

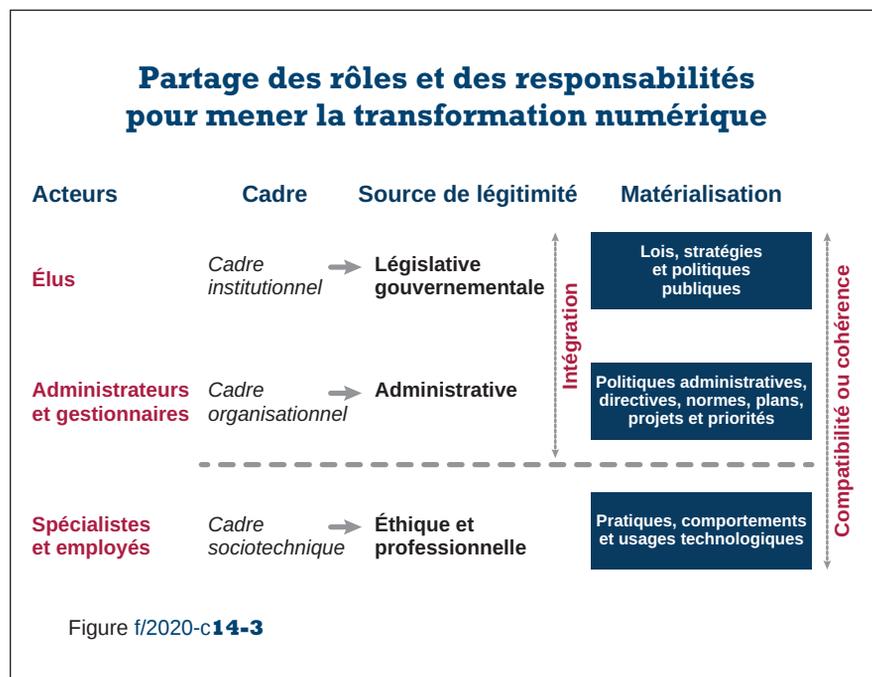
Enfin, et quatrième, la transformation numérique de l'administration publique fait face à des besoins sur le plan des ressources humaines. Non seulement parle-t-on d'un manque de ressources qualifiées pour travailler dans ce nouvel espace, mais on a également remarqué un manque de connaissances sur le potentiel que représente la transformation numérique. Une amélioration des connaissances et des savoir-faire permettant de répondre aux multiples exigences des nouvelles technologies constitue un atout intéressant pour une organisation qui souhaite être en mesure de mieux concevoir les algorithmes et l'architecture d'information. L'importance de développer de nouvelles formes de leadership basées sur la collaboration et l'adaptation de la culture organisationnelle prônant des valeurs, des attitudes et des comportements adaptés à la nouvelle réalité numérique est donc pressante. Surtout, c'est grâce à une participation accrue des employés au projet de transformation que cette culture organisationnelle a les meilleures chances de se voir progressivement transformée et les compétences numériques se développer.

Ce qui ressort assez clairement dans l'énonciation de ces défis et de ces facteurs est le lien étroit qu'il y a entre ces derniers et tous les modèles de transformation numérique. En d'autres mots, ces changements qui touchent l'organisation du bureau apparaissent souvent comme un préalable à tout effort de transformation numérique, et ce, même lorsque les objectifs visés par la transformation sont davantage liés à la prestation de services. Malgré l'accent mis sur une organisation étatique, nous savons que seule, elle ne peut réaliser sa propre transformation, car elle dépend de plusieurs facteurs légaux ou administratifs décidés ailleurs dans les institutions. Ceci pose toute la question des rôles et des responsabilités permettant de mener à bien la transformation numérique de l'administration publique.

Rôles et responsabilités dans la transformation numérique de l'administration publique

Les rôles et responsabilités sont particulièrement importants dans la transformation numérique de l'administration publique, pour deux raisons. Premièrement, l'administration publique répond à l'exécutif, qui est composé

d'élus. Dans ce cadre, elle ne peut agir seule même si elle possède une certaine autonomie d'action. Aussi, sa marge de manœuvre se trouve au sein de l'organisation, et elle n'a pas la possibilité de changer des éléments clés – par exemple les lois – qui peuvent être des barrières importantes à une transformation. En effet, comme nous l'avons vu, par leur obsolescence ou leur manque d'intégration et de cohérence, les lois peuvent parfois entraver la progression de la transformation numérique. Deuxièmement, la transformation numérique ne peut pas non plus dépendre uniquement du service des technologies et être laissée entre ses seules mains. Le projet de transformation numérique de l'administration publique requiert une vue d'ensemble et des liens entre toutes les composantes de l'organisation et entre l'organisation et l'exécutif. Il s'agit d'un enjeu de cohérence institutionnelle et organisationnelle. D'une part, comme l'indique la figure 14-3, il faut s'assurer de l'intégration des lois et des stratégies gouvernementales avec les politiques, les plans, les projets et les priorités sur le plan administratif. Dans ce dernier cas, c'est l'administration publique qui est interpellée. Les administrateurs publics sont ceux qui peuvent servir de relais entre les besoins de l'administration en matière de stratégies gouvernementales et les besoins législatifs avec l'exécutif. D'autre part, il est aussi crucial de s'assurer de la compatibilité des outils, des pratiques et des comportements de l'administration au regard des stratégies, des lois, des politiques administratives et des autres instruments de gestion de l'administration publique. Cette concordance ne peut être vérifiée que par l'organisation elle-même.



Conclusion

En guise de conclusion, il est essentiel de faire un certain nombre de rappels. Premièrement, la transformation numérique de l'administration publique ne serait pas possible sans l'apport des technologies numériques. Il s'agit du levier principal par lequel s'opère la transformation au moyen de deux déterminants. Le premier déterminant est la connectivité, c'est-à-dire la capacité des individus de communiquer entre eux, et le second déterminant est la calculabilité, soit la capacité d'automatiser les processus par l'usage d'algorithmes. C'est ce qui transforme l'environnement interne et externe de l'administration publique et requiert une adaptation. L'interopérabilité des systèmes informatiques et la création de normes et de standards d'usage cohérents sont également des éléments technologiques à considérer lors d'une transformation numérique.

Deuxièmement, il est primordial de s'intéresser au fonctionnement interne de l'organisation dans le contexte d'une transformation numérique. C'est dans la conception de l'organisation que se matérialise la transformation numérique. Il y a une implication directe sur la gouvernance de la

transformation numérique qui nécessitera une présence stratégique de l'expertise technologique et informationnelle à la table de gestion. Il ne s'agit pas ici de répondre à des questions techniques, mais de s'assurer que l'organisation, au plus haut niveau, informe l'algorithme, c'est-à-dire s'assure que les technologies numériques sont moulées sur les besoins organisationnels, ses valeurs et ses principes. De plus, l'adaptation de la culture organisationnelle au numérique ainsi que la mise en place de mécanismes collaboratifs centrés sur le citoyen font également partie des éléments à considérer dans le cadre d'une transformation numérique. Qui plus est, au sein de l'organisation, la transformation numérique de l'administration publique doit se faire en toute conscience des répercussions sur au moins trois éléments essentiels. D'abord, les comportements humains sont affectés directement et il importe d'accompagner les travailleurs dans cette adaptation. L'implication du personnel dans le processus de transformation numérique peut s'avérer une stratégie gagnante pour accroître la motivation, favoriser l'adoption d'une culture organisationnelle numérique et participer à la mise en place de solutions réalistes. Ensuite, les technologies doivent être mises à niveau, cohérentes, compatibles et interopérables. Avec les technologies numériques plus présentes, l'équilibre des infrastructures technologiques de l'organisation devient plus fragile et requiert une attention soutenue pour en assurer l'effectivité. Enfin, les façons de faire, de travailler ou les processus d'affaires sont appelés à changer, parfois de manière draconienne. Là se trouve une grande partie des gains potentiels de l'introduction des technologies numériques.

Troisièmement, sur le plan politique, retenons l'importance d'avoir le soutien des élus pour aider à concrétiser les ambitions de transformation numérique. Entre autres, un cadre législatif et réglementaire adapté aux besoins actuels des organisations publiques doit être adopté pour que les démarches de transformation numérique puissent débiter.

Enfin, il est important de rappeler que, si des éléments changent, il y a aussi des constantes. Il s'agit principalement de l'organisation elle-même, de sa raison d'être, de ses valeurs et de ses principes de fonctionnement. La transformation numérique doit trouver son ancrage à l'intérieur de ces constantes.



Références

Al-Hashmi, A. et Darem, A. B. (2008). *Understanding Phases of E-government Project*. Repéré à : https://www.csi-sigegov.org/emerging_pdf/17_152-157.pdf.

Andersen, K. V. et Henriksen, H. Z. (2006). E-government maturity models: Extension of the Layne and Lee model. *Government Information Quarterly*, 23(2), 236-248. doi:10.1016/j.giq.2005.11.008.

Arrow, K. J. (1974). *The Limits of Organization*. W. W. Norton & Co.

Assemblée nationale du Québec. (2009). *Participer à une consultation publique*. Repéré à : <http://www.assnat.qc.ca/fr/exprimez-votre-opinion/participer-consultation-publique/index.html>.

Batara, E., Nurmandi, A., Warsito, T. et Pribadi, U. (2017). Are government employees adopting local e-government transformation? *Transforming Government: People, Process and Policy*, 11(4), 612-638. doi:10.1108/tg-09-2017-0056.

Bayona, S. et Morales, V. (2017). E-government development models for municipalities. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 17, S47-S59. doi:10.3233/jcm-160679.

Bernier, P. (2017). L'organisation de la fonction administrative de l'État. Dans N. Michaud (dir.), *Secrets d'États? Les principes qui guident l'administration publique et ses enjeux contemporains* (2^e éd., p. 403-442). Presses de l'Université du Québec.

Boudreau, C. et Caron, D. J. (2016). La participation citoyenne en ligne au Québec : conditions organisationnelles et leviers de transformation. *Recherches sociographiques*, 57(1), 155-176. doi:10.7202/1036625ar.

Burton, R. M., Obel, B. et Døjbak Håkonsson, D. (2015). *Organizational Design: A Step-by-Step Approach*. 3^e édition. Cambridge University Press.

Caron, D. J., Maheux, L., Bernardi, S. et Chartier, B. (2019a). *Document d'appui à l'élaboration d'un baromètre pour mesurer l'évolution de la mise en œuvre de la stratégie de transformation numérique du Québec. Étude de cas sur les hypothèses de transformation : le cas de Retraite Québec* [rapport de recherche]. Chaire de recherche en exploitation des ressources informationnelles, École nationale d'administration publique.

Caron, D. J., Chartier, B., Bernardi, S. et Maheux, L. (2019b). *Document d'appui à l'élaboration d'un baromètre pour mesurer l'évolution de la mise en œuvre de la stratégie de transformation numérique du Québec. Étude de cas sur les hypothèses de transformation : le cas du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec* [rapport de recherche]. Chaire de recherche en exploitation des ressources informationnelles, École nationale d'administration publique.

Caron, D. J. et Bernardi, S. (2019). *La gestion de l'information au sein des administrations publiques. Essai de typologie* [rapport de projet de recherche]. Chaire de recherche en exploitation des ressources informationnelles, École nationale d'administration publique.

Douillet, A.-C., Lebrou, V. et Sigalo Santos, L. (2019). Transversalité. Dans L. Boussaguet, S. Jacquot et P. Ravinet (dir.), *Dictionnaire des politiques publiques* (p. 658-666). Repéré à : <https://www.cairn.info/dictionnaire-des-politiques-publiques--9782724625110-page-658.html>.

Emploi et Développement social Canada. (2019). *Sondage sur l'expérience client 2018-2019* [rapport de recherche]. Repéré à : http://epe.lac-bac.gc.ca/100/200/301/pwggsc-tpsgc/por-ef/employment_social_development_canada/2019/101-18-f/rapport.pdf.

Galbraith, J. R. (1974). Organization design: An information processing view. *Interfaces*, 4(3), 28-36. doi:10.1287/inte.4.3.28.

Gautrin, H.-F. (2004). *Rapport sur le gouvernement en ligne : vers un Québec branché pour ses citoyens*. Gouvernement du Québec. Repéré à : <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs47292>.

Goldfarb, A. et Tucker, C. (2019). Digital economics. *Journal of Economic Literature*, 57(1), 3-43. doi:10.1257/jel.20171452.

Goody, J. (1986). *The Logic of Writing and the Organization of Society*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511621598.

Gouvernement du Québec. (2015). *Stratégie gouvernementale en TI : rénover l'État par les technologies de l'information*. Repéré à : https://www.tresor.gouv.qc.ca/fileadmin/PDF/ressources_informationnelles/strategie_ti/strategie_ti.pdf.

Gouvernement du Québec. (2019a). *Mon dossier citoyen*. Repéré à : <https://mondossiercitoyen.gouv.qc.ca/General/index.aspx>.

Gouvernement du Québec. (2019b). *Stratégie de transformation numérique gouvernementale 2019-2023*. Repéré à : <http://www.fil-information.gouv.qc.ca/Pages/Article.aspx?idArticle=2706034245>.

GOV.UK. (2017). *Government Transformation Strategy*. Repéré à : https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/590199/Government_Transformation_Strategy.pdf.

Hiller, J. S. et Bélanger, F. (2001). *Privacy strategies for electronic government* [rapport de recherche]. Repéré à : <http://www.businessofgovernment.org/sites/default/files/PrivacyStrategies.pdf>.

Kernaghan, K. (2012). Integrated Services. Dans L. Côté et J.-F. Savard (dir.), *Encyclopedic Dictionary of Public Administration*. Repéré à : http://www.dictionnaire.enap.ca/Dictionnaire/63/Index_by_word.enap?by=word&id=29.

Layne, K. et Lee, J. (2001). Developing fully functional e-government: A four stage model. *Government Information Quarterly*, 18(2), 122-136.

Lusta, A. A. B. et Aktas, Y. (2017). The five models for e-government. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 3(2), 87-93.

Mondoux, A. (2011). *Histoire sociale des technologies numériques : de 1945 à nos jours*. Nota Bene.

Pedersen, K. (2018). E-government transformations: Challenges and strategies. *Transforming Government: People, Process and Policy*, 12(1), 84-109. doi:10.1108/tg-06-2017-002.

Revenu Québec. (2018). *Services en ligne de Revenu Québec : plus facile que jamais*. La Presse. Repéré à : <https://www.lapresse.ca/xtra/ministere-du-revenu/201803/09/01-5156748-services-en-ligne-de-revenu-quebec-plus-facile-que-jamais.php>.

Technologies numériques et efficacité organisationnelle

Rose, J., Holgersson, J. et Söderström, E. (2019). Designing innovative digital services for government: A business model canvas adaptation. Dans *ECIS 2019 Proceedings*. Repéré à : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1326087/FULLTEXT01.pdf>.

Samson et associés. (2015, 13 mars). *March 2015 Independent Performance Evaluation*. Canada health infoway. Repéré à : <https://www.infoway-inforoute.ca/en/component/edocman/2601-march-2015-independent-performance-evaluation/view-document?Itemid=0>.

Santiso, C. (2019). Révolution numérique et transformation de l'action publique. *Politique étrangère*, 2(été), 129-142. doi:10.3917/pe.192.0129.

Scholta, H., Mertens, W., Kowalkiewicz, M. et Becker, J. (2019). From one-stop shop to no-stop shop: An e-government stage model. *Government Information Quarterly*, 36(1), 11-26. doi:10.1016/j.giq.2018.11.010.

Supiot, A. (2015). *La gouvernance par les nombres*. Fayard.

Van der Meulen, R. (2016, 26 mai). *When Less Becomes More: The Journey to Digital Government*. Gartner. Repéré à : <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/when-less-becomes-more-the-journey-to-digital-government/>

Vismann, C. (2008). *Files: Law, Media and Technology*. Stanford University Press.

Section 2.5

**La transformation
numérique à l'œuvre
dans plusieurs secteurs**



Chapitre 15

LES ENJEUX DE LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE POUR LE SECTEUR FINANCIER

Michel Magnan

Professeur à l'École de gestion John-Molson de l'Université Concordia, titulaire de la Chaire de gouvernance d'entreprise S.A. Jarislowsky, directeur du Centre Desjardins d'innovation en financement d'entreprise, chercheur et fellow au CIRANO

Robert Normand

Directeur de projets au CIRANO

Bryan Campbell

Professeur émérite à l'Université Concordia, chercheur et fellow au CIRANO

Résumé

Les institutions financières sont à l'avant-garde de la transformation numérique de notre économie. Toutefois, les technologies et modèles opérationnels sous-tendant cette transformation remettent en cause le statu quo, notamment en matière d'emploi. Dans ce texte, nous présentons tour à tour le contexte socio-économique du secteur financier en matière d'emploi et de rentabilité ainsi que les enjeux de transformation numérique auxquels les institutions financières font face. Notre analyse est fortement inspirée par des entretiens avec des dirigeants d'institutions financières de différentes tailles, lesquelles sont actives dans les secteurs bancaire, d'assurances ou de gestion de patrimoine. Elle s'appuie en outre sur la consultation de données socioéconomiques publiées par les agences gouvernementales (par exemple Statistique Canada), sur les études et commentaires récents publiés par différents consultants spécialisés, sur les informations publiées par les institutions financières canadiennes et étrangères et sur des textes d'analyse de commentateurs du monde financier¹.

Introduction

Quoique durement frappées par la crise financière de 2007-2009, les institutions financières nord-américaines affichent depuis des taux de croissance et de rentabilité fort enviables. Ainsi, depuis cette crise, les banques canadiennes ont affiché les meilleurs rendements boursiers parmi les banques des principales économies à l'échelle mondiale (Bank for International Settlements, 2018). Cependant, cette performance financière ne s'est pas traduite par une croissance comparable des niveaux d'emploi. Le tableau 15-1 montre l'évolution récente de l'emploi dans le secteur financier canadien. Quelques constats qui découlent de ces données sont importants. Premièrement, en 2017, le secteur de l'intermédiation financière (essentiellement les banques, les caisses Desjardins et les caisses d'épargne ou « *credit unions* ») représente 52 % de la main-d'œuvre du secteur financier, soit 373 000 personnes sur un total de 713 000. Les secteurs des assurances (221 000 employés, 31 % du total) et des valeurs mobilières (119 000 employés, 17 % du total) complètent ce tableau. Deuxièmement, la croissance de l'emploi dans le secteur financier a été relativement faible au cours de cette période, avec un taux de croissance annuel cumulé de 0,6 %, ce qui est largement inférieur à la croissance démographique du Canada, qui a dépassé 1 % par an durant cette période, et au taux de croissance annuel de l'emploi, lequel a atteint 1,4 %. Troisièmement, si l'emploi dans le secteur financier canadien a légèrement augmenté au cours de la période étudiée, la part du Québec a diminué, le nombre d'employés dans chacun des sous-secteurs étant inférieur en 2017 à celui affiché en 2012. Le Québec représente maintenant environ 20 % des employés dans le secteur financier canadien (contre 22 % en 2012). Le seul sous-secteur où le Québec tire son épingle du jeu est celui des assurances, avec près de 24 % des employés au pays (contre 27 % en 2012). De fait, seul l'Ontario a vu sa part des employés dans le secteur financier augmenter plus vite que sa population. La proportion des employés du secteur financier localisés au Québec (20 %) correspond approximativement au poids économique proportionnel de la province (19 %)².

Les enjeux de la transformation numérique pour le secteur financier

Emplois dans le secteur financier (en milliers)						
Extrait et adaptation du tableau de l'emploi salarié par industrie selon l'Enquête sur l'emploi, la rémunération et les heures de travail, Canada, 2012-2017						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Intermédiation financière						
Canada (incluant le Québec)	361	362	363	362	371	373
Québec	76	76	75	75	74	73
Assurances						
Canada (incluant le Québec)	206	208	210	215	219	221
Québec	55	55	55	55	53	54
Valeurs mobilières						
Canada (incluant le Québec)	116	119	119	121	119	119
Québec	19	18	18	19	18	18
Tous secteurs confondus						
Canada (incluant le Québec)	683	689	692	698	709	713
Québec	150	149	148	149	145	145

Tableau t/2020-c15-1

Source : Statistique Canada, *Enquête sur l'emploi, la rémunération et les heures travaillées*, 2017.
Adapté par l'Institut de la statistique du Québec.

En se concentrant sur le sous-secteur de l'intermédiation financière, compte tenu de son importance relative, on peut constater que le peu de dynamisme de l'emploi dans le secteur financier n'est pas lié à des difficultés financières menant à des rationalisations. En effet, de 2013 à 2019, les bénéfices des six grandes banques canadiennes (Banque Royale, CIBC, BMO, Banque Scotia, TD et Banque Nationale) se sont accrus de 50 % pour atteindre 47 milliards de dollars annuellement (selon les derniers chiffres divulgués à l'automne 2019). Les dividendes ont également augmenté de 50 % durant cette même période. Pour l'exercice terminé le 31 octobre 2019, le rendement de l'actif moyen des banques canadiennes a atteint 15,1 %, en légère baisse par rapport à 2018, traçant un portrait fort avantageux de la performance des banques canadiennes. Ces dernières figurent dans le peloton de tête mondial en termes de rentabilité pour les actionnaires. En outre, en dépit de l'accroissement plus que modéré de l'emploi, on note que les salaires versés ont bondi de 35 % au cours de cette période. Somme toute, le secteur bancaire est en croissance et très rentable, mais il

affiche un nombre d'employés relativement stagnant, avec des salaires en hausse et une concentration de plus en plus grande vers la grande région de Toronto³.

Principaux facteurs sous-tendant l'évolution de l'emploi dans le secteur financier

Nos entretiens avec différents acteurs du secteur financier, essentiellement des dirigeants d'institutions et des consultants, nous indiquent que l'évolution du marché de l'emploi dans le secteur financier est liée à des facteurs structurels et spécifiques à la configuration des institutions financières canadiennes⁴. Parmi les facteurs structurels, trois sont intimement reliés et découlent de l'évolution des technologies, à savoir : 1) la transformation numérique des services financiers, 2) la mise à niveau des plateformes informatiques par les institutions, 3) la rationalisation et l'automatisation des processus d'affaires, surtout ceux perçus comme ayant une faible valeur ajoutée. Ces facteurs ont pour toile de fond le rétrécissement des marges bénéficiaires sur les activités de base d'intermédiation financière, c'est-à-dire le revenu net d'intérêt, en raison de la baisse séculaire des taux d'intérêt, laquelle a pour effet d'accélérer la course à l'amélioration de la productivité parmi les institutions financières. Or, dans ce contexte, le recours aux technologies devient un impératif et amène les institutions financières à modifier leur modèle d'affaires.

L'émergence de nouveaux modèles d'affaires, basés notamment sur une virtualisation grandissante du travail et sur la numérisation de l'offre de services, a des conséquences importantes sur la nature des talents et des compétences dont les institutions ont besoin. L'apparente stagnation des niveaux d'emploi observée dans plusieurs institutions cache en fait deux réalités diamétralement opposées. D'une part, nous observons une contraction du personnel ayant des compétences moins techniques ou élémentaires (caissiers dans les points de service bancaires, souscripteurs chez les assureurs, techniciens administratifs, etc.), lequel œuvre principalement dans les services délocalisés. En contrepartie, plusieurs fonctions autrefois assumées dans les points de service locaux ou régionaux sont dorénavant centralisées dans des centres de services partagés, souvent au siège social de l'institution ou dans ses environs. Les gains d'emplois en

Ontario, alors que des pertes sont enregistrées ailleurs au Canada, illustrent cette tendance à la relocalisation vers les principales places d'affaires, soit les sièges sociaux, qui sont pour la plupart à Toronto. D'autre part, les institutions recrutent du personnel ayant des compétences en informatique et technologie ainsi que dans des disciplines connexes (par exemple le marketing numérique), activité qui les met en concurrence entre elles et avec d'autres acteurs économiques (par exemple les entreprises du secteur des jeux vidéo), dont certains jouissent d'avantages fiscaux et aussi d'une aura plus attirante auprès des jeunes professionnels.

