

# Programme de recherche en partenariat : Études scientifiques sur la connectivité - Synthèse des connaissances

## I. INTRODUCTION

À l'heure d'une transformation numérique sans précédent, la connectivité est la clé de la croissance économique, du progrès social et de l'essor de l'intelligence artificielle (IA). Un accès Internet fiable et des communications avancées sont désormais indispensables à l'éducation, à la santé et aux infrastructures intelligentes. Pourtant, de nombreuses régions éloignées du Québec restent pénalisées par des contraintes géographiques et économiques.

Pour y remédier, le gouvernement du Québec a lancé le *Programme de recherche en partenariat : Études scientifiques sur la connectivité – Synthèse des connaissances*. Cette initiative vise à étendre l'Internet haute vitesse, déployer les communications de prochaine génération et accélérer les technologies émergentes au moyen d'investissements ciblés et d'une optimisation des infrastructures, afin de maintenir l'avantage concurrentiel du Québec sur la scène numérique mondiale.

Des défis subsistent toutefois : financement en R&D limité, coordination des infrastructures perfectible et équité d'accès aux bénéfices technologiques [1]–[3]. Préserver le leadership québécois exige une approche équilibrée qui concilie innovation et intérêt public. En examinant les volets **Technologique** et **Impacts sociaux**, cette étude appuie les objectifs stratégiques du Québec et promeut une croissance inclusive et durable.

## II. TECHNOLOGIQUE

Dans le contexte de la transformation numérique mondiale, les technologies de connectivité constituent un pilier fondamental, garantissant des communications efficaces et un échange de données fluide. Des solutions novatrices redéfinissent l'avenir du secteur en répondant aux besoins croissants de vitesse, de couverture et de fiabilité.

### A. Quelles sont les technologies émergentes en matière de connectivité?

Les technologies émergentes progressent dans quatre axes : communications à grande portée, optimisation intelligente, communications à courte portée et architectures réseau de prochaine génération. Elles renforcent la couverture, l'efficacité et l'adaptabilité des infrastructures. La présente section analyse leur importance stratégique et leur potentiel à catalyser les avancées en matière de connectivité.

#### 1) Communication à grande portée

Les réseaux de satellites en orbite terrestre basse (OTB) renforcent la connectivité mondiale, notamment dans les régions éloignées où les infrastructures terrestres sont insuffisantes. Positionnés entre 500 et 2,000 kilomètres d'altitude [4], ces satellites offrent une latence réduite (20–40 ms) et des communications à haut débit [5], soutenant des applications telles que la télémédecine, les transactions financières et la navigation en temps réel. Leur déploiement en constellations assure redondance et couverture fiable sur de vastes zones [6].

Parallèlement, les réseaux 5G et 6G transforment la communication à grande portée grâce à une bande passante élevée, une latence ultra-faible et une connectivité massive. Portée par un dense maillage de petites cellules, la 5G permet des vitesses de 100 Mb/s à 1 Gb/s [7]. Au Canada, le Québec se situe à l'avant-garde de son déploiement, favorisant les villes intelligentes et les écosystèmes de véhicules autonomes [8]. À plus long terme, la 6G renforcera la connectivité mondiale par les communications térahertz (THz) et une latence inférieure à la milliseconde [9]; des initiatives telles qu'Hexa-X et Telesat

en explorent le potentiel pour combler les lacunes de couverture [10], [11].

## 2) *Communication à courte portée*

Les technologies de communication à courte portée évoluent pour répondre aux exigences croissantes de débits élevés, de latence minimale et de résistance aux interférences dans les environnements localisés. Le Wi-Fi 7, prochaine norme WLAN, introduit des canaux de 320 MHz, une modulation 4096-QAM et le fonctionnement multi-liaisons (MLO), améliorant considérablement le débit et l'efficacité du réseau [12]. Avec des vitesses dépassant 40 Gb/s, il est prêt à soutenir des applications gourmandes en données, telles que la réalité virtuelle en temps réel et l'automatisation industrielle.

Dans le même temps, le Li-Fi, technologie de communication par lumière visible (VLC), s'impose comme une alternative complémentaire aux réseaux radiofréquence. Exploitant les LED pour la transmission optique à haut débit, il atteint des vitesses supérieures à 100 Gb/s tout en réduisant les interférences électromagnétiques et offrant une sécurité renforcée [13]. Ses applications couvrent les hôpitaux, les cabines d'avion et les zones urbaines à forte densité, où les réseaux RF montrent leurs limites.

## 3) *Optimisation intelligente*

L'optimisation intelligente révolutionne la gestion des réseaux en permettant l'adaptabilité en temps réel, l'allocation efficiente des ressources et l'analyse prédictive. Les réseaux pilotés par l'IA s'appuient sur l'apprentissage automatique et profond pour optimiser le trafic, l'utilisation du spectre et les paramètres réseau [14]. Dans les réseaux 5G et 6G émergents, ces mécanismes auto-optimisés réduisent la latence et la consommation énergétique tout en renforçant la fiabilité.

Le *network slicing* découpe l'infrastructure en segments virtuels dédiés, de l'URLLC à l'IoT [15]. Le *beamforming holographique* optimise l'efficacité spectrale en orientant dynamiquement les signaux [16]. Ensemble, ces techniques ouvrent la voie à des réseaux autonomes et auto-optimisés, garants d'une connectivité fiable et performante.

## 4) *Architectures réseau futures*

Les architectures réseau futures visent à renforcer l'intelligence, l'adaptabilité et l'optimisation en temps réel. Les *réseaux jumeaux numériques* (*Digital Twin Networks*, DTN) reproduisent fidèlement les réseaux physiques dans un espace virtuel afin d'optimiser l'allocation des ressources et la topologie [17]. Dans les réseaux OTB et 6G, les DTN offrent une vision globale de l'infrastructure, améliorant la connectivité et l'efficacité opérationnelle [18], [19]. Leur flexibilité s'étend à la santé, à la fabrication et aux télécommunications, permettant des ajustements instantanés à des environnements dynamiques.

