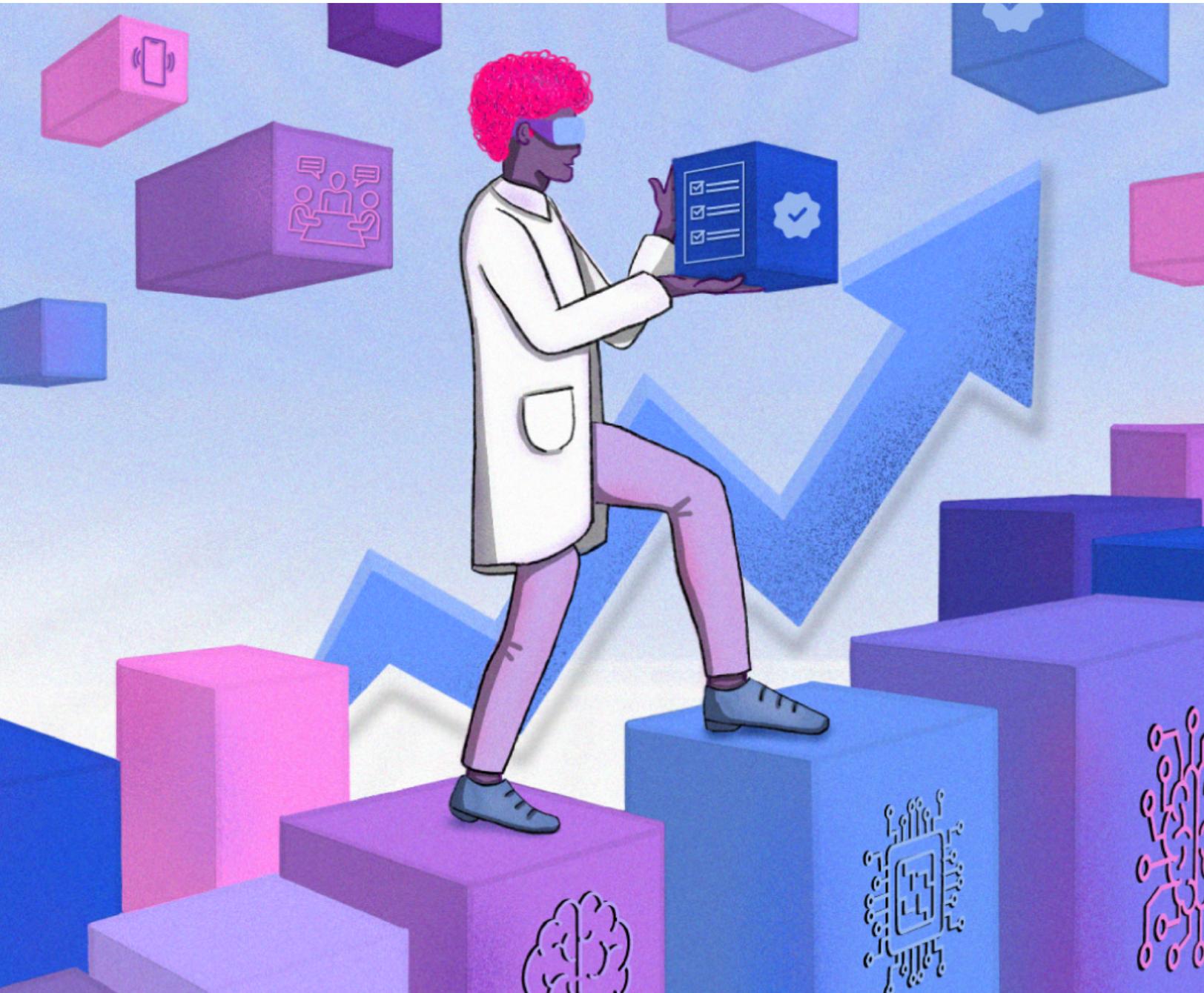


En attendant de s'envoler

L'impact à court terme de l'adoption de l'IA sur la productivité des entreprises

Viet Vu, Vivian Li, Angus Lockhart, Graham Dobbs et Christelle Tessonno | Decembre 2024



Remerciements

The Dais est un groupe de réflexion sur les politiques publiques et le leadership à L'Université métropolitaine de Toronto, et nous travaillons à l'intersection de la technologie, de l'éducation et de la démocratie pour favoriser une prospérité et une citoyenneté partagées au Canada.

Pour obtenir de plus amples renseignements, consultez dais.ca (en anglais)
20, rue Dundas O., bureau 921, Toronto (Ontario)
M5G 2C2



Pour citer le présent rapport :

Viet Vu, Vivian Li, Angus Lockhart, Graham Dobbs et Christelle Tessono, *En attendant de s'envoler : L'impact à court terme de l'adoption de l'IA sur la productivité des entreprises*. The Dais. 2024. <https://dais.ca>

Les données graphiques de ce rapport se trouvent ici : <https://github.com/thedaisTMU/waiting-for-takeoff>.

© 2024, L'Université métropolitaine de Toronto,
350, rue Victoria, Toronto (Ontario) M5B 2K3

The Dais est fier d'engager un groupe diversifié de bailleurs de fonds pour appuyer et catalyser son travail, conformément à ses **valeurs** (en anglais) et sous réserve d'un examen interne approfondi. Comme institution non partisane et d'intérêt public, nous n'acceptons que des fonds d'organismes qui appuient notre mission et nous permettent d'entreprendre des travaux de manière indépendante, avec un contrôle rédactionnel total. Le nom de tous nos bailleurs de fonds est affiché publiquement et de manière transparente sur tous les documents en ligne et imprimés relatifs à chaque projet ou initiative.

Cet ouvrage est financé par :



En attendant de s'envoler : L'impact à court terme de l'adoption de l'IA sur la productivité des entreprises fait partie du portefeuille d'ouvrages du Centre des Compétences futures – Future Skills Centre qui est financé par le programme Compétences futures du gouvernement du Canada.

Les opinions et interprétations contenues dans cette publication sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du gouvernement du Canada.



Cet ouvrage est distribué sous licence en vertu d'une licence Creative Commons 4.0 – Attribution, pas d'utilisation commerciale, partage dans les mêmes conditions. Vous pouvez partager, copier ou redistribuer ce matériel, à condition : d'attribuer le crédit approprié; de ne pas l'utiliser à des fins commerciales; de ne pas appliquer de conditions légales ou de mesures technologiques qui empêchent légalement d'autres personnes de faire quelque chose qu'autorise cette licence; et si vous mélangez, arrangez ou adaptez le contenu, vous devez diffuser vos contributions sous les mêmes conditions que cette licence, indiquer si des modifications ont été apportées et ne pas suggérer que le concédant de la licence vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son œuvre.

Conception et illustration :

Mariana Rodrigues

Travail éditorial :

Suzanne Bowness, CodeWord Communications

Traduction :

Marie-Pierre Lavoie

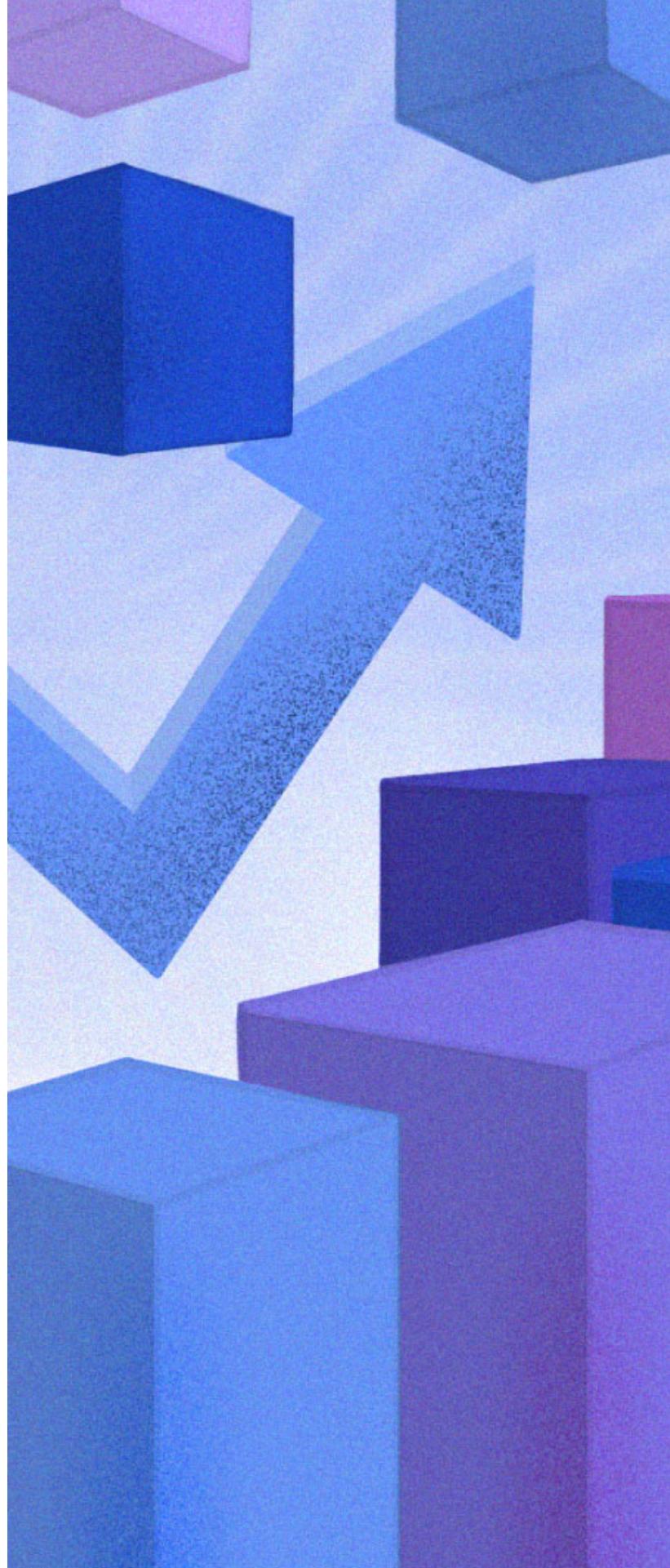
Collaboratrice :

Nina Rafeek Dow

Nous remercions les participants qui nous ont fait part de leurs commentaires et de leurs points de vue précieux lors des tables rondes que nous avons organisées dans le cadre de cette recherche.

Nous remercions également les membres du comité consultatif de la recherche qui ont apporté leur expertise :

Ryan Kelly
Steven Tobin
Louise Levonian
Sarah Gagnon-Turcotte
Tony Bonen
Zachary Rose
Michelle Alexopoulos
Beryl Li



Auteurs



Viet Vu - Gestionnaire, Recherche économique

M. Vu dirige la recherche économique à The Dais. Il s'intéresse à la manière dont les gouvernements et les entreprises conçoivent les politiques et les marchés pour influencer le comportement humain. Il est également fasciné par la manière dont le monde s'adapte aux nouveaux marchés émergents, d'autant plus que les cadres juridiques sont souvent lents à réagir. M. Vu est titulaire d'une maîtrise ès sciences en économie de la London School of Economics and Political Science et d'un baccalauréat ès arts en économie avec spécialisation de l'Université de Colombie-Britannique.



Vivian Li - Économiste principale

Mme Li est économiste principale à The Dais. Ses domaines de prédilection comprennent l'examen des marchés du travail au sein de l'économie de l'innovation et du secteur technologique au Canada. Elle s'intéresse à l'analyse de la relation entre les facteurs économiques et les personnes ainsi qu'aux impacts socio-économiques des politiques et des événements.

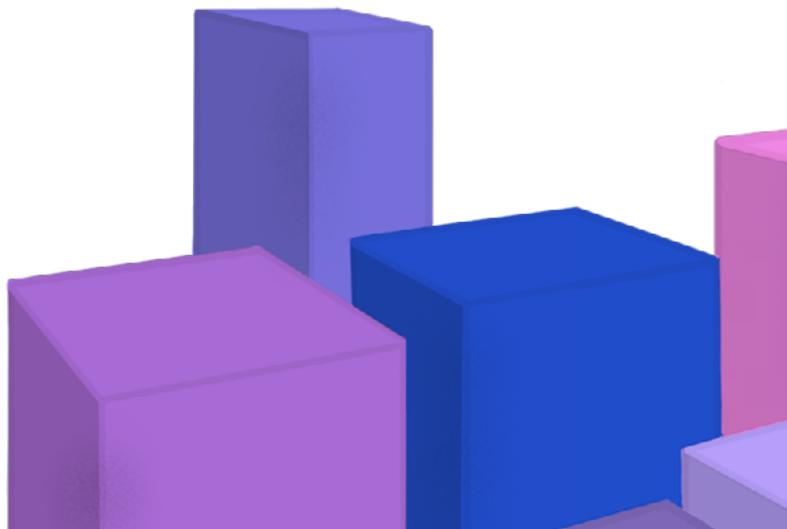
Mme Li est titulaire d'un baccalauréat ès arts en économie de l'Université de Waterloo et d'une maîtrise ès arts en économie de l'Université de Toronto.