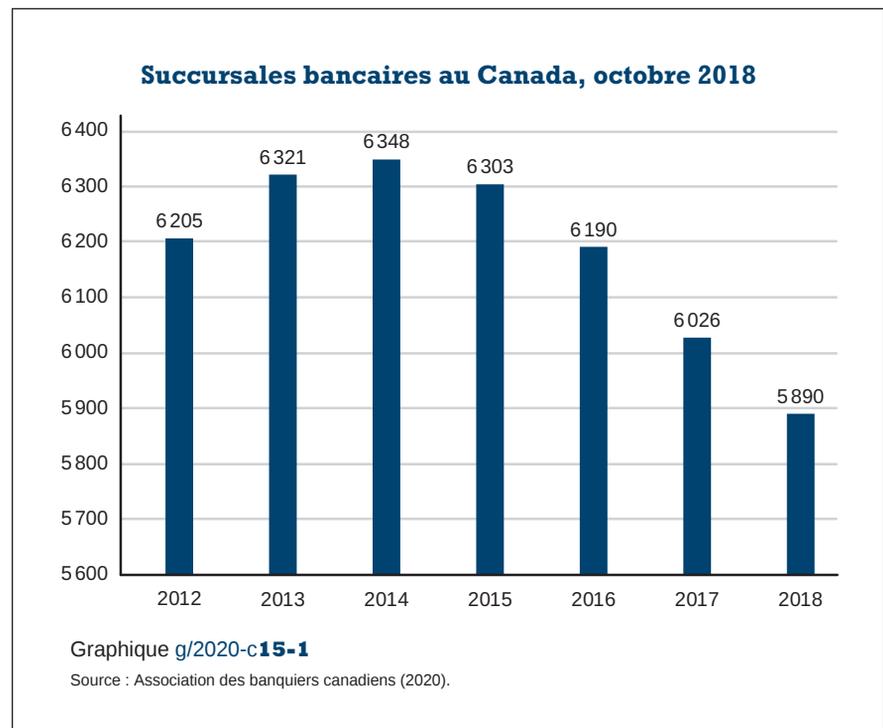
Nous focalisons notre attention sur la dimension technologique, mais le constat s'impose que l'on ne peut évaluer l'impact des technologies sur l'emploi dans le secteur sans prendre en compte le contexte dans lequel elles sont mises en application.

Transformation numérique des services financiers

L'avènement de plateformes Web de services financiers et, plus récemment, la numérisation de l'offre de services induisent une mutation dans la nature et la localisation de l'emploi du secteur. Le développement d'une offre de services financiers numériques ainsi que la popularité grandissante de cette offre auprès de la clientèle ont un impact majeur sur l'emploi en première ligne ou sur le terrain (par exemple en ce qui a trait au personnel dans les points de service pour les banques et Desjardins, aux agents d'assurance ou d'indemnisation pour les assureurs). Selon les informations collectées auprès de dirigeants de diverses institutions financières que nous avons interrogés, il semble que la main-d'œuvre de première ligne est en diminution depuis plusieurs années et que cette tendance devrait se poursuivre dans l'avenir. Ce mouvement de réduction du personnel de première ligne dans les services financiers est observable à l'échelle canadienne et ailleurs dans le monde⁵. L'ancien PDG de Citicorp, Vikram Pandit, projette même une réduction allant jusqu'à 30 % des heures travaillées globalement dans le secteur de la finance en raison des transformations numériques⁶. Son affirmation est cohérente avec les conclusions de plusieurs analystes⁷. À cet égard, les emplois de soutien, notamment dans les services aux particuliers, devraient être particulièrement touchés. À titre d'exemple, les robots conseillers, malgré des débuts timides au

Canada, prendront de plus en plus d'importance auprès des clientèles jeunes et éduquées et éventuellement contribueront au déplacement des conseillers et des planificateurs financiers. Bien que les cas de planification plus complexes devraient toujours requérir une approche personnalisée, plusieurs clients préféreront une approche en ligne systématique et peu dispendieuse. Pour la grande majorité des employés des services bancaires, la transformation numérique changera le type d'activités que les employés feront et leurs responsabilités au cours des prochaines années.

La transformation numérique se manifeste également par la fermeture de points de service bancaires au Canada. Les services aux particuliers, qui nécessitent beaucoup de main-d'œuvre, sont progressivement remplacés par des solutions numériques moins dispendieuses et plus accessibles pour une clientèle ayant accès à Internet.



Si certaines institutions bancaires continuent à ouvrir des points de service au Québec, il faut souligner que ces établissements ont des superficies relativement modestes et un niveau de personnel restreint. La particularité de ces points de service est leur focalisation sur la vente de services aux clients : toutes les tâches à moindre valeur ajoutée ou de nature cléricale ont été évacuées. Le Mouvement Desjardins poursuit une stratégie similaire avec les regroupements de caisses et l'optimisation des points de service. Ainsi, alors que le Mouvement a déjà compté plus de 1 000 caisses dans les années 1990, le nombre tourne autour de 270 aujourd'hui. L'impact de l'avènement du numérique se reflète dans l'utilisation des modes d'opérations bancaires : alors que le nombre d'opérations par voie de guichet automatique ou de guichet traditionnel est en chute libre, il est en hausse continue et spectaculaire sur les canaux numériques, en ligne (Web) ou mobiles (Association des banquiers canadiens, 2019).

Le cas des directeurs de comptes commerciaux des banques

Le secteur « Entreprises » d'une grande banque canadienne offre un exemple qui illustre bien l'impact des technologies sur la productivité et l'emploi. Historiquement, les directeurs de comptes de la banque gardaient le contact avec leurs clients d'affaires au moyen de rencontres périodiques et d'appels au besoin. En général, dans un tel modèle, un directeur de comptes peut voir en moyenne quatre clients par jour. Toutefois, en tirant avantage des nouveaux outils technologiques (par exemple l'interface vidéo et le clavardage), un directeur de comptes peut dorénavant planifier environ 10 rendez-vous en vidéo par jour, ce qui lui permettant d'être en contact visuel avec ses clients de manière récurrente à intervalles réguliers. Le développement d'une plateforme relationnelle numérique permet ainsi au banquier et à son client d'avoir accès à la même information en même temps, ce qui facilite les échanges. En comparaison, les interfaces conçues à partir de systèmes traditionnels sont souvent défailtantes à cet égard. Ce potentiel important de rationalisation des effectifs associé aux différentes applications technologiques devrait d'ailleurs s'accroître au cours des prochaines années. Les grandes institutions financières et bancaires et les compagnies d'assurances ont pour la plupart mis sur pied des laboratoires pour intégrer les nouvelles technologies. Plusieurs projets de recherche issus de ces laboratoires déboucheront vers un accroissement des services

automatisés qui ont pour objectif de systématiser les tâches répétitives, en augmentant notamment la productivité des directeurs de comptes, tout en offrant un meilleur suivi à la clientèle.

Le cas des assureurs de dommages

L'avènement du numérique a trois incidences sur l'emploi parmi les assureurs de dommages. D'une part, plusieurs assureurs ont développé des applications numériques permettant l'obtention de soumissions et le dépôt de réclamations en ligne. Ce nouveau canal de services réduit la demande de services auprès des centres d'appel d'agents d'assurance ou d'indemnisation. Le développement d'applications numériques a amené les assureurs à réduire de manière considérable le nombre de questions posées aux assurés afin que l'interaction entre l'employé et le client ait une durée raisonnable. Ces nouveaux questionnaires initialement préparés pour l'offre numérique ont ensuite migré vers les autres canaux utilisés par les assurés, principalement les centres d'appel. Puisque les questionnaires sont beaucoup plus courts, le temps moyen consacré à chaque appel est donc réduit, et un même agent peut donc gérer un plus grand nombre d'appels, ce qui réduit d'autant la pression sur l'embauche et la rétention d'agents. D'autre part, si leurs besoins en agents d'assurance ou d'indemnisation sont réduits par l'apparition de ces innovations technologiques, les assureurs se voient néanmoins dans l'obligation d'embaucher des ressources spécialisées (marketing et analytique numérique, informatique, programmation) afin de développer et de maintenir à niveau leur offre numérique.

Mise à niveau des plateformes informatiques et rationalisation des processus d'affaires

Après plusieurs années de restrictions en raison de la crise financière de 2007-2009, notamment en vue de recapitaliser leurs opérations, toutes les institutions financières sont maintenant engagées dans des efforts considérables pour mettre à niveau leurs plateformes informatiques. Pour plusieurs institutions, ces plateformes datent des années 1970, sont peu flexibles, requièrent de nombreux développements pour pouvoir être liées aux applications plus modernes, et exigent des compétences de programmation

dans des langages désuets. L'ampleur des investissements requis pour cette mise à niveau peut être de l'ordre de plusieurs centaines de millions de dollars pour une entreprise d'envergure moyenne. À titre d'exemple, la Banque Royale du Canada affirme dépenser plus de 3 milliards de dollars par année en nouvelles technologies.

Parmi les obstacles à la croissance figure la nécessité d'avoir une offre de services de qualité par voie numérique. Ceci constitue un enjeu critique pour les institutions de taille plus modeste, car ces dernières ne bénéficient pas des économies d'échelle accessibles aux institutions de grande taille. Ces efforts entraînent évidemment une demande soutenue de main-d'œuvre spécialisée, laquelle sera recrutée et travaillera essentiellement autour du siège social.

Une autre implication de cette migration de la clientèle vers les plateformes numériques est la nécessité d'embaucher du personnel ayant des compétences technologiques (marketing Web, informatique, analytique des données, etc.), recruté et basé surtout autour du siège social, soit à Montréal ou à Québec pour les institutions québécoises et à Toronto pour la plupart des institutions non québécoises. Ces spécialistes en forte demande choisiront pour plusieurs de faire carrière dans ces grands centres où les possibilités de carrière sont plus grandes. Il en résulte que la gestion des talents est un défi de tous les instants pour les institutions financières à l'extérieur des grands centres.

Impact potentiel de l'intelligence artificielle et de l'analytique des données

À l'heure actuelle, compte tenu des développements en intelligence artificielle (IA) et en analytique des données, il est possible d'envisager l'automatisation complète de certains processus d'affaires qui, actuellement, nécessitent des effectifs importants. Par exemple, pour les assureurs, le processus d'indemnisation représente près de la moitié de la main-d'œuvre, en plus de contribuer à la majeure partie des coûts. On peut escompter que, dans relativement peu d'années, l'indemnisation suite aux accidents d'auto sera automatisée (plus de 50 % des primes perçues par les assureurs de dommages canadiens concernent l'assurance automobile). Ainsi, suite à un accrochage, l'assuré photographiera les dommages sur son véhicule avec son téléphone intelligent et enverra le tout à son assureur. Chez l'assureur,

les photographies seront analysées par les systèmes de reconnaissance visuelle soutenus par l'IA et l'analytique des données, et une estimation sera effectuée. En outre, un rendez-vous sera automatiquement généré pour que l'assuré se rende chez un carrossier autorisé afin que celui-ci effectue les réparations requises. Le carrossier sera automatiquement payé par l'assureur. Il est possible, et même probable, qu'aucun employé de l'assureur ne sera impliqué dans toutes ces démarches.

Innovation et investissement en technologie : un enjeu particulier pour certaines institutions

Un autre enjeu pour les institutions financières est la nécessité d'investir des sommes considérables en technologie dans le but de conserver leur compétitivité dans l'offre de services numériques et d'améliorer la productivité de leurs processus d'affaires. Or, ces investissements requièrent des ressources financières (capital) et humaines considérables dans des marchés tendus, ce qui peut constituer un enjeu pour des acteurs dont les moyens sont limités. L'émergence des *fintech* et des *assurtech* offre possiblement de bonnes occasions à cet égard, une entreprise de moyenne ou petite taille pouvant s'associer à une *fintech* pour implanter et déployer une innovation⁸. Toutefois, le taux de mortalité des *fintech* est élevé, et de telles entreprises préfèrent souvent traiter avec des institutions de grande taille recelant un plus grand potentiel de déploiement qu'avec des joueurs petits ou moyens. Enfin, compte tenu de leur nature, les règles du jeu du capital de risque s'appliquent aux *fintech* : en moyenne, sur une dizaine d'innovations, neuf seront des échecs ou des demi-succès et une seule connaîtra le succès, offrant un rendement représentant plusieurs fois la mise de fonds des investisseurs. Miser sur un seul partenaire est donc risqué. Plusieurs organisations importantes (par exemple Intact, BMO) ont donc créé des fonds de capital de risque focalisés sur les entreprises *fintech-assurtech*, le tout en vue de repérer celles ayant le meilleur potentiel. Une telle option n'est pas offerte aux institutions disposant de ressources plus modestes.

Dans le contexte réglementaire actuel, l'impact potentiel des *fintech* et *assurtech* sur les modèles d'affaires existants ainsi que sur le niveau de concurrence dans le marché semble relativement modeste (comme les

possibilités qu'ils peuvent apporter aux institutions qui seront les premières à adopter leurs innovations). En termes d'incidence sur l'emploi, que ce soit au Québec ou au Canada, il semble encore trop tôt pour tirer des conclusions définitives. Ce que l'on peut avancer, c'est que la montée des *fintech* et des *assurtech* risque d'accélérer les tendances récentes dans l'amélioration de la productivité et d'accentuer la pression à la baisse sur les niveaux d'emploi. Quoique l'analogie soit imparfaite, Alibaba (qui possède Ant Financial et offre le service de paiement numérique Alipay, lequel est largement utilisé en Chine et menace même les banques traditionnelles) affiche une valeur boursière de 480 milliards de dollars avec seulement 66 000 employés. En comparaison, la plus grande banque canadienne, la Banque Royale, affiche une capitalisation boursière de 150 milliards de dollars, mais compte 82 000 employés⁹. Une analogie similaire peut être réalisée avec Apple, Amazon et Facebook en Amérique du Nord.

Le cas « Economical Insurance »

L'expérience récente de Economical Insurance est particulièrement instructive quant à la capacité des institutions de taille intermédiaire à relever les défis que présentent la révolution numérique et la modernisation des plateformes informatiques. Cette entreprise réalise un chiffre d'affaires annuel d'environ 2 milliards de dollars (contre 8 milliards de dollars pour Intact, le leader dans le marché canadien). Depuis quelques années, l'entreprise s'est engagée dans le développement et le lancement d'une offre d'assurances complètement distincte et numérique : Sonnet^{md}. Cependant, les coûts associés à ce projet ainsi que la détérioration des conditions de marché en assurance de dommages (notamment pour l'assurance automobile) ont fait en sorte que, depuis 2015, l'entreprise a réalisé des pertes sur ses activités d'assurance et a vu une détérioration importante de ses ratios de capitalisation. Uniquement en 2018, les investissements dits stratégiques de Economical, c'est-à-dire essentiellement pour Sonnet^{md} et pour un autre projet (Vyne), ont atteint plus de 130 millions de dollars. Economical étant une mutuelle d'assurance, elle n'a pas de comptes à rendre aux analystes et investisseurs chaque trimestre, ce qui peut représenter un avantage dans ces circonstances. Toutefois, la contrepartie est qu'elle a difficilement accès aux marchés des capitaux. Selon certains acteurs de ce segment, cette initiative pourrait compromettre l'indépendance de l'entreprise à moyen terme. De fait, l'entreprise a amorcé un processus de démutualisation qui lui permettrait d'accéder aux marchés des

capitaux ou de se vendre à un concurrent, mais sa marge de manœuvre est mince et sa pérennité est compromise par ce projet. Ce cas illustre bien l'importance des économies d'échelle en investissements technologiques et la nécessité d'avoir accès à des ressources financières importantes pour assurer la finalisation des projets de transformation.

Défis en matière de recrutement et de rétention des talents

Il ressort clairement des entretiens que nous avons réalisés ainsi que de la revue des publications spécialisées que les institutions financières font face à des défis importants de recrutement et de rétention des talents, en particulier à l'extérieur des grands centres, même si en parallèle elles réduisent leurs effectifs dans certains créneaux d'activité. Ces défis sont de plusieurs ordres et ont également une incidence certaine sur le nombre total d'emplois dans le secteur.

Les institutions financières sont en concurrence directe avec plusieurs autres secteurs de l'économie pour le recrutement et la rétention de professionnels en technologies de l'information (analystes, programmeurs, etc.). Le défi particulier auquel elles font face à cet égard est, premièrement, qu'une partie importante du travail à accomplir vise le remplacement ou la mise à niveau de systèmes patrimoniaux et de plateformes désuètes (souvent basés sur des programmes développés en langage Cobol ou même assembleur), un travail qui n'est pas nécessairement perçu comme particulièrement attrayant par des jeunes ayant Ubisoft ou Google en tête. Deuxièmement, afin d'optimiser leur offre de services et de la numériser, les institutions financières recrutent de plus en plus de spécialistes des données (par exemple en analytique des données ou en intelligence artificielle) ainsi que des personnes présentant de nouveaux profils (par exemple des ingénieurs spécialisés en processus ou en innovation). Cependant, si la perspective de faire carrière dans une grande institution financière relativement bureaucratique peut en attirer certains, elle peut aussi en décourager plusieurs. En outre, ces profils sont recherchés par un grand nombre d'entreprises de toutes sortes. Troisièmement, en parallèle, les institutions financières réduisent graduellement le nombre d'emplois demandant peu

de compétences particulières ou requérant des compétences génériques (par exemple le personnel de bureau en succursale). Nous élaborons maintenant davantage sur ce point.

Nous constatons que les entreprises du secteur financier sont à la recherche des mêmes profils de compétences que les sociétés de logiciels, de commerce électronique ou de jeux vidéo, et ce, sur les mêmes marchés, à savoir Montréal et Québec. Or, la capacité de formation dans ces deux marchés est limitée et l'attractivité relative du secteur financier est un enjeu. Pour les professionnels de plus haut niveau ayant des expertises de pointe critiques pour les services financiers, Montréal et Québec demeurent des marchés relativement petits, ce qui réduit leur attractivité aux yeux des talents hors Québec. En d'autres termes, si un tel professionnel travaille chez Desjardins à Montréal et veut changer d'employeur, il n'y a que la Banque Nationale qui peut présenter une taille et des défis comparables (et vice-versa). Ce même professionnel, s'il est plutôt basé à Toronto, aura comme marché les cinq grandes banques canadiennes, en plus des grands assureurs (de personnes et de dommages) ainsi que certaines grandes firmes de gestion de patrimoine. Il en résulte, selon nos rencontres avec des représentants des grandes institutions financières au Québec, que l'attraction et la rétention du personnel ayant une expertise de haut niveau en technologie est un défi de tous les instants, ce défi étant exacerbé pour les entreprises en région.

Perspectives futures en matière d'emploi

Que nous réserve l'avenir à l'égard de l'emploi dans le secteur financier ? Tous les répondants nous mentionnent qu'ils s'attendent à ce que leur entreprise poursuive sa croissance, mais sans que le niveau d'emploi augmente. De fait, celui-ci pourrait continuer à diminuer. Une analyse de la performance financière de banques scandinaves et australiennes, lesquelles sont perçues comme particulièrement innovatrices en matière de productivité, nous révèle que tout est possible. En effet, les grandes banques de ces deux régions ont des ratios de productivité inférieurs d'environ 10 % à 20 % à ceux affichés par les banques canadiennes. En d'autres termes, alors qu'il en coûte environ entre 0,50 et 0,60 dollar à une banque canadienne pour générer 1,00 dollar de revenus, ce ratio passe entre 0,40 et 0,50 dollar en Scandinavie et en Australie¹⁰. Si la tendance de ces deux régions se

répand, et rien n'indique le contraire, on peut donc envisager une stagnation ou une diminution continue de l'emploi dans le secteur financier québécois, malgré le fait que ce secteur soit rentable et en croissance.

Conclusion

De manière globale, les analyses prospectives de plusieurs cabinets-conseils en services financiers confirment notre diagnostic. Par exemple, PwC (2014) souligne que les technologies permettent aux banques de proposer à leurs clients une offre globale de services, conseils et solutions ciblée sur leurs besoins. Les banques ayant le leadership à cet égard seront en mesure de maintenir des marges intéressantes. Toutefois, il faut aussi compter que l'avènement des *fintech* permet à des acteurs nouveaux ou non conventionnels de s'introduire dans un marché sans avoir à assumer les coûts reliés aux systèmes informatiques patrimoniaux devant être mis à niveau. Par conséquent, toutes les institutions, même celles visant les clients à haute valeur ajoutée, auront besoin de rationaliser leur structure de coûts, en plus d'investir dans l'analytique des données et la conformité. En outre, la numérisation rend les clients plus mobiles et exigeants. De l'avis de PwC, les banques devront continuer à réduire leurs coûts au cours des prochaines années afin d'améliorer leur productivité. Des réductions de coût unitaire de l'ordre de 50 % sur un horizon de 5 à 6 ans sont même mentionnées. Les exemples des banques scandinaves et australiennes illustrent bien que l'atteinte de ces objectifs de réduction de coûts est possible pour les banques canadiennes, ce qui n'augure rien de positif pour leur niveau d'emploi.

Les pressions sur les coûts ainsi que les investissements importants en technologies pourraient amener le développement d'une infrastructure de services partagée entre des firmes d'un même secteur. En d'autres termes, plutôt que de développer en parallèle des systèmes et processus d'affaires non différenciés et coûteux, il est possible d'entrevoir que certaines institutions parmi les plus performantes et d'avant-garde pourront vendre ou louer leur infrastructure à d'autres acteurs sectoriels, le tout afin d'atteindre des économies d'échelle et d'optimiser l'exploitation des différentes institutions impliquées. À titre d'exemple, la Financière Banque Nationale assume et exploite les plateformes technologiques d'un ensemble de courtiers indépendants, le tout moyennant honoraires. Une autre possibilité est que des concurrents se regroupent pour le développement d'outils et de

services communs. La récente création de Gestion de patrimoine Aviso par le Mouvement Desjardins et les caisses d'épargne du Canada est un autre exemple de regroupement de plateformes technologiques et de services dans le but d'atteindre une masse critique. Quelques répondants mentionnent également la possibilité pour certains joueurs de taille plus modeste d'entrer dans des relations de « coopétition », à savoir coopérer pour le développement de certains services ou de plateformes communes tout en demeurant en concurrence dans le marché. Ce concept relativement récent est utilisé dans le secteur des technologies, notamment aux États-Unis, et dans les services financiers, particulièrement en Europe. L'appui des régulateurs est toutefois requis. Par contre, ces efforts risquent également d'affecter le niveau d'emploi, ainsi que sa répartition ou sa localisation.

