



Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2024 (Volume 1)

CAP SUR LA FRONTIÈRE TECHNOLOGIQUE



Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2024 (Volume 1)

CAP SUR LA FRONTIÈRE TECHNOLOGIQUE

Ce document, ainsi que les données et cartes qu'il peut comprendre, sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem-Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

Note de la République de Türkiye

Les informations figurant dans ce document qui font référence à « Chypre » concernent la partie méridionale de l'île. Il n'y a pas d'autorité unique représentant à la fois les Chypriotes turcs et grecs sur l'île. La Türkiye reconnaît la République Turque de Chypre Nord (RTCN). Jusqu'à ce qu'une solution durable et équitable soit trouvée dans le cadre des Nations Unies, la Türkiye maintiendra sa position sur la « question chypriote ».

Note de tous les États de l'Union européenne membres de l'OCDE et de l'Union européenne

La République de Chypre est reconnue par tous les membres des Nations Unies sauf la Türkiye. Les informations figurant dans ce document concernent la zone sous le contrôle effectif du gouvernement de la République de Chypre.

Merci de citer cet ouvrage comme suit :

OCDE (2024), *Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2024 (Volume 1) : Cap sur la frontière technologique*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/e34abd55-fr>.

ISBN 978-92-64-75948-0 (imprimé)

ISBN 978-92-64-86583-9 (PDF)

ISBN 978-92-64-46758-3 (HTML)

ISBN 978-92-64-68699-1 (epub)

Crédits photo : Couverture © Metamorworks/Shutterstock.com ; © Omelchenko/Shutterstock.com.

Les corrigenda des publications sont disponibles sur : www.oecd.org/fr/apropos/editionsocde/corrigendadepublicationsdelocde.htm.

© OCDE 2024

L'utilisation de ce contenu, qu'il soit numérique ou imprimé, est régie par les conditions d'utilisation suivantes : <https://www.oecd.org/fr/conditionsdutilisation>.

Avant-propos

Les *Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE* sont une publication phare qui analyse l'évolution du développement des technologies, des politiques et de la situation du numérique dans les pays membres et les économies partenaires de l'OCDE. L'édition 2024 s'appuie, entre autres, sur les indicateurs issus de la Boîte à outils de l'OCDE sur la transformation numérique, des bases de données de l'OCDE sur l'accès aux TIC et leur utilisation et de l'Observatoire OCDE des politiques relatives à l'IA. Elle met également à profit les réponses au questionnaire élaboré dans l'optique de sa préparation, qui apportent des éclairages sur les priorités et les politiques des pays membres et des économies partenaires de l'OCDE dans le domaine du numérique.

Cette édition comprend deux volumes. Le *Volume 1* traite de technologies clés telles que l'intelligence artificielle, les réseaux sans fil de nouvelle génération et les technologies immersives, dont on étudie les incidences sur l'économie et la société. Il propose également une analyse de l'adoption des technologies numériques par les individus, les entreprises et les administrations et donne à voir l'ampleur et la portée des fractures numériques et les solutions pour favoriser l'égalité des chances et l'inclusion. Il fournit de nouvelles estimations de la croissance du secteur des technologies de l'information et des communications. Enfin, il aborde la question de la santé mentale dans les environnements numériques.

L'édition 2024 des *Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE* est le fruit du travail collectif du personnel de la Division de la politique de l'économie numérique de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE (STI). Le Secrétariat a préparé le *Volume 1* sous les auspices du Comité de la politique du numérique de l'OCDE (CPN), présidé par Yoichi Iida (Japon). La publication a bénéficié des précieux commentaires des délégués auprès du CPN et de ses Groupes de travail. Le CPN a procédé à la déclassification du contenu du *Volume 1* le 4 décembre 2023 et le 15 janvier 2024.

Molly Leshner (Économiste principale et Cheffe d'unité) a piloté la définition des orientations et l'élaboration de la publication, avec l'appui d'Elif Koksal-Oudot (Économiste), sous la direction d'Audrey Plonk (Directrice adjointe).

Les auteurs de ce volume sont Camilo Umana Dajud et Nicolas Benoit (Chapitre 1 : « Perspectives de croissance du secteur des TIC »), Celine Caira (Chapitre 2 : « L'avenir de l'intelligence artificielle »), Alexia González Fanfalone et Bengt Mölleryd (Coup de projecteur : « Réseaux de nouvelle génération et écosystème de la connectivité »), Simon Lange et Pierre Montagnier (Chapitre 3 : « Diffusion des technologies numériques et données »), Jeremy Bailenson et Molly Leshner (Chapitre 4 : « La réalité virtuelle, ses possibilités et ses risques »), et Lorena Giuberti Coutinho et Molly Leshner (Coup de projecteur : « Santé mentale et environnements numériques »).

Les collègues de l'OCDE suivants ont apporté de précieuses contributions à la préparation du *Volume 1* dans leurs domaines d'expertise respectifs : Simon Lange, Annabelle Mourougane, Dave Turner et Nicolas Woloszko (chapitre 1) ; Luis Aranda, Jamie Berryhill, Sarah Bérubé, Fabio Curi Paixao, Angéline Gentaz et Karine Perset (chapitre 2) ; Verena Weber (coup de projecteur sur les réseaux de nouvelle génération) ; Nicolas Benoit (chapitre 3), Clarisse Girot, Lorena Giuberti Coutinho et Christian Reimsbach-Kounatze (chapitre 4) ; et Francesca Gottschalk, Hanna Pawelec, Christopher Prinz, Lisa Robinson et Doron Wijker (coup de projecteur sur la santé mentale).

La publication a bénéficié des commentaires, de l'appui et de la contribution de Jerry Sheehan (Directeur), de Jens Lundsgaard (Directeur adjoint), d'Hanna-Mari Kilpelainen (Conseillère principale) et de Gallia Daor (Conseillère), de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation.

Angela Gosmann et Mark Foss ont apporté un appui éditorial. Andreia Furtado et Sebastian Ordelheide ont mené la stratégie de la communication. Julian Jaramillo, Paola Avellaneda et Diego Pinilla (Bestiario) ont conçu les visualisations de données et les infographies. Fabio Parmeggiani a fourni un appui à la conception. Marion Barberis, Sarah Ferguson, Shellie Phillips et Alice Weber ont assuré le secrétariat.

Table des matières

Avant-propos	3
Guide de lecture	7
Résumé	11
Chapitre 1 PERSPECTIVES DE CROISSANCE DU SECTEUR DES TIC	
Principaux constats	17
Vue d'ensemble des efforts déployés pour mesurer la transformation numérique	18
Méthodologie de mesure en temps réel de la croissance du secteur des TIC	20
Perspectives de croissance du secteur des TIC dans les différents pays	25
Il est essentiel de mesurer le secteur des TIC pour en évaluer les performances et concevoir des politiques rationnelles	33
Références	35
Notes	36
Chapitre 2 L'AVENIR DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	
Principaux constats	41
Le paysage technologique de l'IA d'aujourd'hui et de demain	42
Les prédictions concernant les trajectoires et les conséquences futures de l'IA varient selon les experts	51
Progression des pays sur la voie du déploiement d'une IA digne de confiance	55
Incertain et complexe, l'avenir de l'IA laisse entrevoir de grandes opportunités mais aussi des risques importants pour la société et les économies	65
Références	66
Notes	72
Coup de projecteur LES RÉSEAUX SANS FIL DE PROCHAINE GÉNÉRATION ET L'ÉCOSYSTÈME DE LA CONNECTIVITÉ	
Connectivité terrestre : au-delà des technologies 5G	78
Connectivité non terrestre : progrès des technologies satellites et autres technologies sans fil non terrestres	82
Topologies de connectivité hybride : vers l'intégration des technologies de réseau terrestres et non terrestres	84
Références	88
Notes	91
Chapitre 3 DIFFUSION DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES ET DONNÉES	
Principaux constats	97
La capacité à utiliser efficacement l'internet est essentielle à l'égalité des chances et l'inclusion	97
La crise du COVID-19 a poussé les individus à davantage se tourner vers les services en ligne... du moins temporairement	104
Les technologies dépendantes des données se diffusent lentement	108
Il est essentiel de favoriser une adoption et une diffusion équitables des technologies numériques pour combler les fractures numériques et dynamiser la croissance de la productivité	114
Annexe 3.A. Tableaux de régression	116
Références	118
Notes	122

Chapitre 4 LA RÉALITÉ VIRTUELLE, SES POSSIBILITÉS ET SES RISQUES	
Principaux constats.....	129
Comprendre la réalité virtuelle.....	130
Avantages et possibilités de la réalité virtuelle.....	134
Inconvénients et risques de la réalité virtuelle.....	138
Assurer la gouvernance de la réalité virtuelle.....	142
Références.....	147
Notes.....	152
Coup de projecteur LA SANTÉ MENTALE ET LES ENVIRONNEMENTS NUMÉRIQUES	
L'anonymat, la désincarnation et la désinhibition expliquent pourquoi on communique et on interagit différemment en ligne.....	157
Le cyberharcèlement, l'utilisation problématique de l'internet et l'utilisation problématique des médias sociaux sont associés à des problèmes de santé mentale.....	158
Les technologies immersives offrent de nouvelles possibilités pour la santé mentale mais peuvent aussi exacerber les risques.....	159
Les données suggèrent que les comportements négatifs dans les environnements numériques sont en hausse et qu'ils touchent de manière disproportionnée les filles.....	160
Une utilisation modérée des technologies numériques tend à être bénéfique, mais leur « surutilisation » peut être préjudiciable.....	162
Vers un programme d'action en faveur de la santé mentale à l'ère du numérique.....	164
Références.....	166
Notes.....	170
Liste des Graphiques.....	173
Liste des Tableaux.....	174
Liste des Encadrés.....	174

Suivez les publications de l'OCDE sur :




-  https://twitter.com/ocde_fr
-  <https://www.facebook.com/OCDEfr>
-  <https://www.linkedin.com/showcase/organisation-de-cooperation-et-de-developpement-economiques>
-  <https://www.youtube.com/user/OECDiLibrary>
-  <https://www.oecd.org/newsletters/>

Ce livre contient des...

StatLinks 

Accédez aux fichiers Excel® à partir des livres imprimés !

Vous trouverez un **StatLink**  sous chaque tableau ou graphique de cet ouvrage. Pour télécharger le fichier Excel® correspondant, il vous suffit de copier le lien dans votre navigateur internet ou de cliquer dessus depuis la version électronique de l'ouvrage.