Angus Lockhart - Analyste principal de politiques

Angus Lockhart est analyste principal des politiques à The Dais. Ses recherches portent sur l'adoption des technologies d'innovation dans les secteurs public et privé, et le rôle que la politique peut jouer dans l'accélération de l'adoption de ces technologies.

M. Angus est titulaire d'un baccalauréat ès arts en sciences politiques de l'Université de la Colombie-Britannique et d'une maîtrise ès arts en sciences politiques de l'Université Simon Fraser.





Graham Dobbs - Économiste principal

Comme économiste principal, M. Dobbs explore les innovations éducatives et technologiques au sein de la population active canadienne et leur impact sur la répartition et les transitions professionnelles.



Christelle Tessono - Adjointe aux politiques et à la recherche

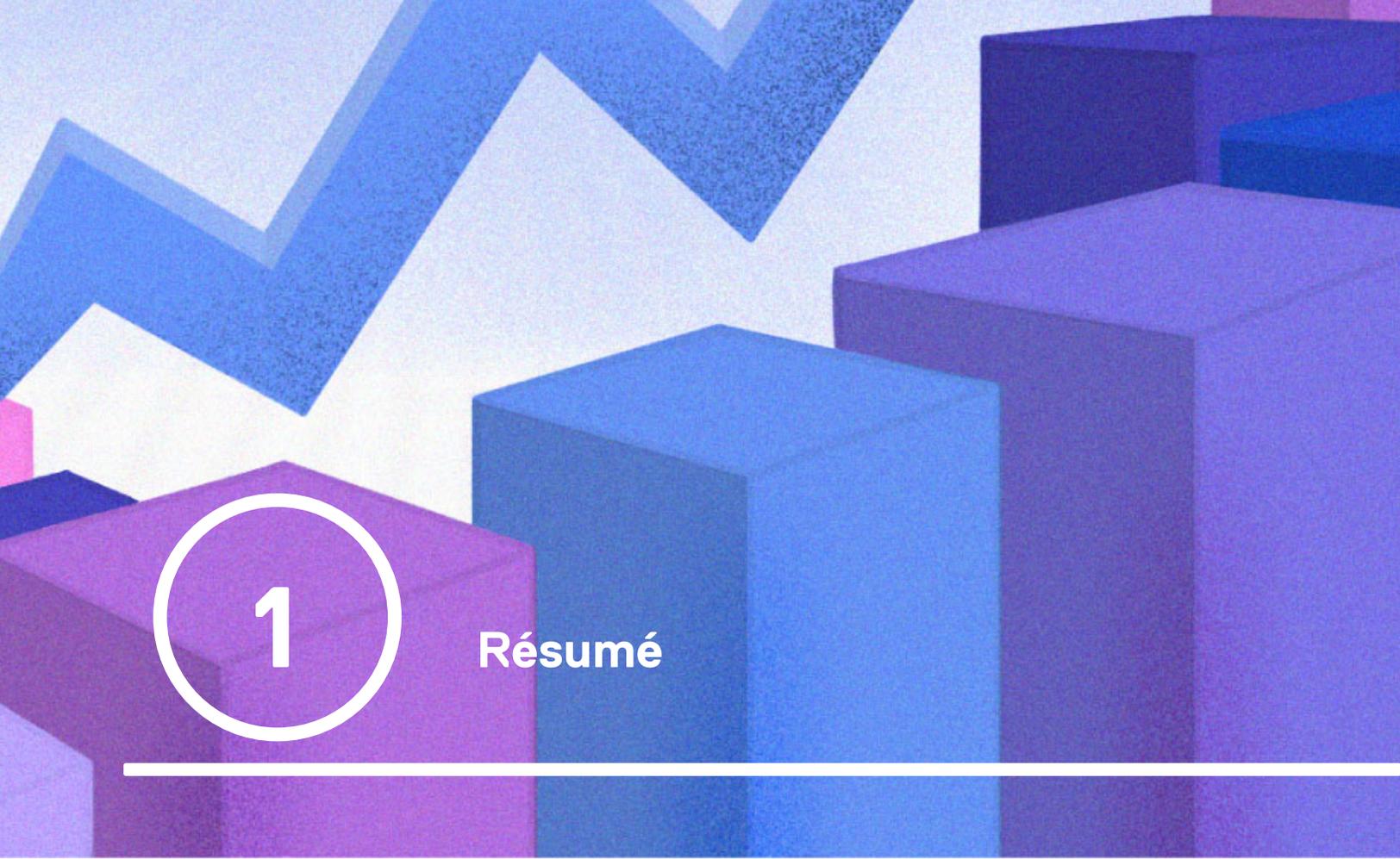
Mme Tessono mène des recherches aux intersections de la technologie numérique, des droits de la personne et de la gouvernance. Cela l'a menée à travailler sur divers projets liés à la publicité politique sur les plateformes de médias sociaux, au travail à la demande, à la technologie de reconnaissance faciale, à la protection de la vie privée et à la politique en matière d'IA.

Mme Tessono est titulaire d'un baccalauréat ès arts en sciences politiques de l'Université McGill et poursuit actuellement ses études supérieures à la Faculté d'information de l'Université de Toronto.



Table of Contents

7	RÉSUMÉ
9	INTRODUCTION
11	RECENSION DES ÉCRITS
16	MÉTHODOLOGIE
16	Estimation de la productivité au niveau de l'entreprise
17	Estimation causale (triple estimation de différence dans la différence)
20	DONNÉES
20	Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet
21	Microdonnées de recherche sur les entreprises
22	CONSTATIONS
22	Résultats descriptifs
24	Modélisation causale
27	CONCLUSION
29	ANNEXE A
31	ANNEXE B



1

Résumé

L'intelligence artificielle (IA) est la technologie dont on discute le plus au cours des dernières années. Ses adeptes promettent qu'elle aidera à surmonter les problèmes de productivité et transformera radicalement l'économie en augmentant les gains salariaux et la production économique, entre autres avantages. Cette conversation sur l'intersection de l'IA et de la croissance de la productivité est particulièrement importante au Canada aujourd'hui, tandis que l'on s'inquiète d'un « problème de la productivité ».

La productivité est un élément clé de la croissance économique et du niveau de vie futurs, car elle offre la possibilité d'augmenter la production sans augmenter les intrants, comme les heures de travail, les ressources naturelles et les coûts d'investissement. Pourtant, lors des précédentes vagues d'innovation, nous avons observé des schémas dans lesquels on adoptait largement une technologie, sans qu'il soit prouvé qu'elle augmente la productivité.

Le regretté économiste Robert Solow a fait la célèbre remarque suivante : « On voit des ordinateurs partout, sauf dans les statistiques de productivité ». Les choses seront-elles différentes cette fois-ci?

Il est essentiel de comprendre si l'IA suivra ou non les mêmes tendances que les vagues d'innovation précédentes. Cette compréhension permettra d'éclairer la politique économique, les décisions d'investissement des entreprises, la planification de la main-d'œuvre et les discussions plus larges sur les avantages et les inconvénients de l'IA.

Dans cette étude, nous abordons la question cruciale de savoir si l'adoption de l'IA conduit à une amélioration de la productivité au niveau de l'entreprise.

Principaux constats :

Grâce à des données de haute qualité provenant de l'Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet (ETNUI) de Statistique Canada et des Microdonnées de recherche sur les entreprises, auxquelles nous avons accédé par l'intermédiaire du Réseau canadien des Centres de données de recherche, nous avons effectué l'analyse suivante. Nous avons examiné les entreprises qui ont adopté l'IA entre le début 2020 et la fin 2021 pour comprendre si l'adoption des technologies d'IA s'est traduite par des gains de productivité à court terme au niveau de l'entreprise. Quand nous définissons le « court terme » comme 1 à 2 ans après l'adoption, nous constatons ce qui suit :

- **Les preuves des gains de productivité qui résultent de l'utilisation de l'IA sont mitigées.** Il n'existe aucune preuve concluante d'une relation positive ou négative forte entre l'adoption de l'IA et l'amélioration de la productivité à court terme.
- **Il n'existe pas de relation significative entre l'adoption de l'IA au cours de cette période et les niveaux de productivité totale des facteurs (PTF) ou la croissance de la PTF** (gains d'efficacité dans la production qui ne découlent pas de l'ajout de main-d'œuvre ou de capital) à court terme.
- **Les entreprises qui ont adopté l'IA étaient déjà plus productives que leurs homologues,** mais la décision d'adopter l'IA n'a pas augmenté le taux de croissance de leur productivité.

Bien qu'il s'agisse du premier rapport au Canada à examiner la relation entre l'adoption de l'IA et la productivité des entreprises, les taux globaux d'adoption de l'IA dans l'économie canadienne restent faibles et à un stade précoce.

À mesure que les applications d'IA se généralisent et sont de plus en plus intégrées dans diverses activités, les chances que les gains d'efficacité potentiels se traduisent par une augmentation de la productivité pourraient s'accroître.

Plus particulièrement, cette recherche se concentre sur les impacts de l'adoption de l'IA avant le lancement public de ChatGPT à la fin de 2022, qui a suscité un intérêt généralisé pour la dernière génération de technologies d'IA générative. Comme les outils d'IA générative tels que les grands modèles de langage (GML) offrent des capacités différentes des autres types d'IA, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer leur impact sur la croissance de la productivité dans les entreprises canadiennes. Les données de la prochaine itération de l'enquête de Statistique Canada, menée entre fin 2023 et début 2024, le permettront.

De nombreux responsables politiques et du secteur privé présument que l'adoption de l'IA par les entreprises peut être une solution miracle pour relever le défi de la croissance de la productivité au Canada. Nos résultats incitent à la prudence lorsqu'il s'agit d'affirmer que l'adoption de l'IA au niveau de l'entreprise se traduit par des gains de productivité à court terme. Nous nous réjouissons de poursuivre nos analyses et nos recherches sur la manière dont le déploiement de ces technologies en évolution rapide influe sur le cours de l'économie canadienne.



2

Introduction

Depuis la révolution industrielle et la première génération de technologies d'automatisation alimentées par la machine à vapeur, les préoccupations qui concernent les implications de ces technologies pour l'économie, et en particulier pour les travailleurs, ont été constantes. Aujourd'hui, près de 300 ans plus tard, nous sommes confrontés aux mêmes questions, cette fois en raison des technologies d'automatisation alimentées par l'électricité et les puces semi-conductrices à base de silicium. Cette conversation sur l'intersection de l'intelligence artificielle (IA) et de la croissance de la productivité est particulièrement importante au Canada aujourd'hui. De nombreuses voix s'élèvent pour s'inquiéter d'un « problème de la productivité » qui menace la croissance économique et le niveau de vie futurs du Canada, plus dépendant du secteur des ressources que ses homologues du G7.^{1,2} Nombreuses sont les personnes qui affirment que l'IA peut être une pièce essentielle du casse-tête de la croissance.³ ⁴ Pourtant, jusqu'à présent, la recherche s'est surtout attachée à déterminer si ces technologies allaient remplacer les travailleurs, et peu d'études ont évalué si l'adoption de l'IA entraînait des améliorations de la productivité.⁵

Il y a de nombreuses raisons de prendre au sérieux l'enquête sur l'estimation de l'impact de l'IA sur la productivité. Robert Solow, lauréat d'un prix Nobel et grand théoricien de la croissance économique, a fait une remarque célèbre sur l'adoption généralisée des ordinateurs personnels : « On voit des ordinateurs partout, sauf dans les statistiques de productivité ». De nombreux économistes ont cherché à expliquer le « paradoxe de Solow », c'est-à-dire le phénomène selon lequel la croissance de la productivité n'a que peu de rapport avec le progrès technologique.⁶ En sera-t-il de même avec la vague actuelle d'IA? Les taux d'adoption de l'IA étant relativement faibles au Canada et dans d'autres pays⁷ et les recherches macroéconomiques prévoyant une contribution modeste de l'IA à la croissance globale de la productivité⁸, il est nécessaire de procéder à un examen objectif de l'incidence de l'adoption de l'IA sur la productivité au Canada.

Robert Solow, lauréat d'un prix Nobel et grand théoricien de la croissance économique, a fait une remarque célèbre sur l'adoption généralisée des ordinateurs personnels : « On voit des ordinateurs partout, sauf dans les statistiques de productivité ».

L'urgence est amplifiée par une nouvelle caractéristique de la dernière génération de technologies d'intelligence artificielle : une classe de modèles que l'on appelle transformateurs de pré-entraînement génératif (GPT en anglais). Les GPT sont un sous-ensemble des grands modèles de langage, ou des modèles d'intelligence artificielle qui sont entraînés sur de vastes quantités de données naturelles générées par l'homme, telles que du texte ou des images.