Le *jumeau numérique humain* (*Human Digital Twin*, HDT) pousse plus loin ce concept en intégrant santé intelligente, services personnalisés et interaction homme-machine [20]. En modélisant les états physiologiques et comportementaux, l'HDT assure une connectivité fluide entre humains, dispositifs et réseaux [21], [22]. En phase avec l'accent mis par le Québec sur l'IA et l'edge computing, notre recherche examine comment l'HDT peut optimiser la distribution des ressources et les algorithmes intelligents, soutenant les villes intelligentes et les soins de santé à distance [23].

## B. *Quel est le potentiel des technologies satellitaires et leur perspective d'évolution au cours d'un horizon de 1 à 10 ans?*

La technologie satellitaire connaîtra des avancées majeures au cours de la prochaine décennie, stimulant la connectivité mondiale, la viabilité économique et l'intégration harmonieuse aux réseaux terrestres. Sur un horizon de 1 à 10 ans, des innovations clés — liaisons intersatellites laser (LISL), collaboration multi-orbite et optimisation des réseaux par l'IA — redéfiniront le secteur, améliorant performances, flexibilité et rentabilité.

### *1) État actuel et fondements technologiques*

Les satellites en orbite géostationnaire (OGE), renforcés par la technologie HTS (High Throughput Satellite), continuent de soutenir la navigation, la météorologie et les communications régionales à haut débit [24], [25]. Les satellites en orbite terrestre moyenne (OTM) jouent un rôle essentiel dans les systèmes de positionnement, de synchronisation et de navigation tels que GPS, Galileo et GLONASS [26].

Les évolutions les plus marquantes concernent toutefois les constellations en orbite terrestre basse (OTB), en rapide expansion grâce à leur faible latence et leur grande densité de couverture [27]. Elles représentent une solution stratégique pour les communautés nordiques et les zones d'exploitation de ressources au Québec, où l'infrastructure terrestre est économiquement non viable.

### *2) Progrès technologiques et gains de performance à venir*

D'ici cinq à dix ans, trois percées majeures façonneront l'évolution des réseaux satellitaires :

- **Liaisons intersatellites laser (LISL)** : en assurant des communications optiques à très haut débit entre satellites, les LISL réduiront la dépendance aux stations sol, abaisseront la latence et accroîtront considérablement la capacité et la fiabilité du réseau [28]. Les satellites Starlink V1.5 utilisent déjà les LISL pour garantir une couverture mondiale stable, même dans les régions dépourvues d'infrastructures au sol [29].
- **Collaboration multi-orbite (OTB-OTM-OGE)** : au cours de la prochaine décennie, les architectures intégrées deviendront plus dynamiques, ajustant en temps réel la couverture et la capacité selon la géographie et la demande [30].
- **Optimisation par l'IA** : des algorithmes d'apprentissage automatique géreront de manière proactive le routage, l'allocation de spectre et l'équilibrage de charge, améliorant l'efficacité et l'adaptabilité inter-orbite [31].

Ces avancées garantiront des communications à haut débit et faible latence, offrant des solutions flexibles et résilientes aux environnements urbains comme isolés.

### *3) Viabilité économique et faisabilité du déploiement*

La rentabilité des satellites se renforce, notamment là où la fibre optique est prohibitive à cause du relief ou des conditions climatiques extrêmes. Les constellations OTB, illustrées par Starlink [29], ont prouvé leur succès industriel en fournissant un haut débit à faible latence aux zones mal desservies, limitant l'infrastructure terrestre nécessaire [28]. Dans les régions de haute latitude telles que le Québec, étendre la connectivité satellitaire stimule la croissance économique en soutenant les secteurs des ressources, les infrastructures intelligentes et les opérations d'affaires à distance.

### *4) Perspectives de marché et potentiel de croissance*

Le marché satellite devrait croître fortement : l'offre capacitaire mondiale progressera de 30 % d'ici 2033, portée par la domination des constellations OTB dans l'expansion du haut débit. Les revenus cumulatifs de l'industrie spatiale mondiale pourraient atteindre 1,7 billion \$ US d'ici 2032, dopés par la demande des zones isolées [32]. Au Canada, la position géographique et économique du Québec constitue un atout stratégique pour soutenir les secteurs nordiques et les communautés autochtones.

### *5) Intégration homogène satellite-terrestre*

La prochaine décennie verra l'émergence d'un écosystème unifié où satellites OTB, OTM et OGE convergeront avec les infrastructures fibre et cellulaires. Les satellites OGE soutiendront les applications à large bande passante (télémédecine, intervention d'urgence), tandis que les OTB offriront des services à faible latence pour les opérations en temps réel et le cloud distribué. L'IA facilitera la commutation multi-orbite en temps réel, permettant aux dispositifs de basculer intelligemment entre réseaux satellite et terrestre, garantissant une connectivité continue et optimisée.