Guide de lecture

Acronymes

2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
3GPP	3rd Generation Partnership Project (projet de partenariat de troisième génération)
5G	Technologie cellulaire sans fil de cinquième génération
6G	Technologie cellulaire sans fil de sixième génération
A2G	Air-to-ground (réseau air-sol)
ADAV électrique	Aéronef électrique à décollage et atterrissage verticaux
AESA	Agence européenne de la sécurité aérienne
AIGO	Groupe de travail sur la gouvernance de l'intelligence artificielle (OCDE)
AIM	Outil de suivi des incidents liés à l'IA (OCDE)
APA	American Psychological Association (États-Unis)
API	Interface de programmation d'applications
ATM	Air traffic management (système de gestion du trafic aérien)
BERT	Bidirectional Encoder Representations from Transformers (représentations d'encodeur bidirectionnel à partir de transformateurs)
BRL	Réal brésilien
CEN-GENELEC	Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique
CIMT	Conseil de l'information sur le marché du travail (Canada)
CITI	Classification internationale type, par industrie, de toutes les branches d'activité économique
CMR	Conférence mondiale des radiocommunications
COVID-19	Maladie à coronavirus 2019
CPU	Central processing unit (unité centrale de traitement)
DAES ONU	Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies
DICE	Dangerous, impossible, counterproductive or expensive (dangereux, impossible, contre-productif ou onéreux)
DISR	Department of Industry, Science and Resources (Australie)
DSIT	Department for Science, Innovation and Technology (Royaume-Uni)
ETSI	Institut européen des normes de télécommunications
EUR	Euro
EuroHPC	Entreprise commune européenne pour le calcul à haute performance
FCC	Federal Communications Commission (États-Unis)
FMI	Fonds monétaire international
GHz	Gigahertz
GPT	Generative Pretrained Transformer (transformateur génératif pré-entraîné)
GPU	Graphics processing unit (unité de traitement graphique)
GSMA	Global System for Mobile Communications (Association pour le système mondial de communication avec les mobiles)
GTGIA	Groupe de travail sur la gouvernance de l'intelligence artificielle
HAPS	High-altitude platform station (station placée sur une plateforme en haute altitude)
HBSC	Health Behaviour in School-Aged Children: WHO Collaborative Cross-National Study (Enquête transnationale collaborative de l'OMS sur les comportements des enfants d'âge scolaire en matière de santé)
HIBS	High-altitude IMT base stations (stations de base IMT en haute altitude)

HTS	<i>High-throughput satellites</i> (satellites à haut débit)
IA	Intelligence artificielle
IAC	Intelligence artificielle capable
IAG	Intelligence artificielle générale
IAGén	IA générative
ICP	Indicateur clé de performance
ID	Identification
IdO	Internet des objets
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens)
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i> (Groupe de travail sur l'ingénierie Internet)
IMAX	Image Maximum
IMDA	<i>Infocomm Media Development Authority</i> (Singapour)
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i> (Télécommunications mobiles internationales)
INRIA	Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (France)
ISO	Organisation internationale de normalisation
Istat	Institut italien des statistiques
KDDI	Kokusai Denshin Denwa Co. Ltd. (Japon)
LEO	<i>Low Earth orbit</i> (satellite en orbite basse)
LLaMA	<i>Large Language Model Meta Artificial Intelligence</i> (Grand modèle de langage Meta intelligence artificielle)
LOWESS	<i>Locally weighted scatterplot smoothing</i> (lissage LOWESS)
M2M	Communication entre machines
MEO	<i>Medium Earth orbit</i> (satellite en orbite moyenne)
MIC	Ministère des Affaires intérieures et des Communications (Japon)
MinTIC	<i>Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones</i> (Ministère des Technologies de l'information et des communications, Colombie)
NAIRR	<i>National Artificial Intelligence Research Resource</i> (ressource nationale de recherche en IA, États-Unis)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (États-Unis)
non OSG	Satellite non géostationnaire
NSA	<i>Non standalone</i> (réseau non autonome)
NSF	<i>National Science Foundation</i> (États-Unis)
NSTC	<i>National Science and Technology Council</i> (États-Unis)
NTN	<i>Non-terrestrial network</i> (réseau non terrestre)
ODD	Objectifs de développement durable (Nations Unies)
OFCOM	<i>Office of Communications</i> (Royaume-Uni)
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONE AI	Réseau d'experts de l'IA auprès de l'OCDE
ONS	<i>Office for National Statistics</i> (Royaume-Uni)
OSG	Satellite en orbite géostationnaire
OSTP	<i>Office of Science and Technology Policy</i> (États-Unis)
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord
PIB	Produit intérieur brut
PISA	Programme international de l'OCDE pour le suivi des acquis des élèves
PME	Petites et moyennes entreprises
PMIA	Partenariat mondial sur l'intelligence artificielle
PP	Point de pourcentage
R-D	Recherche-développement
ReLU	Fonction d'activation ReLU (<i>rectified linear unit</i> , ou unité linéaire rectifiée)

REQM	Racine de l'erreur quadratique moyenne
RV	Réalité virtuelle
SA	<i>Standalone</i> (réseau autonome)
SCN	Système de comptabilité nationale
SESAR	<i>Single European Sky Air Traffic Management Research</i> (entreprise commune SESAR)
SIM	<i>Subscriber identity module</i> (module d'identification de l'abonné)
STAN	Base de données de l'OCDE pour l'analyse structurelle
SVI	<i>Search Volume Index</i> (indice de volume de recherche)
TDAH	Trouble déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité
TIC	Technologies de l'information et des communications
TN	<i>Terrestrial network</i> (réseau terrestre sans fil)
TRUBA	Infrastructure numérique nationale de science (Türkiye)
TSPT	Trouble de stress post-traumatique
TUBITAK	<i>Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu</i> (Conseil de la recherche scientifique et technologique de Türkiye)
UE IA	Législation de l'Union européenne sur l'intelligence artificielle
UIT	Union internationale des télécommunications
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
UPI	Utilisation problématique de l'internet
UPMS	Utilisation problématique des médias sociaux
US DOT	<i>United States Department of Transportation</i> (États-Unis)
USD	Dollar des États-Unis
UTM	<i>Unmanned aircraft system traffic management</i> (système de gestion du trafic des aéronefs sans pilote)
VALK	<i>Gross value-added volumes</i> (valeur ajoutée brute en volumes)
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> (réseau local sans fil)

Grouperments de pays

Zone euro	Allemagne, Autriche, Belgique, Chypre, Croatie, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Irlande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Pays-Bas, Portugal, République slovaque et Slovénie.
UE	Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Roumanie, Slovénie et Suède.
G7	Allemagne, Canada, États-Unis, France, Italie, Japon et Royaume-Uni.
G20	Afrique du Sud, Allemagne, Arabie saoudite, Argentine, Australie, Brésil, Canada, République populaire de Chine, Corée, États-Unis, Fédération de Russie, France, Inde, Indonésie, Italie, Japon, Mexique, Royaume-Uni, Türkiye, Union africaine et Union européenne.
OCDE	Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Canada, Chili, Colombie, Corée, Costa Rica, Danemark, Espagne, Estonie, États-Unis, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Israël, Italie, Japon, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Slovénie, Suède, Suisse et Türkiye.

Abréviations

La plupart des graphiques de la présente publication utilisent les codes ISO pour les noms de pays ou d'économies.

ALB	Albanie	IDN	Indonésie
ARG	Argentine	IND	Inde
ARM	Arménie	IRL	Irlande
AUS	Australie	ISL	Islande
AUT	Autriche	ISR	Israël
AZE	Azerbaïdjan	ITA	Italie
BEL	Belgique	JPN	Japon
BEL-FR	Belgique (francophone)	KAZ	Kazakhstan
BEL-NL	Belgique (néerlandophone)	KOR	Corée
BGR	Bulgarie	LTU	Lituanie
BRA	Brésil	LUX	Luxembourg
CAN	Canada	LVA	Lettonie
CHE	Suisse	MDA	Moldova
CHL	Chili	MEX	Mexique
COL	Colombie	MKD	Macédoine du Nord
CRI	Costa Rica	MLT	Malte
CZE	République tchèque	NLD	Pays-Bas
DEU	Allemagne	NOR	Norvège
DNK	Danemark	NZL	Nouvelle-Zélande
EGY	Égypte	PHL	Philippines
ESP	Espagne	POL	Pologne
EST	Estonie	PRT	Portugal
FIN	Finlande	ROU	Roumanie
FRA	France	SAU	Arabie saoudite
GBR	Royaume-Uni	SRB	Serbie
GBR-ENG	Angleterre	SVK	République slovaque
GBR-SCT	Écosse	SVN	Slovénie
GBR-WLS	Pays de Galles	SWE	Suède
GEO	Géorgie	TUR	Türkiye
GRC	Grèce	UKR	Ukraine
HRV	Croatie	USA	États-Unis
HUN	Hongrie	ZAF	Afrique du Sud

Résumé

Un écosystème de technologies numériques interdépendantes se met en place rapidement, entraînant dans son sillage des évolutions économiques et sociétales majeures. Les données nourrissent cet écosystème et créent une valeur considérable, mais pas seulement : elles font également naître des risques pour la vie privée et la sécurité en ligne. Certaines des technologies font déjà partie intégrante de la vie quotidienne, d'autres se profilent. Les *Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2024 (Volume 1)* apportent de nouveaux éclairages sur les technologies phares qui sous-tendent la transformation numérique et sur leurs incidences.

Dans ce premier volume, les auteurs se sont appuyés sur des données massives et des techniques d'apprentissage automatique pour produire de nouvelles estimations du taux de croissance du secteur des technologies de l'information et des communications (TIC), qui est au cœur de l'écosystème. Ils se sont ensuite tournés vers la frontière technologique, s'intéressant à l'avenir de l'intelligence artificielle (IA) et aux moyens de la façonner de manière à en faire une force positive. Ce *Volume 1* propose également une analyse de l'adoption des technologies numériques par les individus, les entreprises et les administrations et donne à voir l'ampleur et la portée des fractures numériques et les solutions pour favoriser l'égalité des chances et l'inclusion. Pour ce faire, on se penche sur l'impérieuse nécessité que les réseaux sans fil de nouvelle génération fournissent une connectivité illimitée, en tout lieu. Au-delà de l'engouement suscité par les technologies immersives, on examine la capacité avérée de la réalité virtuelle à se prêter à un déploiement à grande échelle, avant d'en exposer les possibilités et les risques. Enfin, on donne un coup de projecteur à la question de la santé mentale dans les environnements numériques, en particulier ceux présentant les risques les plus élevés.

Principales conclusions

Le secteur des TIC continue d'afficher des résultats supérieurs à ceux enregistrés à l'échelle de l'ensemble de l'économie

Si l'« économie numérique » ne se limite plus au seul secteur des TIC, celui-ci en reste le noyau et sous-tend l'innovation numérique. Or, on manque de données actualisées sur les performances de ce secteur essentiel, ce qui limite la visibilité des responsables de l'élaboration des politiques. Les auteurs de ce *Volume 1* s'appuient sur un modèle de prévision immédiate inédit exploitant des données massives et des techniques d'apprentissage automatique pour fournir des données à jour comparables sur la croissance économique du secteur des TIC. Les estimations montrent qu'au cours des dix dernières années, dans les pays de l'OCDE, il a progressé environ trois fois plus rapidement que l'ensemble de l'économie. En 2023, le secteur des TIC a atteint de nouveaux sommets, avec un taux de croissance moyen de 7.6 % dans la zone OCDE.