Les GPT montrent des signes qui indiquent qu'ils sont différents des vagues précédentes d'IA. Au lieu de remplacer les tâches routinières (ou les tâches qui peuvent être décrites de manière cohérente, répétable et étape par étape pour obtenir des résultats similaires), l'IA basée sur les GPT semble compléter les travailleurs cognitifs dans les tâches non routinières. Les premières expériences d'introduction de l'IA générative en milieu de travail montrent également qu'au lieu de nuire aux travailleurs les moins qualifiés d'une profession donnée, elle réduit l'écart de performance entre le moins performant et le plus performant pour la même tâche.^{9 10 11}

Dans cette étude, nous abordons la question cruciale de savoir si l'adoption de l'IA conduit à une amélioration de la productivité au niveau de l'entreprise. Nous nous appuyons sur des données d'enquête uniques et de grande qualité sur l'utilisation de l'IA dans les entreprises canadiennes, liées à leurs déclarations fiscales, pour estimer de manière causale le changement de productivité qui résulte de l'adoption de l'IA. Les données de l'enquête, qui suivent l'adoption de l'IA par les entreprises entre le début 2020 et la fin 2021, sont limitées car elles ne tiennent pas compte de l'émergence plus récente de l'IA générative, avec le lancement de ChatGPT à la fin 2022. Elles offrent néanmoins une occasion unique d'étudier les effets à court terme sur la productivité de l'adoption de l'IA par les entreprises ainsi qu'une base de référence potentielle pour le suivi longitudinal des tendances de la productivité liées à l'IA, à mesure que le rythme d'adoption de l'IA s'accélère au Canada.

Les premières expériences d'introduction de l'IA générative en milieu de travail montrent également qu'au lieu de nuire aux travailleurs les moins qualifiés d'une profession donnée, elle réduit l'écart de performance entre le moins performant et le plus performant pour la même tâche.

3

Recension des écrits

L'innovation technologique fait souvent apparaître une tension entre les perturbations à court terme et les avantages à long terme. Par conséquent, une recension des écrits qui porte sur les deux périodes donne une idée globale de l'impact potentiel de l'IA. À court terme, les inquiétudes se concentrent sur les effets négatifs potentiels sur l'emploi à mesure que les nouvelles technologies deviennent plus courantes en milieu de travail et dans les industries. En même temps, les écrits qui se concentrent sur le long terme mettent souvent l'accent sur les avantages potentiels de la technologie pour l'amélioration de la productivité et la prospérité générale, car l'innovation technologique à long terme s'est souvent révélée bénéfique. Par exemple, la machine à filer a contribué à la révolution industrielle¹², tandis que les technologies chimiques et biologiques ont entraîné des révolutions dans la production agricole.¹³

L'accélération de la création et de la diffusion de l'innovation technologique rend les impacts à court et à long terme plus difficiles à prévoir. C'est pourquoi les chercheurs s'interrogent sur la nécessité d'actualiser les modèles existants pour comprendre l'impact de la technologie sur l'économie.

Cela souligne la nécessité de synthétiser notre compréhension des différents degrés de reconnaissance de l'impact technologique. Notre étude vise à faire le lien entre ces deux types d'écrits – l'impact à long terme sur la productivité et l'impact à court terme sur l'emploi – en se concentrant sur l'impact à court terme sur la productivité de l'adoption de l'IA.

Qu'est-ce que l'IA?

Avant de poursuivre, il est important de définir les limites de ce que nous considérons comme l'IA et de délimiter clairement les domaines dans lesquels les chercheurs l'ont traitée comme distincte ou similaire aux technologies d'automatisation précédentes. Selon l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), l'intelligence artificielle (IA) « est un système qui fonctionne grâce à une machine et capable d'influencer son environnement en produisant des résultats (tels que des prédictions, des recommandations ou des décisions) qui peuvent influencer les environnements physique réels ou virtuels ».¹⁴ On ignore souvent la distinction entre l'IA et les autres technologies dans les écrits sur la croissance économique à long terme, qui porte sur le niveau général de l'évolution technologique et son impact sur la productivité à long terme.

Pour les besoins de la présente étude, on définit l'IA à l'aide de notre principale source de données, l'Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet (ETNUI) de Statistique Canada : « un système qui simule un comportement intelligent en analysant son environnement et en agissant - avec une certaine autonomie - dans le but d'atteindre des objectifs précis. Les systèmes d'IA peuvent constituer des logiciels proprement dits ou être intégrés à un appareil. »¹⁵ L'enquête, qui s'adresse aux décideurs technologiques des entreprises canadiennes, comporte notamment une question sur l'adoption de l'IA.

La question de l'enquête porte explicitement sur l'utilisation d'applications spécifiques alimentées par l'IA, comme l'apprentissage automatique, les agents virtuels, la reconnaissance automatique de la parole, les systèmes de reconnaissance faciale et autres logiciels d'analyse d'images, le matériel qui intègre l'IA et les technologies qui automatisent les flux de travail ou aident à la prise de décisions. Les répondants peuvent également signaler d'autres formes d'IA utilisées dans leur entreprise. La définition utilisée dans l'ETNUI garantit que les entreprises identifiées comme adoptant l'IA l'utilisent à un degré significatif.

Le paradoxe de la productivité

Les écrits axés sur les effets distributifs à court terme de l'adoption des technologies ont caractérisé la vague actuelle de technologies d'IA par son impact immédiat sur les travailleurs (par le biais de déplacements/pertes d'emploi ou de changements dans la demande de compétences). Toutefois, les effets distributifs à court terme ne sont souvent pas représentatifs de l'impact d'une technologie à long terme.

La célèbre citation de Robert Solow, qui fait référence à l'adoption plus large des ordinateurs personnels dans l'économie, a d'abord été attribuée à l'observation d'un ralentissement de la productivité en dépit des progrès technologiques rapides dans les années 1980.

On définit l'IA à l'aide de notre principale source de données, l'Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet (ETNUI) de Statistique Canada : « un système qui simule un comportement intelligent en analysant son environnement et en agissant - avec une certaine autonomie - dans le but d'atteindre des objectifs précis. Les systèmes d'IA peuvent constituer des logiciels proprement dits ou être intégrés à un appareil. »

De nombreuses théories ont été élaborées pour expliquer cette idée apparemment contre-intuitive, notamment une répartition inégale des gains de productivité du travail, une mauvaise mesure de la production des entreprises ou de la croissance de l'emploi due à l'adoption, et des retards dans la mise en œuvre.¹⁶ En outre, on a théorisé qu'un effet de réallocation se produisait, par lequel les travailleurs qui sont remplacés par de nouvelles technologies se déplacent des secteurs productifs qui adoptent la technologie vers des secteurs moins productifs qui ne l'adoptent pas. Ce mouvement annule alors les gains de productivité escomptés.¹⁷

Des études ont montré que l'automatisation peut réduire la dispersion des salaires entre les groupes de travailleurs qui effectuent des tâches similaires et réduire l'écart entre les travailleurs les plus qualifiés et les moins qualifiés au sein d'une même profession. L'automatisation tend à remplacer les tâches qui ont tendance à être mieux rémunérées, ce qui entraîne une inégalité salariale entre les groupes.¹⁸ La modification de la prime de compétences par l'automatisation des tâches (et le remplacement des travailleurs qui en découle) a un effet modérateur sur la croissance des salaires qui résulterait autrement de l'augmentation de la productivité.

Profil des entreprises qui adoptent l'IA au Canada

Notre compréhension du potentiel de gains de productivité de l'IA dans l'ensemble de l'économie est actuellement limitée. Cela est dû (a) à l'adoption faible et inégale de l'IA par les entreprises et (b) à l'accès incohérent aux données pour les chercheurs. Les données de l'OCDE sur 11 pays membres (sans le Canada) montrent que l'adoption de l'IA est fortement concentrée dans les grandes entreprises et, dans une certaine mesure, dans les jeunes entreprises – et moins dans les petites entreprises ou les entreprises plus anciennes.¹⁹ L'utilisation plus large de l'IA dans les grandes entreprises peut être liée aux dotations ou capacités plus considérables d'utilisation des actifs incorporels et d'autres actifs complémentaires nécessaires pour exploiter pleinement le potentiel de l'IA. Une grande entreprise peut déjà disposer d'atouts comme des niveaux élevés ou des investissements dans les compétences et la formation en matière de TIC, des capacités numériques au niveau de l'entreprise et une infrastructure numérique, ce qui constitue une base plus solide pour l'utilisation de l'IA.

Les données de l'OCDE sur 11 pays membres (sans le Canada) montrent que l'adoption de l'IA est fortement concentrée dans les grandes entreprises et, dans une certaine mesure, dans les jeunes entreprises.

Ce modèle d'adoption inégale se vérifie également dans le contexte canadien. Des recherches antérieures ont montré qu'en 2021, seulement 3,7 % des entreprises canadiennes avaient adopté l'IA dans leurs pratiques commerciales.²⁰ De même, l'adoption était inégale selon les entreprises, les grandes entreprises le faisant beaucoup plus que les petites.²¹ Une étude récente portant sur les entreprises

françaises a abouti à des conclusions similaires et a noté que les grandes entreprises ont été en mesure de réaliser des gains de productivité plus importants parce qu'elles avaient accès à beaucoup plus de ressources pour tirer parti du potentiel des systèmes d'IA adoptés.²² Étant donné le chevauchement entre l'adoption et la taille de l'entreprise, les gains de productivité des grandes entreprises ne semblent pas refléter uniquement l'utilisation de l'IA, mais plutôt d'autres caractéristiques de l'entreprise.

Au niveau mondial, l'adoption de l'IA est plus fréquente dans les jeunes entreprises et dans les secteurs des TIC et des services professionnels.²³ Les entreprises en démarrage apportent souvent des innovations plus radicales sur le marché, en particulier quand apparaissent de nouveaux paradigmes technologiques. La concentration des adeptes de l'IA dans certains secteurs et types d'entreprises suggère que son potentiel comme technologie polyvalente ne s'est pas encore pleinement concrétisé dans l'ensemble de l'économie.

En outre, comme l'ont souligné Brynjolfsson et coll. (2023),²⁴ il est difficile de trouver des preuves des effets sur la productivité des technologies basées sur l'IA à l'échelle macroéconomique, en raison des différentes façons dont les entreprises choisissent d'adopter l'IA. Par conséquent, la preuve de gains de productivité significatifs doit encore être apportée par la recherche et le peu de preuves disponibles ne peut être raisonnablement appliqué à l'ensemble de l'économie.

Étant donné le chevauchement entre l'adoption et la taille de l'entreprise, les gains de productivité des grandes entreprises ne semblent pas refléter uniquement l'utilisation de l'IA, mais plutôt d'autres caractéristiques de l'entreprise.

Mesurer la productivité et l'adoption de l'IA

Bien qu'il existe plusieurs façons de mesurer la productivité, nous nous concentrons dans cette étude sur le concept de « productivité totale des facteurs » (PTF), qui mesure les gains d'efficacité dans la production qui ne découlent pas de l'ajout d'une unité supplémentaire de travail ou de capital.²⁵ La PTF ne mesure pas seulement la productivité du travail, mais aussi celle des facteurs non liés au travail (comme les machines). En d'autres termes, la productivité est le rapport entre la valeur d'un produit et la valeur de tous les intrants qui ont été utilisés pour produire ce produit.²⁶

Les chercheurs ont eu du mal à mesurer la productivité de l'IA en raison du manque de données accessibles sur l'adoption de l'IA par les entreprises.²⁷ L'information sur les types spécifiques de technologies basées sur l'IA, ainsi que les détails sur les contextes dans lesquels les entreprises les utilisent, est sous-estimée. On a recours à deux méthodes différentes pour définir l'utilisation de l'IA et la production des entreprises.

Dans une première approche, les chercheurs ont utilisé les demandes de brevets et les données relatives à l'adoption de technologies spécifiques basées sur l'IA, telles que les robots et la prise de décision managériale fondée sur des données.²⁸ Alderucci et coll. (2020) ont analysé les brevets délivrés aux États-Unis afin d'évaluer la prévalence des inventions liées à l'IA par les entreprises. Les auteurs ont relié ces données aux microdonnées du Bureau du recensement des États-Unis afin de cerner les tendances de la demande en main-d'œuvre et de la croissance des entreprises. Ils ont constaté que les entreprises dotées d'innovations liées à l'IA connaissaient une croissance de l'emploi de 25 % et une croissance du chiffre d'affaires de 40 % plus rapides que les entreprises similaires qui n'avaient pas élaboré et adopté d'outils d'IA.²⁹

Dans une deuxième approche, les chercheurs ont utilisé le chiffre d'affaires et le résultat d'exploitation des entreprises pour évaluer les gains de productivité qui résultent de l'adoption de l'IA. Par exemple, Kim,

Park et Kim (2022) ont identifié 105 entreprises aux États-Unis qui ont adopté l'IA pour automatiser et augmenter les tâches entre 2000 et 2015.³⁰ L'étude a montré qu'au fil du temps, l'adoption de l'IA ne s'est pas traduite par une réduction des coûts ou une augmentation des bénéfices, ce qui signifie qu'elle n'a pas eu d'impact réel sur les résultats en matière de productivité. Toutefois, une autre étude qui utilisait le revenu d'exploitation pour mesurer la production a examiné l'impact de la pénétration de l'IA sur la PTF parmi les entreprises manufacturières chinoises cotées en bourse³¹ entre 2010 et 2021. L'étude a montré qu'une augmentation de 1 % de la densité d'utilisation de l'IA entraînait une hausse de 14,2 % de la PTF.³²

Une étude récente a utilisé les données de panel de l'Enquête communautaire sur l'innovation (ECI) 2018 de la Commission européenne pour évaluer les gains de productivité liés à l'IA en Allemagne.³³ L'étude a révélé que les entreprises qui utilisaient l'IA ont vu les ventes de leurs produits augmenter, ce qui indique une augmentation à court terme de la productivité liée à l'adoption de l'IA.