*C. Quelles sont les meilleures technologies pour soutenir les besoins actuels et futurs de la population, incluant les entreprises, en matière de connectivité?*

Alors que la demande d'une connectivité fluide, à haut débit et fiable ne cesse de croître — portée par les villes intelligentes, les industries gourmandes en données et l'inclusion numérique — des technologies de rupture sont indispensables pour répondre à des besoins et des environnements très divers. Les exigences varient sensiblement entre les centres urbains, les communautés rurales et éloignées, et les secteurs industriels. Les relever efficacement suppose des solutions adaptées à chaque segment :

*1) Utilisateurs urbains*

Les zones urbaines, caractérisées par une forte densité de population et des infrastructures développées, dépendent d'une connectivité rapide et fiable pour soutenir leurs écosystèmes dynamiques. Les technologies clés sont :

- **Réseaux 5G et 6G** : les réseaux 5G ultra-rapides transforment la connectivité urbaine en permettant véhicules autonomes [8], AR/VR et déploiements IoT à grande échelle [33]. Au Québec, faire progresser l'infrastructure 5G est vital pour stimuler l'innovation et la croissance économique. Les investissements dans la 6G — communications térahertz et optimisation pilotée par l'IA [9] — prépareront la province à un leadership en matière de connectivité et de villes intelligentes.
- **Wi-Fi 7** : face à la demande d'accès à haut débit, le Wi-Fi 7 complète les réseaux cellulaires par une meilleure efficacité spectrale, moins de congestion et une connectivité indoor ultra-rapide. Ses fonctionnalités MLO et sa modulation améliorée en font une solution idéale pour les environnements urbains, garantissant une faible latence dans les immeubles, gares et espaces publics [12].
- **Li-Fi** : utilisant les ondes lumineuses plutôt que les radiofréquences, le Li-Fi assure des transmissions sécurisées et rapides dans les espaces contraints en spectre [13]. Sa capacité à fonctionner dans les hôpitaux, cabines d'avion ou environnements industriels sensibles aux RF en fait un atout stratégique pour réduire la congestion du spectre et renforcer la confidentialité des données.

*2) Communautés rurales et éloignées*

Les zones rurales et éloignées font face à des défis de connectivité liés à la faible densité de population, aux grandes distances et aux coûts élevés du déploiement de la fibre. Au Québec, l'accès 50/10 Mb/s couvre 76,88% des régions rurales contre 99,74% en milieu urbain, et seulement 66,70% dans les réserves des Premières Nations [1]–[3]. Les technologies clés sont :

- **Constellations OTB** : les réseaux satellites en orbite basse offrent une couverture étendue et une faible latence, idéales pour les régions rurales et nordiques du Québec [5]. En investissant dans les OTB et leurs liaisons intersatellites, la province peut combler la fracture numérique, faciliter la télémédecine, l'enseignement en ligne et soutenir la croissance des zones mal desservies.
- **Systèmes multi-orbite** : la collaboration OTB–OTM–OGE garantit une connectivité fiable dans tous les territoires [30], contribuant à la croissance économique et positionnant le Québec comme chef de file des communications avancées.

*3) Utilisateurs professionnels*

Des PME aux grands groupes industriels, les entreprises exigent des réseaux sécurisés, performants et efficaces pour soutenir leurs opérations. Les technologies adaptées incluent :

- **Jumeaux numériques** : s'appuyant sur la connectivité à haut débit, ils créent des répliques virtuelles d'actifs physiques, offrant un suivi précis et l'optimisation des processus. Au Québec, cette approche peut accroître l'innovation et l'efficacité dans les secteurs clés, stimulant la croissance économique.
- **Réseaux pilotés par l'IA** : L'intelligence artificielle permet une gestion intelligente du trafic, une allocation efficiente des ressources et une adaptation dynamique aux conditions réseau, garantissant

une connectivité efficiente, à faible latence et fiable pour l'automatisation industrielle, le cloud computing et les services numériques. Face à la dépendance croissante aux données en temps réel, ces réseaux seront essentiels pour fournir des solutions évolutives et haute performance.

*D. À quelle hauteur sera-t-il nécessaire de poursuivre les investissements dans les infrastructures terrestres, compte tenu de l'évolution rapide des technologies satellitaires ou émergentes?*

Dans un contexte de transformation rapide des technologies de communication mondiales, l'essor des satellites et d'autres innovations émergentes offre au Québec des occasions inédites tout en soulevant de nouveaux défis pour le développement des infrastructures numériques. Trouver un équilibre stratégique entre réseaux terrestres et solutions de pointe est décisif pour l'avenir de l'économie numérique québécoise et pour son positionnement sur la scène technologique internationale.

*1) Complémentarité entre technologies terrestres et satellitaires*

Les satellites en orbite terrestre basse (OTB) fournissent une connectivité essentielle aux régions éloignées ou peu desservies, notamment dans le Nord québécois, où les infrastructures terrestres sont coûteuses ou difficiles à déployer [27]. Cependant, la capacité limitée en bande passante et la latence inhérente restreignent leurs performances dans les centres urbains à forte densité et pour les applications nécessitant une faible latence. Dans ces zones, les réseaux terrestres—en particulier la fibre et la 5G—demeurent des composantes indispensables de la stratégie de connectivité de la province.

*2) Limites technologiques et besoins de transition*

Malgré des avancées rapides, les technologies satellitaires ne peuvent pas encore remplacer totalement les infrastructures terrestres. Les constellations actuelles peinent à satisfaire les exigences de connectivité massive, de fiabilité élevée et de latence très faible, essentielles pour les applications industrielles et les initiatives de ville intelligente dans les régions urbaines et périurbaines du Québec [34]. Tant que ces technologies n'auront pas atteint une maturité accrue, les réseaux terrestres resteront le socle du développement économique et de l'innovation technologique provinciaux.

*3) Priorités stratégiques pour le Québec*

Poursuivre les investissements dans les infrastructures terrestres répond aux besoins immédiats des secteurs urbains et industriels tout en préparant l'intégration des technologies futures. À court terme, l'accent doit être mis sur les réseaux terrestres ; les centres urbains et les utilisateurs industriels ont besoin d'une connectivité robuste et fiable. Les solutions éprouvées, telles que la 5G et la future 6G, offrent des débits plus élevés et une latence moindre que les services satellitaires actuels [9], [33]. Selon le Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes (CRTC), l'élargissement de l'accès à l'Internet haute vitesse est une priorité pour stimuler la croissance économique et garantir l'inclusion numérique dans toutes les régions [35].