Les acteurs de l'IA doivent collaborer pour stimuler l'innovation de manière responsable et veiller à ce que ses avantages soient largement partagés

Les avancées technologiques dans le domaine de l'IA poussent à reconsidérer l'avenir du travail, des loisirs et de la société. L'avenir de l'IA pourrait apporter des avantages considérables, notamment des gains de productivité accrus, une accélération des progrès scientifiques et des solutions pour lutter contre le changement climatique. Pour autant, l'IA ne va pas sans présenter de risques ayant trait, entre autres, à la confiance, la justice, la protection de la vie privée, la sûreté et la responsabilité. Depuis 2022, le nombre d'incidents liés à l'IA – à savoir les événements impliquant un système d'IA qui ont causé, directement ou indirectement, des préjudices – et de dangers liés à l'IA rapportés dans les médias a fortement augmenté avec, en tête de liste, les incidents liés à l'IA générative. Pour bâtir une IA digne de confiance utilisée dans l'intérêt de l'humanité et de la planète, il sera essentiel de développer une compréhension

commune des possibilités et des risques principaux qu'elle fait naître. Pour y parvenir, les pays mettent au point, à un rythme sans précédent, des stratégies nationales et d'autres initiatives publiques en matière d'IA.

Les réseaux sans fil de nouvelle génération sont indispensables pour assurer une connectivité illimitée, en tout lieu

La prolifération des technologies émergentes va de pair avec la production de volumes considérables de données, ce qui génère des besoins croissants en termes de bande passante et de traitement des données. Nombre d'applications nouvelles exigent par ailleurs des performances de réseau supérieures, à savoir des débits plus élevés et des temps de réponse (latence) réduits. Presque tous les pays de l'OCDE déploient des réseaux 5G et lancent des travaux de recherche sur des technologies de « l'après-5G » ou de la « 6G ». Ils se tournent également vers la connectivité satellite et d'autres technologies de communication aérienne, qui gagnent du terrain partout dans le monde. Ces technologies commencent à fournir une connectivité de qualité, en particulier dans les zones rurales et mal desservies, contribuant par là même à réduire les disparités dans ce domaine. À l'avenir, l'intégration des technologies sans fil terrestres et non terrestres favorisera l'expansion et la résilience de l'écosystème de la connectivité.

La diffusion des technologies numériques et la capacité à les utiliser efficacement restent inégales, ce qui nuit à l'égalité des chances et à l'inclusion

Les technologies telles que l'infonuagique et l'internet des objets se généralisent. En revanche, l'adoption des technologies dépendantes des données, à l'instar de l'IA, reste faible et concentrée dans certains secteurs. Il est possible d'accélérer la diffusion des technologies en assurant aux entreprises des conditions équitables d'accès aux ressources clés, notamment aux données. Les efforts en faveur d'une accélération de la diffusion des technologies et des investissements dans les compétences peuvent aider à réduire les écarts d'utilisation de l'internet, qui sont notables entre les classes d'âge et les niveaux d'instruction et de revenus, et nuisent à l'égalité des chances et à l'inclusion. Pour inciter les individus et les entreprises à utiliser les services en ligne, les pouvoirs publics devraient proposer des services inclusifs, centrés sur l'utilisateur et investir dans les compétences, tout en accompagnant les personnes qui risquent le plus de se retrouver dépassées.

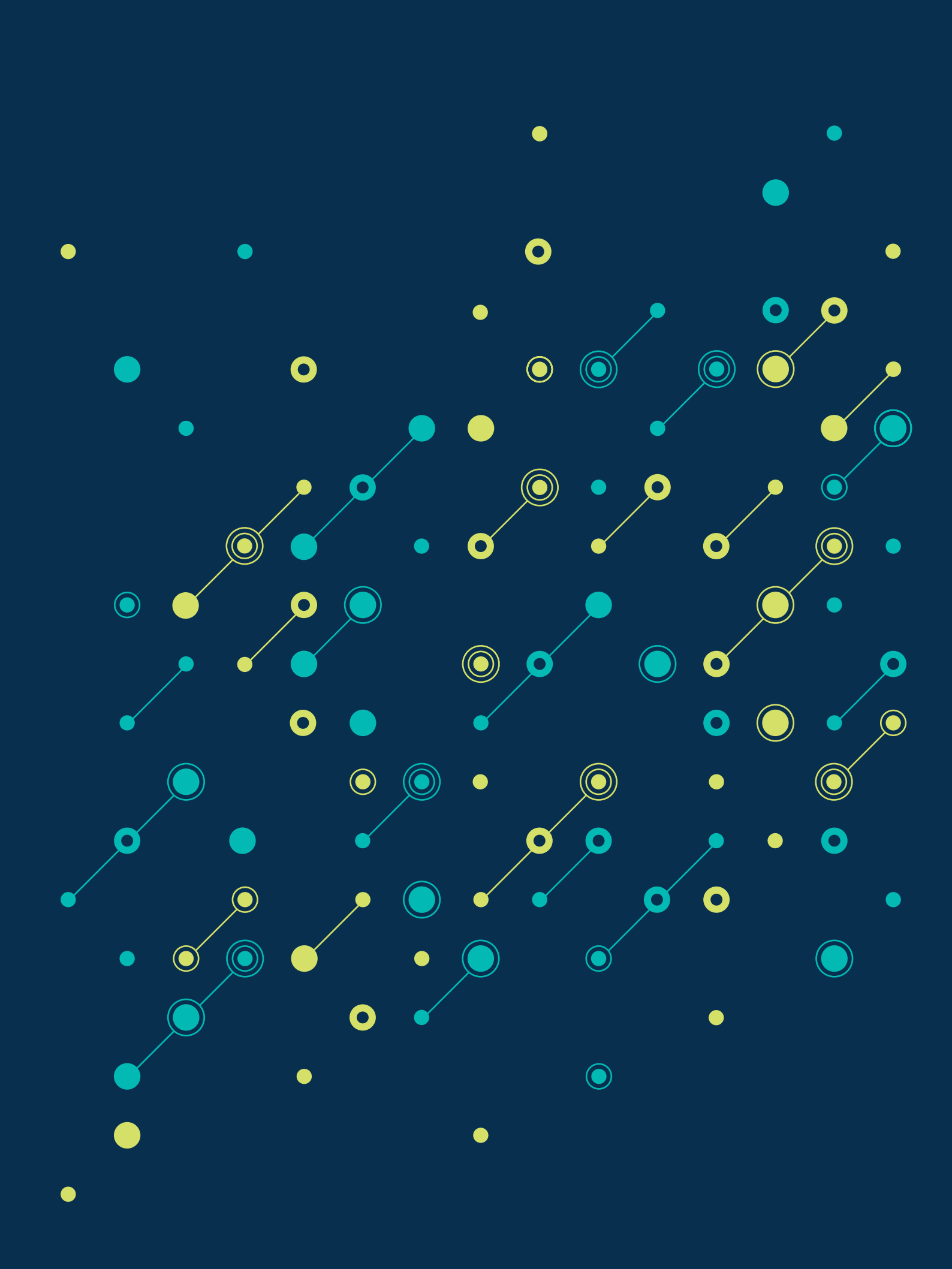
Les technologies immersives comme la réalité virtuelle ouvrent la voie à des expériences extraordinaires, mais la sécurité en ligne et hors ligne est essentielle

L'essor des technologies tridimensionnelles s'accélère, soulevant des questions quant aux possibilités et aux risques qu'elles font naître. La réalité virtuelle est le médium immersif qui affiche une capacité avérée à se prêter à un déploiement à grande échelle dans des domaines divers. Le suivi des mouvements corporels, qui favorise le « sentiment de présence », distingue la réalité virtuelle des autres environnements immersifs. Les environnements de réalité virtuelle peuvent être autonomes, sociaux ou industriels ; ils comprennent un cycle de suivi, de rendu et d'affichage, un processus continu qui se déroule en temps réel. La réalité virtuelle est particulièrement adaptée aux expériences qui, dans le monde physique, seraient dangereuses, impossibles, contre-productives ou onéreuses. Dans la mesure où il n'existe aucun moyen d'« exercer son option de retrait » ou de « rester incognito » dans la réalité virtuelle, de nouvelles approches, au-delà des modèles traditionnels fondés sur le consentement, devront être mises en place pour protéger la vie privée. Une attention particulière doit être portée à la sécurité mentale et physique, en particulier dans le cas des enfants et des véhicules mobiles.

Les comportements négatifs se multiplient dans les environnements numériques et touchent les filles de manière disproportionnée

L'anonymat, la désincarnation et la désinhibition contribuent à expliquer pourquoi les individus communiquent et interagissent différemment en ligne et peuvent conduire à des comportements négatifs. Depuis 2017, le pourcentage total de jeunes faisant état de difficultés à fonctionner au

quotidien et d'un mal-être à cause de l'utilisation des médias sociaux a augmenté de 49 %, la part des filles ayant progressé deux fois plus rapidement que celle des garçons. Par ailleurs, de plus en plus de jeunes sont victimes de cyberharcèlement, les taux étant en moyenne plus élevés chez les filles que chez les garçons. La victimisation en cyberharcèlement a augmenté de 26 % entre 2017 et 2022. Si les travaux de recherche montrent qu'une utilisation modérée des technologies numériques tend à être bénéfique, leur « surutilisation » peut se révéler préjudiciable. Dans les pays et régions où la fréquence de l'utilisation problématique des médias sociaux est plus forte, on observe également des pourcentages plus élevés d'utilisation intensive des messageries instantanées, des réseaux sociaux, des courriels et d'autres formes de communication en ligne.



Chapitre 1

Perspectives de croissance du secteur des TIC

À mesure que les technologies numériques gagnent du terrain et ont des incidences de plus en plus profondes sur la société et l'économie, il devient indispensable d'élaborer des politiques fondées sur des données probantes. Or, on manque de données actuelles, comparables à l'échelle internationale, sur la croissance des composantes numériques de l'économie. Si l'« économie numérique » ne se limite plus au seul secteur des technologies de l'information et des communications (TIC), celui-ci en reste le noyau et demeure essentiel à la poursuite de l'innovation numérique. Ce chapitre décrit les résultats d'un modèle de prévision immédiate qui exploite les données Google Trends et les techniques d'apprentissage automatique pour fournir aux responsables de l'élaboration des politiques des données à jour et comparables sur la croissance économique du secteur des TIC. Ces estimations peuvent aider à faire la lumière sur ses performances actuelles et, par là même, à étayer les décisions des pouvoirs publics qui auront à l'avenir des incidences sur ce secteur vital de l'économie.