Impacts sectoriels de l'adoption de l'IA

Les chercheurs se sont également intéressés aux gains de productivité dans les différents secteurs de l'économie et dans les différentes compétences. Dans le domaine de la santé, des études ont montré que l'IA améliore la productivité des employés dans la prestation de services aux patients³⁴ En agriculture, l'IA a été adoptée pour aider les agriculteurs à évaluer les prévisions de rendement et à allouer les ressources de manière rentable. Plusieurs études identifient le potentiel d'amélioration de la productivité qui en découle.³⁵ Une autre étude réalisée par Kanazawa et coll. (2022) a constaté qu'un navigateur basé sur l'IA augmentait la productivité des chauffeurs de taxi en leur permettant de trouver plus rapidement des clients. Toutefois, l'augmentation de la productivité s'est concentrée sur les conducteurs peu qualifiés, pour réduire l'écart de productivité entre eux et les conducteurs hautement qualifiés d'environ 14 %.³⁶

La productivité au niveau de l'entreprise est souvent le résultat de gains d'efficacité dans les tâches effectuées par les travailleurs. En particulier, l'IA générative et les GML sont très utiles pour appuyer les tâches de rédaction et de codage. Par exemple, des études analysent les gains de productivité liés à l'utilisation de robots conversationnels d'assistance comme ChatGPT d'OpenAI en milieu de travail. Une étude, qui a confié à 453 professionnels de niveau universitaire des tâches de rédaction de niveau moyen, a montré que ChatGPT augmentait la productivité moyenne : le temps nécessaire à la réalisation d'une tâche allait en diminuant et la qualité de l'écriture allait en augmentant.³⁷ En outre, Peng et coll. (2023) ont mené une étude qui a révélé que les ingénieurs logiciels qui avaient accès à GitHub Copilot étaient en mesure d'effectuer une tâche deux fois plus rapidement que ceux qui n'y avaient pas accès.³⁸ Cependant, d'autres études montrent que l'utilisation d'outils d'IA générative dans certaines tâches (comme le codage) augmente considérablement les taux d'erreur et de bogue.³⁹

En résumé, la recherche sur les gains de productivité qui résultent de l'utilisation de l'IA est limitée par des problèmes de disponibilité des données et par des approches différentes de la mesure de l'adoption de l'IA et de la productivité des entreprises. Les écrits existants donnent des résultats mitigés. Il n'existe aucune preuve concluante, au niveau de l'ensemble de l'économie ou des secteurs, d'une relation positive forte entre l'adoption de la technologie et l'amélioration de la productivité. Les résultats et les limites de la recherche soulignent également la nécessité d'aborder les évaluations de la productivité avec nuance et en accordant une attention particulière aux compétences et aux conditions de travail des travailleurs qui utilisent ces outils.

En résumé, la recherche sur les gains de productivité qui résultent de l'utilisation de l'IA est limitée par des problèmes de disponibilité des données et par des approches différentes de la mesure de l'adoption de l'IA et de la productivité des entreprises. Les écrits existants donnent des résultats mitigés. Il n'existe aucune preuve concluante, au niveau de l'ensemble de l'économie ou des secteurs, d'une relation positive forte entre l'adoption de la technologie et l'amélioration de la productivité.



4

Méthodologie

Estimation de la productivité au niveau de l'entreprise

Le niveau de croissance de la productivité d'une entreprise est l'un des principaux critères de mesure des résultats de notre étude. Dans cet ouvrage, nous faisons conceptuellement référence à la « productivité totale des facteurs » (ou PTF) chaque fois que nous utilisons le mot « productivité ». La PTF se définit comme les gains d'efficacité dans la production qui ne découlent pas d'une unité supplémentaire de travail ou de capital. L'approche privilégiée, popularisée pour la première fois par Robert Solow, est donc l'idée d'un « résidu de Solow », selon laquelle la PTF est ce qui « reste » après que la valeur de tous les intrants a été déduite de la valeur de la production.⁴⁰

Il s'agit d'une procédure en deux étapes. Tout d'abord, on produit des estimations spécifiques à l'industrie des ratios de capital et de travail utilisés. Les paramètres qui en résultent pour la production spécifique à l'industrie servent ensuite à la deuxième étape, avec les attributs spécifiques à l'entreprise (comme la masse salariale, le revenu et l'évaluation du capital). Cela nous permet d'obtenir des estimations de la productivité au niveau de l'entreprise. L'annexe A explique plus en détails le processus spécifique utilisé et pourquoi cette approche, appelée processus Wooldrige-Levinsohn-Petrin ou WLP, est l'approche privilégiée en économie.

Estimation causale (triple estimation de différence dans la différence)

À l'aide de la mesure de la croissance de la productivité au niveau de l'entreprise présentée dans la section précédente, nous décrivons à présent notre stratégie empirique afin d'obtenir l'impact causal de l'adoption de l'IA sur la productivité. En particulier, nous utilisons une variante d'une estimation causale populaire en économie – l'estimateur de la différence dans la différence (ou diff-en-diff).

D'un point de vue conceptuel, la différence dans la différence permet aux chercheurs de se concentrer sur la différence de résultats entre deux groupes, dont un seul a été exposé à un « événement causal ». Une méthode quasi-expérimentale permet à un chercheur d'établir une relation de cause à effet entre une exposition (une intervention politique ou un événement particulier) et un résultat (l'objectif politique souhaité).

Pour ce faire, elle se concentre sur les situations où l'exposition à une intervention politique est ciblée sur un sous-échantillon spécifique. Son affirmation causale repose sur l'hypothèse d'une « tendance parallèle » selon laquelle les entreprises (dans le cas présent) qui ont adopté l'IA et celles qui ne l'ont pas adoptée ont suivi une trajectoire similaire. Si celles qui ont adopté l'IA ne l'avaient pas fait, on suppose qu'elles seraient restées sur la même trajectoire. Son principal avantage est qu'elle permet une interprétation causale limitée en l'absence d'exposition aléatoire à une intervention (dans ce cas, l'adoption de l'IA). Les détails techniques du modèle de différence dans la différence utilisé dans ce rapport se trouvent à l'annexe A.

Sélection des variables

Variable d'intérêt

Notre variable d'intérêt identifie les entreprises qui adoptent des technologies d'IA au cours des trois années de l'échantillon. En d'autres termes, nous avons identifié deux sous-groupes distincts d'entreprises canadiennes : les entreprises qui ont adopté l'IA entre 2020 et 2021 et les entreprises qui ne l'ont pas adoptée et qui sont restées dans l'échantillon. Celles qui ont adopté l'IA avant 2020 sont exclues, car nous ne pouvons pas déterminer quand elles ont adopté la technologie. La matrice ci-dessous illustre les critères d'inclusion et les groupes d'intérêt de notre échantillon :

Nous avons identifié deux sous-groupes distincts d'entreprises canadiennes : les entreprises qui ont adopté l'IA entre 2020 et 2021 et les entreprises qui ne l'ont pas adoptée et qui sont restées dans l'échantillon.

Tableau 1 : Résumé des conditions de traitement de l'adoption de l'IA

Restrictions de l'échantillon du panel sur l'adoption de l'IA	N'a pas adopté l'IA avant 2021	A adopté l'IA avant 2021
N'a pas adopté l'IA avant 2019	Groupe témoin	Groupe étudié
A adopté l'IA avant 2019	Exclus de l'échantillon	Exclus de l'échantillon

Les restrictions du panel nous permettent de comprendre l'effet unique de l'adoption de l'IA sur la PTF des entreprises canadiennes par rapport aux entreprises qui n'ont pas adopté l'IA au cours de la période d'analyse de trois ans.

Dans nos autres spécifications de modélisation, nous créons une variable d'interaction comme variable de traitement en utilisant l'année de déclaration fiscale de l'entreprise et un indicateur binaire qui identifie l'adoption de l'IA en 2021. Cela permet de comprendre l'effet indépendant de l'adoption de l'IA sur le niveau et l'évolution de la PTF.

Contrôles

Nous dérivons la variable pour l'industrie en créant un indicateur binaire pour les entreprises dans les industries de services par le premier chiffre des codes du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN). Nos recherches antérieures ont montré que les industries de services embauchent et emploient des travailleurs dont les compétences sont plus susceptibles d'être touchées par l'IA et qu'elles disposent d'une plus grande variété de propositions de valeur pour son application.

Nous regroupons nos estimations de l'erreur standard sur la taille de l'entreprise afin de tenir compte des caractéristiques non observables des entreprises qui adoptent l'IA. Cela nous permet de tenir compte des caractéristiques non observables qui varient dans le temps qui ne sont pas prises en compte dans les variables de contrôle et de traitement basées sur la

taille de l'entreprise. Nos travaux antérieurs montrent que l'adoption de l'IA par les entreprises canadiennes est fortement orientée vers les entreprises ayant un grand nombre d'employés.

Nous utilisons la variable « taille de l'entreprise » de l'ETNUI,⁴¹ une variable catégorielle qui indique si une entreprise emploie moins de 20, 20 à 99 ou 100 employés ou plus.⁴²

Robustesse

Pour garantir la robustesse de l'estimation de l'effet causal, nous utilisons également une méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) à effet fixe, une variable instrumentale et des régressions par quantile aux 25e, 50e et 75e percentiles.

Cela permet d'estimer le coefficient de la PTF pour le groupe étudié des entreprises ayant adopté l'IA en 2021 comme variable d'interaction entre la période post-traitement (2021) et les entreprises du groupe étudié (ayant adopté l'IA en 2021 mais pas en 2019). Comme pour le modèle de différence dans la différence, un indicateur binaire pour le secteur des biens ou des services de l'entreprise a été ajouté en tant que contrôle, avec des erreurs types groupées sur la taille de l'entreprise.

Dans le cas des régressions par quantile, nous ajoutons la taille de l'entreprise comme variable de contrôle. De plus amples renseignements sur la forme de cette régression figurent à l'annexe A.

La crise de la COVID-19 et son impact potentiel

La période de changement que nous envisageons d'étudier est celle comprise entre 2019 et 2021, notamment entre une période de perturbation économique importante provoquée par la pandémie de COVID-19. Nous discutons ici de la manière dont nos résultats devraient être caractérisés dans le contexte de cet événement.

Nous notons que la méthodologie de différence dans la différence vise à contrôler les chocs et les tendances communs qui touchent toutes les entreprises. Par conséquent, nous sommes convaincus que notre allégation causale n'est pas contaminée par la pandémie de COVID-19. Nous discutons des problèmes potentiels liés à l'interprétation de nos résultats en dehors du contexte de la COVID-19.

Toutefois, la pandémie de COVID-19 pourrait avoir créé un environnement unique pour les entreprises qui adoptent l'IA. Compte tenu des perturbations économiques causées par la pandémie, la motivation des entreprises à adopter l'IA peut avoir été différente de ce qu'elle aurait été dans des circonstances plus normales. Par exemple, les entreprises peuvent s'être tournées vers les technologies d'automatisation pour maintenir leur productivité malgré les exigences de distanciation sociale et le renforcement des protocoles de santé et de sécurité. De même, il est possible qu'en raison du ralentissement du marché du travail provoqué par la pandémie, certaines entreprises qui auraient mis en œuvre l'IA pour faire face aux difficultés d'embauche aient décidé de ne pas le faire.

Si les entreprises ont adopté l'IA au cours de cette période pour relever de nouveaux défis, ou ne l'ont pas fait pour des raisons qui les auraient normalement motivées, il est possible que, dans un contexte différent, l'adoption de l'IA ait donné des résultats différents. Il sera important de reproduire ces travaux pour la période suivant la pandémie afin de vérifier si ces résultats restent valables ou s'ils changent en dehors du contexte de la COVID-19.

5

Données

Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet

La principale source de données que nous utiliserons pour notre recherche sera l'Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet (ETNUI). L'ETNUI est une enquête obligatoire menée par Statistique Canada auprès des entreprises pour comprendre l'adoption de différentes technologies dans les entreprises canadiennes. L'itération moderne de l'enquête a été menée pour la première fois en 2019 (jusqu'en 2020), avec une vague de suivi en 2021 (jusqu'en 2022), et une troisième vague qui a conclu la collecte de données en mars 2024 (non encore publiée). Les entreprises sont légalement tenues de répondre à l'enquête, et environ 15 000 d'entre elles répondent à chaque vague d'enquête.

L'enquête s'adresse aux décideurs technologiques des entreprises et couvre les cas d'utilisation de la technologie qui sont « au cœur des processus opérationnels » (par exemple, un employé qui utilise Google pour chercher de l'information et qui interagit donc avec l'IA qui classe les résultats de la recherche ne sera pas couvert). La réponse à cette question, en particulier en ce qui concerne l'IA, constitue notre principale mesure de l'adoption de l'IA dans les entreprises.