Le développement de l'intelligence artificielle affectera la plupart des métiers de la finance et entraînera certes des remplacements, mais également une amélioration de leur fonctionnalité et productivité. Certains métiers liés à l'analyse des données (par exemple celui d'actuaire) et aux technologies de l'information seront en croissance soutenue dans un marché de l'emploi en finance au mieux relativement stable. En outre, il y aura une pression pour que les professionnels actuels dans ces disciplines se réoutillent pour profiter pleinement des avancées technologiques. Enfin, de nouveaux métiers émergeront probablement dans la foulée de la montée de l'intelligence artificielle : des formateurs de machines (« *trainers* »), des vulgarisateurs (« *explainers* ») et des éthiciens (« *sustainers* ») ; le tout en vue de faire le pont entre les métiers traditionnels et leurs manières de faire et les nouvelles technologies et applications (KPMG, 2017). À cet égard, les établissements d'enseignement supérieur (cégeps, universités, écoles spécialisées) auront un rôle important à jouer afin de s'assurer que leurs diplômés ont les compétences nécessaires mais surtout la polyvalence voulue pour rediriger leurs compétences ou en développer de nouvelles. La formation continue aura également un rôle à jouer.



Références

Association des banquiers canadiens. (2019, 13 mars). *Fiche info. Les Canadiens et leurs activités bancaires*. Repéré à : <https://cba.ca/technology-and-banking?l=fr>.

Association des banquiers canadiens. (2020, 25 mai). *Total des succursales bancaires au Canada et par province*. Repéré à : <https://cba.ca/bank-branches-in-canada>.

Bank for International Settlements. (2018). *CGFS Papers No 60: Structural changes in banking after the crisis*. Repéré à : <https://www.bis.org/publ/cgfs60.pdf>.

Bessen, J. E. (2016). How computer automation affects occupations: Technology, jobs, and skills. *Boston Univ. School of Law, Law and Economics Research Paper*, 15-49.

Chanjaroen, C. (2017, 12 septembre). Pandit Says 30% of Bank Jobs May Disappear in Next Five Years. *Bloomberg*. Repéré à : <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-09-13/ex-citi-ceo-pandit-says-30-of-bank-jobs-at-risk-from-technology>.

Chui, M., Manyika, J., et Miremadi, M. (2016, juillet). Where machines could replace humans—and where they can't (yet). *McKinsey Digital*. Repéré à : <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/where-machines-could-replace-humans-and-where-they-cant-yet>.

Finance Montréal et EY. (2017). *Comment accélérer l'essor de l'écosystème FinTech à Montréal? Constats et axes de développement*. Repéré à : <https://www.finance-montreal.com/wp-content/uploads/2017/12/ey-accelerating-development-in-montreals-fintech-ecosystem-fr.pdf>.

KPMG. (2017). *Impact de l'intelligence artificielle sur le secteur des services financiers*. Finance Montréal. Repéré à : https://www.finance-montreal.com/wp-content/uploads/2018/05/Finance-Montreal_Rapport-de-l'IA-etude_vFINAL.pdf.

PwC. (2014). *Retail Banking 2020 Evolution or Revolution?* Repéré à : <https://www.pwc.com/gx/en/banking-capital-markets/banking-2020/assets/pwc-retail-banking-2020-evolution-or-revolution.pdf>.

Statistique Canada. (2017). *Enquête sur l'emploi, la rémunération et les heures travaillées*.

Statistique Canada. *Tableau 36-10-0222-01, Produit intérieur brut, en termes de dépenses, provinciaux et territoriaux, annuel (x 1 000 000)*. <https://doi.org/10.25318/3610022201-fra>

Notes

1. Ce chapitre est une adaptation d'un rapport de projet du CIRANO : <https://cirano.qc.ca/fr/sommaires/2020RP-19>.
2. Statistique Canada. *Tableau 36-10-0222-01*.
3. Statistique Canada. (2017). *Enquête sur l'emploi, la rémunération et les heures travaillées*. Adapté par l'ISQ.
4. Des entretiens ont été réalisés avec les présidents (chef des opérations et/ou chef de la direction) de quatre institutions financières d'envergure nationale et/ou régionale (dont trois assureurs), des membres de la direction de deux institutions financières d'envergure

Les enjeux de la transformation numérique pour le secteur financier

nationale, un consultant sénior d'un cabinet de services-conseils international et un dirigeant d'association d'institutions financières. Ces entretiens nous ont permis d'avoir accès à des informations relatives à l'emploi non disponibles publiquement, dont plusieurs sont présentées ci-après.

5. L'impact final sur le niveau d'emploi global dans le secteur est plus difficile à cerner et dépend de la capacité des individus à développer de nouvelles compétences ou à se réorienter avec succès. Voir à cet égard Bessen, J. E. (2016). How computer automation affects occupations: Technology, jobs, and skills. *Boston Univ. School of Law, Law and Economics Research Paper*, 15-49.
6. Entrevue avec Chanyaporn Chanjaroen de Bloomberg (12 septembre 2017) : <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-09-13/ex-citi-ceo-pandit-says-30-of-bank-jobs-at-risk-from-technology>.
7. Voir, entre autres, Chui, M., Manyika, J., et Miremadi, M. (2016, juillet). Where machines could replace humans—and where they can't (yet). *McKinsey Digital*. Repéré à : <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/where-machines-could-replace-humans-and-where-they-cant-yet> ; World Economic Forum. (2018). *The Future of Jobs Report. 2018*. Repéré à : http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_2018.pdf.
8. *Fintech* est un nouveau terme qui qualifie les entreprises proposant des solutions innovantes dans le secteur financier en utilisant des moyens technologiques. Le secteur *fintech* regroupe les entreprises qui se spécialisent dans un secteur particulier des services financiers (paiement, assurances, investissement, etc.) et utilisent la technologie pour améliorer et remettre en question de façon innovante les produits et services de ce secteur. Ce qualificatif ne s'applique pas seulement aux entreprises en démarrage, quoique très nombreuses, mais désigne également les entreprises plus matures. *Assurtech* est un domaine au sein du *fintech* portant sur l'intégration des technologies financières, notamment sur le plan de l'assurance de dommages. Voir Finance Montréal et EY. (2017). *Comment accélérer l'essor de l'écosystème fintech à Montréal ? Constats et axes de développement*. Repéré à : <https://www.finance-montreal.com/wp-content/uploads/2017/12/ey-accelerating-development-in-montreals-fintech-ecosystem-fr.pdf>.
9. La venue de l'*Open Banking* au Canada changerait certainement la donne relativement au rôle et à l'influence des *fintech*. Toutefois, compte tenu que le cadre réglementaire et législatif entourant une évolution dans ce sens n'est pas déterminé, et en l'absence d'exemples bien documentés ailleurs dans le monde, il est difficile de se prononcer quant aux conséquences de l'*Open Banking* tant sur les *fintech* que sur l'emploi.
10. Selon les données de 2017, obtenues de Bloomberg pour les banques suivantes : Canada : Banque Royale du Canada, Banque CIBC, Banque de Nouvelle-Écosse, Banque TD, Banque de Montréal, Banque Nationale du Canada, Mouvement Desjardins ; Australie : Westpac Banking, Australia and New Zealand Banking, Commonwealth Bank of Australia ; Scandinavie : Handelsbanken, Nordea, Swedbank.

Chapitre 16

LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE APPLIQUÉE À L'AGRICULTURE AU QUÉBEC

Annie Royer

Professeure agrégée à l'Université Laval,
chercheuse et fellow au CIRANO

Nathalie de Marcellis-Warin

Professeure titulaire à Polytechnique Montréal
et présidente-directrice générale du CIRANO

Ingrid Peignier

Directrice principale des partenariats et de
la valorisation de la recherche au CIRANO

Thierry Warin

Professeur titulaire à HEC Montréal,
chercheur et fellow au CIRANO

Avec la collaboration de Christophe Mondin, de Nounagnon Nick Elie Hounga et de Molivann Panot

Résumé

Augmentation de la productivité, meilleure qualité de vie, solution à la pénurie de main-d'œuvre et bénéfiques pour l'environnement sont autant de gains attendus de l'utilisation du numérique dans le secteur agricole québécois. La robotisation des tâches, le guidage automatique de la machinerie et l'usage de nouveaux outils de diagnostic à la fois matériels (drones) et logiciels (modèles prédictifs) en temps réel font déjà partie du paysage rural québécois. Toutefois, des enjeux d'ordre technique, éthique, organisationnel et institutionnel peuvent ralentir cette transformation. Comment le Québec agricole entreprend-il le virage numérique ? Ce chapitre dresse un portrait de l'utilisation du numérique dans un secteur où la donnée est devenue la nouvelle matière première ; le point central est mis sur la production laitière. Certains aspects qui découlent des changements en cours ici et ailleurs sont aussi abordés.

Introduction

L'agriculture du ^{xxi}e siècle affronte une concurrence internationale de plus en plus vive, ce qui ne l'empêche pas d'avoir à relever d'importants défis environnementaux et sociétaux. Pour ce faire, les technologies numériques, l'analyse des données, l'intelligence artificielle, les applications et les services fournis par voie numérique sont des outils majeurs (OCDE, 2018). Le numérique crée une agriculture dite de précision. Comparativement à l'agriculture traditionnelle, où les intrants sont appliqués de manière uniforme sur une parcelle donnée, l'agriculture de précision, en collectant des données sur le sol, la météorologie et le rendement d'une parcelle, détermine des zones qui seront traitées à des doses variables en fonction des besoins. Dans les élevages, l'agriculture de précision peut générer des données sur chaque animal, ce qui permet un suivi individuel et précis. L'intégration des données générées sur la ferme et leur mise en relation avec son écosystème offre de nouvelles méthodes pour mieux prévoir les risques, prendre des décisions en temps réel et optimiser la logistique, en plus d'accroître le potentiel de partage de l'innovation et du savoir. On parle alors d'agriculture numérique ou d'agriculture intelligente (*smart farming*).

Les bénéfices de l'agriculture 4.0 sont d'ores et déjà palpables dans les champs, où les agriculteurs s'approprient rapidement les nouvelles technologies. Pourtant, différents enjeux éthiques, économiques, techniques, institutionnels et organisationnels apparaissent. L'importance grandissante de la donnée remet en question les modèles en place et la gouvernance du système agroalimentaire tout en créant de nouvelles relations de pouvoir entre les acteurs du secteur – nous y reviendrons. S'ils ne sont pas abordés, ces enjeux pourraient ébranler la confiance de l'ensemble de la filière agroalimentaire, et ce, jusqu'aux consommateurs.

L'agriculture diffère fondamentalement des autres secteurs en cours de transformation numérique. D'abord, elle fait face à un environnement très incertain au sein duquel le producteur doit réaliser ses tâches dans des conditions complexes (travailler avec le vivant) et changeantes (météo, volatilité des prix) qui sont imprévisibles et difficilement contrôlables. Ensuite, l'agriculture se pratique en grande partie en région, où les infrastructures, notamment l'accès à une connexion à Internet haute vitesse, sont parfois déficientes, ce qui peut nuire à l'équité entre producteurs. Enfin, le secteur

agricole, fortement réglementé et encadré, fournit déjà une imposante quantité de données à nombre d'intervenants (gouvernements, associations, organisations de producteurs, fournisseurs) pour des fins de contrôle ou dans l'objectif de bénéficier d'une analyse comparative avec un groupe de producteurs sur la base d'un point de référence (*benchmark*). Cette habitude ferait en sorte que les producteurs agricoles seraient plus enclins à partager leurs données avec les différents intervenants que dans d'autres secteurs (Royer, de Marcellis-Warin, Peignier, Warin *et al.*, 2020).

Ce chapitre a pour objectif de tracer un portrait de l'utilisation du numérique dans le secteur agricole québécois en soulignant ses principaux enjeux. Nous illustrerons notre propos par une étude de la production laitière. Nous terminerons avec une présentation des solutions favorisant le partage responsable des données qui existent dans d'autres pays.

Portrait de l'utilisation présente du numérique dans le secteur agricole québécois

Terreau fertile pour le numérique

Au Québec, l'agriculture et ses activités de soutien représentent 57 000 emplois et 28 000 entreprises (MAPAQ, 2018a). Le développement très rapide des technologies numériques dans les dernières années et l'évolution des perceptions dans le milieu font entrevoir un fort potentiel et un bon taux d'adoption. Les producteurs accordent plus d'importance qu'avant à leur qualité de vie et se considèrent de plus en plus comme des gestionnaires d'entreprise, ce qui semble aller de pair avec une gestion plus numérique des fermes. De plus, l'utilisation de robots, tant dans les champs que dans les étables, permet de répondre à l'important enjeu de pénurie de main-d'œuvre que connaît ce secteur (CCRHA, 2016). Par ailleurs, les technologies numériques sont plus facilement adoptées par la relève, qui fait partie de la génération des natifs numériques. Sur cet aspect, le Québec une place enviable à l'échelle canadienne. La proportion d'entreprises agricoles québécoises possédant une relève (22 %) est la plus élevée au Canada (MAPAQ, 2018b).

Le Québec présente un nombre important d'entreprises qui développent de nouvelles technologies numériques et créent des applications utiles dans le secteur agricole, tant pour le monde végétal que pour le monde animal (voir, à ce sujet, les encadrés présentant Agrilog et Motörleaf). Ce domaine est en pleine effervescence. Certaines jeunes entreprises sont à l'avant-garde de la recherche et du développement technologique appliqués à l'agriculture et plusieurs sont reconnues à l'international.

Zoom sur Agrilog

Agrilog^{MC} (www.agrilog.ca) est une entreprise spécialisée dans la gestion de l'entreposage des grains qui a mis au point Silog, un système intelligent qui automatise la ventilation des silos à l'aide de capteurs installés à l'intérieur. Cette technologie permet de recueillir des données qui indiquent au système à quel moment ventiler pour optimiser la qualité du grain.

Au Québec, Agrilog a plus de 70 utilisateurs sur sa plateforme numérique et plus de 30 systèmes de contrôle déployés sur le terrain. L'entreprise travaille à un projet pilote regroupant une trentaine de fermes qui devrait permettre de mettre en lumière les pratiques d'entreposage au Québec et de quantifier le gain en efficacité de leur système. Son produit suscite l'adhésion du milieu agricole¹.

Zoom sur Motörleaf

Motörleaf (www.motorleaf.com), basée à Montréal, fournit des services aux producteurs en serres et aux fermes hydroponiques du monde entier (Canada, États-Unis, Japon, Europe). Grâce aux technologies issues du développement de l'intelligence artificielle, Motörleaf établit des prévisions automatisées très précises des rendements, ce qui permet au producteur de mieux planifier sa production, évitant le gaspillage de ressources et les pertes financières. La société propose aussi un service permettant de repérer les signes annonciateurs des épidémies et, par conséquent, de réagir plus rapidement².

Exemples d'utilisations au Québec

Le secteur agricole québécois est actuellement hétérogène en ce qui a trait à l'utilisation du numérique. D'un type de production à l'autre, d'une ferme à l'autre, aucune tendance forte ne semble se profiler, sauf peut-être pour les sous-secteurs qui demandent beaucoup de main-d'œuvre ou dans lesquels le numérique a un potentiel intéressant et rentable. Voici quelques exemples de technologies encore marginales au Québec, mais qui devraient se démocratiser dans les années à venir.

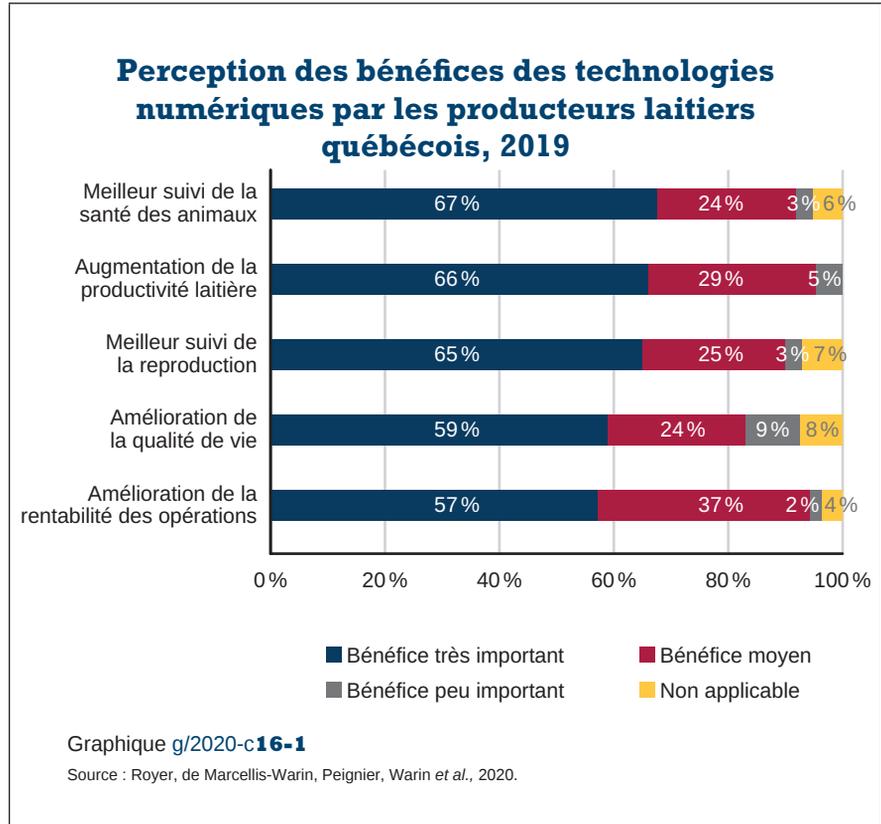
Des fermes avicoles québécoises mettent à l'essai des algorithmes d'apprentissage. En utilisant des données de consommation de moulée, ces algorithmes sont capables de prédire avec une précision de 90 % le jour et l'heure où les animaux atteindront le poids idéal sur un horizon de deux semaines (Laplante El Haïli, 2019). Dans le secteur porcin, une entreprise beauceronne a développé un système qui permet de prédire le moment optimal d'insémination des truies. Ce système pourra diminuer les doses de semence administrées, entraînant une réduction du temps de travail des employés et une amélioration de la génétique du troupeau. Dans le secteur maraîcher, les robots désherbeurs peuvent être équipés de procédés de reconnaissance faciale afin de dépister les ravageurs et les maladies (Laplante El Haïli, 2019).

Une enquête effectuée en 2019 par le CIRANO auprès de producteurs laitiers³ montre que 75 % des producteurs sondés utilisent une forme ou une autre de technologie numérique sur leur ferme. Les technologies les plus utilisées sont les capteurs de production de lait (57 % des répondants), les capteurs de mouvement des vaches (53 %), les distributeurs automatiques de concentrés (52 %), le GPS (47 %), les capteurs de température du lait (47 %) et les caméras de surveillance (47 %). Les applications sur téléphone ou tablette sont utilisées par 74 % des répondants de cet échantillon.

Facteurs d'adoption des technologies numériques

L'adoption des technologies numériques en agriculture dépend en grande partie des bénéfices attendus et réels qu'en tirent les producteurs. Pour les producteurs laitiers québécois sondés, les principaux bénéfices perçus de ces technologies sont un meilleur suivi de la santé des animaux,

l'augmentation de la productivité, un meilleur suivi de la reproduction, l'amélioration de la qualité de vie et l'amélioration de la rentabilité de la ferme (graphique 16-1).



Zoom sur Lactanet

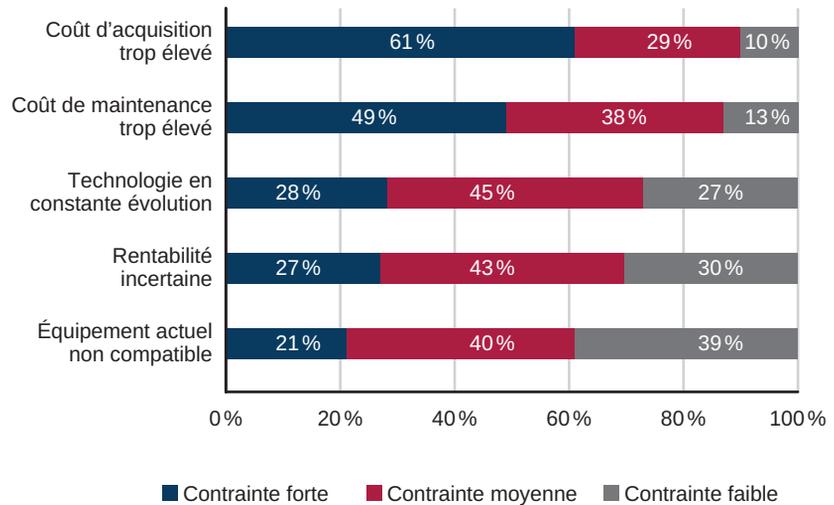
Lactanet (www.lactanet.ca) est un centre pancanadien d'expertise de la production laitière qui, en plus de fournir un service d'analyse en laboratoire, fait le traitement informatique de données de production laitière et les transfère aux intervenants désignés. Au fil des ans, le nombre de données collectées sur les vaches a constamment augmenté, si bien qu'aujourd'hui Lactanet peut collecter jusqu'à 20 000 points de données annuellement par vache (production, qualité et composition du lait)⁴. En exploitant judicieusement ces données et en utilisant une méthode d'analyse comparative (*benchmarking* entre groupes de producteurs), Lactanet permet à l'industrie laitière d'optimiser ses méthodes et ses rendements.

Facteurs pouvant entraver l'adoption des technologies numériques

Toutefois, bien que le Québec soit un terreau fertile pour le numérique, plusieurs facteurs peuvent entraver le développement de ces technologies, particulièrement la taille des exploitations. Les entreprises québécoises ont en général des superficies plus petites comparativement à celles situées dans le reste du Canada ou aux États-Unis. Or, la rentabilité de l'utilisation des technologies numériques serait plus facile à atteindre sur des fermes de plus grande taille (AIC, 2017).

Plusieurs autres facteurs peuvent également ralentir l'adoption des technologies numériques sur les fermes. L'accès à Internet, la vitesse de connexion, les barrières d'intégration et d'interopérabilité ainsi que la disponibilité des technologies au Canada constituent des obstacles. Mais la variable qui domine les autres pour ce qui est de la décision d'adopter ou non des technologies numériques est la question financière, soit le coût d'acquisition des technologies et leur rentabilité (Borchers et Bewley, 2015). Le Graphique 16-2 fait état des principaux obstacles à l'adoption perçus par les producteurs laitiers québécois sondés.

Contraintes à l'adoption des technologies numériques perçues par les producteurs laitiers québécois, 2019



Graphique g/2020-c16-2

Source : Royer, de Marcellis-Warin, Peignier, Warin *et al.*, 2020.

Le secteur laitier québécois se démarque de celui du reste du Canada par une forte utilisation de la stabulation entravée, dans laquelle les vaches sont attachées. Cette pratique diminue l'intérêt de l'utilisation du numérique, notamment des robots de traite et des outils de suivi comportemental, dont l'utilisation est optimale lorsque les animaux peuvent se déplacer librement. Seulement 23 % des vaches québécoises sont en stabulation libre, ce qui freine évidemment la percée du numérique dans ce secteur⁵.

Principaux enjeux de l'agriculture numérique

Plusieurs enjeux découlent de la transformation numérique de l'agriculture : ils sont d'ordre technique, éthique, organisationnel et institutionnel. Nous présentons ici les principaux qui concernent le Québec.