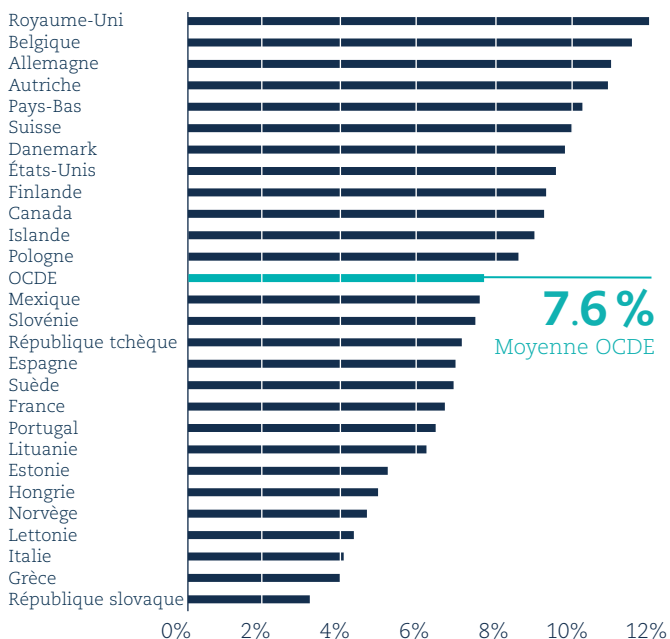
La croissance du secteur des TIC est supérieure à celle de l'économie dans son ensemble

Dans les pays de l'OCDE, le secteur des TIC a progressé près de 3 fois plus rapidement que l'économie dans son ensemble.

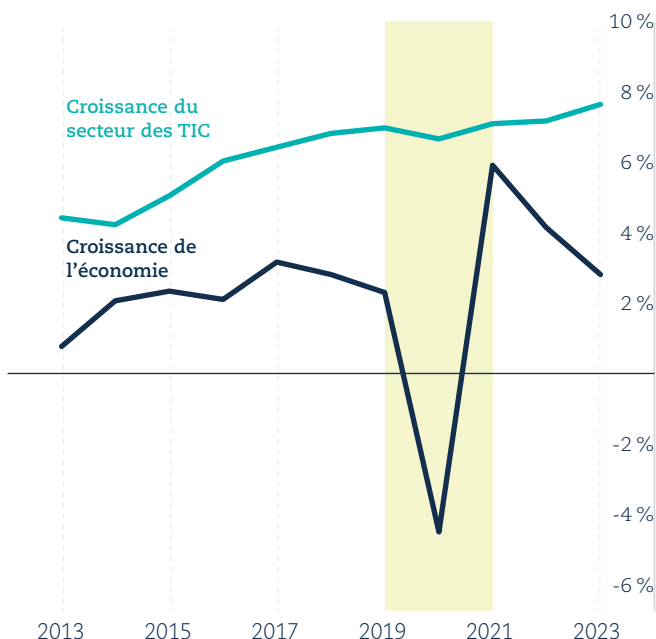


Les estimations montrent une croissance robuste du secteur des TIC en 2023.

Prévisions de croissance du secteur des TIC, 2023



Le secteur des TIC a résisté à la pandémie de COVID-19, contrairement à l'économie prise dans son ensemble.



Principaux constats

Des estimations actualisées de la croissance du secteur des TIC contribuent à éclairer les décisions des pouvoirs publics qui influent sur ce secteur vital

- Des données issues de sources non traditionnelles et les techniques d'apprentissage automatique peuvent constituer un complément utile aux statistiques officielles sur la transformation numérique de l'économie. Un réseau neuronal artificiel exploitant les données Google Trends fournit une mesure en temps réel de la croissance du secteur des TIC.
- Les indicateurs en temps réel de la croissance économique du secteur des TIC peuvent aider les pouvoirs publics à en appréhender les performances actuelles et, par là même, étayer les décisions de politique publique.

Au cours des dix dernières années, le secteur des TIC a progressé dans la plupart des pays de l'OCDE, mais de manière inégale

- Entre 2013 et 2023, tous les pays de l'OCDE ont enregistré, en moyenne, des taux de croissance positifs du secteur des TIC. Pour autant, on observe des disparités importantes (10 points) entre les pays affichant les performances les plus élevées et celles dont les performances du secteur sont les plus faibles.

Les taux de croissance du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE tendent à converger

- En 2011, le taux de croissance moyen du quatrième quartile (quart supérieur) des pays de l'OCDE était 13 fois supérieur au taux moyen du premier quartile (quart inférieur). En 2023, la croissance moyenne du quatrième quartile était seulement deux fois supérieure à celle du premier quartile. Les écarts de croissance du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE se sont donc considérablement réduits. Cette évolution s'explique à la fois par une hausse des taux de croissance moyens dans le premier quartile et une baisse de ceux observés dans le quatrième quartile.

Le secteur des TIC a enregistré une croissance vigoureuse dans tous les pays de l'OCDE en 2023

- Les prévisions immédiates montrent que le secteur des TIC a connu une croissance vigoureuse en 2023, avec un taux moyen de 7.6 %. Dans de nombreux pays de l'OCDE, 2023 a été une année record pour le secteur. Dix pays ont enregistré des taux de croissance supérieurs à 9 % : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, les États-Unis, la Finlande, les Pays-Bas, le Royaume-Uni et la Suisse. En Belgique et au Royaume-Uni, ils ont même dépassé 11 %. Ces bons résultats en 2023 pourraient s'expliquer par une augmentation de la demande de produits et de services TIC dans la période de l'après-pandémie de COVID-19.

Si les pays évaluent certains aspects de la transformation numérique de l'économie, ils ont souvent centré leurs efforts sur la mesure de l'adoption des technologies et des activités numériques des ménages et des entreprises. Pour ce faire, ils se sont généralement appuyés sur des enquêtes sur l'utilisation des technologies de l'information et des communications (TIC), à l'instar de l'enquête type de l'OCDE sur l'accès aux TIC et leur utilisation par les entreprises, les ménages et les individus (OCDE, 2015^[1]) (OCDE, 2015^[2]), ou ont ajouté des questions dans des enquêtes existantes réalisées auprès des entreprises ou des ménages.

L'observation de la réalisation et de l'intensité des activités numériques dans le cadre de la vie quotidienne présente un grand intérêt. Pour autant, ces indicateurs ne renseignent pas sur la valeur monétaire du niveau de production associé à la transformation numérique ni sur les gains d'efficacité liés à l'évolution des processus de production. Compte tenu de l'absence de lien direct entre la valeur de la production associée et l'activité numérique, ou entre les gains de productivité et l'utilisation des technologies numériques, nous ne disposons que d'une vision partielle des incidences des technologies et des données sur les indicateurs macroéconomiques traditionnels.

Le manque d'indicateurs sur la valeur de l'« économie numérique » comparables au plan international a conduit à une multiplication des efforts de mesure dans ce domaine. Au niveau national, l'accent a été mis sur la création des tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique et des comptes satellites de l'économie numérique dans le Système de comptabilité nationale (SCN) (OCDE, 2023^[3]) (Mitchell, 2021^[4]). Si l'intégration de la dimension numérique de l'économie dans le SCN constitue la meilleure solution à long terme à ce problème de mesure, il faudra des années avant que les pays mettent en œuvre et produisent des statistiques comparables à l'échelle internationale.



Alors que la transformation numérique s'intensifie, il devient de plus en plus nécessaire de disposer de mesures actuelles solides des composantes numériques de l'économie. Ce chapitre a vocation à contribuer aux efforts déployés pour mesurer un volet essentiel de l'« économie numérique » : le secteur des TIC. Les travaux visent à enrichir la base factuelle en produisant des estimations en temps réel de la croissance économique du secteur des TIC, à l'aide de l'apprentissage automatique et des données massives. Ces estimations peuvent étayer la conception et la mise au point des politiques du numérique, en complément des statistiques officielles produites par les offices statistiques nationaux. La méthodologie utilisée pour élaborer les estimations en temps réel est exposée en détail dans un document technique (Umana Dajud, à paraître^[5]).

Vue d'ensemble des efforts déployés pour mesurer la transformation numérique

Mesurer l'étendue de l'économie numérique est une tâche complexe, notamment parce que les technologies numériques et les données sont présentes partout, à des degrés divers. Surtout, alors qu'ils tentaient d'évaluer les incidences de la transformation numérique d'une façon qui soit cohérente avec la comptabilité nationale, les pays se sont demandés quelle activité économique devrait être considérée comme faisant partie de l'« économie numérique ».

Les tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique contribueront à améliorer la mesure à moyen terme

Les tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique offrent un cadre souple de mesure des composantes numériques de l'économie, qui ne repose pas sur une définition ou un indicateur unique considéré(e) comme étant représentatif(-ve) de l'économie numérique (Mitchell, 2021^[4]). Ces tableaux (encadré 1.1) non seulement couvrent les différents produits et acteurs associés à la transformation numérique, mais donnent également à voir la nature des transactions qui lient ces acteurs. Ce cadre délimite également les transactions selon qu'elles portent sur des produits commandés et/ou livrés par voie numérique.

Autres changements notables, le cadre des tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique contribue à améliorer la mesure de la transformation numérique grâce à l'ajout de sept colonnes supplémentaires aux tableaux traditionnels des ressources et des emplois. Ces colonnes correspondent aux différents types de secteurs numériques (plateformes d'intermédiation numérique facturant explicitement une commission, plateformes axées sur les données et la publicité, détaillants en ligne, etc.). La deuxième caractéristique importante tient à l'inclusion d'une agrégation des lignes des biens et services TIC. Elle offrira une mesure simple de l'intensité d'utilisation des produits TIC dans le cadre de différentes activités (consommation des ménages, investissement et exportations) (Mitchell, 2021^[4]). Enfin, les tableaux contiendront des lignes de produits supplémentaires pour les services infonuagiques et les services numériques intermédiaires.

Encadré 1.1. SCN et économie numérique

Le SCN est le cadre le plus solide pour mesurer l'économie numérique. Les normes statistiques internationales définies pour l'établissement de la comptabilité nationale garantissent la comparabilité des mesures entre les pays. Le cadre donne à voir les évolutions des chaînes de production induites par la transformation numérique puisque toute valeur ajoutée y figure déjà. L'adoption des tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique devrait donner un aperçu de la contribution de l'économie numérique. En l'absence d'un indicateur unique représentant tous les aspects économiques de la transformation numérique, les tableaux peuvent donner des estimations qui répondent à un large éventail de besoins des utilisateurs.

La mise en œuvre des tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique aura pour effet d'améliorer considérablement la mesure de l'économie numérique dans les statistiques officielles. Toutefois, elle ne va pas sans poser d'importantes difficultés. Si l'on parvient à les surmonter, les tableaux pourraient être utilisés à moyen terme par les pays de l'OCDE.

L'un des obstacles tient au fait que l'on ne dispose pas des données requises pour alimenter les tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique. Pour les tableaux des ressources et des emplois classiques, les offices statistiques s'appuient sur des données administratives et sur les enquêtes réalisées auprès des entreprises. Or, ces sources n'apportent pas suffisamment de données pour produire les tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique (Mitchell, 2021^[4]). Il faudra par conséquent soit modifier les enquêtes existantes, soit en créer de nouvelles.

Malgré ces difficultés, les tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique offrent une solution intéressante pour améliorer la mesure de l'économie numérique à moyen terme. Des orientations pratiques sur l'élaboration des tableaux, ainsi qu'une liste non exhaustive de statistiques que certaines agences spécialisées produisent actuellement, sont exposées dans le document (Mitchell, 2021_[4]).