Une autre caractéristique que nous exploitons pour effectuer notre analyse causale est le nombre non négligeable d'entreprises qui ont répondu à la fois à l'ETNUI de 2019 et de 2021 – soit un total de plus de 2 000 entreprises. Cela nous permet d'examiner la croissance de la productivité dans les entreprises qui ont adopté l'IA entre 2019 et 2021 (c'est-à-dire celles qui n'avaient pas adopté l'IA en 2019 mais l'ont fait en 2021).

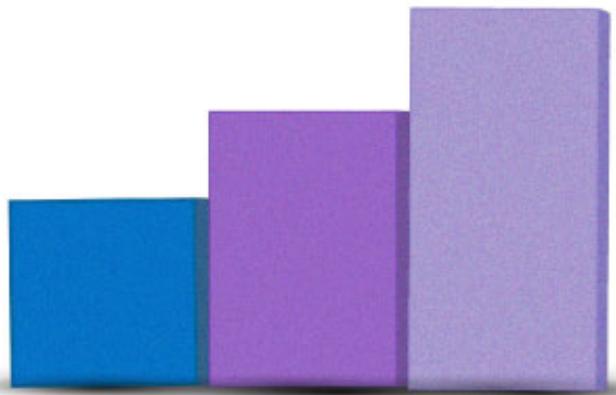
Toutefois, l'ETNUI ne fournit pas les données financières et d'emploi nécessaires pour estimer la productivité au niveau de l'entreprise. Pour obtenir cette information, nous nous appuyons sur le fait que l'ETNUI existe dans l'Environnement de fichiers couplables (EFC) de Statistique Canada. Cet écosystème de données relie les données d'enquêtes auprès des entreprises aux sources de données administratives.

En utilisant l'EFC, nous relierons des identifiants uniques au niveau de l'entreprise à des attributs clés de l'entreprise dans le registre des entreprises (comme leur secteur d'activité et leur localisation) et à des renseignements financiers qui proviennent de l'Index général des renseignements financiers (données sur le revenu, l'emploi et le capital provenant des déclarations d'impôts des entreprises). Cela nous permet d'estimer la croissance de la productivité au niveau de l'entreprise pour les entreprises dans l'ensemble de données de l'ETNUI.

Microdonnées de recherche sur les entreprises

Les Microdonnées de recherche sur les entreprises (MDE), que l'on appelait autrefois Fichier de microdonnées longitudinales des comptes nationaux (FMLCN), sont une source de données administratives de base pour la recherche que Statistique Canada tient à jour. Elles contiennent des données longitudinales sur toutes les entreprises enregistrées au Canada, avec des données provenant de sources administratives, telles que le registre des entreprises, les données fiscales et le registre des exportations.

Nous utilisons principalement les MDE pour effectuer la première des deux étapes du processus d'estimation de la productivité au niveau de l'entreprise. Comme nous l'avons expliqué dans la section consacrée aux méthodes, la méthode que nous utilisons pour estimer la productivité au niveau de l'entreprise nécessite l'estimation d'un modèle unique pour chacun des 324 codes industriels détaillés (appelés Système de classification des industries de l'Amérique du Nord ou SCIAN), puis l'application de chacun de ces 324 modèles aux attributs individuels de l'entreprise (comme le chiffre d'affaires et le nombre d'emplois). La taille de l'échantillon auquel nous avons accès grâce à l'ETNUI ne nous permet tout simplement pas d'effectuer cette étape de manière rigoureuse. Par conséquent, nous utiliserons des données sur toutes les entreprises enregistrées au Canada pour générer ces modèles d'estimation spécifiques à l'industrie (de 2000 à 2020).



6

Constations

Résultats descriptifs

Avant de présenter la modélisation de l'effet de l'adoption de l'IA sur la productivité, nous commençons par établir les caractéristiques de base des deux groupes d'échantillons en comparant les principales statistiques descriptives.

Tout d'abord, pour comprendre historiquement comment les décisions en matière d'intrants ont varié d'une industrie à l'autre, nous calculons les allocations au travail et au capital spécifiques à l'industrie en utilisant un échantillon plus large de l'ensemble complet de données provenant des Microdonnées de recherche sur les entreprises de 2001 à 2022.

Lorsque nous appliquons ces estimations au groupe étudié (entreprises ayant adopté l'IA au cours de la période 2020-2021) pour calculer la productivité au niveau de l'entreprise (une mesure du revenu produit par un ensemble d'intrants), nous constatons que les entreprises ayant adopté l'IA sont globalement plus productives que les entreprises n'utilisant pas l'IA, tant avant qu'après la période d'expérimentation.

Parmi les entreprises qui ont adopté l'IA, les niveaux de productivité ont été de 10 % à 35 % supérieurs à ceux des entreprises qui ne l'ont pas adoptée au cours des années observées dans notre étude, comme le montre la figure 1. Il s'agit là d'un résultat remarquable qui suggère que l'adoption de l'IA est corrélée à une plus grande productivité de l'entreprise.

Mais l'adoption de l'IA entraîne-t-elle une augmentation de la productivité des entreprises? L'adoption de l'IA est-elle associée à une augmentation de la productivité totale des facteurs de l'entreprise après l'adoption? Si l'on considère la croissance annuelle de la PTF, c'est-à-dire la différence entre la PTF d'une entreprise d'une période à l'autre, la figure 2 montre que la PTF des entreprises ayant adopté l'IA n'augmente pas systématiquement plus vite que celle des autres entreprises dans une mesure significative (à l'exception de 2022).⁴³

Figure 1 : Productivité globale des facteurs par année et adoption de l'IA

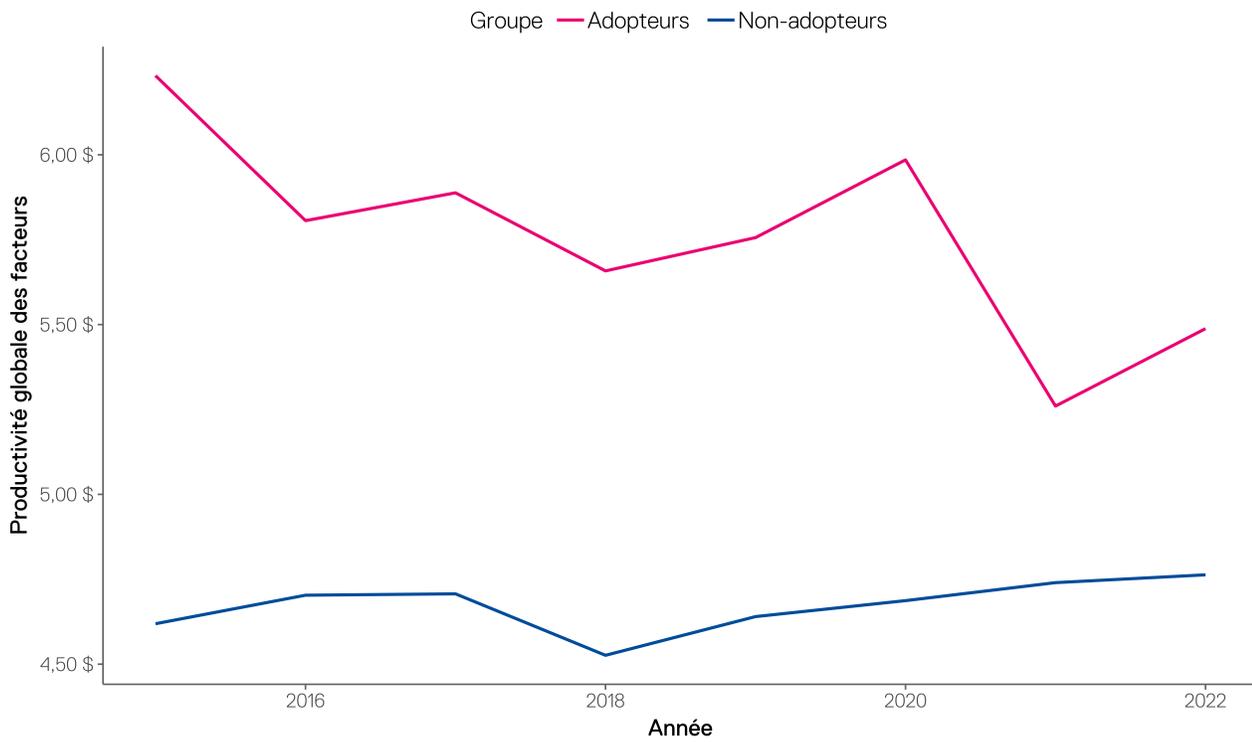
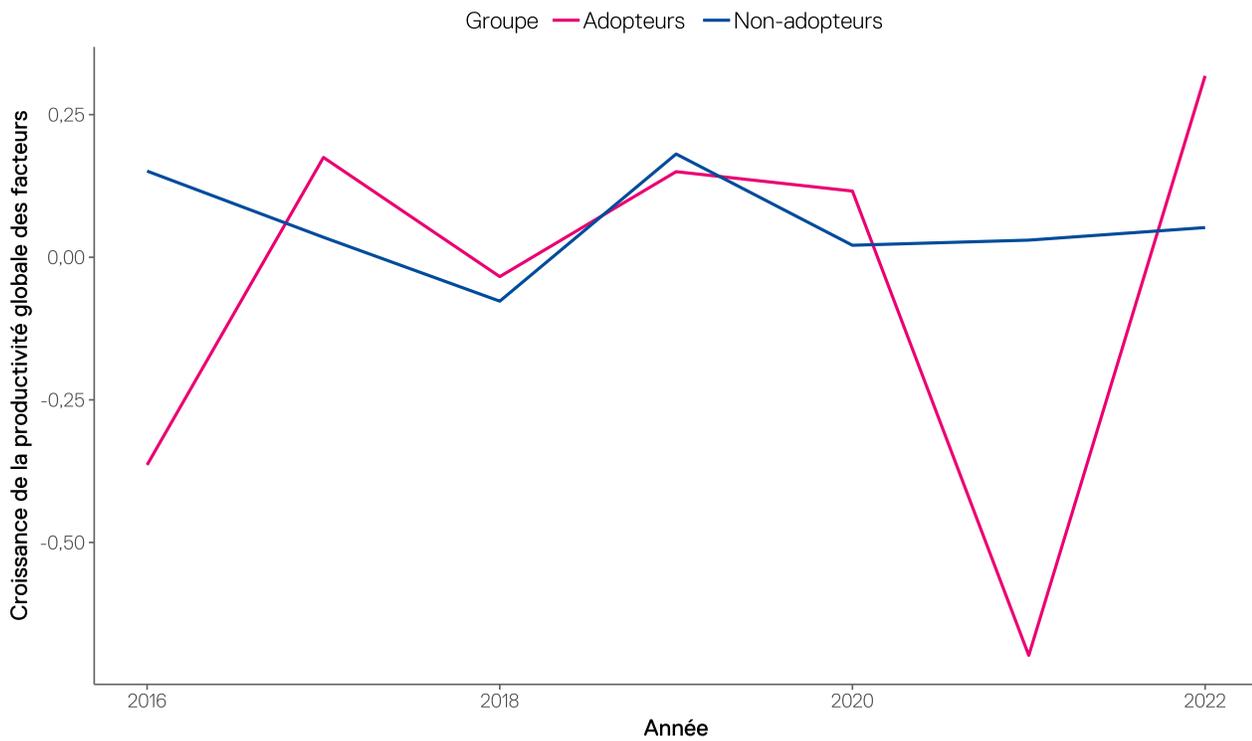


Figure 2 : Croissance de la productivité globale des facteurs par année et adoption de l'IA



Modélisation causale

En utilisant une approche de différence dans la différence, nous constatons que l'ensemble des entreprises qui ont adopté l'IA ont connu une croissance de la productivité inférieure à celle des autres entreprises au Canada après l'adoption de l'IA. La figure 3 montre qu'en 2022, quand toutes les entreprises du groupe étudié ont adopté l'IA, la croissance de la PTF est significativement plus faible au sein du groupe étudié que pour le groupe témoin d'entreprises n'ayant pas adopté l'IA (représenté dans la figure 3 par la ligne à 0,0). Toutefois, au cours de la période où les entreprises ont adopté l'IA, les résultats sont mitigés : en 2020, la croissance était nettement plus élevée et en 2021, elle était nettement plus faible.