À plus long terme, les avancées technologiques pourraient transformer en profondeur le paysage des télécommunications. Les réseaux OTB, OTM et OGE devraient atteindre des niveaux de performance qui concurrenceront les services terrestres [28], [30]. Par ailleurs, leurs avantages en matière de durabilité—réduction de l'empreinte environnementale et couverture à l'échelle mondiale—prendront de l'importance. Étant donné la vaste géographie du Québec, une approche hybride combinant réseaux terrestres et satellites représente une voie efficace pour offrir une connectivité numérique à l'ensemble de la province tout en répondant aux besoins variés des différentes régions.

*E. L'utilisation de l'aluminium (ou d'autres matériaux) devrait-il être privilégiée plutôt que l'acier pour la construction de sites cellulaires terrestres, dans une optique d'accélérer la construction, réduire les coûts et faire face aux événements climatiques extrêmes?*

Dans la construction des infrastructures de télécommunications modernes, le choix des matériaux dépasse la simple décision technique : il suppose des considérations stratégiques en matière d'efficacité

de mise en œuvre, de faisabilité économique et d'adaptabilité environnementale. Dans le contexte de l'engagement du Québec en faveur de la transformation numérique et du développement durable, optimiser l'alternative entre l'aluminium et l'acier pour les sites cellulaires terrestres a des répercussions majeures — non seulement pour accélérer le déploiement, mais aussi pour renforcer la résilience du réseau et réduire les coûts d'exploitation.

#### *1) Propriétés des matériaux*

L'aluminium, léger et résistant à la corrosion, se transporte et se manipule facilement, ce qui le rend particulièrement adapté aux régions à forte humidité, à salinité élevée (zones côtières) ou à coûts logistiques importants. Sa malléabilité simplifie l'assemblage sur site, pouvant raccourcir les délais de construction [36], [37]. À l'inverse, l'acier offre une résistance à la traction et une capacité portante supérieures, idéales pour les sites exposés à des vents violents, des charges de neige élevées ou une activité sismique. L'acier galvanisé résiste efficacement à la corrosion, mais peut nécessiter davantage d'entretien dans des environnements extrêmement corrosifs [38].

#### *2) Considérations de coût*

Le coût initial de l'aluminium est généralement plus élevé que celui de l'acier [39]. Toutefois, son poids réduit abaisse significativement les frais de transport et d'installation. À long terme, ses faibles besoins d'entretien en milieux corrosifs peuvent compenser l'investissement initial. L'acier présente un coût d'achat inférieur, mais peut requérir des traitements anticorrosion additionnels et des opérations de maintenance récurrentes dans les environnements difficiles, augmentant ainsi son coût total de possession.

#### *3) Adaptation régionale des matériaux*

En raison de sa plus grande robustesse, l'acier est mieux adapté aux conditions météorologiques extrêmes — ouragans, fortes chutes de neige — qui caractérisent certaines régions du Québec. Il s'impose donc dans les zones urbaines ou suburbaines où la capacité portante est critique. À l'inverse, dans les régions éloignées, les environnements corrosifs ou les contextes nécessitant un déploiement rapide, l'aluminium — grâce à sa légèreté, sa résistance à la corrosion et sa maniabilité — se révèle plus avantageux.

#### *4) Efficacité de déploiement*

La légèreté de l'aluminium facilite son transport et sa manutention, rationalisant ainsi les processus de construction. Cet atout est déterminant pour le Québec, dont la géographie vaste et variée — notamment les régions nordiques et isolées — complique les déploiements traditionnels. L'utilisation de l'aluminium soutient donc les objectifs provinciaux : accélérer l'expansion du réseau, combler les lacunes de connectivité et favoriser le développement économique par des infrastructures de télécommunications résilientes.

#### *5) Durabilité*

L'aluminium est hautement recyclable et présente un profil environnemental favorable, bien que sa production soit énergivore [40]. Accorder la priorité à des matériaux fortement recyclables s'aligne sur les engagements du Québec en matière de durabilité et de réduction de l'empreinte environnementale, tout en conciliant croissance industrielle et objectifs climatiques ambitieux.

#### *F. Comment couvrir un maximum de territoire avec un signal de haute qualité et au meilleur coût ?*

Maximiser la couverture territoriale avec des signaux de haute qualité tout en préservant la rentabilité suppose une combinaison stratégique de technologies, un déploiement ciblé et une optimisation des ressources, afin de s'adapter aux conditions géographiques et démographiques variées.

### *1) Intégration multi-technologique*

La combinaison des systèmes satellitaires multi-orbite et des réseaux 5G/6G permet de constituer une infrastructure robuste et exhaustive. Les constellations en orbites basse et moyenne [30] assurent une connectivité de base dans les régions éloignées ou mal desservies, réduisant la fracture numérique, tandis que les réseaux 5G et 6G offrent une connectivité à haut débit et faible latence dans les centres urbains densément peuplés [9], [33], ouvrant la voie à des applications avancées et à l'innovation.

### *2) Allocation dynamique des ressources*

L'intégration d'algorithmes avancés d'optimisation de réseau — algorithmes génétiques, optimisation par essaim de particules ou apprentissage par renforcement — améliore le déploiement des stations de base et des segments satellitaires [41]. Ces méthodes déterminent l'implantation optimale en fonction de la densité de population, des contraintes géographiques et de la demande en trafic, garantissant une couverture efficace, une latence réduite et une allocation optimale des ressources.

### *3) Analyse de la demande utilisateur*

Une analyse détaillée de la demande par région est essentielle pour identifier les zones à forte ou faible connectivité. En exploitant la technologie des jumeaux numériques, il est possible de simuler et d'analyser avec précision les comportements des usagers, fournissant des données précieuses pour l'optimisation des réseaux [42], [43]. Ces informations éclairent la hiérarchisation des investissements et le choix des technologies, permettant d'équilibrer au mieux coûts et couverture.