Les données sur l'adoption des technologies numériques apportent des informations complémentaires

La deuxième méthode pour évaluer la transformation numérique consiste à mesurer l'adoption des technologies numériques. L'utilisation des biens et des services TIC par les consommateurs et les entreprises a rapidement évolué au cours des dernières décennies. Le développement des technologies numériques a transformé le comportement des consommateurs et ouvert la voie à la création de nouveaux modèles économiques.

En parallèle, la mesure de l'adoption des technologies numériques s'est considérablement améliorée. Les statistiques officielles sur les ménages et les entreprises comprennent souvent plusieurs indicateurs de l'adoption à la fois d'outils numériques éprouvés (tels que les plateformes en ligne ou les outils de paiement électronique) et de technologies numériques perfectionnées (telles que l'intelligence artificielle ou l'analytique des données massives). Diverses enquêtes mises en œuvre au niveau national ont aidé à constituer la base factuelle dans ce domaine.

C'est dans ce contexte que l'OCDE a publié, en 2002, deux enquêtes types destinées à fixer les normes internationales relatives à la production d'indicateurs comparables de la transformation numérique. L'enquête type sur l'adoption et l'utilisation des TIC par les ménages et les individus et l'enquête sur l'utilisation des TIC par les entreprises ont été conçues pour améliorer la mesure de la disponibilité des technologies de l'information et des communications et leur utilisation par les ménages, les individus et les entreprises, tout en prenant en considération les besoins nouveaux en termes de politiques publiques (OCDE, 2015_[1]).

L'enquête type de l'OCDE axée sur les ménages et les individus s'intéresse aux principales dimensions de la transformation numérique, telles que l'accès à l'internet, la fréquence et l'intensité d'utilisation, le recours au commerce électronique, et les compétences informatiques des individus (OCDE, 2015_[1]). Celle axée sur les entreprises vise à aider les offices statistiques nationaux à recueillir des statistiques de base en vue de mesurer la transformation numérique (adoption du haut débit, utilisation de l'informatique, vente en ligne, etc.).

L'enquête contient en outre des modules supplémentaires qui aident à mieux comprendre l'utilisation des TIC (services d'analytique des données ; identification par radiofréquence ; logiciel-service). D'une part, en recourant à une enquête principale, on s'assure que les pays privilégient un ensemble commun de mesures et, ce faisant, que les aspects les plus importants de la transformation numérique sont mesurés dans tous les pays de l'OCDE de manière à faciliter les comparaisons. D'autre part, les modules supplémentaires permettent de mesurer les technologies émergentes et les nouvelles tendances sans renoncer à la partie principale de l'enquête (OCDE, 2015_[2]).

Autres méthodes de mesure de la transformation numérique de l'économie

L'intensité numérique des secteurs économiques peut aussi donner une indication des composantes numériques de l'économie. Les pays établissent leurs propres taxonomies (Statistique Canada, 2019_[6]) (Bureau of Economic Analysis, 2018_[7]) et l'OCDE a mis au point une taxonomie pour 12 pays (Calvino et al., 2018_[8]). Cette dernière comprend une composante technologique (investissement dans les TIC, consommation intermédiaire de TIC et robots), le capital humain requis pour intégrer la technologie à la production (spécialistes des TIC), et la façon dont les technologies influent sur le comportement des entreprises sur le marché des produits (ventes en ligne).

La taxonomie est utilisée dans différents indicateurs de la Boîte à outils de l'OCDE sur la transformation numérique¹ (contribution des secteurs à forte intensité numérique à la croissance de la valeur ajoutée, par exemple)². Les tableaux de bord comme la Boîte à outils constituent un volet important de cet écosystème de mesure. La Boîte à outils, avec son outil d'exploration de données dénommé Data Kitchen, fournit aux décideurs et aux analystes des politiques des indicateurs clés pour chacune des dimensions du Cadre d'action intégré sur la transformation numérique (OCDE, 2019_[9]). Elle donne donc un aperçu complet des indicateurs disponibles ayant trait aux performances numériques des pays.

Divers efforts ont également été déployés pour mesurer différents aspects de la transformation numérique. Les échanges numériques en sont un exemple (Mourougane, 2021_[10]). Le Bureau central de la statistique des Pays-Bas a ainsi mis au point une méthodologie innovante qui associe les déclarations de taxe sur la valeur ajoutée (TVA) des entreprises et des technologies d'extraction de données à partir des pages web (*web scraping*) pour estimer les flux transfrontières



d'échanges numériques de biens (Meertens et al., 2020^[11]). Les données des cartes de crédit sont également utilisées pour mesurer les flux d'échanges numériques de biens comme de services (OCDE, 2019^[12] ; Cavallo, Mishra et Spilimbergo, 2022^[13]). Par ailleurs, l'OCDE a déployé des efforts considérables pour mesurer les évolutions de l'intelligence artificielle, en s'intéressant notamment aux brevets (Dernis et al., 2021^[14]), aux marques (Nakazato et Squicciarini, 2021^[15]) et aux compétences (Samek, Squicciarini et Cammeraat, 2021^[16]).

Malgré ces efforts, on manque d'indicateurs monétaires à jour, comparables à l'échelle internationale, sur la transformation numérique de l'économie

Les indicateurs d'adoption des technologies numériques par les ménages et les entreprises apportent des informations importantes sur le rythme et l'étendue de la transformation numérique. En revanche, ils ne donnent pas à voir l'évolution de la valeur monétaire de l'« économie numérique ». La conception et la mise en œuvre des tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique comblera partiellement ce manque à moyen terme. Dans l'intervalle, on ne dispose pas de données à jour et comparables à l'échelle internationale dans ce domaine.

À mesure que la transformation numérique gagne du terrain, force est de constater que l'« économie numérique » concerne tous les secteurs. Dans le même temps, le secteur des TIC reste au cœur de la transformation numérique et joue un rôle essentiel à l'appui de l'innovation numérique et de l'économie dans son ensemble. De précédents travaux de l'OCDE montrent qu'une hausse de la productivité multifactorielle du secteur des TIC peut avoir des incidences sur la croissance économique globale (Nicoletti et Scarpetta, 2003^[17]).

La contribution de la valeur ajoutée directement produite par le secteur des TIC dans les pays de l'OCDE a considérablement augmenté au cours des dix dernières années. Dans les pays couverts par la Base de données de l'OCDE pour l'analyse structurelle (STAN)³, le secteur des TIC représentait en moyenne 3.9 % de la valeur ajoutée totale en 2010. En 2019, sa part avait bondi de près de 40 %, pour atteindre en moyenne 5.4 % de la valeur ajoutée totale.

Les ordinateurs, logiciels et services en ligne constituent la clé de voûte de la transformation numérique et évoluent rapidement. Néanmoins, les délais de publication des statistiques officielles sont considérablement plus longs pour les taux de croissance sectoriels que pour les taux de croissance consolidés à l'échelle des pays. Or, les indicateurs en temps réel de la croissance économique du secteur des TIC peuvent aider les pouvoirs publics à en appréhender les performances actuelles et, par là même, étayer les futures politiques publiques.

Méthodologie de mesure en temps réel de la croissance du secteur des TIC

Les avancées récentes en matière de techniques statistiques ont permis d'améliorer les prévisions qui se fondent sur des sources de données non traditionnelles. Ce chapitre choisit d'utiliser ces techniques pour mesurer en temps réel la croissance économique du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE (prévisions immédiates), plutôt que d'établir des prévisions d'avenir. Les données Google Trends fournissent de précieuses informations sur les résultats économiques^{4,5}. L'OCDE les a utilisées pour établir des prévisions immédiates des échanges de services pendant la pandémie de COVID-19 (Jaax, Gonzales et Mourougane, 2021^[18]), ainsi que pour produire des estimations hebdomadaires des taux de croissance du produit intérieur (PIB) (Woloszko, 2020^[19]). Par ailleurs, l'Observatoire OCDE des politiques relatives à l'IA exploite régulièrement des sources de données innovantes pour mesurer l'utilisation et la diffusion des technologies liées à l'intelligence artificielle en temps réel⁶.

Une méthode de prévision immédiate rationnelle en termes de données

Le modèle employé dans le cadre de ce chapitre s'appuie sur la méthodologie innovante mise au point par l'OCDE et utilisée pour produire des estimations en temps réel des taux de croissance pour l'ensemble de l'économie (2020^[19]). Une version modifiée de la méthodologie est utilisée pour générer des prévisions immédiates des taux de croissance du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE. Pour ce faire, la procédure suit la définition du secteur des TIC formulée par l'Organisation (2002^[20]) comme « une combinaison de secteurs de fabrication et de services qui recueillent, transmettent et affichent des données et des informations par des moyens électroniques ». Selon cette définition, établie au niveau à deux chiffres de la CITI Rév. 4 (Horvát et Webb, 2020^[21]), le secteur des TIC comprend trois sous-divisions : Fabrication d'ordinateurs, d'articles électroniques et optiques (D26), Télécommunications (D61), Technologies de l'information et autres services d'information (D62-63/D62T63). Il convient de préciser que les valeurs présentées dans ce document peuvent différer de celles des offices statistiques nationaux car il arrive que certains pays se fondent sur d'autres définitions du secteur des TIC pour l'établissement de leur comptabilité nationale.

STAN⁷ fournit des données sur la valeur ajoutée du secteur des TIC dans la plupart des pays de l'OCDE. Pour quelques pays membres, ces données ne sont pas disponibles à l'heure actuelle dans la base (Australie, Chili, Colombie, Corée,

Costa Rica, Irlande, Israël, Japon, Luxembourg, Nouvelle-Zélande et Türkiye). Une fois qu'elles y figureront, il sera facile de les inclure dans le modèle de prévision immédiate.

Le modèle de prévision immédiate utilise seulement deux types de données en entrée : les taux de croissance du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE et les données Google Trends. Les taux de croissance sont calculés à l'aide des données issues de la base STAN. Plus précisément, les estimations annuelles de la valeur ajoutée des TIC en volumes⁸ tirées de la base servent au calcul des taux de croissance annuels du secteur pour 27 pays de l'OCDE, de 2010 à 2018 ou 2019, selon les pays.

Google Trends fournit deux types de données sur les recherches effectuées sur l'internet : des mots-clés et des catégories prédéfinies. Des mots-clés sont disponibles pour tout terme ayant fait l'objet de suffisamment de recherches en ligne. Les catégories prédéfinies rassemblent différentes recherches par mots-clés dans des groupes significatifs. Elles présentent l'avantage de pouvoir être directement comparées d'un pays à l'autre, ce qui n'est pas toujours le cas pour les mots-clés. De plus, certaines catégories sont spécifiquement liées au secteur des TIC. Le tableau 1.1 cite neuf catégories Google Trends correspondant à différentes composantes du secteur des TIC, bien qu'il en existe beaucoup d'autres.