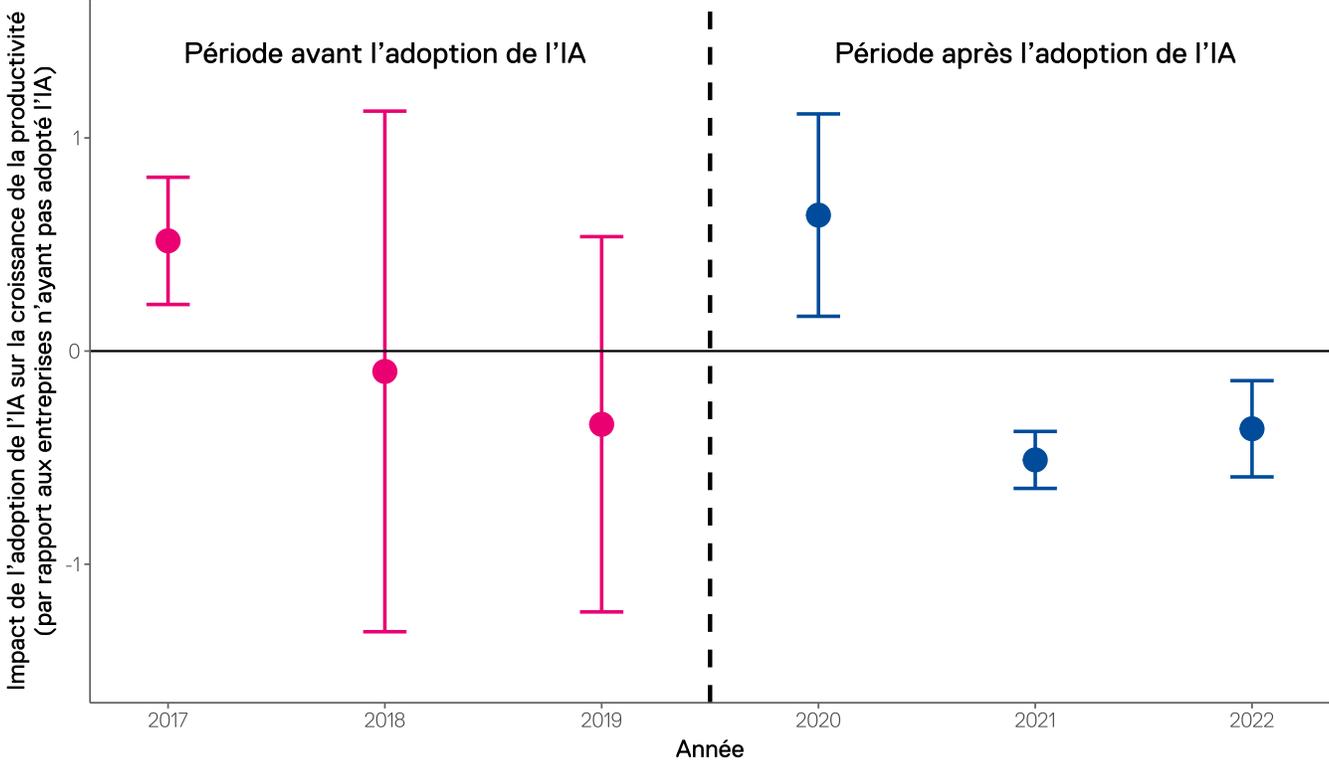
Notre modèle, qui relie les données de l'Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet aux données financières au niveau de l'entreprise, estime l'impact de l'adoption de l'IA par une entreprise sur la croissance ultérieure de sa productivité. Ce modèle compare la différence de croissance de la productivité entre les entreprises qui ont adopté l'IA entre début 2020 et fin 2021 et les entreprises qui n'ont pas adopté l'IA.⁴⁴

Nous soulignons deux considérations importantes. Premièrement, ces données couvrent la période qui précède le lancement de l'IA générative. Deuxièmement, on ne connaît pas le moment exact où chaque entreprise du groupe étudié a adopté l'IA. Dans l'idéal, le traitement (adoption de l'IA) aurait été appliqué à toutes les entreprises au même moment, mais dans le cas présent, il a eu lieu à une date inconnue entre la fin de 2019 (quand l'itération 2019 de l'ETNUI a pris fin) et la fin de 2021 (quand l'enquête 2021 a pris fin). Cela signifie que la première année où des effets pourraient se manifester serait en 2020, et que toutes les entreprises du groupe étudié auraient adopté l'IA au début de 2022.



En utilisant une approche de différence dans la différence, nous constatons que l'ensemble des entreprises qui ont adopté l'IA ont connu une croissance de la productivité inférieure à celle des autres entreprises au Canada après l'adoption de l'IA. La figure 4 montre qu'en 2022, quand toutes les entreprises du groupe étudié ont adopté l'IA, la croissance de la PTF est significativement plus faible au sein du groupe étudié que pour le groupe témoin d'entreprises n'ayant pas adopté l'IA (représenté dans la figure 4 par la ligne à 0,0). Toutefois, au cours de la période où les entreprises ont adopté l'IA, les résultats sont mitigés : en 2020, la croissance était nettement plus élevée et en 2021, elle était nettement plus faible.

Figure 3 : Impact de l'adoption de l'IA sur la croissance de la productivité (par rapport aux entreprises n'ayant pas adopté l'IA)



D'autres façons de modéliser cet impact donnent des résultats différents. L'annexe B présente les résultats détaillés de cinq autres modèles qui examinent la relation entre l'adoption de l'IA et la croissance de la PTF. Bien que les spécifications diffèrent d'un modèle à l'autre, elles ne montrent systématiquement aucune augmentation significative de la croissance de la PTF pour les entreprises qui adoptent l'IA. Toutefois, il est intéressant de noter qu'elles ne montrent pas non plus la même relation négative significative que celle produite par le modèle de différence dans la différence.

Dans l'ensemble, ces modèles suggèrent que les avantages de l'IA mis en évidence dans des travaux plus expérimentaux ne sont pas largement réalisés dans les entreprises qui ont commencé à utiliser l'IA dans leur travail quotidien sur l'horizon à court terme de l'étude (jusqu'à deux ans à partir du moment de l'adoption). Nous examinons également la relation entre l'adoption de l'IA dans les entreprises et la PTF globale plutôt que le taux de croissance annuel de la PTF. Les résultats de ces modèles sont similaires à ceux des modèles de croissance de la PTF. Dans la plupart des cas, il n'y a pas de relation significative entre l'adoption de l'IA par une entreprise en 2020 ou 2021 et une quelconque différence dans la PTF.

Quand nous estimons l'impact de l'adoption de l'IA et la PTF globale de l'entreprise, nous constatons une relation significative et positive entre les entreprises qui commencent à utiliser l'IA et les autres entreprises de notre échantillon. La relation positive entre les modèles qui estiment le niveau de la PTF suggère que les entreprises qui ont adopté l'IA sont généralement plus productives que les entreprises qui n'ont pas adopté l'IA, et ce, même avant l'adoption. Elles continuent également à être plus productifs en moyenne après l'adoption.

En résumé, le groupe étudié des entreprises ayant adopté l'IA était déjà très productif, mais la décision d'adopter l'IA n'a pas augmenté le taux de croissance de leur productivité.

Pourtant, l'adoption de l'intelligence artificielle par les entreprises canadiennes n'en est qu'à ses débuts. Au fur et à mesure que les innovations en matière d'IA se poursuivent, la technologie se diffuse dans différentes fonctions de l'entreprise et, à mesure que de plus en plus d'entreprises l'intègrent, le modèle existant pourrait changer. Rien de tout cela n'exclut une croissance de la PTF parmi les entreprises étudiées sur un horizon temporel plus long, ou une croissance de la PTF due à l'adoption future par des entreprises qui sont moins productives au départ.

Les résultats appellent à la prudence en présumant que l'adoption de l'IA par les entreprises peut être une solution miracle pour relever le défi de la croissance à court terme de la productivité au Canada.

En résumé, le groupe étudié des entreprises ayant adopté l'IA était déjà très productif, mais la décision d'adopter l'IA n'a pas augmenté le taux de croissance de leur productivité.

7

Conclusion

L'exubérance à l'égard de l'IA et de ses avantages potentiels pour l'économie et la société découle d'un optimisme quant à sa capacité à stimuler la croissance de la productivité, avec le potentiel d'améliorer le travail et de rehausser le niveau de vie. Pourtant, le paradoxe de Solow observe qu'au cours des différentes vagues d'innovation, la croissance de la productivité est restée à la traîne, voire a diminué, pendant les périodes d'adoption des technologies. Les choses seront-elles différentes cette fois-ci?

Les résultats de cette étude, bien que préliminaires, suggèrent que les personnes qui partagent cet optimisme devraient faire preuve de prudence quant aux avantages de l'adoption de l'IA en termes de productivité à court terme. Les travaux de recherche sur les gains de productivité qui résultent de l'utilisation de l'IA donnent des résultats mitigés, sans preuve concluante d'une relation positive ou négative forte entre l'adoption de la technologie et l'amélioration de la productivité.

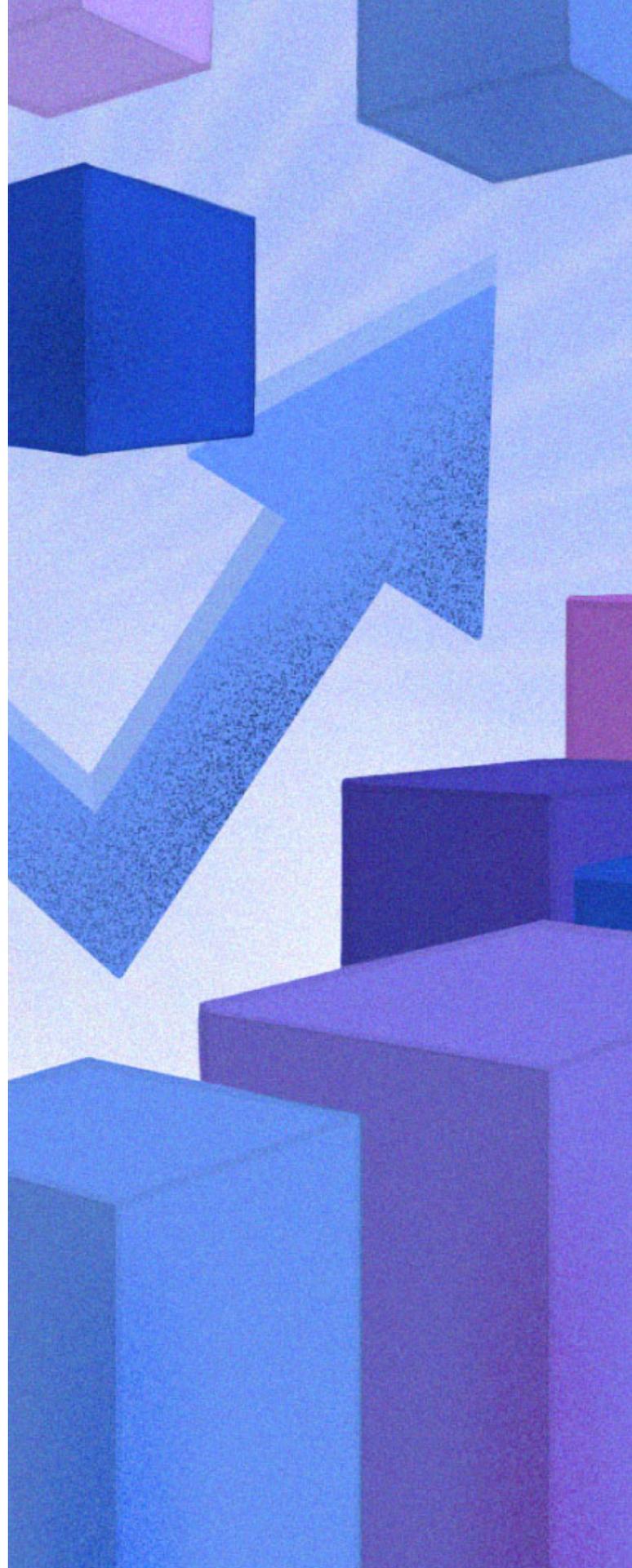
Notre modèle économique, qui examine un groupe étudié d'entreprises canadiennes ayant adopté l'IA en 2020 ou 2021, ne révèle aucune relation significative entre l'adoption de l'IA et une quelconque différence dans les niveaux ou la croissance de la productivité totale des facteurs (PTF). De plus, le sous-groupe des entreprises ayant adopté l'IA était déjà très productif, mais la décision d'adopter l'IA n'a pas augmenté le taux de croissance de la productivité de ces entreprises.

Notre modèle économique, qui examine un groupe étudié d'entreprises canadiennes ayant adopté l'IA en 2020 ou 2021, ne révèle aucune relation significative entre l'adoption de l'IA et une quelconque différence dans les niveaux ou la croissance de la productivité totale des facteurs (PTF). De plus, le sous-groupe des entreprises ayant adopté l'IA était déjà très productif, mais la décision d'adopter l'IA n'a pas augmenté le taux de croissance de la productivité de ces entreprises.

Cependant, cette recherche a ses limites. Les différentes vagues d'innovation ne sont pas nécessairement prédictives des vagues futures, de sorte qu'il est difficile d'extrapoler les résultats d'une période à l'autre, et les gains se produisent souvent au fil du temps. Étant donné que l'adoption de l'IA est relativement faible dans l'ensemble de l'économie canadienne, il est plus difficile de se faire une idée de l'impact de l'IA sur la productivité – en particulier par rapport à l'impact d'autres technologies d'usage général plus largement adoptées.