### *4) Partenariats*

La mise en place de partenariats entre entreprises et collectivités territoriales pour co-investir dans les infrastructures renforce significativement la connectivité. Les opérateurs privés peuvent, par exemple, assurer la gestion de segments satellitaires OTB dans leur domaine d'expertise, partageant les coûts de lancement et de maintenance tout en garantissant un service de haute qualité. De telles collaborations élargissent efficacement la couverture, notamment dans les zones isolées, et améliorent l'accessibilité.

### *5) Stratégie de déploiement par phases*

Une stratégie de déploiement par phases réduit les coûts en ciblant d'abord les zones prioritaires — communautés éloignées, pôles industriels clés — avant une expansion progressive. Cette approche optimise l'allocation des ressources, limite les risques financiers et permet des ajustements continus, garantissant une expansion de la connectivité à la fois efficace et durable.

## III. IMPACTS SOCIAUX

### *A. Les impacts sociaux de la connectivité sont-ils documentés?*

Les retombées sociales de la connectivité sont largement documentées, en particulier pour la croissance économique, l'éducation et la santé. Au Québec, la connectivité joue un rôle déterminant dans la réduction des disparités régionales et l'amélioration des services publics. Toutefois, des défis subsistent pour garantir un accès équitable et exploiter pleinement les nouvelles technologies.

#### *1) Retombées sociales bien documentées*

Au Québec, la connectivité a permis d'importantes avancées dans les domaines de l'éducation, de l'emploi et de la santé. Des initiatives comme le programme *Campus numérique* dotent les écoles d'outils et de ressources numériques, accroissant l'engagement en classe et améliorant les résultats scolaires. Des universités, notamment l'Université Concordia, ont élargi leur offre de cours en ligne, permettant aux étudiants des régions éloignées, y compris les communautés autochtones du Nord québécois, d'accéder à une éducation de qualité sans devoir se déplacer [44], [45].

Sur le marché du travail, la connectivité a facilité le télétravail et le développement des compétences numériques, particulièrement durant la pandémie de COVID-19. Les entreprises montréalaises ont adopté

des modalités de travail flexibles qui maintiennent la productivité, tandis que les programmes de la Commission des partenaires du marché du travail offrent des formations aux compétences numériques, ouvrant à la population rurale de nouvelles perspectives d'emploi [46].

Dans le domaine de la santé, les réseaux de télémédecine relient les patients des régions isolées aux professionnels de santé grâce aux consultations virtuelles, réduisant ainsi les déplacements et améliorant l'accès aux soins essentiels [47]. Ces consultations rapides contribuent à de meilleurs résultats sanitaires et à une diminution de la pression sur les établissements déjà surchargés.

## 2) *Enjeux à approfondir*

Malgré ces bénéfices documentés, certains volets restent peu explorés. Les effets psychologiques et sociétaux à long terme de la connectivité généralisée — addiction numérique, santé mentale, évolution des interactions sociales — nécessitent des recherches plus poussées afin de mieux saisir les implications d'une société hyperconnectée.

De plus, l'impact des technologies émergentes telles que la 6G, les satellites OTB et les jumeaux numériques demeure insuffisamment étudié. Les enjeux de confidentialité, d'équité et de changements sociétaux qu'engendrent ces innovations soulignent la nécessité d'analyses complètes, afin d'en maximiser les bénéfices tout en limitant les conséquences inattendues.

## 3) *Contexte particulier du Québec*

Grâce à ses vastes campagnes, à ses territoires nordiques isolés et à ses centres urbains dynamiques, le Québec constitue un laboratoire unique pour analyser l'impact sociétal de la connectivité. À Montréal, celle-ci nourrit l'innovation, la croissance et les services publics, démontrant l'apport d'infrastructures avancées. À l'inverse, dans les zones rurales et nordiques — notamment autochtones — ses effets (accès à l'éducation, aux soins et aux occasions économiques) restent moins étudiés, surtout quant à la réduction des disparités régionales et à la préservation du patrimoine culturel.

Enfin, la forte identité francophone et la dynamique culturelle distincte du Québec ajoutent une complexité supplémentaire à l'influence de la connectivité sur les résultats sociaux. Bien que ces facteurs nécessitent des stratégies adaptées, peu de travaux ont encore étudié le rôle des outils numériques dans la durabilité culturelle, la cohésion sociale et l'inclusion au sein des diverses communautés de la province.

## *B. La connectivité permet-elle de réduire les inégalités sociales ou les accentue-t-elle?*

La fracture sociale demeure l'un des défis majeurs de la société contemporaine. En tant que vecteur central de l'ère numérique, la connectivité offre une voie de transformation vers une structure sociale plus équitable. En abolissant les barrières géographiques et l'inégalité d'accès à l'information, elle crée de nouvelles possibilités de répartition des ressources et de participation élargie, en particulier pour les groupes marginalisés.

### 1) *Accès aux opportunités*

La connectivité ouvre de nouvelles perspectives aux régions éloignées en leur donnant accès aux ressources numériques. En éducation, des plateformes comme *École en réseau*<sup>1</sup> offrent aux élèves des communautés isolées et autochtones un enseignement de qualité par classes virtuelles, abolissant les barrières géographiques. En santé, la télémédecine — notamment le *Réseau québécois de la télésanté*<sup>2</sup> — assure un soutien médical à distance, évitant de longs déplacements aux patients du Nord québécois.

La connectivité élargit les perspectives professionnelles des communautés éloignées : le commerce électronique permet aux producteurs agricoles et artisans du Nord québécois de vendre leurs produits aux marchés national et international. Par ailleurs, le télétravail offre aux résidents l'accès à l'économie du savoir et à des emplois bien rémunérés sans quitter leur région.

<sup>1</sup><https://eer.qc.ca/>

<sup>2</sup><https://telesantequebec.ca/>



## 2) Développement économique

En stimulant l'économie numérique, la connectivité génère de nouvelles sources de revenus et des opportunités de développement pour les collectivités défavorisées. Au Québec, elle redynamise les régions sous-développées. Par exemple, la plateforme locale *Maturin*<sup>3</sup> met en valeur les produits agricoles et de terroir, élargissant le marché des producteurs ruraux.