Enjeux techniques

Les enjeux techniques réfèrent principalement aux questions liées à la sécurité dans le transfert ou le stockage des données, à l'intégration, à l'interopérabilité et à la qualité des données. Avec la multiplication des sources de données et l'essor de l'analyse de ces données, un défi important pour un producteur est de réussir à nouer tous les flux d'information en un seul tissu intelligible qu'il pourra valoriser en prenant des décisions avantageuses. D'une part, un agriculteur peut être incapable d'utiliser le plein potentiel de ses technologies numériques puisque les multiples équipements utilisés, souvent de différents fournisseurs, ne sont pas compatibles entre eux. D'autre part, les producteurs et leurs conseillers n'ont pas toujours les connaissances et les compétences pour bien intégrer ces outils. Aussi, chaque maillon de la chaîne (équipement qui génère des données, équipement qui les entrepose, entreprise qui les analyse, conseiller faisant des recommandations, etc.) opère à sa manière à un certain moment, et dépend ou non d'autres maillons de la chaîne, ce qui peut créer des barrières d'interopérabilité dans les échanges de données. Enfin, une grande quantité de données ne signifie pas qu'elles seront toutes utiles à la prise de décision ou à la recherche. L'agriculture est, à l'instar des autres secteurs économiques, confrontée à la pertinence et à la qualité des données.

Enjeux éthiques

Les enjeux de confidentialité des données réfèrent au fait de s'assurer que les données ne sont accessibles qu'à ceux dont l'accès est autorisé. Il n'existe pas, à notre connaissance, d'encadrement législatif spécifiquement dédié aux données agricoles. Les règles entourant la confidentialité des données se trouvent souvent, mais pas toujours, dans le contrat liant le producteur au fournisseur (Royer, de Marcellis-Warin, Peignier, Warin *et al.*, 2020). Seulement 35 % des producteurs laitiers sondés dans l'étude du CIRANO ont des craintes concernant la confidentialité de leurs données numériques (Royer, de Marcellis-Warin, Peignier et Panot, 2020). Les plus jeunes producteurs sont les moins craintifs. Chez les producteurs de 34 ans et moins, 23 % disent avoir des craintes quant à la confidentialité de leurs données, alors que cette proportion monte à 70 % pour ceux de 55 ans et plus (Royer, de Marcellis-Warin, Peignier et Panot, 2020).

Il subsiste une zone grise importante en ce qui a trait à la propriété des données créées par le secteur agricole. À qui appartiennent les données de la ferme : au producteur ou au fournisseur de la technologie ? Et une fois la donnée transformée et utilisable, à qui reviennent la propriété et les bénéfices qui peuvent découler de l'utilisation ? Plusieurs producteurs ne savent pas où les données vont ou à quoi elles servent après la collecte dans leurs exploitations (American Farm Bureau Federation, 2016). Les données sont devenues un capital pour les entreprises qui vendent des technologies numériques. Il y aurait donc un risque réel que certaines entreprises utilisent des données pour en tirer un profit financier sans partager celui-ci avec les générateurs de ces données, c'est-à-dire les producteurs agricoles. De plus, plusieurs outils collectifs et sectoriels d'évaluation comparative des performances pourraient être mis à mal si les producteurs ne peuvent rendre leurs données disponibles.

La question de l'autonomie des agriculteurs vis-à-vis des fournisseurs de services et d'équipements introduit deux scénarios antithétiques (Wolfert, Ge, Verdouw et Bogaardt, 2017). Le premier est celui d'un gain d'indépendance face aux grandes entreprises traditionnelles puisque le développement du numérique stimule la création de jeunes entreprises, augmentant ainsi l'offre de fournisseurs. Cela sera vrai à condition que les producteurs conservent la propriété de leurs données et puissent les transmettre à qui ils le désirent, notamment à ces petites entreprises. Le deuxième scénario est celui d'une perte d'autonomie. Dans un scénario sombre, mais envisageable, les producteurs qui adoptent le numérique et gèrent leur exploitation sur la base de données pourraient devenir dépendants des entreprises qui analysent leurs données.

Enjeux organisationnels et institutionnels

Les enjeux organisationnels sont principalement liés au transfert de connaissances, à la formation et au partage des données. Le secteur agricole manque de ressources humaines et de compétences techniques pour accompagner la valorisation des données (Kshetri, 2014). Des ressources extérieures expertes en sciences des données doivent être embauchées pour utiliser et tirer profit de ces technologies. Or, ces ressources sont très prisées dans les autres secteurs économiques, et le secteur agricole, qui a un taux de rentabilité généralement très faible, peine à attirer et à retenir ces expertises. Pour ce qui est du transfert de connaissances, les conseillers

des producteurs font face à une importante courbe d'apprentissage, et le peu d'études de rentabilité des outils numériques peut créer une certaine réticence au changement. La formation offerte aux futurs producteurs et agronomes québécois est, quant à elle, lentement mais sûrement en mutation (Royer, de Marcellis-Warin, Peignier, Warin *et al.*, 2020).

Les principales données pouvant être collectées sur une ferme sont les données agronomiques, météorologiques, du sol, des machines, de production et financières. Le plein potentiel du numérique dans la production agricole dépend d'un partage de ces données entre les producteurs et leur écosystème de partenaires (centres d'expertise, centres de recherche, gouvernement, fournisseurs d'intrants, d'équipements et de services, laboratoires d'analyse, organisations de producteurs, vétérinaires, conseillers en environnement, etc.). Pour permettre l'interconnexion spatiale (de parcelles, d'exploitations et de territoires), le décroisement des acteurs de la filière, la réduction des incertitudes (avec les données techniques couplées aux données économiques) et pour améliorer leur performance (étalon de données technico-économiques comme outil de pilotage pour le producteur), le partage des données est essentiel (Bellon-Maurel, Garcia et Huyghe, 2018 ; Kamilaris, Kartakoullis et Prenafeta-Boldú, 2017).

De nombreuses solutions technologiques sont développées dans différents pays pour faciliter le partage de données (Royer, de Marcellis-Warin, Peignier et Panot, 2020). Il s'agit le plus souvent de portails de données qui peuvent être paramétrés de différentes manières avec des données visibles ou téléchargeables, des modalités d'accès, des licences associées à la réutilisation des données et des coûts d'accès aux données à des fins d'utilisation ou de développement de services. La participation des entités privées qui souhaitent valoriser les données pour elles-mêmes représente un défi.

Plusieurs exemples sont en place aux États-Unis (voir l'encadré) et en Europe. En Allemagne, la société DKE a développé l'outil Agrirouter, qui vise à faciliter les échanges de données entre tous les acteurs du secteur avec différents niveaux d'accès. Les données demeurent la propriété des agriculteurs et des frais sont facturés aux utilisateurs.

Exemples de plateformes de données agricoles aux États-Unis

Le portail de données Agricultural Data Coalition est une plateforme indépendante de stockage et de partage de données électroniques agricoles. En plus de permettre aux agriculteurs américains d'avoir un meilleur contrôle sur leurs données, elle est conçue pour le partage de données entre les producteurs, les fournisseurs de technologies et les institutions de recherche. Le financement de la plateforme repose sur les frais d'utilisation et les cotisations des membres. Une autre initiative est le Open Ag Data Alliance (OADA), un référentiel de données ouvertes qui permet l'échange de données agricoles de manière sécuritaire et simplifiée ainsi que leur interopérabilité au sein du secteur.

Plusieurs initiatives cherchent à encadrer ce partage de données, soit en établissant des principes de confidentialité et de sécurité des données agricoles (par exemple Privacy and Security Principles for Farm Data aux États-Unis), soit en mettant en place une charte sur l'utilisation des données agricoles (par exemple la charte DATA-AGRI en France), soit en utilisant un code de conduite relatif aux données (par exemple le Code de conduite de l'UE relatif au partage des données agricoles par contrat ou le NZ Farm Data Code of Practice en Nouvelle-Zélande).

Au Québec, sur la plateforme de données ouvertes Données Québec (2020), 29 jeux de données relatifs à l'agriculture et à l'alimentation sont disponibles, dont 14 fournis par le MAPAQ et 9 par la Financière agricole du Québec (Données Québec, 2016).

Toutes ces initiatives montrent l'importance des enjeux du partage des données partout dans le monde. La plupart des acteurs souhaitent la mise en place d'une structure de gouvernance des données et un encadrement réglementaire pour éviter les dérives. Toutefois, pour que le secteur agricole puisse tirer parti des technologies numériques, un engagement et une coopération s'imposent de la part des agriculteurs, des chercheurs, du secteur privé, des organisations à but non lucratif et des pouvoirs publics (OCDE, 2018).

Conclusion

La capacité d'utiliser les technologies numériques en agriculture ne dépend pas seulement de l'accès aux infrastructures de connectivité. Elle est également liée au développement d'une gamme de services de collecte et d'analyse de données et de l'environnement réglementaire (qui englobe les règles d'interopérabilité, les normes de qualité des données, les normes ou les règlements sur la propriété et la confidentialité des données, les compétences, les plateformes numériques, le stockage et le traitement dans le nuage, etc.). Ces éléments façonnent la création de systèmes efficaces de numérisation et fournissent ensemble une infrastructure de données habilitante. Il est toutefois important de ne pas laisser s'amplifier des situations où les producteurs deviendraient dépendants d'une seule technologie développée par une entité unique qui imposerait alors une façon de gérer son exploitation (Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018). De plus, dans ses travaux, l'OCDE étudie les avantages et les défis inhérents à l'utilisation des technologies pour le secteur agricole et montre que l'adoption durable et inclusive des technologies numériques pourrait ainsi faire évoluer les besoins en compétences du secteur, d'où l'importance de la formation et du transfert de connaissances aux producteurs et aux acteurs de leur écosystème (OCDE, 2019).



Références

AIC. (2017). *An Overview of the Agricultural Innovation System*. Agricultural Institute of Canada/Conseil de l'innovation agroalimentaire.

American Farm Bureau Federation. (2016). *Farm Bureau survey: Farmers want to control their own data*. Repéré à : <https://www.fb.org/newsroom/farm-bureau-survey-farmers-want-to-control-their-own-data>.

Bellon-Maurel, V., Garcia, F. et Huyghe, C. (2018). Introduction : données à partager, valeurs à créer dans l'économie numérique. *Innovations agronomiques*, (67), 1-2.

Borchers, M. R. et Bewley, J. M. (2015). An assessment of producer precision dairy farming technology use, prepurchase considerations, and usefulness. *Journal of Dairy Science*, (98), 4198-4205.

CCRHA. (2016). *Prévisions du marché du travail agricole du Québec jusqu'en 2025*. Repéré à : https://cahrc-ccrha.ca/sites/default/files/files/Labour-Employment/QC_reportFR.pdf

Données Québec. (2016). *Agriculture et alimentation*. Repéré en novembre 2019 à : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/group/agriculture-alimentation>.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., et Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 23-37. doi:10.1016/j.compag.2017.09.037

Kshetri, N. (2014). The emerging role of Big Data in key development issues : Opportunities, challenges, and concerns. *Big Data & Society*, 1(2), doi:10.1177/2053951714564227.

Laplante El Haïli, M. (2019, 7 février). À 21 heures jeudi, dans deux semaines, les poulets auront le poids idéal. *La terre de chez nous*.

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2018a). *Politique bioalimentaire 2018-2025*. Repéré à : https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/agriculture-pecheries-alimentation/publications-adm/dossier/politique-bioalimentaire/PO_politiquebioalimentaire_MAPAQ.pdf?1549643501.

MAPAQ. (2018b). *Portrait de la relève agricole au Québec 2016*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. (2018). *Le partage des données, un enjeu majeur*. Repéré à : <https://agriculture.gouv.fr/le-partage-des-donnees-un-enjeu-majeur>.

OCDE. (2018). La technologie et le numérique dans l'agriculture. Repéré à : <https://www.oecd.org/fr/agriculture/sujets/technologie-et-agriculture-numerique/>.

OCDE. (2019). *Digital Opportunities for Better Agricultural Policies*. Repéré à : https://www.oecd-ilibrary.org/fr/agriculture-and-food/digital-opportunities-for-better-agricultural-policies_571a0812-en.

Royer, A., de Marcellis-Warin, N., Peignier, I., Warin, T., Panot, M. et Mondin, C. (2020). *Enjeux du numérique dans le secteur agricole* [rapport]. CIRANO.

Royer, A., de Marcellis-Warin, N., Peignier, I. et Panot, M. (2020). *Industrie laitière 4.0 : bénéfices potentiels et enjeux* [rapport]. CIRANO.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C. et Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming—a review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80.

Notes

1. Source : communication avec l'entreprise.
2. Source : communication avec l'entreprise.
3. Les données chiffrées ont été obtenues lors d'une conversation téléphonique en 2020 avec un interlocuteur de Lactanet.
4. Il s'agit d'un sondage en ligne effectué en 2019 auprès de 121 producteurs laitiers québécois. L'échantillon comporte une surreprésentativité de producteurs orientés vers le numérique. Par exemple, alors que les robots de traite sont utilisés par environ 11 à 15 % des fermes québécoises (communication personnelle avec Lactanet, septembre 2019), l'échantillon montre plutôt 37 % d'utilisation. Les données doivent donc être interprétées avec prudence. Malgré cela, ces données permettent de dresser un portrait intéressant des producteurs les plus enclins à utiliser ces technologies (Royer, de Marcellis-Warin, Peignier et Panot, 2020).
5. Cela correspond à 14 % des fermes (documentation interne fournie par Lactanet, 2019).

Chapitre 17

TRANSFORMER LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION PAR LE NUMÉRIQUE

Un chantier ambitieux et nécessaire

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

Robert Pellerin

Professeur titulaire à Polytechnique Montréal

Conrad Boton

Professeur à l'École de technologie supérieure

Ivanka Iordanova

Professeure à l'École de technologie supérieure

Louis Rivest

Professeur à l'École de technologie supérieure

Christophe Danjou

Professeur adjoint à Polytechnique Montréal

Nathalie Perrier

Associée de recherche à Polytechnique Montréal

Daniel Forgues

Professeur à l'École de technologie supérieure

Érik Poirier

Professeur à l'École de technologie supérieure

Laurent Joblot

Enseignant à Arts et Métiers ParisTech Cluny, en France

Résumé

L'industrie de la construction joue un rôle prépondérant dans l'économie. Malgré son importance, elle fut longtemps décrite comme moins productive et innovante que d'autres secteurs. Depuis quelques années, cette situation semble changer et plusieurs acteurs reconnaissent la nécessité d'innover pour assurer la compétitivité des entreprises. De nouvelles formes de travail émergent grâce à l'introduction

de technologies telles que la modélisation des données du bâtiment (BIM), la réalité virtuelle et augmentée, la préfabrication, les objets intelligents, la fabrication additive, les technologies portables, l'automatisation, la robotisation. Au Québec, plusieurs grandes entreprises ont déjà adopté certaines de ces technologies, mais leur mise en œuvre reste encore embryonnaire, en particulier chez les petites entreprises. Selon nombre d'experts, l'utilisation des technologies doit être encouragée afin de créer une véritable transformation numérique de la construction au Québec. Ce chapitre propose une courte analyse de cette transformation et des pistes d'intervention pour le contexte québécois, à partir des tendances observées à l'échelle internationale.

Introduction

Le secteur de la construction est fort important au sein de l'économie québécoise. Cette industrie, qui couvre un très grand nombre d'activités¹, représentait 6 % du PIB en 2018 et comptait pour près de 48 milliards de dollars en investissements² (Commission de la construction du Québec [CCQ], 2019b). Le secteur public a investi plus de 18 milliards de dollars en 2018 dans la construction non résidentielle et les travaux de génie, contre 8,6 milliards de dollars pour le secteur privé³. Ces chiffres n'expriment toutefois que la part directe de l'industrie de la construction. Une partie des secteurs manufacturier, du commerce et des services est reliée à l'activité générée dans la construction, créant des retombées économiques indirectes⁴ considérables. À titre d'exemple, le PIB direct du secteur de la construction en 2014 ne représentait réellement que la moitié de la valeur ajoutée⁵ totale des différents acteurs du réseau d'affaires de la construction (Deloitte et Conseil du patronat du Québec [CPQ], 2016).

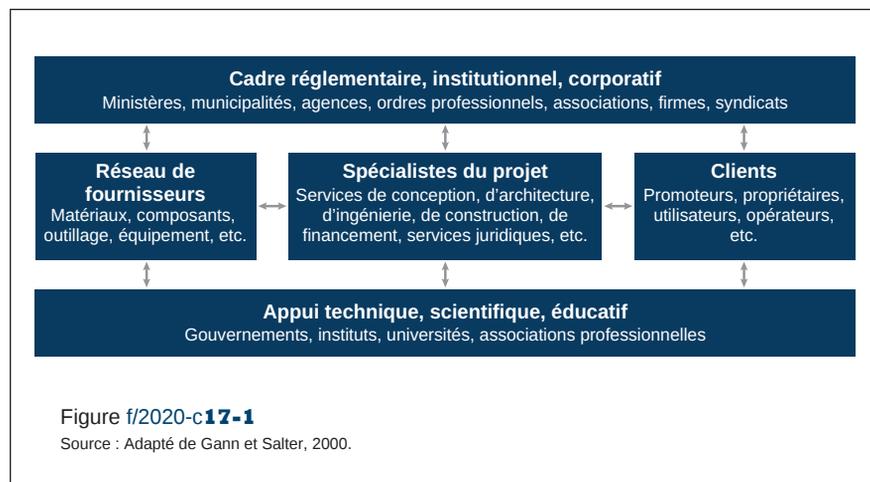
Malgré son importance sur le plan économique, l'industrie de la construction au Québec, comme bien d'autres dans le monde – en France, par exemple (Alliance Industrie du Futur [AIF], 2017) –, fait face à de nombreux défis afin de pouvoir rejoindre d'autres secteurs plus productifs, dont celui du manufacturier. En effet, la productivité horaire⁶ du secteur de la construction au Québec était de 45,5 dollars en 2018, comparativement à 57,0 dollars

Transformer le secteur de la construction par le numérique

pour le secteur manufacturier⁷. Ce décalage s'explique par un certain nombre de caractéristiques spécifiques au secteur de la construction.

En général, un projet de construction peut être défini comme une entreprise multiorganisationnelle, unique, temporaire et soumise à la problématique d'une livraison sur un site précis où plusieurs firmes doivent être mobilisées pour une période donnée. D'autres phénomènes s'ajoutent à ces caractéristiques et contribuent souvent à la complexité des projets : besoins du client parfois imprécis et changeants, provoquant des coûts importants dus aux modifications en cours de projet ; peu d'apprentissage d'ensemble, car peu de répétition ; risques élevés dus à la nouveauté ; incertitudes techniques, climatiques et même sociétales ; coordination et processus décisionnels complexes entre les équipes impliquées ; conditions de réalisation changeantes ; etc. (De Blois, Lizarralde, De Coninck, 2016).

Le secteur de la construction est également caractérisé par une forte fragmentation de l'ensemble de la chaîne de valeur à laquelle contribuent un nombre élevé d'intervenants. Outre les donneurs d'ouvrage (clients), on compte les professionnels de la construction (architectes, ingénieurs, etc.), les constructeurs eux-mêmes (entrepreneurs généraux et spécialisés), de même que les manufacturiers de matériaux et fournisseurs de toutes sortes (biens et services). Ce réseau d'acteurs indépendants impliqués dans la réalisation d'un ouvrage unique peut être très diversifié et hétérogène (voir la figure 17-1), rendant ainsi la gestion des travaux et la coordination plus difficile comparativement à d'autres secteurs plus fortement intégrés.



L'industrie est notamment caractérisée par un nombre élevé de petites et moyennes entreprises. En 2018, le pourcentage d'employeurs québécois du secteur ayant 5 salariés ou moins était de 82 %, alors que 24 entreprises seulement sur 25 808 comptaient plus de 200 salariés (CCQ, 2019a, 2019b). Un autre trait important du milieu de la construction réside dans le fait que bon nombre des donneurs d'ouvrage pour le secteur non résidentiel sont des organisations publiques. Ainsi, parmi les 65 projets les plus importants (d'un minimum de 100 millions de dollars) ayant eu cours au Québec en 2018, près de la moitié étaient financés par des organisations publiques : ministères, municipalités, agences publiques, etc. (CCQ, 2019a). Ce type de projets, et en particulier ceux de grande envergure, pose souvent des défis sur le plan de la définition, du financement et du contrôle des coûts, en plus d'enjeux importants d'accessibilité sociale (Lehmann et Motulsky, 2013; SECOR/KPMG, 2012).

Enfin, bien que l'industrie de la construction joue un rôle prépondérant dans l'économie, les investissements en R-D dans ce secteur sont relativement faibles. En effet, selon le Conference Board du Canada (2018), depuis 2000, les dépenses de R-D réalisées par les entreprises dans le secteur de la construction au Canada s'établissent en moyenne à 0,08 % (en pourcentage du PIB), ce qui est beaucoup plus faible que dans le secteur manufacturier (4,2 %), les mines, le pétrole et le gaz (0,67 %), et le secteur des services (0,82 %).

Devant tous ces défis, les appels à l'accroissement de productivité du secteur se font de plus en plus insistants tant au Canada qu'ailleurs dans le monde (Prieto, 2013). C'est ainsi qu'on observe graduellement diverses initiatives sur le plan de l'innovation qui démontrent la capacité bien réelle de transformation numérique chez plusieurs firmes rattachées à ce secteur (Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations [CEFRIO], 2014; Centre d'études et de recherches pour l'avancement de la construction au Québec [CERACQ], 2015a, 2015b; Orstavik, Dainty et Abbott, 2015). Que cela concerne la gestion de projet, la fabrication, l'exécution, le suivi, la surveillance, les techniques de construction ou encore les outils utilisés, l'innovation transforme peu à peu les façons de faire traditionnelles de l'industrie de la construction.

Transformation numérique du secteur

Bien que les données indiquent un retard du secteur de la construction en ce qui a trait à l'adoption de technologies de pointe – une analyse de l'institut McKinsey effectuée en 2015 indique que la construction est l'un des secteurs les moins numérisés, devançant de peu le secteur de l'agriculture (Deloitte, 2019; McKinsey and Company, 2017) –, plusieurs initiatives en cours suggèrent une transformation graduelle des pratiques dans cette industrie souvent considérée comme traditionnelle. Ce changement est insufflé par un souci d'être en phase avec les innovations observées à l'échelle internationale (voir les exemples plus loin), mais vise aussi à répondre à des enjeux nationaux importants : pénurie de main-d'œuvre, compétitivité, développement durable, etc. La transformation numérique constitue l'une des voies privilégiées pour améliorer la performance globale du secteur à long terme⁸ (Deloitte et CPQ, 2016).

La transformation numérique s'exprime de différentes façons. L'un des courants forts actuels repose sur le concept dit de la quatrième révolution industrielle, aussi appelée « industrie 4.0 » (Drath et Horch, 2014), faisant référence à un ensemble de technologies permettant la capture des données en temps réel et un partage continu et instantané entre les différents intervenants, ce qui facilite une meilleure collaboration et une amélioration de la performance (Danjou, Rivest et Pellerin, 2017). Ce courant peut être défini comme le passage d'une réalisation et d'une gestion centrées sur des sources d'information statiques (par exemple, les plans et devis papier) vers une réalisation et une gestion axées sur une source d'information regroupée et réutilisable à diverses fins (Poirier, Frénette, Carignan et Paris, 2018). Dans le secteur de la construction, la transformation numérique vise donc à permettre un accès plus rapide et plus étendu à l'information afin d'accroître la valeur ajoutée aux différents maillons de la chaîne de valeur (Grosso Sategna, Meinero et Volontà, 2019). L'exemple des technologies mobiles⁹ illustre bien l'impact important que le numérique peut avoir sur les pratiques traditionnelles. Lorsqu'elles sont couplées avec des dispositifs de captation et de traitement automatique des données, les technologies mobiles permettent de transformer les pratiques d'affaires, notamment en accélérant la prise de décision, et mènent ainsi à des gains importants de productivité.