Mesurer l'impact de l'intelligence artificielle sur la productivité par le biais de son adoption par les entreprises selon l'ETNUI ne permet pas de déterminer dans quelle mesure les technologies sont utilisées dans les fonctions essentielles de l'entreprise. À mesure que les applications d'IA se généralisent et sont de plus en plus intégrées dans diverses activités, les chances que les gains d'efficacité potentiels se traduisent par une augmentation de la productivité pourraient s'accroître.

Il est important de noter que cette recherche se concentre également sur les impacts de l'IA avant le dernier boom de l'IA générative. L'IA générative a un champ d'application plus large dans l'économie, mais aussi des implications plus importantes pour le bien-être économique de la population canadienne, les premières données suggérant une diminution de la demande de compétences et de tâches qui peuvent être remplacées par des applications génératives.⁴⁵ L'impact de l'IA générative sur la croissance de la productivité des entreprises canadiennes doit faire l'objet de recherches plus approfondies. Grâce aux données de la prochaine itération de l'Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet qui a été menée à la fin 2023 et au début 2024, cela sera possible.



Annexe A

La méthodologie consiste en une analyse descriptive et une analyse causale. L'analyse descriptive fournit une vue d'ensemble du type d'entreprises déployant l'IA et de leur productivité moyenne pour l'année la plus récente de l'ETNUI. Cela nous donne une idée de l'état actuel de l'adoption de l'IA au Canada. Cela comprend une sous-population de 15 683 entreprises en 2021 (et de 14 127 entreprises en 2019), avec une variable de PTF construite déconstruite par des caractéristiques d'entreprise telles que la taille de l'entreprise et l'industrie SCIAN. Pour cette analyse, nous devrions utiliser les Microdonnées de recherche sur les entreprises (MRE) de 2021 et les réponses au niveau de l'entreprise de l'ETNUI de 2021.

Toutefois, pour comprendre toute l'étendue de l'impact de l'IA sur l'efficacité des entreprises, nous devons isoler l'effet de traitement de l'adoption de l'IA. Il s'agirait d'une analyse causale qui utilise une variable de la PTF au niveau de l'entreprise comme variable dépendante, l'effet du traitement étant l'adoption des technologies de l'IA par les entreprises.^{46 47 48} Comme nous le verrons plus en détail dans la section relative aux exigences en matière de données, nous nous appuyons, pour cette étape, sur les MRE et les réponses de l'ETNUI concernant l'adoption de l'IA.

Quand ils étudient l'économie et le processus de production, les économistes conceptualisent souvent ce que l'on appelle la « fonction de production », qui transforme les intrants (le travail fourni par les personnes et les entrepreneurs et les machines ainsi que d'autres formes de capital) en extrants (les biens ou services physiques finaux). La PTF est intuitivement comprise comme ce qui permet à la valeur de la production de dépasser la somme totale des valeurs des intrants. On l'interprète parfois comme une technologie ou une innovation, et la croissance de la PTF permet à un même ensemble d'intrants de créer encore plus de produits qu'auparavant, ce qui explique pourquoi les économistes et les décideurs politiques se concentrent sur cette mesure.

De façon empirique, l'estimation de la PTF est difficile, car elle est conceptuellement floue. L'approche privilégiée, popularisée pour la première fois par Robert Solow, est l'idée d'un « résidu de Solow », selon laquelle la PTF est ce qui « reste » après que la valeur de tous les intrants a été déduite de la valeur de la production.⁴⁹ Nous suivons une approche similaire dans notre travail. En particulier, nous nous appuyons sur des travaux antérieurs qui ont exploré l'estimation de la productivité au niveau de l'entreprise^{50 51} (le processus Wooldridge-Levinsohn-Petrin ou WLP) qui s'est également révélé efficace dans les données canadiennes.⁵² Ce calcul est une approche ajustée de la méthode d'estimation de Levinsohn et Petrin (2003),^{53 54} comme l'a exposée Wooldridge (2009).⁵⁵

Plus précisément, la procédure WLP propose un processus d'estimation en deux étapes où la fonction de production spécifique à l'industrie est estimée. Les paramètres qui en résultent pour la production spécifique à l'industrie servent ensuite à la deuxième étape, avec les attributs spécifiques à l'entreprise (comme la masse salariale, le revenu et l'évaluation du capital) pour obtenir les estimations de la productivité au niveau de l'entreprise. Il s'agit d'estimer la série d'équations suivante à l'aide d'une approche de variable instrumentale :

$$\ln(Y_{it}) = \beta_0 + \beta_L \ln(L_{it}) + \beta_K \ln(K_{it}) + \beta_m \ln(m_{it}) + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$\ln(Y_{it}) = \beta_0 + \beta_L \ln(L_{it}) + \beta_K \ln(K_{it}) + f(g[K_{it-1}, m_{it-1}]) + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

où Y_{it} représente le revenu total de l'entreprise pour l'année t pour l'entreprise i , L_{it} représente la masse salariale totale pour l'année t et l'entreprise i , K_{it} représente le total des actifs de l'entreprise dans l'année t pour l'entreprise i , et m_{it} représente le coût total des ventes et des biens intermédiaires dans l'année t pour l'entreprise i . Dans l'équation 1, la forme complète de la fonction de production est décrite et la production dépend des décisions de l'entreprise concernant le travail, le capital et les intrants intermédiaires. Dans l'équation 2, la fonction

$f(g[K_{it-1}, m_{it-1}])$ est notre mesure de la productivité, qui est une fonction des décisions en matière de capital et d'intrants intermédiaires au moment $t-1$. Nous suivons le modèle WLP en supposant une forme fonctionnelle polynomiale du troisième degré pour ces fonctions.

Nous observons deux groupes d'entreprises : un groupe témoin composé d'entreprises qui n'ont pas adopté les technologies d'IA en 2019 ou en 2021, et un groupe étudié qui n'a pas déployé les technologies d'IA en 2019 mais l'a fait en 2021. Dans l'estimation de la différence dans la différence, nous observons l'impact de cette intervention sur la PTF dans les années qui suivent la mise en œuvre de l'IA. Cela nous permet d'observer l'évolution de la PTF au temps t par rapport au temps t_1 , en contrôlant d'autres facteurs spécifiques au temps et à l'entreprise, comme le type de secteur d'activités de l'entreprise (par exemple, les biens ou les services), la taille de l'entreprise, etc.

À l'aide des estimations de la PTF au niveau de l'entreprise, nous effectuerons la triple estimation suivante des différences dans les différences (étant donné que la PTF est déjà une différence) sur l'impact de l'adoption de l'IA, qui prend la forme suivante dans l'équation 3 :

$$\Delta PTF_{it} = \beta_0 + \beta_1 Post_t + \beta_2 Traitement_i + \beta_3 (Traitement_i \times Post_t) + \beta_4 Service_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

Avec $Traitement_i$ comme indicateur binaire qui représente le groupe étudié (entreprises qui ont adopté l'IA en 2021, mais pas en 2019), $Post_t$ qui représente si la période d'estimation de la PTF est postérieure à la mise en œuvre de l'IA (en 2021), $Traitement_i \times Post_t$ comme terme d'interaction qui mesure l'effet du traitement sur le groupe étudié, et $Service_{it}$ qui représente un indicateur binaire de l'appartenance d'une entreprise à une industrie de biens ou de services.

En outre, on a construit des modèles de MCO à effet fixe, une variable instrumentale et des modèles de régression par quantile, qui prennent la forme suivante dans l'équation 4 :

$$\Delta PTF_{it} = \beta_0 + \beta_1 Traitement_{it} + \beta_2 Année_{2021} + \beta_3 (Traitement_{it} \times Année_{2021}) + v_t + \beta_4 Service_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

Pour MCO à effet fixe, les caractéristiques temporelles spécifiques à l'entreprise sont annulées, la PTF étant une variable de croissance entre les périodes t et $t-1$. Quand on utilise les niveaux de PTF au lieu de la croissance, ces caractéristiques sont saisies par le biais de u_i résiduel. Les effets fixes dans le temps des caractéristiques spécifiques à l'année sont pris en compte avec v_t résiduel pour les niveaux et la croissance de la PTF.



Annexe B

Tableau B-1 : Estimation de la différence dans la différence, croissance de la PTF en tenant compte de l'indication de l'industrie des biens/services et des erreurs standard groupée sur les groupes de taille d'emploi

Période	Effet moyen du traitement sur le groupe étudié (EMTÉ)	Erreur standard	95% confidence interval (lower bound)	Intervalle de confiance à 95 % (limite supérieure)
2017	0,52	0,22	0,22	0,82
2018	-0,09	0,91	-1,32	1,13
2019	-0,34	0,66	-1,22	0,54
2020	0,64	0,35	0,16	1,11
2021	-0,51	0,1	-0,64	-0,38
2022	-0,36	0,17	-0,59	-0,14

*Les valeurs en noir sont statistiquement significatives au niveau de 5 %

Tableau B-2 : Estimation de la différence dans la différence, niveaux de la PTF en tenant compte de l'indication de l'industrie des biens/services et de l'erreur standard groupée sur les groupes de taille d'emploi

Période	Effet moyen du traitement sur le groupe étudié (EMTÉ)	Erreur standard	95% confidence interval (lower bound)	Intervalle de confiance à 95 % (limite supérieure)
2016	-0,34	0,25	-0,77	0,09
2017	0,13	0,02	0,09	0,16
2018	0,26	0,71	-0,95	1,47
2019	-0,22	0,41	-0,93	0,48
2020	0,38	0,10	0,21	0,56
2021	0,14	0,28	-0,34	0,61
2022	0,29	0,18	-0,03	0,60

*Les valeurs en noir sont statistiquement significatives au niveau de 5 %

Tableau B-3 : Régression MCO à effets fixes, croissance de la PTF en tenant compte de l'indication de l'industrie des biens/services et de l'erreur standard groupée sur les groupes de taille d'emploi

Variable	Estimation	Erreur standard	Valeur T	Valeur P
Groupe étudié	-126,86	352,02	-0,36	0,75
Période post-traitement	0,00	0,03	0,10	0,93
Interaction : Groupe étudié et période post-traitement	0,06	0,17	0,36	0,75

*Les valeurs en noir sont statistiquement significatives au niveau de 5 %

Tableau B-4 : Régression MCO à effets fixes, niveaux de la PTF en tenant compte de l'indication de l'industrie des biens/services et de l'erreur standard groupée sur les groupes de taille d'emploi

Variable	Estimation	Erreur standard	Valeur T	Valeur P
Groupe étudié	-521,43	262,76	-1,98	0,19
Période post-traitement	0,00	0,06	-0,03	0,98
Interaction : Groupe étudié et période post-traitement	0,26	0,13	1,99	0,18

*Les valeurs en noir sont statistiquement significatives au niveau de 5 %

Tableau B-5 : Variable instrumentale (2e étape), croissance de la PTF en tenant compte de l'indication de l'industrie des biens/services et de l'erreur standard groupée sur les groupes de taille d'emploi

Variable	Estimation	Erreur standard	Valeur T	Valeur P
Groupe étudié	-126,86	352,03	0,36	0,72
Période post-traitement	0,003	0,031	0,10	0,92
Interaction : Groupe étudié et période post-traitement	0,06	0,17	0,04	0,97

*Les valeurs en noir sont statistiquement significatives au niveau de 5 %

Tableau B-6 : Variable instrumentale (2e étape), niveaux de la PTF en tenant compte de l'indication de l'industrie des biens/services et de l'erreur standard groupée sur les groupes de taille d'emploi

Variable	Estimation	Erreur standard	Valeur T	Valeur P
Groupe étudié	521,43	262,76	0,03	0,98
Période post-traitement	-0,002	0,064	1,98	0,05
Interaction : Groupe étudié et période post-traitement	0,26	0,13	1,99	0,05

*Les valeurs en noir sont statistiquement significatives au niveau de 5 %

Tableau B-7 : Régression par quantile, croissance de la PTF en tenant compte de l'indication de l'industrie des biens/services et de l'erreur standard groupée sur les groupes de taille d'emploi

Quantile	Interaction : Groupe étudié et période post-traitement	Erreur standard	Valeur T	Valeur P
25 ^e	0,01	0,01	1,08	0,28
50 ^e	0,01	0,01	0,86	0,39
75 ^e	0,002	0,013	0,15	0,88

Tableau B-8 : Régression par quantile, niveaux de la PTF en tenant compte de l'indication de l'industrie des biens/services et de l'erreur standard groupée sur les groupes de taille d'emploi

Quantile	Interaction : Groupe étudié et période post-traitement	Erreur standard	Valeur T	Valeur P
25 ^e	-0,04	0,22	0,18	0,86
50 ^e	0,08	0,35	0,24	0,81
75 ^e	0,37	1,27	0,29	0,77