La généralisation du télétravail ouvre de nouveaux emplois aux populations éloignées. Les investissements publics renforçant la couverture réseau leur permettent désormais de travailler dans des secteurs à forte intensité de connaissances sans quitter leur localité.

## 3) Inclusion sociale

Des technologies de communication de haute qualité renforcent l'inclusion sociale en rapprochant les groupes marginalisés de la société dominante. Les réseaux sociaux offrent un espace d'expression et d'interaction, tandis que les réseaux d'entraide en ligne facilitent l'accès des personnes handicapées, des aînés et d'autres groupes vulnérables à un soutien psychologique, à des conseils médicaux et à une orientation professionnelle. Les pouvoirs publics et les organismes à but non lucratif — notamment à travers la *Charte canadienne du numérique* [48] — déploient des outils numériques pour promouvoir l'inclusion, par exemple via des formations en ligne aux compétences numériques.

## 4) Équité informationnelle

La connectivité garantit un accès égal à l'information — qu'il s'agisse des politiques publiques, des tendances du marché ou des ressources culturelles — aidant les groupes défavorisés à rester informés. Elle comble le fossé informationnel des communautés éloignées et à faibles revenus, tout en permettant aux groupes marginalisés de participer au partage des connaissances et à l'innovation, les habilitant ainsi à contribuer pleinement au progrès social.

### C. Comment la connectivité peut-elle favoriser le développement scientifique, économique et social?

La connectivité est un moteur de transformation, permettant au Québec d'accroître la collaboration scientifique et l'intégration des ressources, de stimuler l'innovation économique et la création d'emplois à forte valeur ajoutée, ainsi que de révolutionner l'accès à l'éducation et aux services sociaux. En répondant aux besoins immédiats tout en ouvrant la voie à un avenir durable et inclusif, elle s'impose comme un pilier fondamental du développement holistique de la province.

## 1) Développement scientifique

La connectivité est la pierre angulaire du progrès scientifique moderne : en supprimant les barrières à la collaboration, elle permet aux établissements de partager sans friction compétences et ressources. Au Québec, cette infrastructure interconnectée aide les chercheurs à relever des défis complexes et multidisciplinaires. Des initiatives comme l'*Institut canadien de recherches avancées* (CIFAR)<sup>4</sup> dynamisent l'innovation en santé et en sciences de l'environnement, tandis que les projets de l'Université Concordia sur la résilience climatique (C-CCAL)<sup>5</sup> démontrent l'impact de la connectivité sur les avancées scientifiques. En donnant accès à de vastes jeux de données et à des outils de pointe, elle accélère la découverte et fait progresser les enjeux mondiaux.

## 2) Développement économique

La connectivité a profondément redéfini le paysage économique québécois, nourrissant un écosystème technologique dynamique et concurrentiel à l'échelle mondiale. L'accès à l'Internet à haut débit permet aux jeunes entreprises d'innover et de monter en puissance, créant ainsi un terreau fertile pour l'entrepreneuriat. Cette connectivité favorise non seulement l'essor des start-ups, mais attire également les investissements

<sup>3</sup><https://www.maturin.ca>

<sup>4</sup><https://cifar.ca/>

<sup>5</sup><https://www.climatechangeadaptationlab.ca/>

et les talents vers la province. Par exemple, Mila — l'Institut québécois d'intelligence artificielle — est devenu un pôle mondial de la recherche en IA; ses partenariats accélèrent la commercialisation de technologies de pointe dans des secteurs tels que la santé et le traitement du langage naturel. En ouvrant aux entreprises les marchés internationaux et en attirant les capitaux étrangers, la connectivité stimule l'innovation, génère des emplois à haute valeur ajoutée et renforce la compétitivité économique du Québec.

### 3) *Développement social*

La connectivité a transformé l'accès à l'éducation et aux services sociaux, profitant particulièrement aux communautés sous-desservies. Grâce aux outils d'apprentissage en ligne, les élèves des régions éloignées — y compris les communautés autochtones — peuvent désormais accéder à des ressources éducatives de haute qualité jusque-là inatteignables [44]. Cette avancée favorise l'équité scolaire en permettant à tous les élèves, quel que soit leur lieu de résidence, de réussir dans leurs études. Par ailleurs, des plateformes numériques comme *Services Québec* simplifient l'accès aux services gouvernementaux, permettant aux citoyens de demander des permis ou des aides sociales plus efficacement. Ces innovations renforcent l'engagement civique tout en veillant à ce que les groupes marginalisés reçoivent le soutien nécessaire, améliorant ainsi l'inclusivité et le bien-être social.

### D. *Y a-t-il des impacts spécifiques sur les Premières Nations et les communautés nordiques?*

La connectivité peut transformer la vie des Premières Nations et des communautés nordiques en atténuant l'isolement et le manque d'accès aux ressources. Dans ces régions, les technologies numériques font office de passerelle vers les services essentiels, la préservation du patrimoine culturel et l'essor d'opportunités économiques.

#### 1) *Possibilités positives*

La connectivité permet aux communautés autochtones et nordiques d'accéder à des services cruciaux : télémédecine, enseignement en ligne et programmes gouvernementaux. La télémédecine, en particulier, offre des consultations à distance avec des spécialistes, supprimant les longs déplacements et améliorant significativement l'accès aux soins.

Les plateformes numériques sont de puissants vecteurs pour préserver langues et traditions autochtones. Des initiatives comme *FirstVoices*<sup>6</sup> documentent et revitalisent ces langues, garantissant leur transmission. De son côté, le projet « Eagle and the Condor » de Sandra Cespedes montre comment l'équité numérique et des solutions de pointe peuvent combler les fossés historiques et renforcer la résilience culturelle [49].