La section qui suit présente les technologies et concepts clés dans le contexte de la transformation numérique du secteur de la construction (que l'on qualifie de construction 4.0). Étant donné l'importance de la modélisation des données d'un bâtiment (concept qu'on appelle, en anglais, le *Building Information Modeling*, qui a mené à l'adoption de l'abréviation commune BIM) dans l'intégration de la gestion de l'information dans l'ensemble du cycle de vie d'un projet, une sous-section entière y est consacrée plus loin.

Construction 4.0 : une réponse aux enjeux et aux besoins en transformation numérique de l'industrie de la construction

L'application des principes de l'industrie 4.0 au secteur de la construction, mieux connue sous le nom de « construction 4.0 », offre un potentiel considérable pour répondre aux défis de ce secteur. À l'échelle des projets, on note, entre autres, le défi de la gestion de l'information – abondance de documentation, variété dans la nature des documents, multiplicité des textes réglementaires, pluralité des formats d'échange (Kubicki, 2006 ; Björk, 1999 ; Guerriero, 2009 ; Botton, 2009) – qui découle de la structure fragmentée de l'industrie (Harty et Laing, 2010). Le réseau complexe de liens entre les entreprises engagées dans un projet nécessite une gestion efficace du flux d'informations techniques qui doivent être clairement communiquées entre les parties prenantes. Il s'agit là de l'un des plus grands défis de l'industrie, car c'est sur la qualité des données recueillies et transmises que reposent en grande partie l'efficacité du processus de prise de décision et, donc, la performance des projets de construction. Comme l'industrie 4.0, la construction 4.0 implique donc une notion d'exploitation et de partage des données afin de soutenir la prise de décision (ou de réaction) en temps réel ou quasi réel. Ces décisions seront pour la plupart décentralisées, et certaines d'entre elles pourront même être prises de façon automatique par des systèmes, sans intervention humaine.

Bon nombre de pratiques et de technologies sont actuellement développées pour concrétiser la vision proposée par la construction 4.0. En voici quelques exemples (AIF, 2017 ; Bowmaster et Rankin, 2019) :

- L'automatisation du travail et la robotique collaborative (en anglais, *cobotics*), pour guider les gestes des travailleurs ou pour réaliser des

Transformer le secteur de la construction par le numérique

tâches manuelles répétitives sur les chantiers, comme le font les robots de maçonnerie ;

- Les véhicules aériens sans pilote (également appelés « drones »), qui collecte des données qui peuvent aider à surveiller des sites, suivre l'avancement des travaux ainsi que la qualité et la sécurité des opérations, etc. ;
- La radio-identification ou les *étiquettes RFID* (en anglais, *radio frequency identification*), par exemple pour localiser et reconnaître des matériaux sur un chantier ;
- L'impression 3D ou la fabrication additive, pour fabriquer un objet en 3D par ajout de matière couche par couche à partir d'un modèle numérique 3D (par opposition à l'usinage, c'est-à-dire la fabrication par retrait de matière) ;
- Les machines intelligentes (intelligence artificielle), pour prendre des décisions en temps réel sur l'état d'avancement des travaux sur un chantier à partir d'images captées par des caméras et traitées par des machines ou des systèmes capables d'« apprendre » sur la construction d'un bâtiment et d'anticiper les besoins d'intervention ;
- Les matériaux « augmentés » ou avancés¹⁰, pour obtenir un avantage marqué du point de vue de la performance – conductivité thermique, dureté, efficacité, biodégradabilité, etc. –, comparativement aux matériaux conventionnels couramment utilisés (Pôle de recherche et d'innovation en matériaux avancés au Québec [PRIMA Québec], 2018) ;
- Les outils d'analyse prédictive, pour repérer rapidement, à l'aide par exemple d'images et de vidéos capturées par drones, les problèmes potentiels d'exécution et de performance au cours d'un projet et les communiquer aux acteurs par l'entremise de téléphones intelligents ou de tablettes, afin de mieux anticiper les risques de délais et de dépassement de coûts ;
- La réalité virtuelle, pour visualiser une idée de design de bâtiment en 3D ;
- La numérisation (ou le *scanner*) laser 3D, pour reproduire la forme d'un site en capturant sur le terrain les données nécessaires à la création d'une image de nuages de points qui sera ensuite intégrée dans un logiciel BIM ;

- Les travailleurs et les équipements « augmentés »¹¹, pour collecter des données sur les conditions de travail – à l'aide, par exemple, de capteurs dans les équipements de protection individuels – et pour augmenter les connaissances du travailleur sur le terrain – au moyen de la réalité augmentée¹²;
- Les technologies et les applications mobiles¹³, pour effectuer diverses tâches sur le chantier : gestion des listes de déficiences, des visites de chantier, des mises en service, rapports automatiques, collaboration en temps réel, etc.

Ces nouvelles technologies présentent un potentiel important non seulement pour améliorer la productivité, la collaboration et la gestion de l'information, mais aussi pour réduire les délais d'un projet, augmenter la qualité des biens livrables bâtis, améliorer la santé et la sécurité en chantier, et favoriser l'atteinte de cibles environnementales (Poirier *et al.*, 2018). De telles innovations technologiques font de plus en plus leur entrée sur les chantiers de construction québécois. À titre d'exemple, on peut penser aux robots et aux drones qui, équipés de caméras, peuvent prendre des images dans des zones parfois dangereuses afin de suivre l'évolution d'un chantier (Association québécoise de la quincaillerie et des matériaux de construction, 2020). Au Québec, 340 entreprises sont présentement actives dans le domaine des matériaux augmentés, et la construction constitue un secteur d'application privilégié avec ses panneaux composites¹⁴ et ses matériaux de construction écoresponsables¹⁵ et autoréparants¹⁶ (PRIMA Québec, 2018). Plusieurs entreprises utilisent également différentes applications mobiles pour la gestion de projet et de chantier (CERACQ, 2015b). Parmi les nombreuses retombées liées à l'utilisation de ces applications, outre l'amélioration de la capture et de l'échange d'informations dans la phase d'exécution, le gain de temps demeure le bénéfice le plus cité (Frenette, 2015; Usman et Said, 2012).

À Montréal, on développe actuellement une technologie de visualisation qui s'appuie sur la réalité augmentée pour faciliter les échanges d'informations à distance lors des travaux publics ou la gestion des infrastructures (Innovation Développement MTL, 2018). La communication visuelle à distance est assurée par une technologie mobile en réalité augmentée permettant à un employé sur le terrain de recevoir les directives d'un autre employé au bureau qui communique à l'aide d'un casque de réalité virtuelle et d'une application de virtualité augmentée installée sur un ordinateur de

bureau. Cette technique permet de superposer des objets virtuels en 3D et du texte devant des objets de construction réels.

Le BIM : pierre angulaire de la construction 4.0

Parmi les nombreuses transformations numériques en cours dans le monde de la construction, l'adoption du BIM représente, pour plusieurs observateurs professionnels et du milieu de la recherche universitaire, la clé de voûte pour permettre le déploiement de la construction 4.0. Le concept du BIM peut se résumer ainsi : générer et échanger l'information portant sur un projet dans une seule base de données partagée entre tous les acteurs. En effet, sa mise en œuvre permet de rapprocher les fonctions de planification de la séquence réelle d'exécution d'un bâtiment ou d'un ouvrage, et ce, en rendant possible notamment la visualisation de la réalisation projetée à l'échelle du temps d'une maquette numérique (la planification 4D) et des coûts escomptés (la planification 5D) (Wang, Yung, Luo et Truijens, 2014). Le BIM sert de plateforme de partage de connaissances et de données tout au long de la chaîne de valeur de la construction, en plus d'être un outil d'aide à la décision durant le cycle de vie d'un projet. Sur ces aspects, il diffère de la stratégie 4.0 en ce sens qu'il permet de centraliser une foule de données exploitées ou évaluées par des humains de manière asynchrone, plutôt qu'en temps réel ou quasi réel.

L'adoption du BIM est devenue une norme de la construction dans plusieurs pays (McAuley, Hore et West, 2017). À titre d'exemple, la General Services Administration (GSA) aux États-Unis exige des pratiques issues du BIM depuis 2007 pour les projets gouvernementaux, alors que le gouvernement du Royaume-Uni impose depuis 2016 que la réalisation de tout projet public soit supportée par le BIM, au moins au moyen d'une maquette 3D (McAuley *et al.*, 2017). L'utilisation de ce concept permet à l'Agence de l'environnement du Royaume-Uni de réaliser des économies d'environ 600 000 livres (soit plus de 1 million de dollars) par an dans la gestion du transfert de données des projets d'investissement aux opérations (University of Cambridge, 2020). La Finlande, la France et Singapour sont également considérées comme des chefs de file mondiaux en matière d'adoption du BIM. Au Canada, plusieurs organismes publics, comme Infrastructure Alberta et le ministère de la Défense nationale, utilisent largement le BIM ou sont en voie d'exiger son application sur certains projets (Poirier

et al., 2018). Services publics et Approvisionnement Canada travaille à mettre en place certaines normes BIM pour faciliter la transition vers le numérique, rejoignant ainsi des pays comme les États-Unis et la Finlande. Au Québec, la Société québécoise des infrastructures exige le BIM sur ses grands projets depuis 2016.

Selon l'EU BIM Task Group (2016), un organisme soutenu et financé par la Commission européenne, les possibilités liées à la transformation numérique et au déploiement du BIM sont en effet nombreuses. On peut souligner ici :

- Une plus grande productivité du secteur, résultant en un accroissement de la valeur générée par celui-ci ;
- Une meilleure qualité des biens publics construits ;
- Une capacité accrue d'adapter l'environnement bâti aux défis du développement durable et des changements climatiques ;
- Un environnement bâti qui soutient la nécessité d'une économie circulaire ;
- Une augmentation de la transparence du réseau d'affaires de la construction et de ses performances ;
- De nouvelles possibilités de croissance du secteur grâce à des exportations et à des offres de services supplémentaires ; et
- Un réseau d'affaires plus fort et plus qualifié en technologies numériques, attirant des talents et des investissements.

Les résultats d'une étude menée en 2017 par le Groupe BIM Québec auprès de 40 experts sur le déploiement du BIM dans l'industrie de la construction au Québec ont également permis d'établir plus d'une trentaine d'occasions rendues possibles grâce à son utilisation (Poirier *et al.*, 2018). Outre l'amélioration de la qualité des ouvrages, de la communication, de la gestion et de la qualité de l'information, les cinq éléments les plus mentionnés par les experts sont l'importance des gains en efficacité (35 % des experts l'ont nommée), la diminution des risques en chantier (33 %), la possibilité de préfabrication et d'intégration des manufacturiers (25 %), la réduction des déchets (23 %) ainsi que l'amélioration du transfert des données de construction vers la gestion des actifs (20 %).

On constate donc que les avantages du BIM vont au-delà du partage de données dans la chaîne de valeur de la construction. En fait, ils s'étendent sur tout le cycle de vie de l'actif bâti et se déclinent en bénéfices substantiels sur le plan économique : réduction des coûts de construction, diminution de la durée du projet, baisse des reprises en chantier et réduction des coûts d'entretien et d'opération (BIM Industry Working Group, 2011; EU BIM Task Group, 2016; General Services Administration, 2007; Poirier *et al.*, 2018; Roland Berger GMBH, 2016). On observe également, sur le plan environnemental, une réduction du gaspillage en chantier, une optimisation de l'utilisation de l'énergie en mode opération et la possibilité d'évaluer le cycle de vie complet de l'actif en opération. Finalement, le BIM peut aussi apporter des bénéfices sur le plan social : normes de santé et de sécurité plus élevées, engagement et consultation publique améliorés, etc.

Dans le but de montrer l'impact du BIM sur la performance des projets, un modèle a été développé par PwC sous la direction du UK BIM Task Group pour mesurer les bénéfices de ce concept à chaque étape du cycle de vie d'un projet (PricewaterhouseCoopers LLP, 2018). Ce modèle regroupe les bénéfices en différentes catégories : gains de temps, économies de matériel, économies de coûts, amélioration de la santé et de la sécurité, réduction des risques, amélioration de l'utilisation et de la qualité des actifs, etc. Il fournit également des lignes directrices sur la façon de quantifier les bénéfices pour chaque catégorie. Par exemple, on peut traduire en termes monétaires les gains de temps résultant de l'usage du BIM en calculant la réduction correspondante des coûts directs de la main-d'œuvre. Si les gains de temps entraînent une accélération de l'exécution du projet, la valeur actuelle nette¹⁷ de celui-ci peut également augmenter. De même, on peut estimer les économies de matériaux en calculant la variation de la quantité de chaque type de matériau utilisé et en appliquant ensuite le coût de chaque type à la réduction calculée.

L'utilisation du BIM agit donc comme catalyseur d'améliorations et de changements qui vont bien au-delà des fonctions de modélisation, de partage et d'échange de l'information. Les bénéfices directs qui en résultent se traduisent en économies réelles. Les entreprises en construction qui envisagent le passage au BIM se doivent de saisir pleinement les bénéfices qui y sont liés et de quantifier leurs impacts directs sur la performance des projets, afin de pouvoir non seulement justifier les coûts de transition vers le BIM, mais aussi assurer la viabilité du processus d'implantation (Poirier, Staub-French et Forgues, 2015).

Les concepts de construction 4.0 et du BIM rallient un grand nombre d'acteurs de l'industrie. L'effort de diffusion se poursuit, non sans difficultés. La véritable embûche qui a été identifiée dès le début réside dans leur mise en œuvre, qui requiert un plan de transformation structuré ainsi qu'un plan de déploiement pour l'ensemble des acteurs (AIF, 2017).

État de la situation au Québec

Portrait de la transformation numérique dans l'industrie québécoise de la construction

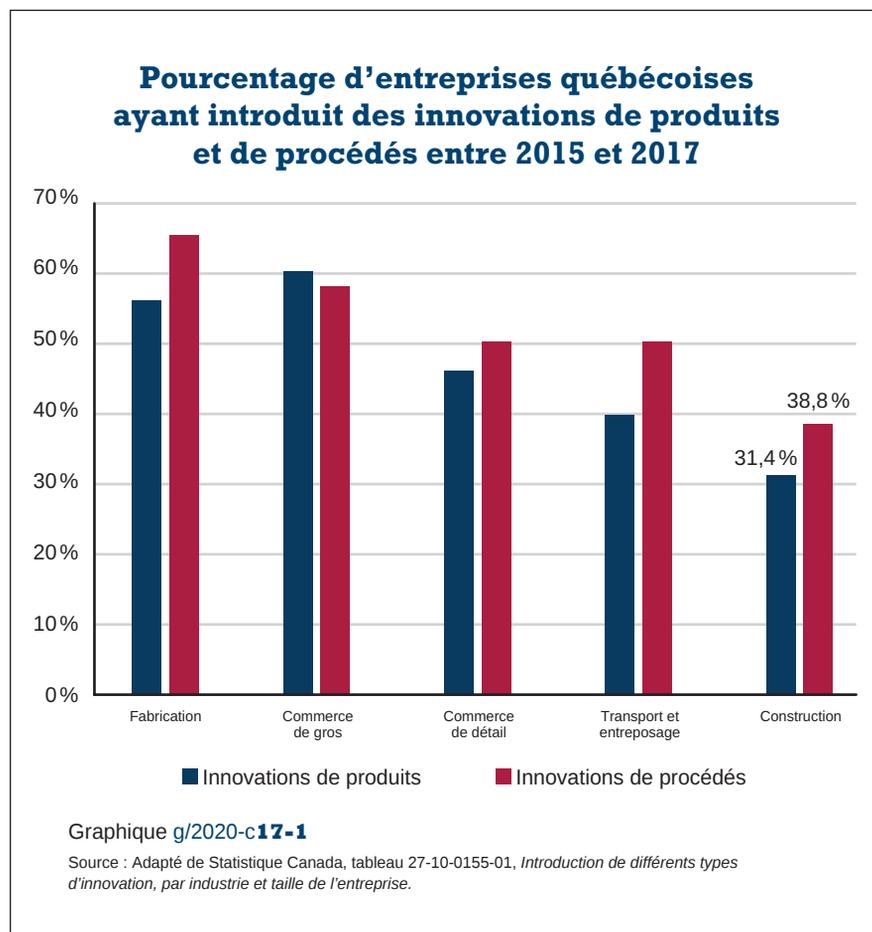
Au Québec, l'industrie de la construction se transforme de différentes façons et intègre de plus en plus les technologies et les approches issues de la construction 4.0 pour favoriser la compétitivité des entreprises de la province. Selon une étude réalisée en 2016 (Deloitte et CPQ), les moyens les plus utilisés pour innover comprennent, sans s'y limiter, les technologies mobiles, la conception intégrée¹⁸, le BIM, la préfabrication et d'autres innovations en lien avec les matériaux (polymères, matériaux recyclés, etc.). Plusieurs grandes entreprises au Québec utilisent le BIM depuis des années.

D'ici 2025, on estime que la transformation numérique à grande échelle de la construction non résidentielle permettra de réaliser des économies de coût global annuel de 13 à 21 % lors des phases d'ingénierie et de construction, et de 10 à 17 % durant l'exploitation de l'ouvrage (Gerbert, Castagnino, Rothballer, Renz et Filitz, 2016). Au Québec, uniquement en ce qui a trait aux dépenses en immobilisation, cela représenterait entre 3 et 5 milliards de dollars d'économies par année (Poirier *et al.*, 2018).

Bien que l'industrie québécoise de la construction participe au courant 4.0, elle reste toutefois en retard par rapport à sa contrepartie européenne et américaine. En effet, un sondage mené en 2015 par le Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti (GRIDD), en collaboration avec le CERACQ, révélait un taux d'adoption moyen du BIM de 31 % pour l'ensemble de l'industrie québécoise de la construction, avec néanmoins des écarts importants selon le type d'entreprises : ingénieurs-conseils (62 %), architectes (41 %), sous-traitants, fabricants et donneurs d'ouvrage (20 %), et entrepreneurs généraux (12 %)

Transformer le secteur de la construction par le numérique

(Forgues, Tahrani et Poirier, 2015). Ce taux d'adoption du BIM correspond bien à d'autres données publiées par Statistique Canada qui démontraient récemment que seulement 31,4 % et 38,8 % des entreprises québécoises en construction avaient introduit respectivement des innovations de produits et de procédés entre 2015 et 2017 (graphique 17-1).



La même enquête menée par le GRIDD a aussi permis de déterminer les principaux bénéfices pour les entreprises ayant adopté le BIM (Forgues *et al.*, 2015). On note l'amélioration de la compréhension du projet, l'amélioration de la coordination multidisciplinaire, l'élimination de conflits spatiaux entre les éléments 3D (par la détection d'interférences), l'amélioration de la

communication entre les membres de l'équipe de projet et la réduction du temps de coordination.

Plus récemment, les résultats d'une autre enquête menée par l'Association des architectes en pratique privée du Québec (2017) sur l'utilisation du BIM auprès de ses membres révélaient que son usage aurait trois fois plus d'incidences positives que négatives sur les pratiques d'affaires des architectes. Le BIM serait ainsi vu comme ayant un fort potentiel pour améliorer la coordination et la collaboration au sein de l'équipe de projet, stimuler l'industrie de la construction, bonifier les relations entre les parties prenantes du réseau d'affaires et améliorer la qualité des ouvrages ainsi que celle des processus de déploiement de projets.

Afin d'encourager l'usage intensif du BIM et des nouvelles technologies, différents acteurs se mobilisent pour appuyer la transformation numérique dans le secteur de la construction au Québec. Parmi ces intervenants, on trouve le CERACQ, le GRIDD, le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) ainsi que plusieurs chaires de recherche dans le secteur de la construction. Le Groupe BIM Québec, né de la volonté des principaux acteurs du BIM au Québec, contribue également à mieux intégrer les contraintes et spécificités de la province et à mieux développer les occasions que permet cette nouvelle pratique professionnelle. La Table multisectorielle BIM-PCI (processus de conception intégrée) constitue une autre initiative pour mobiliser les acteurs du secteur. Initiée en 2011 par le GRIDD, cette table de concertation vise à rapprocher les principaux acteurs de l'industrie afin d'établir une marche à suivre pour que l'industrie effectue une transition numérique (Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti, s.d.). Finalement, le gouvernement du Québec a octroyé une enveloppe de 11 millions de dollars sur cinq ans dans son budget de 2018-2019 pour soutenir la transformation numérique dans l'industrie québécoise de la construction. L'initiative provinciale pour la construction 4.0 (présentée sur le site www.constructionnumerique.ca) est subventionnée à même ce poste budgétaire.

Malgré toutes ces initiatives, l'industrie de la construction au Québec peine à entreprendre pleinement le virage numérique, alors que la construction 4.0 prend son essor ailleurs dans le monde – certaines entreprises aux États-Unis ont atteint le plus haut niveau de maturité d'utilisation des technologies mobiles en construction, et les grandes entreprises de ce secteur en France déploient déjà plusieurs technologies à l'échelle industrielle (AIF,

2017; CERACQ, 2015b). Ce retard est dû principalement aux disparités, d'une entreprise à l'autre, sur le plan de l'implantation et de l'utilisation de nouvelles technologies (comme le BIM), ainsi qu'à une forte résistance au changement qui nuit à leur adoption (Deloitte, 2019). La transformation numérique dans l'industrie québécoise de la construction pose en fait de nombreux défis – telle la lourde charge des coûts de transition pour les petites entreprises du secteur – qui viennent ralentir la courbe d'adoption de ces nouvelles pratiques.

Conditions pour soutenir la transformation du secteur au Québec

Sur le plan national, les défis liés à la transformation numérique sont multiples. Le secteur de la construction présente en fait de nombreuses caractéristiques structurelles uniques pouvant entraver le virage numérique. Parmi celles-ci, la faible taille des entreprises en construction limite leur capacité à prendre ce virage numérique. L'unicité de chaque projet de construction – deux ouvrages ne seront jamais identiques (type de sol, etc.) – peut également expliquer la réticence de l'industrie à s'automatiser et à adopter de nouvelles technologies d'information comparativement aux autres industries (Childress, 2013; Forgues et Staub-French, 2011; Gu et London, 2010; Hewage et Ruwanpura, 2009). À ces caractéristiques s'ajoutent la durée limitée des projets, la mobilité de la main-d'œuvre et des entreprises qui se déplacent d'un site à l'autre, le taux de roulement élevé du personnel ainsi que l'instabilité cyclique – l'activité de construction varie en fonction des investissements publics ou privés, entraîne des périodes de forte activité et d'autres où l'activité se trouve ralentie (CCQ, 2020). Le secteur de la construction repose également sur un grand nombre de parties prenantes dont les intérêts et les besoins peuvent différer, même en matière d'innovation.