Tableau 1.1. Mise en correspondance indicative des catégories Google Trends liées au secteur des TIC

Code de la CITI Rév. 4	Division de la CITI Rév. 4	Catégorie Google Trends	ID de catégorie Google Trends
D26	Fabrication d'ordinateurs, d'articles électroniques et optiques	Computer Servers (Serveurs d'ordinateurs)	728
		Consumer Electronics (Électronique grand public)	78
		Binoculars, Telescopes - Optical Devices (Jumelles optiques, télescopes – Appareils optiques)	1384
D61	Télécommunications	Telecom (Télécommunications)	13
		Mobile Phones (Téléphones portables)	390
		Communications Equipment (Équipements de communication)	385
D62-63/D62T63	Technologies de l'information et autres services d'information	Network Storage (Stockage réseau)	729
		Internet Software (Logiciels internet)	807
		Web Services (Services web)	302

Note : Ce tableau contient une liste non exhaustive de catégories Google Trends disponibles liées au secteur des TIC.

Sources : Base de données de l'OCDE pour l'analyse structurelle (STAN), <http://oe.cd/stan> ; Google Trends (consulté le 19 février 2024).

Google Trends fournit un indice temporel du volume de questions que les utilisateurs saisissent dans Google depuis un lieu géographique et à une heure donnés : l'indice de volume de recherche, ou *Search Volume Index* (SVI). Cet indice ne correspond pas au volume réel de recherche : ses valeurs sont exprimées sur une échelle allant de 0 à 100 d'après les volumes de recherche normalisés pour chaque mois et lieu d'une requête. Les prévisions immédiates présentées dans ce chapitre reposent sur un échantillon mensuel de requêtes SVI pour 1 131 catégories⁹. Ces dernières couvrant l'ensemble des pays de l'OCDE, entre janvier 2004 et décembre 2023 (inclus).

Tirer des informations utiles des données Google Trends

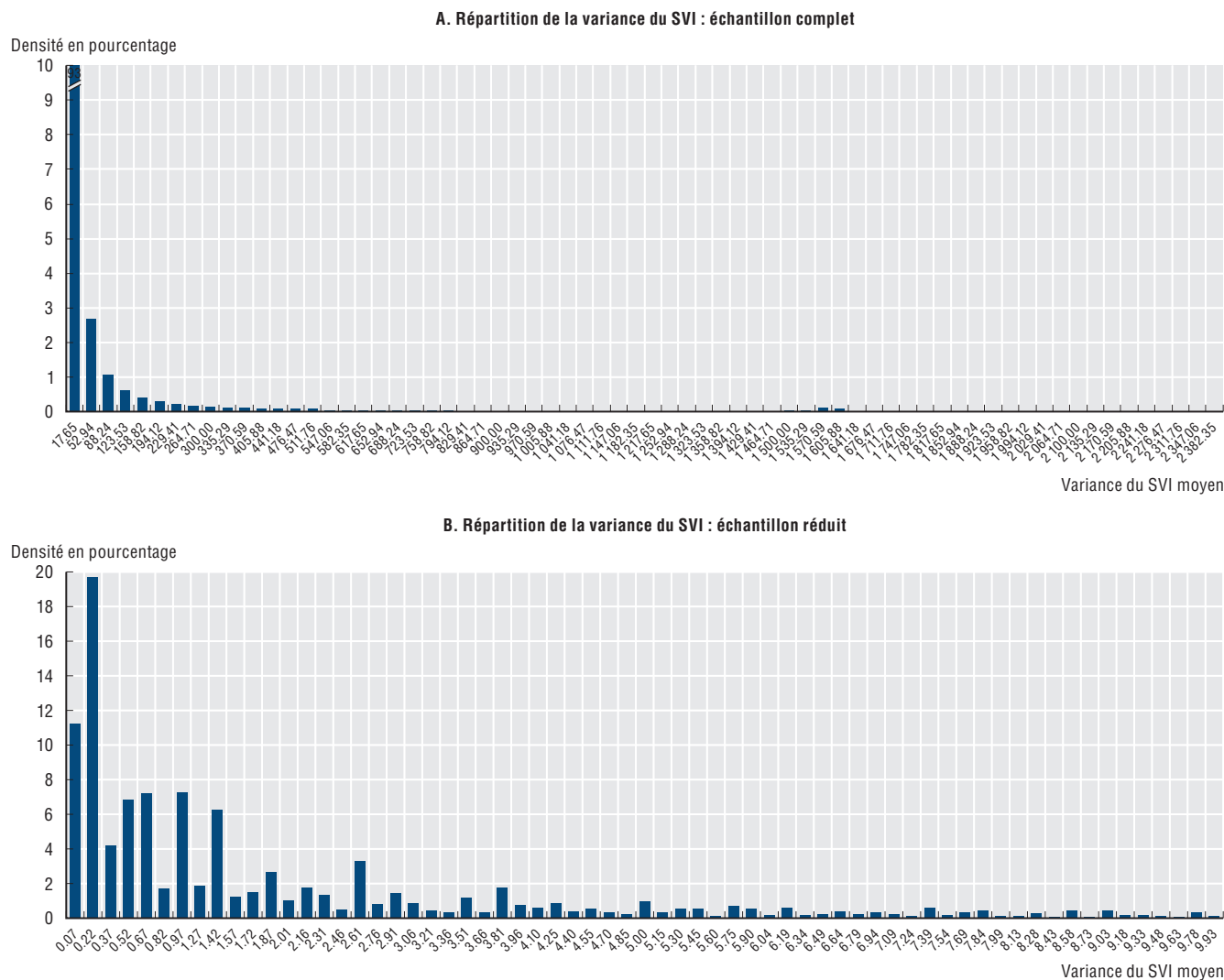
Les données Google Trends se sont révélées utiles dans différents domaines (dont l'économie, l'épidémiologie, ou la finance). Elles présentent toutefois des limites importantes. En premier lieu, pour protéger la confidentialité des recherches, Google fournit un SVI fondé sur un échantillon aléatoire de toutes les recherches effectuées dans chaque catégorie. Cela ne pose pas de problème pour les catégories populaires, l'échantillon étant suffisamment large pour être représentatif de l'ensemble des recherches qui en relèvent. En revanche, pour les catégories moins populaires, l'échantillon obtenu est plus limité et pourrait donc ne pas être représentatif de la population de recherches. Par conséquent, les SVI pour les catégories dont les univers de recherche comportent peu d'observations pourraient présenter une variance d'échantillonnage importante d'un prélèvement d'échantillon à l'autre (Combes et Bortoli, 2016_[22]).

L'un des moyens de repérer et de corriger le bruit consiste à prélever plusieurs échantillons de données Google Trends à différents moments. On définit alors un seuil au-delà duquel la variance des différents échantillons est considérée comme étant trop élevée. Dans ce chapitre, cinq échantillons Google Trends distincts ont été prélevés pour chaque catégorie dans chacun des pays, et l'on a calculé la variance correspondante. Après analyse de la variance observée dans l'ensemble de données, le seuil de variance maximum tolérée a été fixé à dix¹⁰. Par conséquent, toutes les combinaisons pays-catégorie présentant une variance supérieure à dix pour les cinq échantillons Google Trends ont été supprimées¹¹. Le graphique 1.1 donne à voir la répartition du bruit d'échantillonnage (variance du SVI) avant (partie A) et après



(partie B) la suppression des catégories présentant une variance supérieure à dix. Comme le montre le graphique, ce seuil permet d'éliminer la plupart des catégories particulièrement volatiles qui, à défaut, pourraient nuire à la précision du modèle de prévision immédiate¹².

Graphique 1.1. Répartition du bruit d'échantillonnage avant et après correction



Notes : SVI = Search Volume Index. Ce graphique présente la distribution cumulative de la variance sur cinq tirages de Google Trends (c'est-à-dire le « bruit de l'échantillon »). Le panel A présente les résultats pour l'ensemble de l'échantillon, tandis que le panel B présente les observations dont la variance sur les cinq tirages est inférieure ou égale à dix.

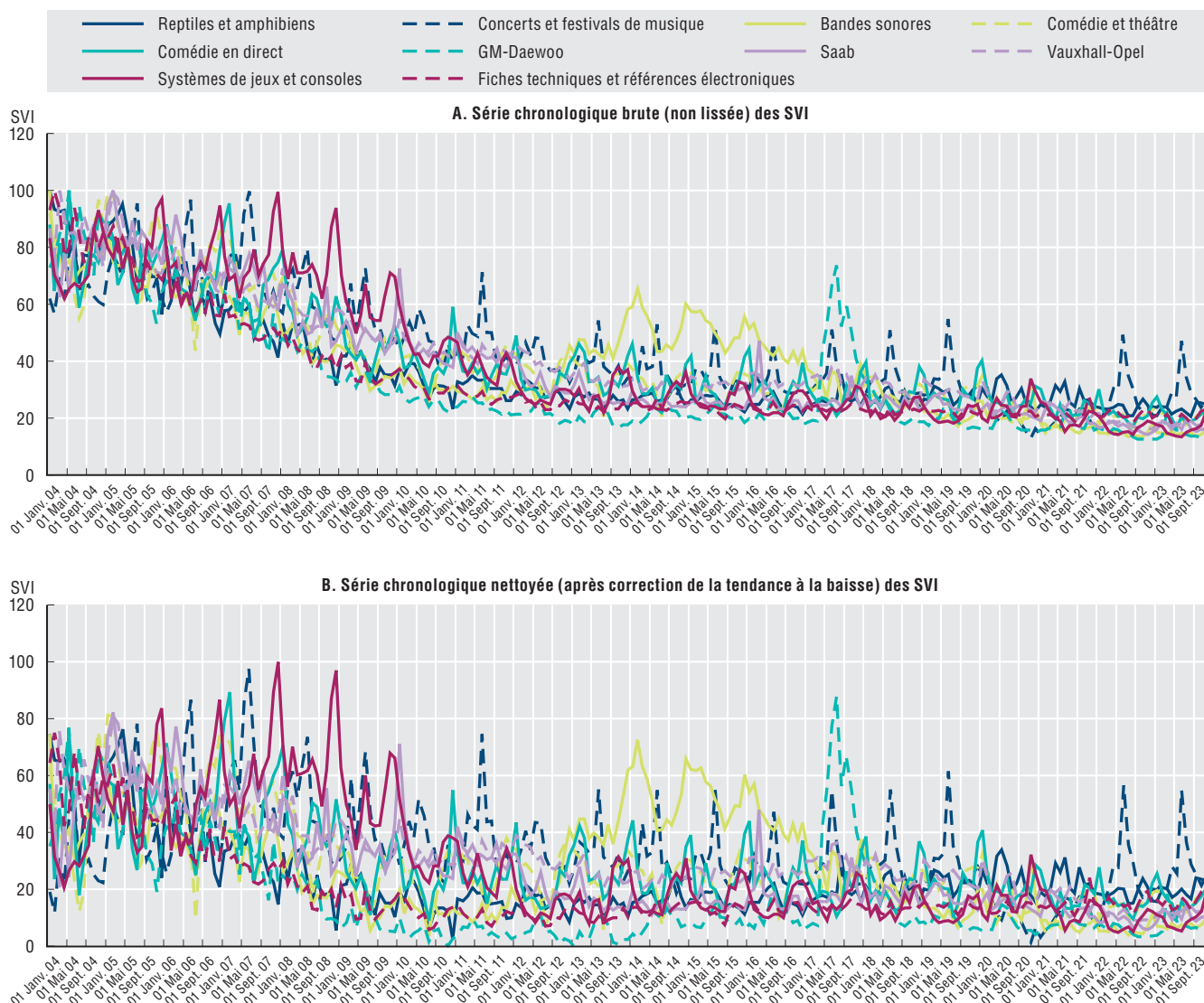
Source : Calculs des auteurs d'après les données Google Trends (consulté le 19 février 2024).