Enfin, la connectivité ouvre de nouvelles perspectives économiques telles que le commerce électronique et le télétravail. Les artisans et producteurs agricoles peuvent désormais vendre leurs produits à l'échelle nationale, voire internationale, améliorant ainsi les conditions économiques locales.

#### 2) *Défis persistants*

Malgré les progrès accomplis, de nombreuses communautés autochtones et régions éloignées ne disposent toujours pas d'un accès Internet fiable. Dans le Nord canadien, certaines localités enregistrent des débits très inférieurs à la moyenne nationale, tandis que d'autres sont entièrement dépourvues de couverture à large bande [50]. L'absence d'infrastructures freine ainsi leur pleine participation à l'économie numérique.

Par ailleurs, l'adoption des technologies numériques demeure inégale : les aînés et les personnes faiblement scolarisées éprouvent souvent des difficultés à acquérir les compétences nécessaires pour tirer parti du commerce électronique, du télétravail ou des services en ligne.

Nombre d'outils numériques ignorent les langues et contextes autochtones, créant de nouvelles barrières; leurs besoins et perspectives demeurent souvent absents de la conception technologique.

<sup>6</sup><https://www.firstvoices.com>

Enfin, l'isolement géographique et une histoire d'exclusion sociale alimentent parfois une méfiance envers les nouvelles technologies. Les expériences passées d'exploitation peuvent conduire à des réticences à adopter ces outils numériques, compromettant ainsi leur déploiement et leur acceptation.

## RÉFÉRENCES

- [1] Innovation, Science and Economic Development Canada, "Canada's connectivity strategy," 2019. [Online]. Available: <https://ised-isde.canada.ca/site/high-speed-internet-canada/en/canadas-connectivity-strategy>
- [2] Canadian Radio-television and Telecommunications Commission, "Broadband fund: Closing the digital divide in canada," 2025. [Online]. Available: <https://crtc.gc.ca/eng/internet/internet.htm>
- [3] O. of the Auditor General of Canada, "Connectivity in rural and remote areas: Internet coverage report," Government of Canada, 2023. [Online]. Available: [https://www.oag-bvg.gc.ca/internet/English/parl\\_oag\\_202303\\_02\\_e\\_44205.html](https://www.oag-bvg.gc.ca/internet/English/parl_oag_202303_02_e_44205.html)
- [4] G. Sebestyen, S. Fujikawa, N. Galassi, and A. Chuchra, *Low Earth Orbit Satellite Design*. Springer, 2018.
- [5] I. Leyva-Mayorga, B. Soret, M. Röper, D. Wübben, B. Matthiesen, A. Dekorsy, and P. Popovski, "LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184 955–184 964, 2020.
- [6] S. Cakaj, *LEO Coverage*. John Wiley & Sons, Ltd, 2022, ch. 5, pp. 103–119. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119899280.ch5>
- [7] Shivendra Panwar, "Breaking the Latency Barrier," *IEEE Spectrum*, 2020. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/breaking-the-latency-barrier>
- [8] Société de l'assurance automobile du Québec, "In an Autonomous Vehicle," SAAQ, 2024. [Online]. Available: <https://saaq.gouv.qc.ca/en/road-safety/modes-transportation/autonomous-vehicles>
- [9] L. U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, and C. S. Hong, "6G Wireless Systems: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147 029–147 044, 2020.
- [10] Hexa-X Consortium, "Deliverable D5.3: Final 6G architectural enablers and technological solutions," Hexa-X, 2023. [Online]. Available: [https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2023/05/Hexa-X\\_D5.3\\_v1.0.pdf](https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2023/05/Hexa-X_D5.3_v1.0.pdf)
- [11] Telesat, "Telesat Lightspeed: Resilient, assured global communications," Telesat, 2023. [Online]. Available: <https://www.telesat.com/wp-content/uploads/2024/01/Telesat-Lightspeed-Defence.pdf>
- [12] C. Chen, X. Chen, D. Das, D. Akhmetov, and C. Cordeiro, "Overview and performance evaluation of wi-fi 7," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 12–18, 2022.
- [13] H. Haas, "Lifi: Conceptions, misconceptions and opportunities," in *2016 IEEE Photonics Conference (IPC)*. IEEE, 2016, pp. 680–681.
- [14] N. A. Khan and S. Schmid, "Ai-ran in 6g networks: State-of-the-art and challenges," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 294–311, 2024.
- [15] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M. K. Marina, "Network slicing in 5g: Survey and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, 2017.
- [16] X. Hu, R. Deng, B. Di, H. Zhang, and L. Song, "Holographic beamforming for leo satellites," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 10, pp. 2717–2721, 2023.
- [17] Y. Wu, K. Zhang, and Y. Zhang, "Digital Twin Networks: A Survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 18, pp. 13 789–13 804, 2021.
- [18] B. Mao, X. Zhou, J. Liu, and N. Kato, "Digital Twin Satellite Networks Toward 6G: Motivations, Challenges, and Future Perspectives," *IEEE Network*, vol. 38, no. 1, pp. 54–60, 2024.
- [19] T. T. Bui, L. D. Nguyen, B. Canberk, V. Sharma, O. A. Dobre, H. Shin, and T. Q. Duong, "Digital Twin-Empowered Integrated Satellite-Terrestrial Networks Toward 6G Internet of Things," *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 12, pp. 74–81, 2024.
- [20] S. D. Okegbile, J. Cai, and C. Yi, "Concept of Human Digital Twin: An Introduction," in *Human Digital Twin: Exploring Connectivity and Security Issues*. Springer, 2024, pp. 3–15.
- [21] S. D. Okegbile, J. Cai, D. Niyato, and C. Yi, "Human digital twin for personalized healthcare: Vision, architecture and future directions," *IEEE network*, vol. 37, no. 2, pp. 262–269, 2022.
- [22] J. Chen, C. Yi, S. D. Okegbile, J. Cai, and X. Shen, "Networking architecture and key supporting technologies for human digital twin in personalized healthcare: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 26, no. 1, pp. 706–746, 2023.
- [23] S. D. Okegbile, H. Gao, O. Talabi, J. Cai, C. Yi, D. Niyato, and X. Shen, "Fles: A federated learning-enhanced semantic communication framework for mobile AIGC-driven human digital twins," *IEEE Network*, 2025.
- [24] Itjon, E. Lagunas, N. Maturo, S. K. Sharma, B. Shankar, J. F. M. Montoya, J. C. M. Duncan, D. Spano, S. Chatzinotas, S. Kisseleff,