Les bénéfices liés à la transformation numérique ne se réaliseront donc pleinement que si les acteurs de l'industrie travaillent tous ensemble (Poirier *et al.*, 2018). En effet, avec plus de 25 000 entreprises de construction au Québec en 2019, le processus de transformation numérique doit nécessairement passer par la collaboration et la transition collective. La collaboration est devenue impérative dans le secteur de la construction – les résultats d'une étude menée par le CERACQ (2015b) indiquent que, bien que certaines entreprises au Québec se montrent innovantes en adoptant, par

exemple, des technologies mobiles, l'utilisation de ces technologies se fait en général encore pour un usage personnel (par exemple la consultation de documents). Ce processus doit également être encouragé par une structure favorable et un soutien de tous les acteurs de l'industrie.

En effet, la transformation repose au départ sur les initiatives des entreprises individuelles – adoption de nouvelles technologies et de nouveaux processus, innovation de modèles d'entreprise, amélioration de la culture et de l'organisation de l'entreprise, etc. Toutefois, l'action individuelle ne peut pas suffire dans un secteur aussi fragmenté et horizontal : un bon nombre de défis doivent être relevés collectivement. Le secteur dans son ensemble a donc une responsabilité. Il doit établir de nouvelles formes de collaboration entre les entreprises de la construction ou améliorer celles existantes. Enfin, certaines initiatives peuvent être adoptées par le gouvernement, agissant à la fois comme régulateur et comme donneur d'ouvrage clé de grands projets d'infrastructure (World Economic Forum, 2016).

Ce n'est qu'en prenant appui sur des axes d'intervention précis que le virage numérique sera pleinement entrepris par l'industrie québécoise de la construction.

Axes d'intervention prometteurs dans le secteur de la construction au Québec

Comme dans d'autres domaines où l'on observe des efforts importants pour prendre le virage numérique, tels le commerce de détail, l'éducation ou le transport, le secteur québécois de la construction doit se doter d'une stratégie permettant de mettre en œuvre les changements technologiques nécessaires à sa transformation. C'est ce qui ressort de l'étude publiée par BIM Québec sur le déploiement des outils et des pratiques de modélisation des données du bâtiment au Québec. Le rapport propose une stratégie composée de 5 grands axes d'intervention, qui se déclinent en 20 initiatives, pour orienter et structurer la transformation de l'industrie. Le tableau 17-1 résume les axes d'intervention et les initiatives proposées.

Transformer le secteur de la construction par le numérique

		Axes d'intervention pour stimuler l'adoption des technologies en construction au Québec
Axes d'intervention		Initiatives proposées
1	Leadership et gouvernance	<p>Faire converger les pôles de gouvernance afin de coordonner les efforts visant à entreprendre et à soutenir le virage numérique au Québec.</p> <p>Inscrire les corps publics comme donneurs d'ouvrage exemplaires en matière de construction utilisant les possibilités du numérique.</p> <p>Accroître la demande en matière de BIM par les donneurs d'ouvrage.</p> <p>Développer et soutenir une stratégie québécoise de transition vers le numérique pour l'industrie de la construction mettant de l'avant des cibles claires et des mesures suffisantes et concrètes.</p>
2	Engagement et accompagnement	<p>Créer un mouvement vers le BIM afin de briser l'inertie de l'industrie.</p> <p>Mettre en place des incitatifs pour la prise du virage par les entreprises et les institutions.</p> <p>Faire la promotion des meilleures pratiques dans la livraison et le maintien de notre environnement bâti.</p> <p>Élargir le bassin de projets par secteur d'activités.</p>
3	Collaboration et exécution	<p>Mettre en place un cadre politique, légal et financier favorable au déploiement du BIM.</p> <p>Développer des standards afin de normaliser le travail là où il gagne à être normalisé.</p> <p>Cadrer les rôles et les responsabilités des acteurs du projet et les adapter aux nouvelles pratiques numériques.</p> <p>Définir de nouvelles approches collaboratives à la livraison du projet et à son cycle de vie.</p>
4	Formation et enseignement	<p>Orienter les programmes et les méthodes d'enseignement et de formation vers les pratiques émergentes.</p> <p>Appuyer le développement de programmes de formation adaptés aux différents besoins de la filière en matière de BIM.</p> <p>Assurer l'accessibilité à l'enseignement et à la formation de qualité.</p> <p>Soutenir l'évaluation des compétences individuelles.</p>
5	Recherche et développement	<p>Encourager et accroître les partenariats entre le milieu universitaire et l'industrie.</p> <p>Mettre sur pied (ou consolider) un centre québécois dédié à l'intégration des nouvelles technologies en construction.</p> <p>Développer une plateforme de partage et de centralisation des connaissances et d'outils liés au virage numérique.</p> <p>Mettre en place un système d'étalonnage pour l'industrie afin de mesurer les bénéfices du BIM et de favoriser le développement d'une culture d'amélioration continue.</p>

Source : Adapté de Poirier *et al.*, 2018.

Tableau t/2020-c17-1

Finalement, dans leur stratégie économique favorisant l'innovation de la construction au Québec, Deloitte et le Conseil du patronat du Québec (2016) présentent deux exemples d'intervention afin de soutenir l'innovation, le transfert technologique et le développement des compétences et des pratiques. La première intervention consiste à encourager l'investissement privé en capital, en main-d'œuvre et en innovation pour augmenter la productivité, alors que la seconde vise à soutenir le virage vert dans les produits et les procédés liés à la construction.

Conclusion

Le secteur de la construction joue un rôle prépondérant dans l'économie québécoise. La productivité du travail dans ce milieu reste toutefois plus faible que celle d'autres secteurs, dont celui du manufacturier. Cet écart s'explique par un certain nombre d'enjeux majeurs auxquels doit aujourd'hui faire face l'industrie de la construction : globalisation du secteur, pénurie de main-d'œuvre, défis en matière de développement durable, etc. En réponse à ces enjeux, l'industrie devra entre autres travailler sur l'innovation, un vecteur clé de productivité pour soutenir la compétitivité de ses entreprises.

Alors que le courant de la construction 4.0 prend son essor dans le monde, le Québec accuse toujours un retard dans l'adoption de ses technologies dans la construction. Pourtant, les bénéfices liés à l'adoption des technologies 4.0 dans le secteur de la construction sont nombreux : amélioration de la productivité, de l'efficacité des modes de gestion et de production, de la qualité des ouvrages bâtis, de la collaboration au sein des équipes de projet, de la santé et de la sécurité des travailleurs, du respect de critères et de lois gouvernementales en matière de développement durable, etc.

Pour tirer pleinement avantage des bénéfices liés à l'innovation, de nombreux défis devront être relevés, le plus important étant la forte résistance au changement de l'industrie. En effet, alors que certaines entreprises envisagent d'adopter les nouvelles technologies, d'autres ne semblent pas encore prêtes à entreprendre le virage numérique, surtout les petites firmes (Association des architectes en pratique privée du Québec, 2017).

En dépit des obstacles, l'industrie québécoise de la construction assiste tout de même, depuis déjà quelques années, à l'émergence de diverses initiatives – plans d'action, axes d'intervention, pistes de solution concrètes – impliquant les acteurs du secteur. Elles devront comprendre notamment une gouvernance harmonisée du virage numérique, l'élaboration d'une feuille de route pour mesurer la progression de l'industrie, la formation de réseaux de soutien pour diffuser l'information, l'instauration d'un réseau universitaire favorisant la recherche, l'innovation et la diffusion des connaissances, et l'accroissement de la demande pour l'innovation dans le contexte de projets publics.



Références

Alliance Industrie du Futur (AIF). (2017). *Études filières industrie du futur : synthèse des impacts et des recommandations*. Repéré à : http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2017/09/2017_09_AIF_document-a-telecharger_Etudes-Filières-Industrie-du-Futur-Septembre-2017.pdf.

Association des architectes en pratique privée du Québec. (2017). *Impact économique et profil statistique des établissements privés d'architecture au Québec*. Repéré à : <http://www.aappq.qc.ca/content/file/rapport-aappq-janvier-2017-version-finale-sans-4.pdf>.

Association québécoise de la quincaillerie et des matériaux de construction. (2020, janvier). *L'intelligence artificielle sur un chantier de Pomerleau*. Repéré à : <https://www.aqmat.org/lintelligence-artificielle-chantier-de-pomerleau/>.

BIM Industry Working Group. (2011). *Management for value, cost and carbon improvement: A report for the Government Construction Client Group*. Repéré à : <https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/BISBIMstrategyReport.pdf>.

Björk, B.-C. (1999). Information technology in construction: Domain definition and research issues. *International Journal of Computer Integrated Design and Construction*, 1(1), 1-16. Repéré à : <http://hdl.handle.net/10227/617>.

Boton, C. (2009). *Gestion de l'information au sein des projets de construction : de l'expérience luxembourgeoise à la proposition d'un modèle de système d'information pour l'Afrique*. Université Senghor d'Alexandrie.

Bowmaster, J. et Rankin, J. (2019, mai). A research roadmap for off-site construction: Automation and robotics (p. 173-180). Article présenté au sommet Modular and Offsite Construction (MOC), Banff, Canada. doi:10.29173/mocs91

Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations (CEFRIO). (2014). *Construction 2.0. L'efficacité par le numérique*. Repéré à : <https://cefrio.qc.ca/media/1324/construction-20-lefficacite-par-le-numerique.pdf>.

Centre d'études et de recherches pour l'avancement de la construction au Québec (CERACQ). (2015a). *Processus de conception intégrée (PCI). L'efficacité énergétique des bâtiments. Réduction des impacts sur l'environnement*. Repéré à : <https://ceracq.ca/wp-content/uploads/2015/03/Guide-conception-integree-CERACQ.pdf>.

Centre d'études et de recherches pour l'avancement de la construction au Québec (CERACQ). (2015b). *Construction 2.0 : guide des technologies mobiles*. Repéré à : <https://ceracq.ca/wp-content/uploads/2015/11/Guide-de-Tech.-Mobiles.pdf>.

Childress, V. W. (2013). Building construction and building information modeling. *Technology and Engineering Teacher*, 73(4), 24.

Commission de la construction du Québec (CCQ). (2019a). *Statistiques annuelles de l'industrie de la construction 2018*. Repéré à : https://www.ccq.org/-/media/Project/Ccq/Ccq-Website/PDF/Recherche/StatistiquesHistoriques/2018/intro_tableaux_2018.pdf.

Commission de la construction du Québec (CCQ). (2019b). *Rapport annuel de gestion 2018*. Repéré à : https://www.ccq.org/-/media/Project/Ccq/Ccq-Website/PDF/Communications/RapportsAnnuels/rapport_annuel_2018.pdf.

Commission de la construction du Québec (CCQ). (2020). *L'industrie de la construction*. Repéré à : <https://www.ccq.org/fr-CA/En-tete/qui-sommes-nous/industrie-de-la-construction>.

Conference Board du Canada. (2018). *Recherche-développement des entreprises*. Repéré à : <https://www.conferenceboard.ca/hcp/provincial-fr/innovation-fr/berd-fr.aspx>.

Danjou, C., Rivest, L. et Pellerin, R. (2017). *Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie*. Article présenté au 12^e Congrès international de génie industriel (CIGI 2017), Compiègne, France. Repéré à : <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/16253/1/Rivest%20L%202017%2016253.pdf>.

De Blois, M., Lizarralde, G. et De Coninck, P. (2016). Iterative project processes within temporary multi-organizations in construction: The self-, eco-, re-organizing projects. *Project Management Journal*, 47(1), 27-44. doi:10.1002/pmj.21560

Deloitte. (2019). *Vers la création d'une grappe dans le secteur de la construction* [rapport final remis au ministère de l'Économie et de l'Innovation]. Repéré à : https://www.cpq.qc.ca/workspace/uploads/files/rapport_final_remis_au_mei_1.pdf.

Deloitte et Conseil du patronat du Québec (CPQ). (2016). Étude sur l'écosystème d'affaires de la construction au Québec. Repéré à : <https://www.cpq.qc.ca/wp-content/uploads/2016/04/cpq-construction270516.pdf>.

Drath, R. et Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or hype? *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56-58. doi:10.1109/MIE.2014.2312079

EU BIM Task Group (2016). *Handbook for the introduction of building information modelling by the European public sector: Strategic action for construction sector performance: Driving value, innovation and growth*. Repéré à : http://www.eubim.eu/wp-content/uploads/2017/07/EUBIM_Handbook_Web_Optimized-1.pdf.

Frenette, S. (2015). *Améliorer les processus de communication sur les chantiers de construction à l'aide des technologies mobiles et des technologies infonuagiques* [mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, Canada].

Transformer le secteur de la construction par le numérique

- Forgues, D. et Staub-French, S. (2011). *Améliorer l'efficacité et la productivité du secteur de la construction grâce aux technologies de l'information*. Repéré à : <http://gridd.etsmtl.ca/publications/2011%20rapport%20Am%c3%a9liorer%20l'efficacit%c3%a9%20et%20la%20productiv%c3%a9%20du%20secteur%20de%20la%20construction.pdf>.
- Forgues, D., Tahrani, S. et Poirier, E. (2015). *Sondage 2015 – Adoption du BIM et des approches intégrées au Québec*. GRIDD (Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti), École de technologie supérieure. Repéré à : <http://gridd.etsmtl.ca/fr/archives/1356>.
- Gann, D. M. et Salter, A. J. (2000). Innovation in project-based, service-enhanced firms: The construction of complex products and systems. *Research Policy*, 29(7-8), 955-972. doi:10.1016/S0048-7333(00)00114-1
- General Services Administration. (2007). *GSA BIM Guide Overview*. Repéré à : https://www.gsa.gov/cdnstatic/GSA_BIM_Guide_v0_60_Series01_Overview_05_14_07.pdf.
- Gerbert, P., Castagnino, S., Rothballer, C., Renz, A. et Filitz, R. (2016). *Digital in engineering and construction: The transformative power of building information modeling*. The Boston Consulting Group. Repéré à : <http://futureofconstruction.org/content/uploads/2016/09/BCG-Digital-in-Engineering-and-Construction-Mar-2016.pdf>.
- Groupe de recherche en intégration et développement durable en environnement bâti (GRIDD). (s.d.). *Table multisectorielle*. Repéré à : <http://gridd.etsmtl.ca/fr/table-multisectorielle>.
- Grosso Sategna, L., Meinero, D. et Volontà, M. (2019). *Digitalising the construction sector: Unlocking the potential of data with a value chain approach*. Repéré à : https://issuu.com/cece_europe/docs/final_nobianche2-ied_consulting_-_f.
- Gu, N. et London, K. (2010). Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*, 19(8), 988-999. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.002
- Guerriero, A. (2009). *La représentation de la confiance dans l'activité collective. Application à la coordination de l'activité de chantier de construction*. Nancy-Université INPL. Repéré à : <https://pdfs.semanticscholar.org/dee9/23824bab11f1b8738ee41e81407305b163bc.pdf>.
- Harty, J. et Laing, R. (2010). Removing barriers to BIM adoption: Clients and code checking to drive changes. *Handbook of research on building information modeling and construction informatics: Concepts and technologies*, 546-560. doi:10.4018/978-1-60566-928-1.ch024
- Hewage, K. N. et Ruwanpura, J. Y. (2009). A novel solution for construction on-site communication—The information booth. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(4), 659-671. doi:10.1139/I09-026
- Innovation Développement MTL. (2018, janvier). *Réalité virtuelle et réalité augmentée : technologies de pointe au cœur de l'innovation à Montréal (partie 2)*. Repéré à : <https://ville.montreal.qc.ca/idmtl/realite-virtuelle-et-realite-augmentee-technologies-de-pointe-au-coeur-de-linnovation-a-montreal-partie-2/>.
- Kubicki, S. (2006). *Assister la coordination flexible de l'activité de construction de bâtiments. Une approche par les modèles pour la proposition d'outils de visualisation du contexte de coopération* [thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, France].
- Lehmann, V. et Motulsky, B. (2013). *Communication et grands projets. Les nouveaux défis*. Presses de l'Université du Québec.

McAuley, B., Hore, A. et West, R. (2017). *BICP Global BIM Study: Lessons for Ireland's BIM Programme*. Repéré à : <http://arrow.dit.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1016&context=beschrecrep>.

McKinsey and Company. (2017, février). *Reinventing construction: A route to higher productivity*. Repéré à : <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/Reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/MGI-Reinventing-Construction-Executive-summary.pdf>.

Orstavik, F., Dainty, A. et Abbott, C. (2015). *Construction Innovation*. John Wiley & Sons Ltd. doi:10.1002/9781118655689

Poirier, E. A., Frénette, S., Carignan, V. et Paris, H. (2018). *Accroître la performance de la filière québécoise de la construction par le virage numérique : étude sur le déploiement des outils et des pratiques de la modélisation des données du bâtiment au Québec*. Construction IT Alliance Limited. Repéré à : https://5147b3bb-4760-4d06-beca-a82606abf82e.filesusr.com/ugd/672f48_ac1725fcd7a04483a818107b29da9079.pdf.

Poirier, E., Staub-French, S., Forgues, D. (2015). Measuring the impact of BIM on labor productivity in a small specialty contracting enterprise through action-research. *Automation in Construction*, 58, 74-84. doi:10.1016/j.autcon.2015.07.002

Pôle de recherche et d'innovation en matériaux avancés au Québec (PRIMA Québec). (2018). *Les matériaux avancés : un secteur stratégique pour le Québec*. Repéré à : http://www.prima.ca/sites/default/files/prima_portrait_materiaux_avances_2018.pdf.

PricewaterhouseCoopers LLP. (2018). *BIM level 2 benefits measurement. Summary guide*. Repéré à : https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/1_pwc_summary_guidance_to_bbm.pdf.

Prieto, B. (2013). Systemic innovation and the role of program management as enabler in the engineering & construction industry. *PM World Journal*, 2(3), 1-11. Repéré à : <https://pmworldlibrary.net/wp-content/uploads/2013/03/pmwj8-mar2013-prieto-systemic-innovation-program-management-role-SecondEdition.pdf>.

Roland Berger GMBH. (2016). *Think. Act. Beyond mainstream. Digitization in the construction industry. Building Europe's road to "Construction 4.0"*. Repéré à : https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/tab_digitization_construction_industry_e_final.pdf.

SECOR/KPMG. (2012). Étude sur la gestion actuelle du plan québécois des infrastructures et sur le processus de planification des projets. Repéré à : https://www.tresor.gouv.qc.ca/fileadmin/PDF/publications/e/Etude/Etude_SECOR-KPMG.pdf.

Statistique Canada. Tableau 27-10-0155-01, Introduction de différents types d'innovation, par industrie et taille de l'entreprise. <https://doi.org/10.25318/2710015501-fra>

Statistique Canada. Tableau 34-10-0038-01, Dépenses en immobilisation et réparations, actifs corporels non résidentiels, selon le type de propriété et la géographie. <https://doi.org/10.25318/3410003801-fra>

Statistique Canada. Tableau 34-10-0480-01, *Productivité du travail et mesures connexes par industrie du secteur des entreprises et par activité non commerciale, conformes aux comptes des industries*. <https://doi.org/10.25318/3610048001-fra>

University of Cambridge. (2020). *PwC BIM Benefits Methodology and Report*. Centre for Digital Built Britain. Repéré à : <https://www.cdbb.cam.ac.uk/BIM/BBM>.

Transformer le secteur de la construction par le numérique

Usman, N. et Said, I. (2012). Information and communication technology innovation for construction site management. *American Journal of Applied Sciences*, 9(8), 1259-1267. doi:10.3844/ajassp.2012.1259.1267

Wang, X., Yung, P., Luo, H. et Truijens, M. (2014). An innovative method for project control in LNG project through 5D CAD: A case study. *Automation in Construction*, 45, 126-135. doi:10.1016/j.autcon.2014.05.011

World Economic Forum. (2016). *Shaping the future of construction: A breakthrough in mindset and technology*. Préparé en collaboration avec The Boston Consulting Group. Repéré à : http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf.

Notes

1. Au Québec, la loi R-20 subdivise l'industrie de la construction en quatre grandes catégories d'activités commerciales. Outre i) le secteur résidentiel, on y trouve la grande catégorie des bâtiments non résidentiels et des travaux de génie : ii) les travaux de génie civil et de voirie (par exemple les routes), iii) les installations industrielles (par exemple les usines), de même que iv) les bâtiments institutionnels (par exemple les hôpitaux) et commerciaux (par exemple les centres de distribution).
2. Les investissements en construction représentent ici la valeur des dépenses engagées par les ménages, les entreprises et les administrations publiques pour construire des immeubles, ainsi que celle des dépenses en immobilisations dans les travaux de génie liés au secteur non résidentiel.
3. Voir Statistique Canada, tableau 34-10-0038-01, *Dépenses en immobilisation et réparations, actifs corporels non résidentiels, selon le type de propriété et la géographie*.
4. Les retombées indirectes représentent les effets chez les premiers fournisseurs du secteur de la construction et chez les fournisseurs subséquents.
5. La valeur ajoutée correspond à l'apport effectif d'un secteur dans l'économie. Pour estimer la valeur ajoutée d'un secteur, on doit soustraire de sa production brute les achats d'intrants intermédiaires réalisés auprès d'autres fournisseurs.
6. La productivité du travail est évaluée comme le rapport de la valeur ajoutée réelle aux heures travaillées.
7. Voir Statistique Canada, tableau 34-10-0480-01, *Productivité du travail et mesures connexes par industrie du secteur des entreprises et par activité non commerciale, conformes aux comptes des industries*.
8. L'augmentation de la productivité du secteur dépend également de facteurs « non technologiques », dont des modifications au cadre réglementaire ; ces volets ne sont pas traités dans ce chapitre.
9. Les technologies mobiles sont des appareils portables tels le téléphone intelligent, la tablette ou encore l'ordinateur portable.
10. Les matériaux, tels le béton, le ciment ou les vitres, peuvent être « augmentés » par la technologie afin d'améliorer leurs propriétés physiques ou fonctionnelles (Pôle de recherche et d'innovation en matériaux avancés au Québec, 2018).

11. Les travailleurs peuvent être « augmentés », par exemple, par des robots collaboratifs ou des exosquelettes dans le but d'amplifier, de guider ou de faciliter leurs gestes. De même, les équipements peuvent être « augmentés » par des capteurs pour collecter des données sur les conditions de travail, localiser les travailleurs ou encore prévenir les risques.
12. Munis de casques connectés, les travailleurs peuvent visualiser en 3D l'ensemble des couches d'un bâtiment (réseau électrique, plomberie, climatisation) en réalité augmentée durant la construction en vue de mieux comprendre le projet et d'anticiper les problèmes.
13. Une application mobile est un type d'application logicielle qui fonctionne sur une technologie mobile.
14. Les matériaux composites sont formés d'au moins deux composants dont les propriétés sont complémentaires. Ces matériaux possèdent des propriétés que les composants seuls n'ont pas.
15. Un matériau écoresponsable (ou « écomatériau ») est un matériau de construction qui répond non seulement aux critères de performance physique et fonctionnelle exigés en général (durabilité, sécurité, résistance, etc.), mais aussi à des critères environnementaux tout au long de son cycle de vie.
16. Les matériaux autoréparants (comme le béton autoréparant) ont des microcapsules intégrées remplies d'une sorte de colle qui s'ouvrent en cas de fissure. Le matériau de réparation alors activé permet de réparer la fissure.
17. La valeur actuelle nette correspond à la rentabilité d'un projet après la prise en compte de l'investissement initial requis pour le financer.
18. La conception intégrée est un processus de collaboration entre les intervenants qui couvre le cycle de vie complet d'un projet. Ce processus nécessite une équipe de conception multidisciplinaire qui rassemble les compétences nécessaires pour résoudre de façon intégrée et optimale toutes les exigences de conception découlant des objectifs fonctionnels, environnementaux et économiques (CERACQ, 2015a).