StatLink <https://stat.link/1u28of>

Le deuxième écueil lié à Google Trends tient à la tendance à la baisse observée pour la quasi-totalité des SVI. Celle-ci s'explique par le nombre croissant d'utilisateurs de Google depuis 2004, puisqu'il s'agit là du dénominateur utilisé dans la formule employée pour calculer les SVI. Ce biais semble toutefois s'estomper à partir de 2010, le nombre d'utilisateurs de Google ayant augmenté moins rapidement dans les années qui ont suivi. Le graphique 1.2.A donne à voir les SVI pour dix catégories Google Trends choisies de manière aléatoire aux Pays-Bas, entre 2004 et 2023. L'évolution à la baisse non linéaire, qui ne signifie pas que ces catégories ont perdu en popularité, apparaît clairement.

Pour corriger cette tendance, un lissage LOWESS (*locally weighted scatterplot smoothing*) non paramétrique a été appliqué aux données afin de procéder à une régression pondérée localement. La procédure est généralement utilisée pour lisser la saisonnalité des données Google Trends (Choi et Varian, 2012^[23]). Dans ce chapitre, on applique un lissage LOWESS pour corriger l'évolution à la baisse des SVI (graphique 1.2.B).

Graphique 1.2. Séries chronologiques brute et nettoyée des SVI pour dix catégories Google Trends aux Pays-Bas, 2004-23



Notes : SVI = Search Volume Index. Ce graphique illustre le biais non linéaire inhérent à toutes les séries Google Trends, en montrant l'évolution des SVIs pour 10 catégories de Google Trends (panel A). Ce biais à la baisse a été corrigé à l'aide d'un lisseur LOWESS sur la série SVI moyenne rééchantillonnée de 0 à 100 (panel B).

Source : Calculs des auteurs d'après les données Google Trends (consulté le 19 février 2024).

StatLink <https://stat.link/i9nxvz>

Un réseau neuronal pour mesurer la croissance du secteur des TIC en temps réel

La procédure de prévision immédiate utilisée dans ce chapitre s'appuie sur un algorithme d'apprentissage automatique pour déterminer, à partir des données Google Trends, la croissance du secteur des TIC dans chaque pays. Compte tenu des volumes considérables de données renvoyées par les recherches effectuées sur Google, les relations complexes entre les nombreuses caractéristiques des données peuvent être modélées grâce à l'apprentissage automatique. Cette technique est mieux adaptée que les techniques statistiques et économétriques traditionnelles pour détecter et modéliser les non-linéarités (Woloszko, 2020_[19]).

Le modèle utilisé dans ce chapitre pour établir des prévisions immédiates de la croissance du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE est un réseau neuronal artificiel¹³. Ce type de réseau est basé sur une modélisation probabiliste simplifiée de neurones organiques. Le modèle d'apprentissage automatique est plus exactement un perceptron multicouche. Dans ce cas, la connexion entre les couches est établie dans une seule direction, en évitant les boucles au sein du réseau.



Le modèle utilisé pour calculer les prévisions immédiates comprend deux couches cachées de 2 400 et 800 neurones. Pour l'entraîner, on utilise la méthode d'optimisation basée sur le gradient stochastique mise au point par Kingma et Ba (2015^[24]). Le choix de cette méthode pour la procédure de prévision immédiate utilisée dans le présent chapitre a été dicté par son efficacité en termes de calcul. Une fonction d'activation ReLU (pour *rectified linear unit*, ou unité linéaire rectifiée) est employée pour établir les connexions entre les nœuds du modèle. La fonction est activée – et les connexions sont établies – uniquement lorsqu'un seuil est dépassé. L'une des principales forces de la méthode d'optimisation basée sur le gradient stochastique de ce choix de modélisation tient à son efficacité en termes de calcul.

Une méthode de modélisation agnostique

Le choix de recourir à des techniques d'apprentissage automatique plutôt qu'à des méthodes statistiques et économétriques plus classiques a été guidé par la capacité des réseaux neuronaux à identifier des relations complexes, souvent non linéaires, entre les variables. Ce principe a dicté chaque décision de modélisation prise dans le cadre de ce chapitre. Trois de ces choix, détaillés ci-après, jouent un rôle central dans les performances du modèle.

Le premier tient à la sélection des variables à intégrer au modèle de prévision immédiate. Google Trends propose 1 131 catégories prédéfinies qui sont comparables à l'échelle internationale. Plutôt que de fonder le choix des variables à utiliser sur l'intuition et, en définitive, sur une décision arbitraire, toutes les catégories Google Trends ont été incluses. L'optimisation du réseau neuronal détermine alors les variables et les connexions pertinentes pour mesurer en temps réel la croissance du secteur des TIC. Cette décision de modélisation présente un inconvénient : elle ne permet pas d'interpréter la relation entre des catégories particulières et les taux de croissance du secteur des TIC. Toutefois, le principal objectif du modèle de prévision immédiate est de mesurer en temps réel, avec la plus grande précision possible, la croissance du secteur des TIC, et non pas de comprendre l'impact des recherches effectuées dans Google sur sa croissance.

Le deuxième choix de modélisation concerne les hyperparamètres du réseau. Il s'agit des variables définies avant de commencer l'entraînement du modèle¹⁴. Les paramètres correspondent quant à eux aux estimations apprises par le modèle. Là encore, la méthodologie choisie ne devait pas reposer sur l'intuition. C'est pourquoi la recherche des hyperparamètres a été automatisée à l'aide d'une fonction de recherche par grille. La racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM) a été utilisée comme paramètre de décision pour la recherche par grille dans la procédure. Le nombre de couches, le taux d'apprentissage et la fonction d'activation ont tous été choisis à l'aide de la recherche automatisée des hyperparamètres.

Le troisième choix concerne le calcul des erreurs types. En suivant ce principe agnostique, les erreurs types sont calculées à l'aide d'une procédure « bootstrap » qui ne repose sur aucune hypothèse spécifique relative à la distribution des données. À cet effet, 2 000 échantillons aléatoires avec remplacement sont prélevés. Le modèle est ensuite réentraîné en utilisant chacun des nouveaux échantillons. Les erreurs types sont alors classées afin de conserver les intervalles de confiance à 90 %.

Évaluation des performances des prévisions immédiates

Pour entraîner et évaluer le réseau neuronal artificiel, les taux de croissance du secteur des TIC sont répartis dans deux échantillons différents : un échantillon d'entraînement et un échantillon de validation. Le premier comprend les données de 2011 à 2018. Les données pour la dernière année disponible dans la base STAN (soit 2019) sont utilisées pour l'échantillon de validation.

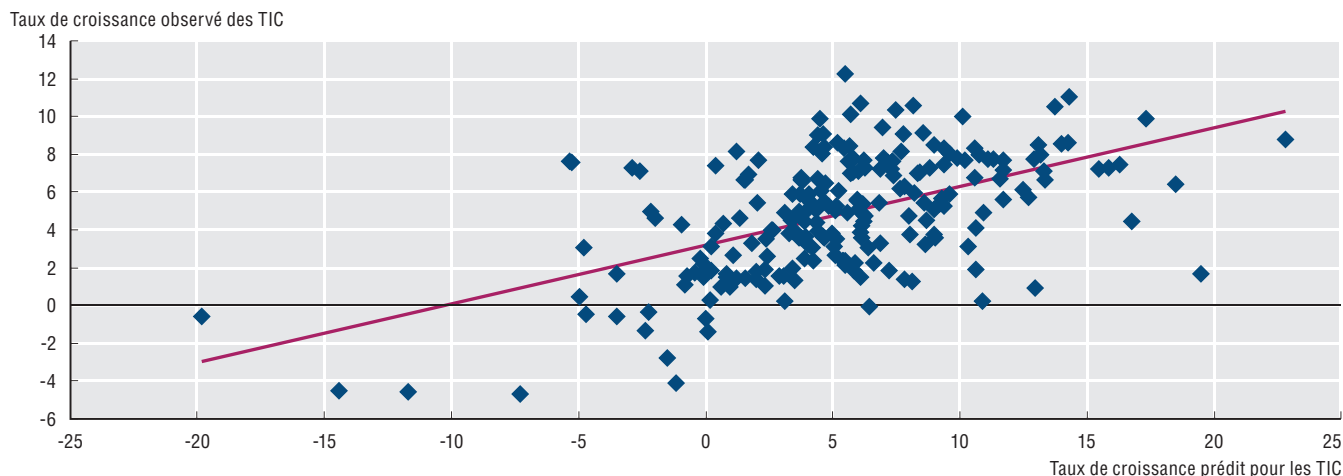
Les performances du réseau neuronal artificiel sont évaluées à l'aide de la REQM des échantillons d'entraînement et de validation. La REQM peut être appréhendée comme une mesure de la distance qui sépare les valeurs prévues par le réseau neuronal et les valeurs observées à partir des données. La REQM est de 2.9 pour l'échantillon d'entraînement, et de 2.7 pour l'échantillon de validation. Ces valeurs peuvent être comparées à l'écart type très élevé des taux de croissance observés (5.4 %)¹⁵.

Le graphique 1.3 donne à voir les taux de croissance du secteur des TIC prévus par le modèle par rapport aux taux de croissance observés. On y voit une corrélation claire entre les taux de croissance observés et les taux prévus (54 %) ; elle est statistiquement significative au seuil de 1 %. Cette forte corrélation positive va dans le sens des valeurs de REQM obtenues.

En comparaison, un modèle autorégressif standard AR (1) utilisant uniquement les données historiques de la balance des opérations courantes pour établir les prévisions de croissance du secteur des TIC pour la prochaine période donne une REQM de 4.82. Par conséquent, les prévisions élaborées à partir des données Google Trends sont deux fois plus précises que celles fondées sur un modèle autorégressif à retard simple.

Graphique 1.3. Le modèle de prévision immédiate est performant

Corrélation entre les taux de croissance observés et prévus du secteur des TIC, 2011-19



Notes : TIC = Technologies de l'information et des communications. Le coefficient de corrélation est de 0.54, significatif à 1 %.

Source : Calculs des auteurs, d'après la Base de données STAN de l'OCDE et les données Google Trends (consulté le 19 février 2024). StatLink contient plus de données.