- J. Querol, L. Lei, T. X. Vu, and G. Goussetis, "Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 70–109, 2021.
- [25] A. Kyrgiazos, B. G. Evans, and P. Thompson, "On the Gateway Diversity for High Throughput Broadband Satellite Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 10, pp. 5411–5426, 2014.
- [26] J. Matar, M. Rodriguez-Cassola, G. Krieger, P. López-Dekker, and A. Moreira, "MEO SAR: System Concepts and Analysis," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 2, pp. 1313–1324, 2020.
- [27] R. Wang, M. A. Kishk, and M.-S. Alouini, "Ultra Reliable Low Latency Routing in LEO Satellite Constellations: A Stochastic Geometry Approach," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 42, no. 5, pp. 1231–1245, 2024.
- [28] A. U. Chaudhry and H. Yanikomeroglu, "Laser Intersatellite Links in a Starlink Constellation: A Classification and Analysis," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 16, no. 2, pp. 48–56, 2021.
- [29] M. Jackson, "SpaceX Starts General Rollout of Starlink's Inter Satellite Lasers," ISPreview, 2021. [Online]. Available: <https://www.ispreview.co.uk/index.php/2021/09/spacex-starts-general-rollout-of-starlinks-inter-satellite-lasers.html>
- [30] X. Qin, T. Ma, X. Zhang, Y. Wang, H. Zhou, and L. Zhao, "Ultra-Dense LEO-MEO Constellation Integrated 6G: A Distributed Hierarchical Mobility Management Approach," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 24, no. 1, pp. 323–339, 2025.
- [31] J. Pi, Y. Ran, H. Wang, Y. Zhao, R. Zhao, and J. Luo, "Dynamic Planning of Inter-Plane Inter-Satellite Links in LEO Satellite Networks," in *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications*, 2022, pp. 3070–3075.
- [32] Analysys Mason, "Space," Analysys Mason, 2025. [Online]. Available: <https://www.analysysmason.com/what-we-do/capabilities/space/>
- [33] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [34] Y. Li, H. Li, L. Liu, W. Liu, J. Liu, J. Wu, Q. Wu, J. Liu, Z. Lai, and F. Guojie, "Fractal Rosette: A Stable Space-Ground Network Structure in Mega-Constellation," 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2105.05560>
- [35] Canadian Radio-television and Telecommunications Commission, "Communications Market Reports," CRTC, 2024. [Online]. Available: <https://crtc.gc.ca/eng/publications/reports/PolicyMonitoring/>
- [36] J. Davis, *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International, 1999.
- [37] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design (Fourth Edition)*. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [38] R. W. Revie, *Uhlig's Corrosion Handbook (Third Edition)*. Wiley, 2011.
- [39] W. D. J. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction (Tenth Edition)*. Wiley, 2018.
- [40] F. A. Almalki, S. H. Alsamhi, R. Sahal, J. Hassan, A. Hawbani, N. Rajput, A. Saif, J. Morgan, and J. Breslin, "Green IoT for eco-friendly and sustainable smart cities: future directions and opportunities," *Mobile Networks and Applications*, vol. 28, no. 1, pp. 178–202, 2023.
- [41] H. Zhang, H. Wang, Y. Li, K. Long, and A. Nallanathan, "DRL-Driven Dynamic Resource Allocation for Task-Oriented Semantic Communication," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 7, pp. 3992–4004, 2023.
- [42] A. E. Onile, R. Machlev, E. Petlenkov, Y. Levron, and J. Belikov, "Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 997–1015, 2021.
- [43] R. Aluvalu, S. Mudrakola, U. M. V. A. Kaladevi, M. Sandhya, and C. R. Bhat, "The novel emergency hospital services for patients using digital twins," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 98, p. 104794, 2023.
- [44] Gouvernement du Québec, "Ressources numériques pour le réseau de l'éducation," Québec, 2025. [Online]. Available: <https://www.quebec.ca/education/numerique/ressources-numeriques/ressources-numeriques-reseau-education>
- [45] Concordia University, "Online courses at concordia university," CU, 2025. [Online]. Available: <https://www.concordia.ca/academics/online-courses.html>
- [46] Future Skills Centre, "FSC establishes \$20 million partnership with CPMT to support workforce development in Quebec," FSC, 2024. [Online]. Available: <https://fsc-ccf.ca/engage/workforce-development-in-quebec/>
- [47] N. Mohammadzadeh, S. Rezayi, and S. Saeedi, "Telemedicine for Patient Management in Remote Areas and Underserved Populations," *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2022.
- [48] ISED, "Canada's Digital Charter," Government of Canada, 2021. [Online]. Available: <https://ised-isde.canada.ca/site/innovation-better-canada/en/canadas-digital-charter-trust-digital-world>
- [49] S. Cespedes, "Eagle and the Condor Project: Promoting Digital Equity with Indigenous Communities," CU, 2024. [Online]. Available: <https://www.concordia.ca/ginacody/about/equity-diversity-inclusion/awards.html>
- [50] J. Turner, "Bridging the Gap: Unraveling the Digital Divide (DDN2-A26)," Government of Canada, 2024. [Online]. Available: <https://www.cspc-efpc.gc.ca/tools/articles/digital-divide-eng.aspx>