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 Bazilevs *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

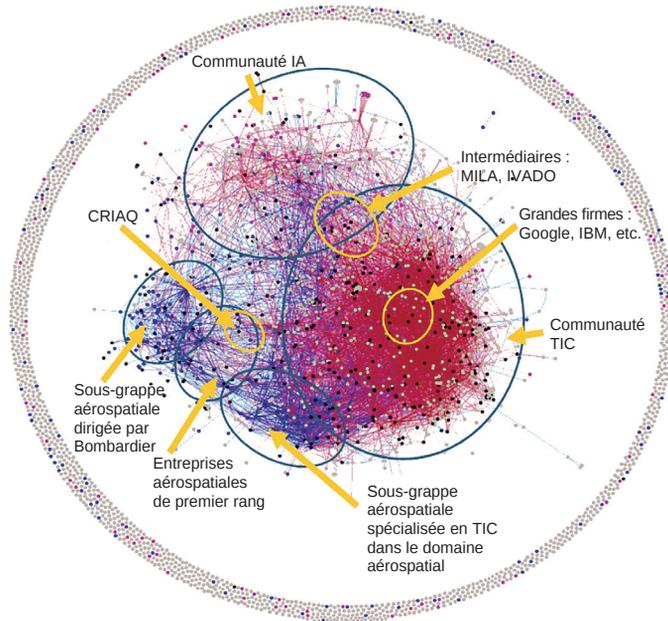


Figure f/2020-c18-1

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.

Chapitre 19

LA MOBILITÉ INTÉGRÉE : UNE PERSPECTIVE D'ÉCOSYSTÈME D'INNOVATION

Carolyn J. Hatch

Associée de recherche à HEC Mosaic

Laurent Simon

Professeur titulaire à HEC Montréal

Patrick Cohendet

Professeur titulaire à HEC Montréal,
et chercheur et fellow au CIRANO

Résumé

Les villes font face aujourd'hui à une transformation profonde dans leur manière d'organiser la circulation des personnes et des biens. De nouveaux modèles économiques inspirés par l'économie de partage et par les technologies de rupture offrent en effet la possibilité d'intégrer de manière fluide les services de transport urbain dans un contexte de mobilité partagée. Ainsi, la « mobilité intégrée » (« mobility as a service », ou « MaaS ») est maintenant rendue possible grâce aux plateformes de mobilité intégrée qui combinent les moyens de transport (tant publics que privés). Ce type d'outil simplifie le processus de planification pour l'utilisateur et permet de fournir des solutions de déplacement hautement personnalisées. Dans le présent chapitre, nous examinons la mobilité intégrée et l'utilisation d'une plateforme

collaborative qui la sous-tend dans une perspective d'écosystème d'innovation. En particulier, nous nous concentrons sur certains des principaux défis auxquels les villes québécoises et canadiennes sont confrontées lorsqu'elles tentent d'évoluer vers une plus grande intégration des services de mobilité urbaine. Parmi ces défis, l'un des plus critiques est celui de la collaboration entre les divers intervenants en mobilité.

Introduction

Les villes connaissent une transformation profonde dans leur manière d'organiser la circulation des personnes et des biens, à un moment où de nouveaux modèles économiques inspirés par l'économie du partage et les technologies numériques de rupture offrent la possibilité d'intégrer de manière fluide les services de transport urbain dans un mécanisme de mobilité partagée. Ainsi, la « mobilité intégrée » (qu'on appelle en anglais « *mobility as a service* », ou « MaaS ») est aujourd'hui rendue possible par une plateforme de mobilité intégrée qui combine les moyens de transport (tant publics que privés) afin de simplifier le processus de planification pour l'utilisateur et de fournir des solutions de déplacement hautement personnalisées (Ambrosino, Nelson, Boero et Pettinelli, 2016; Novikova, 2017; Mulley et Kronsell, 2018).

Comme on l'a vu dans d'autres secteurs, comme celui de l'aérospatiale (Armellini, Beaudry, Bourgault, Solar-Pelletier, Cohendet, Simon, Sultana et Turkina, 2020), ces nouvelles technologies numériques recèlent un potentiel d'innovation important, avec l'avantage de se combiner les unes aux autres pour en accroître l'impact, tout en facilitant la collaboration intra- et extra-organisationnelle grâce au partage des données. Toutefois, pour que l'industrie de la mobilité urbaine puisse bénéficier de ces possibilités, les acteurs (tant les organismes publics traditionnels que les nouveaux venus du secteur privé) doivent se conformer aux nouvelles formes d'organisation et de collaboration industrielles. Un grand nombre de publications récentes soulignent l'importance des plateformes de collaboration numérique qui, dit-on, facilitent la coordination et la gestion de l'innovation et de la création de valeur en faisant intervenir divers acteurs.

Dans ce chapitre, nous analysons la notion de mobilité intégrée et les plateformes de collaboration qui la sous-tendent dans une perspective d'écosystème d'innovation (Oh, Phillips, Park et Lee, 2016; Adner, 2006; Adner et Kapoor, 2010; Iansiti et Levien, 2004). En particulier, nous nous concentrons sur les efforts visant à passer à une plus grande intégration des services de mobilité urbaine au Québec, ainsi que sur les principaux défis auxquels les villes sont confrontées dans ce processus. Notre intérêt pour ces questions est déterminé par divers facteurs : 1) la nécessité de remettre en question les infrastructures et les approches traditionnelles de mobilité urbaine en raison de l'empreinte carbone croissante de cette industrie; 2) la tendance à l'adoption accrue de solutions de mobilité électrique par rapport au modèle de combustion classique, et 3) la transformation vers l'utilisation de services de mobilité partagée plutôt que la possession d'un véhicule personnel.

Ce chapitre est divisé en trois parties. Tout d'abord, nous examinons la rupture numérique de la mobilité urbaine et l'émergence de l'intégration, comme l'a montré le déploiement du système Whim par l'entreprise MaaS Global à Helsinki, en Finlande. Nous examinons ensuite la situation au Québec, notamment les grandes tendances de l'industrie, les voies d'intégration des plateformes et les principales contraintes auxquelles l'industrie locale est confrontée. Nous concluons en résumant les principales idées et les principaux défis.

La mobilité face à la rupture numérique et l'émergence de solutions d'intégration

La récente vague de transformation numérique a ouvert de nouvelles possibilités pour améliorer les solutions de mobilité dans les villes. Les technologies de rupture et les nouveaux modèles économiques offrent un potentiel important pour optimiser la sécurité et l'efficacité de la circulation des personnes et des biens, tandis que les capacités de traitement de données massives et le recours à l'Internet des objets (IdO) permettent de tendre vers un modèle de ville intelligente et, notamment, de mieux anticiper et de résoudre plus facilement les problèmes liés à la circulation et à la congestion. Les modèles d'affaires délaissent de plus en plus les anciennes approches fondées sur la propriété des véhicules pour se tourner vers des

services de mobilité partagée, où le transport en commun se combine harmonieusement avec les offres de services du secteur privé et le véhicule personnel dans un système convivial, personnalisé et en temps réel.

Au cœur de la transformation numérique de la mobilité urbaine se trouve le concept de mobilité intégrée, qui permet aux organismes de transport en commun d'étendre les services qu'ils offrent à leurs clients en reliant les différentes options modales entre elles à un point d'accès unique. Ce nouveau modèle de mobilité urbaine implique le regroupement de multiples options de transport (comme l'autopartage, le covoiturage, le transport actif, le transport en commun et le péage routier) avec des services de mobilité tels que la planification et la facturation des déplacements. Hautement centré sur le client, ce modèle crée une solution de transport conviviale, pratique et personnalisée, permettant aux usagers de planifier et de payer *en un seul clic* leurs déplacements quotidiens au moyen de plusieurs modes de transport. L'idée de base est qu'une grande partie de la mobilité urbaine peut se faire sans voiture si l'utilisateur a les bonnes options. Le fait de disposer d'un système de transport en commun robuste et d'autres choix pour les déplacements, ainsi que d'un accès occasionnel à une voiture, devrait signifier que moins de gens auront besoin de posséder leur propre véhicule.

Le succès du processus d'intégration en cours dépend notamment de la capacité des organismes de transport en commun de s'associer à d'autres fournisseurs de mobilité, y compris des entreprises privées et des acteurs tiers de plateformes de mobilité. Par exemple, le système de MaaS Global ainsi que la plateforme technologique Whim sont devenus des acteurs majeurs dans ce domaine et sont maintenant opérationnels dans les villes d'Helsinki en Finlande et de Birmingham en Angleterre. MaaS Global vend ainsi des forfaits modaux mensuels qui simplifient les déplacements quotidiens afin d'offrir le trajet le plus commode possible et de permettre aux gens d'effectuer un choix modal optimal pour un trajet donné.

Cette nouvelle influence numérique vers l'intégration entraîne de profonds changements dans l'industrie de la mobilité urbaine, des changements qui bouleversent non seulement la nature des acteurs, mais aussi la façon dont ils s'organisent pour co-crée de la valeur, développer de nouveaux modèles économiques et innover pour élargir les offres existantes. Dans ce contexte, une modification radicale des offres de service s'est produite, basée sur un passage vers un modèle d'intégration de plateforme qui permet le partage

de la valeur au sein d'un écosystème d'innovation composé d'organisations dispersées et d'acteurs divers (Gawer et Cusumano, 2002 ; lansiti et Levien, 2004).

Les nouveaux modèles de mobilité durable et intégrés comme celui de MaaS Global sont caractérisés par l'émergence de nouveaux acteurs entrant dans un espace historiquement dominé par les agences de transport du secteur public. Ces nouveaux entrants peuvent inclure de jeunes entreprises, des acteurs de plateformes technologiques tierces et des fournisseurs de services du secteur privé comme Whim, Uber et Lyft, ou encore de nouveaux services numériques. Il peut s'agir aussi de villes, d'unités administratives de planification, de décideurs politiques, de centres de recherche ou d'intermédiaires industriels orientés vers la mobilisation d'acteurs à l'intérieur et à l'extérieur des limites traditionnelles du secteur, comme les grappes industrielles. Ces divers acteurs de la mobilité peuvent offrir des solutions technologiques ou de nouveaux modèles commerciaux qui fournissent une partie, voire la totalité, d'une solution de mobilité donnée.

Comme le souligne la littérature, ces divers acteurs (qui ont parfois des objectifs opposés) sont rassemblés dans un réseau dynamique orienté autour d'une vision commune et d'un intérêt partagé, en l'occurrence, la recherche de solutions de mobilité urbaine plus durables et plus satisfaisantes. Cette vision commune agit comme une force centripète qui rassemble les acteurs de la plateforme et qui, en même temps, favorise le développement de relations personnelles et de confiance entre les parties. Cela facilite alors le transfert de connaissances et renforce la capacité collective du réseau à faire avancer l'innovation. Dans les écosystèmes d'innovation dynamiques, on dit que les relations entre les participants sont symbiotiques, car les membres évoluent conjointement avec le système, et chaque partie prenante participe au sort du système dans son ensemble (lansiti et Levien, 2004 ; Moore, 1996).

Outre l'émergence de nouveaux acteurs, des formes de gouvernance et des mécanismes de coordination inédits, qui favorisent la collaboration entre diverses parties, ont vu le jour, intégrant des joueurs en dehors de la chaîne de valeur traditionnelle et créant ainsi de la valeur à partir de données extraites de processus riches et multiples. Il s'agit notamment de nouvelles pratiques et formes d'organisation soutenant le développement d'interactions et de liens entre de multiples organisations, les interdépendances entre les acteurs et les conditions institutionnelles qui façonnent la

co-crédation de valeur. Dans un contexte où leurs capacités co-évoluent, les participants à l'écosystème coopèrent et se font concurrence pour innover dans la création de nouveaux produits et services. Le concept d'écosystème offre une base d'accords de collaboration et de conditions institutionnelles par lesquels les acteurs publics, les entreprises et d'autres entités combinent des offres individuelles en une solution cohérente et centrée sur le client. Dans ce processus de co-crédation de valeur et de co-innovation, ensemble, ils créent quelque chose qu'aucun acteur ne pourrait faire seul (Adner, 2006; Moore, 1996). Ces conditions sont à la base du succès de MaaS Global dans une ville comme Helsinki, et permettent également de comprendre les principales contraintes liées au déploiement et à l'opérationnalisation de ce nouveau modèle de mobilité.

Transformations de la mobilité et initiatives d'intégration au Québec

Le Québec est considéré par beaucoup d'experts comme un chef de file au Canada et en Amérique du Nord en matière de mobilité durable, de transport intelligent et d'électrification des transports. D'une part, un pourcentage élevé (42 %) de ses impacts en matière de gaz à effets de serre (GES) est lié au transport, ce qui constitue un résultat plus élevé que celui d'autres régions industrialisées avancées comme l'Ontario (34 %) ou la Californie (38 %) (JCCTRP 2018). D'autre part, la province a mis en place un marché du carbone en 2013, et ses objectifs climatiques sont parmi les plus ambitieux au pays (Québec visait même une réduction de 30 % des niveaux de 1990 d'ici 2020 – mais il semble bien que cet objectif devra être remis à plus tard) (Whitmore et Pineau, 2020). Le Québec a ainsi élaboré et mis en œuvre une série de politiques solides à l'échelle provinciale et municipale en matière de transport durable et d'électrification afin d'orienter l'action, et a progressé dans l'intégration de la planification des transports dans l'aménagement urbain et territorial afin de traiter la mobilité sur le territoire de manière intégrée et globale.

Le Québec, qui bénéficie d'une abondance d'hydroélectricité et d'autres ressources naturelles, dispose d'atouts majeurs en matière d'électrification des transports et de production de véhicules électriques (VE). Chef de file dans la production de transport terrestre électrique et intelligent (Tourisme Montréal, 2019), il a déployé une grappe industrielle pour mobiliser et rallier

les acteurs de l'industrie autour de projets communs afin de favoriser les conditions d'intégration et d'innovation, y compris pour les acteurs hors de la chaîne de valeur traditionnelle du transport (notamment grâce à Propulsion Québec). La province a investi dans la création d'organismes visant à assurer le financement de projets de recherche collaborative en transport intelligent et électrique (InnovÉÉ), à développer des technologies et à promouvoir l'éducation et la formation en région (Institut du véhicule innovant, IVI Solutions), ainsi qu'à expérimenter des technologies de rupture en conditions urbaines réelles (IVÉO et Jalon MTL). D'autres acteurs importants sont le Pôle d'excellence québécois en transport terrestre, Prompt ainsi que le Réseau d'innovation ouverte en mobilité durable (RIOMD), également financé par le gouvernement du Québec. Le RIOMD est un écosystème collaboratif unique d'acteurs qui travaillent de concert pour accélérer tous les aspects de la mobilité durable, de la R-D aux démonstrations technologiques en passant par les liaisons avec l'industrie et le public. Son rayonnement est à la fois local et international. Les acteurs de la mobilité interagissent également au sein de réseaux internationaux sur la mobilité, tel le Movin'On Lab, qui est devenu un réseau international de référence de la mobilité durable par l'innovation. À l'initiative de l'entreprise française Michelin, ce réseau, qui tient son événement majeur annuel à Montréal, est composé de 250 acteurs et comprend de grands groupes industriels (dont de nombreuses entreprises québécoises), des innovateurs, des chercheurs et des organisations publiques ou privées qui se sont rassemblés au sein de diverses communautés d'intérêt pour mettre leurs expertises et leurs convictions au service de la mobilité du futur.

Les villes de Québec et de Montréal abritent plusieurs universités et centres de recherche, dont le Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), l'un des plus grands centres de recherche sur les transports au monde et le plus important en nombre de chercheurs ainsi que de nombreuses chaires de recherche, instituts, grappes industrielles et associations dans le domaine des transports propres, électriques et intelligents. Montréal est reconnue internationalement dans le domaine de l'intelligence artificielle, et fait figure de pionnière dans l'application de ce concept aux transports, en se concentrant sur la circulation urbaine et l'amélioration du transport maritime. En matière de transport actif, la ville possède l'une des parts modales¹ les plus élevées en Amérique du Nord pour le vélo, avec 850 km de pistes cyclables et plus de 7 340 vélos en libre-service BIXI desservant plus de

611 stations à Montréal, à Laval et à Longueuil. En 2019, la ville a reçu 50 millions de dollars du gouvernement fédéral pour réaliser son plan de ville intelligente, qui met l'accent sur l'amélioration et la durabilité du transport urbain. Montréal est également l'hôte d'événements internationaux de grande envergure, comme le Sommet annuel Michelin Movin'On sur la mobilité durable, et a été le site de plusieurs projets pilotes de technologie, tant en milieu contrôlé qu'en milieu urbain, comme les navettes autonomes.

Au Canada, Montréal est largement reconnue comme la ville la plus avancée dans sa vision et son action en faveur de la mobilité intégrée. L'Autorité régionale de transport métropolitain (ARTM) est un nouvel acteur régional du transport qui prend l'initiative d'un projet pilote visant à rationaliser la prise de décision et la gouvernance en matière de transport en commun. Actuellement, elle se concentre sur la simplification et l'intégration de la structure tarifaire complexe de la région, dans laquelle les usagers sont confrontés à plus de 700 tarifs différents possibles. La mobilité intégrée est son principal objectif, et il est prévu de mettre en place une structure tarifaire intégrée et simplifiée au cours des prochaines années.

La Société de transport de Montréal (STM), acteur clé du transport en commun dans la région de Montréal, a noué des partenariats avec différents fournisseurs de transport (vélos en libre-service comme BIXI et entreprises d'autopartage comme Communauto), faisant bénéficier ses usagers de tarifs préférentiels. La STM fait la promotion du concept de « mobilité combinée », soit la combinaison intelligente de moyens de transport individuels (marche, vélo, voiture) avec des modes collectifs (autobus, métro, taxi, taxibus partagé, covoiturage et autopartage). En plus du transport en commun, les usagers peuvent maintenant accéder à BIXI et à Communauto grâce au système de cartes et de tarifs OPUS qui leur permettait déjà de prendre le transport en commun. Plus important encore, la STM a intégré le taxi dans son cocktail de mobilité régionale, reconnaissant que les services du secteur privé comme le taxi ne sont pas des concurrents, mais plutôt des collaborateurs qui s'ajoutent à la gamme des modes de transport alternatifs et qui réduisent la dépendance au véhicule personnel. De plus en plus consciente de la tendance à l'intégration et à la durabilité, la STM s'est également associée à Voyagez Futé dans son Passeport mobilité, un programme élaboré pour promouvoir l'utilisation d'autres modes de transport comme solutions de rechange à l'automobile auprès du grand public. Le Passeport mobilité est un produit destiné aux promoteurs et aux gestionnaires immobiliers ainsi qu'aux entreprises. Chaque « passeport »

comprend des abonnements annuels au transport en commun, à BIXI et à Communauto, offerts aux acheteurs de condo et d'immeubles participants ou aux travailleurs des entreprises partenaires. Tous les services offerts sont accessibles aux usagers avec la carte OPUS de la STM.

Les principales contraintes de la transition vers une mobilité intégrée

En dépit de tous ces atouts, de tous ces efforts, et de ces réalisations à petite échelle vers l'intégration, Montréal est encore loin de réaliser un modèle de mobilité pleinement intégré. Le cas de MaaS Global de la ville d'Helsinki en est un bon exemple : le virage vers une plateforme de mobilité intégrée présente souvent des défis d'incitation et de collaboration pour les différents acteurs impliqués. L'expérience finlandaise montre en particulier que la mobilité intégrée n'apparaît pertinente que lorsque le réseau de transports publics est performant et compétitif par rapport à la voiture individuelle (Cerema, 2019).

Comme nous l'avons vu, les plateformes intégrées comme MaaS dépendent d'un degré élevé de collaboration et d'orchestration entre les entités publiques et les organismes de planification d'une part, et les acteurs tiers de la plateforme d'autre part. Après le déploiement de l'outil de MaaS Global à Helsinki, des tensions importantes ont fini par découler du rapprochement de ces acteurs publics et privés, de sorte que les « relations symbiotiques » et les « visions et objectifs communs » articulés dans la littérature sur les écosystèmes restent difficiles à réaliser.

D'une part, des problèmes se posent pour les agences traditionnelles de transport en commun parce qu'un intermédiaire comme le serait une plateforme technologique commune menace d'éroder la relation directe que ces agences ont développée avec leurs usagers. D'autre part, l'évolution vers un système de mobilité plus intégré est une menace pour beaucoup d'acteurs du transport qui risquent de perdre des usagers en raison des incitations et des rabais sur d'autres formes privées de mobilité (telles que l'autopartage ou les taxis). Comme les organismes de transport en commun sont encore souvent jugés en fonction du nombre d'usagers et que leur financement est lié au nombre de personnes qu'ils transportent, il se peut qu'ils soient peu motivés à coopérer avec d'autres fournisseurs de transport.

Si Montréal a obtenu un certain succès dans la négociation de partenariats entre des acteurs publics comme la STM et des partenaires privés comme Communauto, d'autres villes ont en revanche eu beaucoup de difficultés à mettre en œuvre de telles collaborations. Ainsi, selon Olivier Moore (2017), il n'y a pas si longtemps, la Toronto Transit Commission (TTC) aurait pu être réticente à adopter d'autres formes de transport (il fut un temps où certains membres du personnel étaient mécontents de mettre des supports à l'avant des autobus parce que le vélo était considéré comme un concurrent du transport en commun). Ce virage vers l'intégration oblige donc de nombreux organismes publics à revoir complètement leur avenir stratégique. Dans ce cas, la TTC est-elle simplement un fournisseur de transport en commun ou un fournisseur de mobilité dans un réseau complexe d'acteurs qui cherchent collectivement à faire évoluer la société vers un avenir urbain durable ? Les plus grands défenseurs des plateformes privées de mobilité intégrée comme Whim sont souvent des gouvernements nationaux et locaux qui privilégient une expérience simplifiée pour l'utilisateur, en incitant notamment les électeurs à ne pas utiliser leur véhicule personnel. L'expérience d'Helsinki montre que l'efficacité des systèmes de mobilité intégrée reste incertaine si les organismes de transport en commun – le cœur des réseaux de mobilité dans les grandes villes – ne veulent pas voir ces plateformes intermédiaires communes réussir.

Par ailleurs, les plateformes intégrées menacent également la position des autres acteurs de l'écosystème de la mobilité. De nouveaux partenaires privés comme les flottes de taxis, les services de covoiturage ou d'autopartage ont accusé les organismes publics de limiter leur potentiel de croissance. Par exemple, l'entité de transport public d'Helsinki, HSL, n'a pas encore ouvert sa billetterie pour permettre aux abonnés de la plateforme Whim d'accéder facilement au forfait mensuel (les utilisateurs de Whim doivent plutôt obtenir un nouveau billet chaque fois qu'ils se déplacent). En outre, des sociétés comme Uber et Lyft se méfient des plateformes intégrées comme Whim qui permettent de comparer les prix des services de télébilletique. Pour cette raison, ces entreprises ne font souvent pas partie du cocktail mobilité intégré, comme c'est le cas à Montréal.