*Les valeurs en noir sont statistiquement significatives au niveau de 5 %

Notes de Fin

- ¹ Rogers, Carolyn. « L'heure a sonné : réglons le problème de productivité du Canada », 26 mars 2024. <https://www.banqueducanada.ca/wp-content/uploads/2024/03/discours-2024-03-26.pdf>.
- ² Loertscher, Oliver, et Pau Pujolas. « Croissance de la productivité au Canada : Coïncée dans les sables bitumineux. » *Revue canadienne d'économie* 57, no 2 (2024) : 478-501.
- ³ Le Conference Board du Canada. « Real Talk: How Generative AI Could Close Canada's Productivity Gap and Reshape the Workplace-Lessons From the Innovation Economy », février 2024. https://www.conferenceboard.ca/wp-content/uploads/2022/10/real-talk_2024.pdf.
- ⁴ Mercer. « Workforce 2.0: Unlocking Human Potential in a Machine-Augmented World », 2024. <https://www.mercer.com/assets/global/en/shared-assets/local/attachments/pdf-2024-global-talent-trends-report-en.pdf>.
- ⁵ Vu, Viet. « Race Alongside the Machines | Occupational Digitalization Trends in Canada: 2006-2021 », 2022. <https://brookfieldinstitute.ca/wp-content/uploads/Race-Alongside-the-Machines-report-FINAL.pdf>.
- ⁶ Brynjolfsson, Erik. « The Productivity Paradox of Information Technology. » *Communications of the ACM* 36, no 12 (1993) : 66-77.
- ⁷ Lockhart, Angus. « Automatisation à l'échelle nationale? Adoption de l'IA dans les entreprises canadiennes. » *The Dais à l'Université Toronto Metropolitan*, 2023.
- ⁸ Acemoglu, Daron. « The Simple Macroeconomics of AI. » *Document de travail du NBER*, 2024.
- ⁹ Brynjolfsson, Erik, Danielle Li et Lindsey Raymond. « Generative AI at Work », arXiv, 23 avril 2023. <http://arxiv.org/abs/2304.11771>.
- ¹⁰ Dell'Acqua, Fabrizio, Edward McFowland III, Ethan Mollick, Hila Lifshitz-Assaf, Katherine C. Kellogg, Saran Rajendran, Lisa Krayer, François Candelon et Karim R. Lakhani. « Navigating the Jagged Technological Frontier: Field Experimental Evidence of the Effects of AI on Knowledge Worker Productivity and Quality. » *Document de travail*, 2023.
- ¹¹ Noy, Shakked, et Whitney Zhang. « Experimental Evidence on the Productivity Effects of Generative Artificial Intelligence. » *Science* 381, no 6654 (2023) : 187-92.
- ¹² Maw, Peter, Peter Solar, Aidan Kane et John S. Lyons. « After the Great Inventions: Technological Change in UK Cotton Spinning, 1780-1835. » *The Economic History Review* 75, no 1 (2022) : 22-55. <https://doi.org/10.1111/ehr.13082>.
- ¹³ Amare, Getachew et Bizuayehu Desta. « Coloured Plastic Mulches: Impact on Soil Properties and Crop Productivity. » *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 8, no 1 (19 janvier 2021) : 4. <https://doi.org/10.1186/s40538-020-00201-8>.
- ¹⁴ Russell, Stuart, Karine Perset et Marko Grobelnik. « Updates to the OECD's Definition of an AI System Explained. » Portail de l'Observatoire des politiques d'IA de l'OCDE, 23 novembre 2023. <https://oecd.ai/en/wonk/ai-system-definition-update>.
- ¹⁵ Statistique Canada, Enquête sur la technologie numérique et l'utilisation d'Internet – 2021, https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p3Instr_f.pl?Function=assembleInstr&lang=en&Item_Id=1317562.
- ¹⁶ Capello, Roberta, Camilla Lenzi et Giovanni Perucca. 2022. « The Modern Solow Paradox. In Search for Explanations. » *Structural Change and Economic Dynamics* 63 (décembre) :166-80. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2022.09.013>.
- ¹⁷ Acemoglu, Daron, et Pascual Restrepo. « Automation and Rent Dissipation: Implications for Wages, Inequality, and Productivity. » *Document de travail du NBER*, 2024. <https://doi.org/10.3386/w32536>.
- ¹⁸ Ibidem.
- ¹⁹ Calvino, F. et L. Fontanelli (2023), A Portrait of AI Adopters across Countries. OCDE. 11 avril 2023. https://www.oecd.org/en/publications/2023/04/a-portrait-of-ai-adopters-across-countries_76004dec.html.
- ²⁰ Angus Lockhart, Automation Nation? AI Adoption in Canadian Businesses, The Dais, (August 14, 2023), <https://dais.ca/reports/automation-nation-ai-adoption-in-canadian-businesses/>.
- ²¹ Ibidem.
- ²² Calvino, F. et L. Fontanelli (2023), Artificial intelligence, complementary assets and productivity: evidence from French firms. LEM Working Paper Series 2023/35. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/297143/1/2023-35.pdf>.
- ²³ Calvino, F. et L. Fontanelli (2023), A Portrait of AI Adopters across Countries. OCDE. 11 avril 2023. https://www.oecd.org/en/publications/2023/04/a-portrait-of-ai-adopters-across-countries_76004dec.html.
- ²⁴ Erik Brynjolfsson, Danielle Li and Lindsey Raymond, "Generative AI at Work," arXiv, (April 23, 2023), <http://arxiv.org/abs/2304.11771>.
- ²⁵ Si la PTF rend compte de l'efficacité des technologies plus innovantes, elle comprend également d'autres facteurs comme l'augmentation des niveaux de qualification des travailleurs ou une meilleure allocation des ressources.
- ²⁶ Sargent, Tim. « Productivity Growth in Canada: What Is Going On? » University of Calgary School of Public Policy document d'information Paper 17 (2024).
- ²⁷ Czarnitzki, Dirk, Gastón P. Fernández et Christian Rammer. « Artificial Intelligence and Firm-Level Productivity. » *Journal of Economic Behavior & Organization* 211 (1^{er} juillet 2023) : 188-205. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2023.05.008>.
- ²⁸ Voir Czarnitzki, Dirk, Gastón P. Fernández et Christian Rammer. « Artificial Intelligence and Firm-Level Productivity. » *Journal of Economic Behavior & Organization* 211 (1^{er} juillet 2023) : 188-205. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2023.05.008>., Damili, Giacomo, Vincent Van Roy et Daniel Vertesy. « The Impact of Artificial Intelligence on Labor Productivity. » *Eurasian Business Review* 11, no 1 (1^{er} mars 2021) : 1-25. <https://doi.org/10.1007/s40821-020-00172-8>., Brynjolfsson, E., Hitt, L.M., Kim, H.H.

- (2011). « Strength in numbers: How does data-driven decision making affect firm performance? » Disponible sur SSRN : <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1819486>., Ghasemaghaei, M., et Calic, G. (2019). « Does big data enhance firm innovation competency? The mediating role of data-driven insights. » *Journal of Business Research* 104, 69-84.
- ²⁹ Alderucci, D. et coll. (2020), « Quantifying the Impact of AI on Productivity and Labor Demand: Evidence from U.S. Census Microdata ». <https://www.aeaweb.org/conference/2020/preliminary/paper/Tz2HdRna>.
- ³⁰ TT. Kim, Y. Park et W. Kim (2022), « The Impact of Artificial Intelligence on Firm Performance », 2022 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET), Portland (Oregon), États-Unis, pp. 1-10, <https://doi.org/10.23919/PICMET53225.2022.9882634>.
- ³¹ Coté à la bourse de Shenzhen ou de Shanghai.
- ³² Gao, X.; Feng, H. « AI-Driven Productivity Gains: Artificial Intelligence and Firm Productivity. » *Sustainability* 2023, 15, 8934. <https://doi.org/10.3390/su15118934>.
- ³³ Czarnitzki, Dirk, Gastón P. Fernández et Christian Rammer. « Artificial Intelligence and Firm-Level Productivity. » *Journal of Economic Behavior & Organization* 211 (1^{er} juillet 2023) : 188-205. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2023.05.008>.
- ³⁴ Shaikh, Fatima, Gul Afshan, Rana Salman Anwar, Zuhair Abbas et Khalil Ahmed Chana. « Analyzing the Impact of Artificial Intelligence on Employee Productivity: The Mediating Effect of Knowledge Sharing and Well-Being. » *Asia Pacific Journal of Human Resources* 61, no 4 (2023) : 794-820. <https://doi.org/10.1111/1744-7941.12385>.
- ³⁵ Lakshmi, Vijaya et Jacqueline Corbett. « How Artificial Intelligence Improves Agricultural Productivity and Sustainability: A Global Thematic Analysis. » *Hawaii International Conference on System Sciences 2020 (HICSS-53)*, 7 janvier 2020. https://aisel.aisnet.org/hicss-53/os/ai_and_sustainability/3.
- ³⁶ Kanazawa, Kyogo, Daiji Kawaguchi, Hitoshi Shigeoka et Yasutora Watanabe. « AI, Skill, and Productivity: The Case of Taxi Drivers. » Document de travail. Série de documents de travail. National Bureau of Economic Research, octobre 2022. <https://doi.org/10.3386/w30612>.
- ³⁷ Noy, Shakked et Whitney Zhang. « Experimental Evidence on the Productivity Effects of Generative Artificial Intelligence. » *Science* 381, no 6654 (14 juillet 2023) : 187-92. <https://doi.org/10.1126/science.adh2586>.
- ³⁸ Peng, Sida, Eirini Kalliamvakou, Peter Cihon et Mert Demirer, « The Impact of AI on Developer Productivity: Evidence from GitHub Copilot », 2023. Pré-impression. <https://arxiv.org/pdf/2302.06590>.
- ³⁹ Uplevel Data Labs. « Can Generative AI Improve Developer Productivity? », 2024. <https://uplevelteam.com/hubfs/Content%20Assets/Can%20Generative%20AI%20Improve%20Developer%20Productivity.pdf>.
- ⁴⁰ Solow, Robert M. « Technical Change and the Aggregate Production Function. » *The Review of Economics and Statistics* 39, no 3 (1957) : 312-20.
- ⁴¹ Statistique Canada, Classification de la taille de l'entreprise – Technologie et utilisation d'Internet, https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p3VD_f.pl?Function=getVD&TV=1262337&CVD=1262337&CLV=0&MLV=1&D=1.
- ⁴² Une exception est appliquée dans le cas des estimations de régression par quantile, pour lesquelles nous incluons la variable comme paramètre de contrôle dans la spécification du modèle.
- ⁴³ Un ralentissement de la croissance de la productivité en 2021 chez les entreprises qui ont adopté l'IA est probablement dû à l'impact de la COVID-19.
- ⁴⁴ Pour obtenir de plus amples détails sur le modèle, voir l'annexe A.
- ⁴⁵ Li, Vivian et Graham Dobbs. « Right Brain, Left Brain, AI Brain: AI Impact on Skill Demand in Canada's Economy. » *The Dais à l'Université Toronto Metropolitan*, 2024.
- ⁴⁶ Cheng, Zhonghua et Xiangwei Meng. « Can Carbon Emissions Trading Improve Corporate Total Factor Productivity? » *Technological Forecasting and Social Change* 195 (1^{er} octobre 2023) : 122791. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122791>.
- ⁴⁷ Hainsworth, Sam. « Does Artificial Intelligence Benefit UK Businesses? An Empirical Study of the Impact of AI on Productivity. », 6 octobre 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.05985>.
- ⁴⁸ Wen, Huwei, Keyu Hu, Xuan-Hoa Nghiem et Alex O. Acheampong. « Urban Climate Adaptability and Green Total-Factor Productivity: Evidence from Double Dual Machine Learning and Differences-in-Differences Techniques. » *Journal of Environmental Management* 350 (15 janvier 2024) : 119588. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119588>.
- ⁴⁹ Solow, Robert M. « Technical Change and the Aggregate Production Function. » *The Review of Economics and Statistics* 39, no 3 (1957) : 312-20.
- ⁵⁰ Levinsohn, James et Amil Petrin. « Estimating Production Functions Using Inputs to Control for Unobservables. » *The Review of Economic Studies* 70, no 2 (2003) : 317-41.
- ⁵¹ Wooldridge, Jeffrey M. « On Estimating Firm-Level Production Functions Using Proxy Variables to Control for Unobservables ». *Economics Letters* 104, no 3 (septembre 2009) : 112-14. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2009.04.026>.
- ⁵² Denney, Steven, Viet Vu et Ryan Kelly. « Into the Scale-up-Verse: Exploring the Landscape of Canada's High Performing Firms. » Brookfield Institute for Innovation + Entrepreneurship, 2021. <https://brookfieldinstitute.ca/wp-content/uploads/BII-IntotheScaleupverse-Final-1.pdf>.
- ⁵³ Levinsohn, James et Amil Petrin. « Estimating Production Functions Using Inputs to Control for Unobservables. » *The Review of Economic Studies* 70, no 2 (2003) : 317-41.
- ⁵⁴ Tomohiko, INUI, et Université de Gakushuin. « The Effects of Japanese Customer Firms' Overseas Outsourcing on Supplier Firms' Performance », décembre 2016. <https://www.rieti.go.jp/publications/dp/16e106.pdf>.
- ⁵⁵ Wooldridge, Jeffrey M. « On Estimating Firm-Level Production Functions Using Proxy Variables to Control for Unobservables ». *Economics Letters* 104, no 3 (2009) : 112-14. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2009.04.026>.