Au-delà de Montréal, les progrès vers l'intégration des services de mobilité urbaine sont limités dans la plupart des villes canadiennes, dont certaines n'ont que récemment dépassé l'idée qu'une solution comme le vélo puisse faire concurrence au transport en commun. Au Canada, il semble que les grandes villes soient aux prises avec des problèmes de gouvernance,

de réglementation et de densité de population limitée. À Toronto, l'ancien directeur général adjoint de la TTC cite la gouvernance comme un défi majeur : « Ce qui a ralenti Toronto dans le domaine de la mobilité intégrée, c'est qu'il n'y a pas d'organisme unique ni de responsable » (Chris Upfold cité dans Moore, 2017). Il prévoit qu'il faudra cinq ans seulement pour que la région prenne les décisions nécessaires concernant la structure de gouvernance du transport en commun qu'elle souhaite mettre en place. Les compagnies de taxi locales et les autres entreprises de services de transport privées ont exprimé leur inquiétude quant à l'affaiblissement de leur image de marque. Certaines villes voulant intégrer leur système de transport n'ont pas d'autres options que de recourir au vélo en libre-service. De plus, si les entités publiques n'ont que l'incitation à augmenter la fréquentation, alors peu de progrès seront finalement réalisés en partenariat avec d'autres fournisseurs de services de transport. Cela explique peut-être la situation entourant la récente décision de Toronto de rejeter un projet de mobilité intégrée. En 2018, MaaS Global visait Toronto pour sa première expansion à l'extérieur de l'Europe, mais les pourparlers n'ont pas abouti, étant donné le manque d'intérêt perçu par Metrolinx, l'agence régionale de transport en commun (Moore, 2018).

Conclusion

Dans les villes canadiennes, il reste des défis fondamentaux à relever pour réaliser les mesures incitatives de collaboration et les relations symbiotiques entre les entités publiques et privées décrites dans la documentation sur les écosystèmes, qui constituent le fondement d'un système de mobilité intégrée. Malgré les investissements publics au Québec et à Montréal dans la création d'organismes tels que Propulsion Québec et Jalon MTL, dont le mandat est de mobiliser les acteurs de tous les secteurs et de toutes les chaînes traditionnelles de valeur pour promouvoir l'innovation dans les nouvelles solutions de mobilité, les progrès restent limités. Pourtant, Montréal est beaucoup plus avancée que les villes qui ne disposent pas de ces conditions institutionnelles, comme Toronto, où les organismes publics n'ont pas encore élaboré de vision d'intégration, et encore moins progressé dans sa mise en œuvre.

Références

Adner, R. (2006). Match your innovation strategy to your innovation ecosystem. *Harvard Business Review*, 84(4), 98-107. Repéré à <https://hbr.org/2006/04/match-your-innovation-strategy-to-your-innovation-ecosystem>.

Adner, R. et Kapoor, R. (2010). Value creation in innovation ecosystems: How the structure of technological interdependence affects firm performance in new technology generations. *Strategic Management Journal*, 31(3), 306-333. doi:10.1002/smj.821

Ambrosino, G., Nelson, J. D., Boero, M. et Pettinelli, I. (2016). Enabling intermodal urban transport through complementary services: From flexible mobility services to the shared use mobility agency. Workshop 4. Developing inter-modal transport systems. *Research in Transportation Economics*, 59, 179-184. doi:10.1016/j.retrec.2016.07.015

Armellini, F., Beaudry, C., Bourgault, M., Cohendet, P., Simon, L., Solar-Pelletier, L., Sultana, N. et Turkina, E. (2020). L'aérospatiale numérique au Québec : un écosystème innovant au coeur des enjeux de la société. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspective et défis de la transformation numérique* (18, p. 457-470). CIRANO.

Cerema. (2019). Le MaaS en Europe : enseignements des expériences d'Helsinki, Vienne et Hanovre. Repéré à https://www.cerema.fr/system/files/documents/2020/01/cerema_parangonnage_maas_rapport_complet_vf.pdf.

Gawer, A. et Cusumano, M. A. (2002). *Platform leadership: How Intel, Microsoft, and Cisco drive industry innovation*. Boston, MA : Harvard Business School Press.

Iansiti, M., et Levien, R. (2004). Strategy as ecology. *Harvard Business Review*, 82(3), 68-81. Repéré à <https://hbr.org/2004/03/strategy-as-ecology>.

Joint Clean Climate Transport Research Partnership (JCCTRP). 2018. *Policy Brief on Transport and Climate Policy in Quebec*. Repéré à <https://jcctrp.org/policy-briefs/>.

Moore, J. F. (1996). *The Death of Competition: Leadership and strategy in the age of business ecosystems*. HarperCollins.

Moore, O. (2017, 16 août). The transportation transformation. *The Globe and Mail*. Repéré à <https://www.theglobeandmail.com/news/national/the-transportation-transformation-integrated-mobility-is-the-transit-idea-canadian-cities-mustconsider/article36007855/>.

Moore, O. (2018, 9 juillet). How Toronto missed out for now on one of the hottest concepts in transportation—Integrated mobility. *The Globe and Mail*. Repéré à <https://www.theglobeandmail.com/canada/toronto/article-how-toronto-missed-out-for-now-on-one-of-the-hottest-concepts-in/>.

Mulley, C. et Kronsell, A. (2018). Workshop 7 report: The “uberisation” of public transport and mobility as a service (MaaS): Implications for future mainstream public transport. *Research in Transportation Economics*, 69, 568-572. doi:10.1016/j.retrec.2018.08.007

Novikova, O. (2017). The sharing economy and the future of personal mobility: New models based on car sharing. *Technology Innovation Management Review*, 7(8), 27-31. Repéré à <https://timreview.ca/article/1097>.

Oh, D. S., Phillips, F., Park, S., et Lee, E. (2016). Innovation ecosystems: A critical examination. *Technovation*, 54, 1-6. doi:10.1016/j.technovation.2016.02.004

La mobilité intégrée : une perspective d'écosystème d'innovation

Tourisme Montréal. (2019, 4 avril). Montréal, chef de file de la mobilité durable et du transport intelligent. Repéré à <https://blog.mtl.org/fr/mobilite-durable>.

Valverde, M. et Moore, A. (2018). The performance of transparency in public-private infrastructure project governance: The politics of documentary practices. *Urban Studies*, 56(4), 689-704. doi:10.1177/0042098017741404

Whitmore, J. et Pineau, P.-O. (2020). État de l'énergie au Québec 2020 : la consommation de pétrole toujours en hausse. Chaire de gestion du secteur de l'énergie de HEC Montréal, préparé pour Transition énergétique Québec.

The World Bank Group et PPIAF. (2006). *Part modale des transports publics*. Repéré à : https://ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/documents/toolkits/french_UrbanBusToolkit/site/assets/1/1c/1c19.html.

Note

1. « La part modale des transports publics est mesurée en divisant le total des déplacements par transport public dans n'importe quelle période de temps (généralement un jour ouvré moyen) par le nombre total de déplacements effectués sur la même période. » (The World Bank Group et PPIAF, 2006.)

Conclusion

LA PANDÉMIE DE COVID-19 : CATALYSEUR INATTENDU DE LA TRANSFORMATION NUMÉRIQUE

Nathalie de Marcellis-Warin

Professeure titulaire à Polytechnique Montréal
et présidente-directrice générale du CIRANO

Benoit Dostie

Professeur titulaire à HEC Montréal,
chercheur et fellow au CIRANO, et directeur
académique au Centre interuniversitaire
québécois de statistiques sociales (CIQSS)

Genevieve Dufour

Directrice des grands projets
de collaboration au CIRANO
et coordonnatrice du livre
Le Québec économique 9

« **L**a transformation numérique qui s'opère aujourd'hui ne touche pas seulement les domaines à la fine pointe de la technologie. Elle ne touche pas seulement le marché du travail. Elle ne touche pas seulement les sociétés du monde développé. [...] Si le monde entier est concerné par ces transformations majeures, ce n'est pas une transformation homogène ou ordonnée. À ce titre, le Québec présente des atouts et des particularités lui permettant de forger un peu de sens

à ce chaos. Il s'agit d'identifier ces avantages, ainsi que les écueils et les problèmes, afin de s'inscrire non comme suiveur mais comme acteur et modèle de la transformation numérique. » (Forum CIRANO-ADRIQ 2020)

C'est en ces termes que nous avons ouvert le Forum Innovation CIRANO – ADRIQ-RCTi en février 2020. Ce forum a réuni des acteurs de l'écosystème d'innovation, qu'ils soient entrepreneurs dans de petites ou de grandes entreprises, chercheurs ou représentants de partenaires du marché du travail, de la formation professionnelle ou du gouvernement. La journée a été très riche en échanges, notamment au sujet des besoins en développement et en rehaussement des compétences ainsi que des enjeux de formation des employés en entreprise.

Ce sont des exemples de sujets sur lesquels les chercheurs du CIRANO se penchent au sein du Pôle sur les impacts socioéconomiques de la transformation numérique et de l'IA. Le CIRANO a plusieurs initiatives majeures transversales qui traitent des questions reliées aux enjeux actuels de notre société, notamment une portant sur les impacts des changements technologiques et soutenue par le ministère de l'Économie et de l'Innovation (MEI) du Québec. Il était donc évident pour nous de consacrer la neuvième édition du *Québec économique* à l'étude des perspectives et des enjeux de la transformation numérique.

Que ce soit en analysant l'importance de l'écosystème d'innovation et de collaboration qui se met en place au Québec et au Canada, principalement autour de l'IA (Hadj, 2020; Beaudry, Hage, Piantoni et Solar-Pelletier, 2020; Solar-Pelletier, Beaudry et Zhegu, 2020), les innovations numériques qui accompagnent les transformations dans nos organisations publiques et privées (Bourdeau, Hadaya et Marchildon, 2020; Caron, 2020) et qui touchent tous les secteurs de notre économie (Armellini *et al.*, 2020; Bourgault *et al.*, 2020; Magnan, Normand et Campbell, 2020; Hatch, Cohendet et Simon, 2020; Royer, De Marcellis-Warin, Peignier et Warin, 2020), ou encore les impacts de cette révolution numérique sur le marché de l'emploi ainsi que les besoins en éducation et en formation (Vinet, 2020; Dostie, 2020; Dostie et Dufour, 2020) – pour atteindre notamment une meilleure numératie –, les chercheurs qui ont contribué à cet ouvrage souhaitent fournir des données probantes pour aider les décideurs publics dans l'élaboration de leurs politiques.

Conclusion

De plus, une section du livre porte sur la matière première de la transformation numérique, les données, et plus précisément sur l'importance pour les chercheurs de pouvoir accéder à celles des administrations publiques (Haeck et Connolly, 2020). L'accès à des données de qualité permettrait aux chercheurs québécois de tirer le maximum de leurs travaux afin de mieux guider nos politiques et d'améliorer le bien-être de notre société, et favoriserait aussi un rayonnement des travaux de recherche à l'échelle canadienne et internationale. Il permettrait également la formation de la relève en recherche au Québec dans les techniques de pointe, en particulier l'apprentissage machine (Stevanovic, 2020) et le potentiel de valorisation des données non structurées (Aubert, De Marcellis-Warin et Warin, 2020). Ces questions sont au cœur des activités d'un des partenaires académiques du CIRANO, l'Institut de valorisation des données (IVADO).

La plupart des chapitres reposent sur des études conduites par des chercheurs du CIRANO et plusieurs de ses partenaires académiques, à savoir le Centre de recherches mathématiques (CRM) de l'Université de Montréal, avec qui le CIRANO codirige le projet « En avant math! », le Centre interuniversitaire québécois de statistiques sociales (CIQSS) et le Partenariat pour l'organisation de l'innovation et des nouvelles technologies (4POINT0) situé à Polytechnique Montréal.

Cet ouvrage a été écrit en grande partie avant la crise pandémique qui nous a touchés en mars 2020. Toutefois, chacun des chapitres peut aider le lecteur à repérer des défis qui se sont peut-être amplifiés avec la crise, par exemple la transformation numérique des organisations publiques et privées qui s'est accélérée (Bourdeau *et al.*, 2020 ; Caron, 2020). L'achat en ligne, pour les particuliers, était déjà une tendance et a pris de l'ampleur depuis le début de la pandémie ; cela soulève à nouveau la question des défis fiscaux du commerce électronique (Godbout et Robert-Angers, 2020).

Mais cet ouvrage va aussi permettre de bien identifier les forces qui étaient en présence avant l'apparition de la COVID-19 et qui peuvent aider à saisir des occasions dans le contexte actuel. En effet, comme nous bénéficions maintenant d'un léger recul depuis le début de la crise, nous sommes d'avis que les forces de changement nommées dans les différents chapitres du livre n'iront qu'en s'accélégrant dans les prochains mois et années : pour la majorité d'entre elles, la pandémie semble agir comme un catalyseur à la transformation numérique plutôt qu'un frein. Cela rejoint d'ailleurs les conclusions d'autres études ou d'articles publiés

récemment. Par exemple, Munro, Maxim et Whiton (2020) notent que les changements technologiques ne progressent pas de façon linéaire, mais plutôt par secousses, et que la pandémie de COVID-19 est un bel exemple de choc secouant les modèles d'affaires et les processus opérationnels des gouvernements et des entreprises. Plusieurs études économiques notent aussi l'aspect contre-cyclique de l'automatisation et de la mise à jour des processus de production avec de nouvelles technologies (Jaimovich et Siu, 2020). Ces auteurs montrent que même si le prix de la main-d'œuvre diminue en temps de récession, c'est son prix relatif qui importe pour les décisions des entreprises. Une hausse du prix relatif de la main-d'œuvre rend plus intéressants les investissements en nouvelles technologies robotiques, qui progressent donc plus rapidement en temps de crise.

On pourrait penser que l'innovation numérique (en particulier l'automatisation) a aussi un rôle bénéfique à jouer là où les travailleurs sont particulièrement à risque en temps de pandémie, comme les abattoirs (The Economist, 2020). Les solutions technologiques comme le télétravail sont essentielles pour les entreprises qui veulent survivre à la crise économique créée par la situation sanitaire actuelle.

Peu importe la raison, il est attendu que les personnes ayant perdu leur emploi retrouveront un marché du travail passablement modifié à leur retour. Elles devront absolument avoir les compétences adéquates pour ce marché transformé. Hershbein et Kahn (2018) montrent qu'après une récession, les travailleurs effectuant des tâches routinières sont remplacés par des individus plus qualifiés, complétés par de nouvelles technologies implémentées pour remplacer les tâches routinières. Autor et Reynolds (2020) renchérissent et soulignent aussi que la pandémie a accéléré le passage à l'automatisation. Ils ajoutent que plusieurs emplois peu qualifiés ont déjà été éliminés en raison de la crise, et que l'avenir des travailleurs qui occupaient ces postes est pour l'instant des plus incertains : ces emplois reviendront-ils ? Ne serait-il pas mieux de saisir l'occasion pour investir dans les compétences de ces travailleurs ?

Cela rejoint les résultats du Baromètre CIRANO 2018 sur la perception des Québécois sur la transformation numérique et l'intelligence artificielle (IA) (De Marcellis-Warin et Peignier, 2018). La plupart des Québécois (61 %) considéraient que l'IA va transformer les tâches des travailleurs et 53 % croyaient qu'elle occasionnerait de nombreuses pertes d'emploi. Toutefois, la grande majorité d'entre eux ne nourrissaient pas cette appréhension face

Conclusion

à leur situation personnelle : seulement 17 % estimaient que l'IA pourrait leur faire perdre leur propre emploi et 26 % qu'elle affecterait leurs tâches au travail. Le Baromètre a sondé les Québécois sur les pistes d'action qu'ils souhaiteraient que le gouvernement préconise pour mieux gérer les impacts liés au développement de l'IA. Plus de la moitié des Québécois (54 %) croyaient que le gouvernement devrait soutenir les employés qui seront potentiellement licenciés en raison de l'adoption des nouvelles technologies. La majorité d'entre eux (61 %) semblaient d'ailleurs vouloir faire partie de la solution puisqu'ils se disaient prêts à suivre une formation pour s'adapter à ces bouleversements technologiques.

D'ailleurs, en matière de formation continue, Lohr (2020) décrit comment la pandémie agit déjà comme catalyseur pour les demandes de mises à niveau des travailleurs. En effet, alors que la crise accélère les efforts d'automatisation des entreprises qui veulent augmenter leur productivité et diminuer leurs coûts, il devient urgent pour les travailleurs de mettre à niveau leurs compétences s'ils veulent suivre cette nouvelle vague de changements technologiques. Le Baromètre CIRANO 2018 a montré que 34 % des répondants souhaitaient que le gouvernement accorde du financement aux entreprises afin de former leurs employés aux nouvelles technologies numériques.

À cet égard, en matière de réponse politique, le American Workforce Advisory Board (2020) recommandait récemment des investissements massifs dans les nouvelles technologies pour accélérer la livraison de services d'éducation et de formation en ligne (ainsi que pour dispenser des services de santé et faire du commerce). Cependant, il existe un danger d'accroissement des inégalités socioéconomiques lorsque la livraison de ces services essentiels dépend du déploiement inégal des technologies qui les supportent. Ces constats pointent des pistes de recherche futures pour les chercheurs du CIRANO.

Cela rejoint aussi les autres préoccupations des Québécois mises en évidence dans le Baromètre CIRANO 2018 concernant la protection des données personnelles recueillies par des objets connectés et des programmes d'IA. D'après 47 % des Québécois, il est essentiel que le gouvernement en fasse une priorité. Même si nous n'avons pas traité de toutes ces questions dans cet ouvrage, le CIRANO collabore avec l'Observatoire international sur les impacts sociétaux de l'IA et du numérique (OBVIA) sur ces thématiques. Soutenu financièrement par les Fonds de recherche

du Québec et situé à l'Université Laval, l'OBVIA aide les communautés, les organisations et les particuliers à maximiser les retombées positives de l'IA et du numérique et à minimiser les effets négatifs des technologies.

Il ressort donc que les recommandations et les constats faits par les contributeurs du *Québec économique 9* nous apparaissent tout aussi pertinents, et même, ajouterions-nous, encore plus impératifs et urgents qu'avant la pandémie.



Références

American Workforce Advisory Board (2020). *Investing in American Workers to Expedite Economic Recovery. A Call-to-Action by the American Advisory Board.*

Armellini, F., Beaudry, C., Bourgault, M., Cohendet, P., Simon, L., Solar-Pelletier, L., Sultana, N. et Turkina, E. (2020). L'aérospatiale numérique au Québec : un écosystème innovant au cœur des enjeux de la société. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (18, p. 457-470). CIRANO.

Association des directeurs de recherche industrielle du Québec (ADRIQ-RCTi). (2020). Forum Innovation CIRANO – ADRIQ-RCTi 2020. L'humain au cœur de la transformation numérique. (Président d'honneur : Innovitech). <https://cirano.qc.ca/fr/actualites/882>

Aubert, B., De Marcellis-Warin, N. et Warin, T. (2020). Science des données, réseaux sociaux et politiques publiques. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (11, p. 285-314). CIRANO.

Autor, D. et Reynolds, E. (2020). *The Nature of Work after the COVID Crisis: Too Few Low-Wage Jobs.* The Hamilton Project, Brookings.

Beaudry, C., Hage, G., Piantoni, G. et Solar-Pelletier, L. (2020). Les technologies et les politiques publiques en appui à l'essor de l'intelligence artificielle. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (4, p. 113-147). CIRANO.

Bourdeau, S., Hadaya, P. et Marchildon, P. (2020). Projets de transformation numérique : bénéfiques, enjeux et quelques bonnes pratiques. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (5, p. 149-169). CIRANO.

Bourgault, M., Danjou, C., Pellerin, R., Perrier, N., Botton, C., Forgues, D., Iordanova, I., Poirier, É., Rivest, L. et Joblot, L. (2020). Transformer le secteur de la construction par le numérique : un chantier ambitieux et nécessaire. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (17, p. 433-456). CIRANO.

Caron, D. J. (2020). Technologies numériques et efficacité organisationnelle : repenser l'organisation publique selon ses flux informationnels. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (14, p. 373-396). CIRANO.

Conclusion

Cléroux, P. (2020). La pandémie freine une économie en pleine croissance. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (1, p. 25-48). CIRANO.

Cloutier, J.-C. (2020). L'immigration comme solution aux effets du ralentissement démographique au Québec : enjeux et pistes de solution découlant du Congrès 2019 de l'Association des économistes québécois. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (2, p. 49-72). CIRANO.

De Marcellis-Warin, N. et Peignier, I. (2018). *Baromètre CIRANO 2018. Perception des risques au Québec : étude de cas sur l'intelligence artificielle*. 2018MO-02, CIRANO.

Dostie, B. (2020). Changements technologiques et polarisation des salaires au Québec. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation* (9, p. 247-266). CIRANO.

Dostie, B. et Dufour, G. (2020). Transformation numérique et formation continue. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (8, p. 221-246). CIRANO.

Economist (The). (2020, 30 juillet). The fear of robots displacing workers has returned. *The Economist*. <https://www.economist.com/finance-and-economics/2020/07/30/the-fear-of-robots-displacing-workers-has-returned>

Godbout, L. et Robert-Angers, M. (2020). Les défis fiscaux associés au commerce électronique. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (13, p. 355-372). CIRANO.

Hadj, B. (2020). L'intelligence artificielle : un puissant levier de développement économique pour le Québec. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (3, p. 77-112). CIRANO.

Haeck, C. et Connolly, M. (2020). L'accessibilité aux données des administrations. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (10, p. 269-284). CIRANO.

Hatch, C. J., Cohendet, P. et Simon, L. (2020). La mobilité intégrée : une perspective d'écosystème d'innovation. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation* (19, p. 471-484). CIRANO.

Hershbein, B. et Kahn, L. B. (2018). Do recessions accelerate routine-biased technological change? Evidence from vacancy postings. *American Economic Review* 10(7), 1737-1772.

Jaimovich, N. et Siu, H. (2020). Job polarization and jobless recoveries. *The Review of Economic and Statistics*, 102(1), 129-147.

Lohr, S. (2020, 13 juillet). The pandemic has accelerated demands for a more skilled workforce. *The New York Times*.

Magnan, M., Normand, R. et Campbell, B. (2020). Les enjeux de la transformation numérique pour le secteur financier. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (15, p. 399-415). CIRANO.

Munro, M., Maxim, R. et Whiton, J. (2020). The robots are ready as the COVID-19 recession spreads. *Brookings Metro's COVID-19 Analysis*. Brookings.

Rework America Business Network: A Markle Initiative (2019, octobre). *Digital Blindspot: How Digital Literacy Can Create a More Resilient American Workforce*.

Royer, A., De Marcellis-Warin, N., Peignier, I. et Warin, T. (2020). La révolution numérique appliquée à l'agriculture au Québec. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (16, p. 417-432). CIRANO.

Schmouker, O. (2020, 15 avril). Un virus qui va accélérer la transformation numérique. *Les affaires*.

Solar-Pelletier, L., Beaudry, C., et Zhegu, M. (2020). Collaboration et innovation : comment la transformation numérique change la donne. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (6, p. 171-202). CIRANO.

Stevanovic, D. (2020). Prédiction macroéconomique dans l'ère des données massives et de l'apprentissage automatique. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (12, p. 315-352). CIRANO.

Vinet, L. (2020). L'importance des mathématiques et de la numératie pour le Québec. Dans N. de Marcellis-Warin et B. Dostie (dir.), *Le Québec économique 9. Perspectives et défis de la transformation numérique* (7, p. 205-220). CIRANO.