StatLink  <https://stat.link/5uuvp9>

Les bons résultats du réseau neuronal pourraient être dus à une saisonnalité commune entre les données Google Trends et les taux de croissance du secteur des TIC. Par exemple, on pourrait émettre l'hypothèse que Google Trends reflète les performances économiques procycliques du secteur des TIC. Toutefois, le réseau neuronal utilisé pour ce chapitre laisse à voir, plutôt qu'une composante cyclique, un certain nombre d'interactions non linéaires plus complexes entre les données Google Trends et la croissance du secteur des TIC. De fait, la corrélation entre les données Google Trends et les taux de croissance du secteur des TIC est négligeable (-2.8 %). Un comportement cyclique commun des recherches dans Google et des taux de croissance n'explique donc pas les prévisions du réseau neuronal.

Perspectives de croissance du secteur des TIC dans les différents pays

Le modèle de prévision immédiate produit des mesures des performances économiques pour toutes les années pour lesquelles on ne dispose pas de données observées. Pour la plupart des pays, les années 2020 à 2023 sont concernées. Dans un nombre limité de cas, la Base de données STAN de l'OCDE ne contient des données que jusqu'en 2018. Le modèle est utilisé mesure alors la croissance du secteur des TIC entre 2019 et 2023.

Le modèle de prévision immédiate produit plus exactement des estimations ponctuelles des taux de croissance du secteur des TIC. Elles sont utilisées, dans ce chapitre, pour analyser les performances économiques du secteur dans les différents pays de l'OCDE. Outre les estimations ponctuelles, on trouve également ici des intervalles de confiance à 90 %, dont il convient de tenir compte dès lors que des estimations ponctuelles sont présentées.

Estimations actuelles de la croissance du secteur des TIC

Les données obtenues à l'aide du modèle sont particulièrement utiles à deux égards. D'une part, elles permettent d'étendre l'analyse de l'ensemble de la période en intégrant les performances les plus récentes. Selon les pays, les données contenues dans la base STAN vont jusqu'en 2018 ou 2019. Sans les prévisions immédiates, on ne pourrait pas analyser les données des trois ou quatre dernières années. D'autre part, les prévisions immédiates renseignent sur les performances actuelles du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE et permettent aux décideurs de tirer rapidement des conclusions sur l'efficacité des politiques mises en place dans ce domaine.

Le graphique 1.4 présente les taux de croissance observés et ceux issus du modèle de prévision immédiate pour tous les pays de l'OCDE pour lesquels on dispose de l'ensemble des données requises¹⁶. Les résultats montrent que la pandémie de COVID-19 a marqué la fin d'une ère de progression soutenue des taux de croissance qui avait débuté peu après la crise financière mondiale. Néanmoins, bien que les taux de croissance aient marqué le pas, l'essor du secteur reste solide : en 2020, le taux de croissance moyen du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE s'établissait en effet à 6.6 %. En 2021, dans la plupart des pays de l'OCDE, l'impact de la crise du COVID-19 n'est plus visible, et l'on atteint en 2023 le taux de croissance le plus élevé jamais enregistré. En revanche, les résultats sont à nuancer lorsque l'on observe

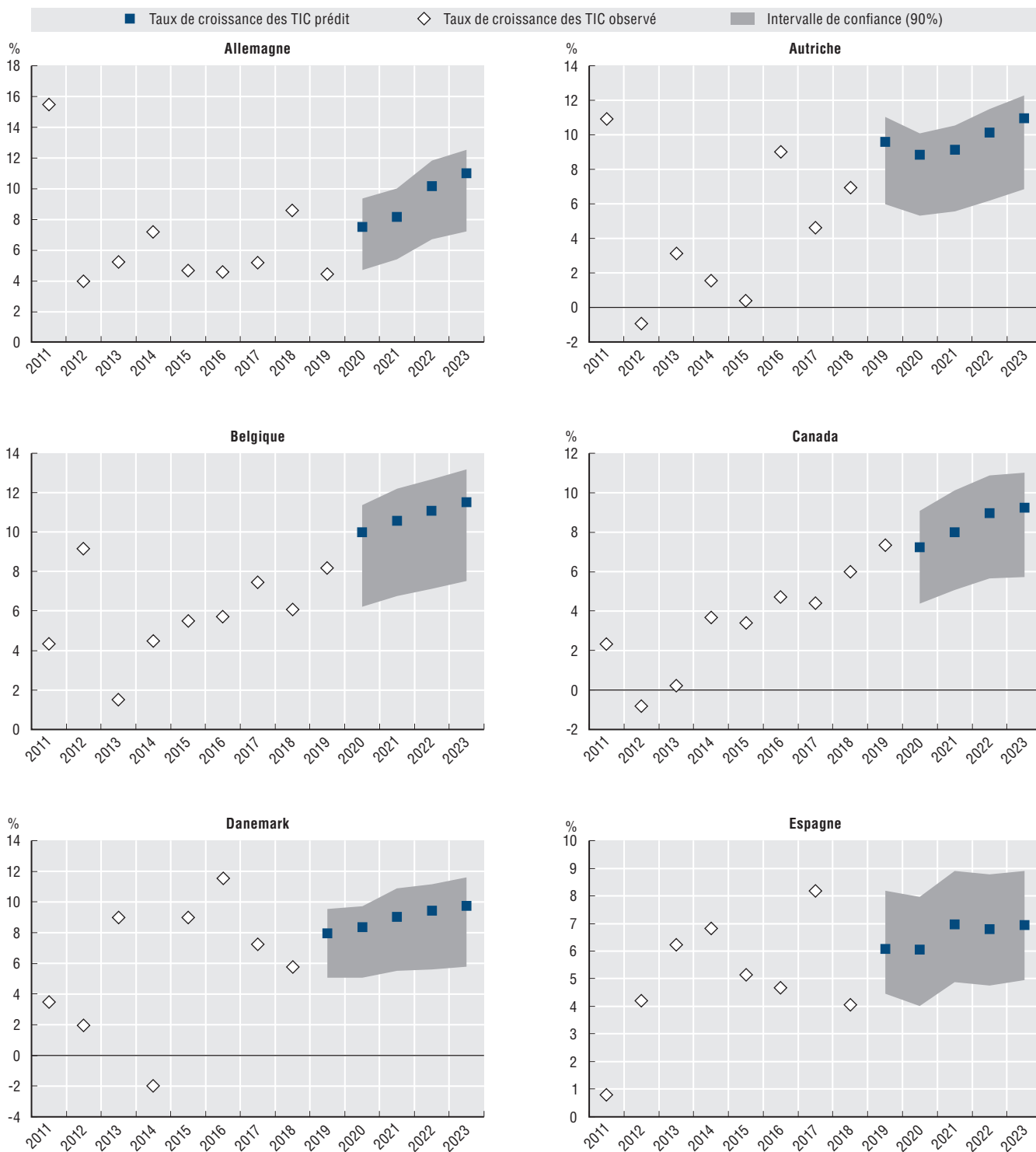
1. PERSPECTIVES DE CROISSANCE DU SECTEUR DES TIC



les estimations ponctuelles dans les intervalles de confiance respectifs¹⁷. Pour autant, même en tenant compte des intervalles de confiance, il ressort des prévisions immédiates que la crise du COVID-19 n'a eu qu'un impact modéré sur le secteur des TIC.

Graphique 1.4. Le secteur des TIC résiste face aux vents contraires de l'économie

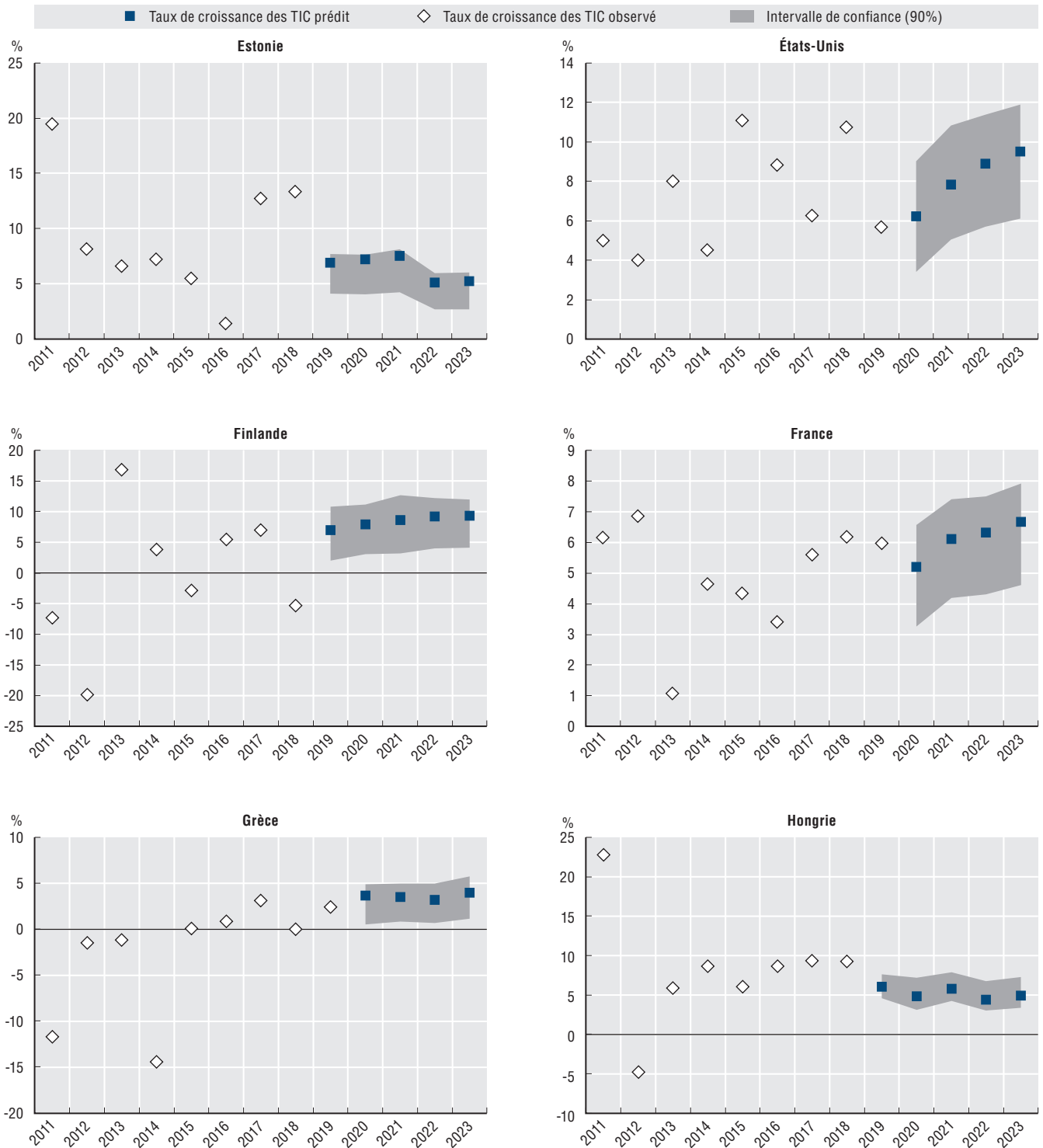
Taux de croissance observés et prévus du secteur des TIC, 2011-23



1. PERSPECTIVES DE CROISSANCE DU SECTEUR DES TIC

Graphique 1.4. Le secteur des TIC résiste face aux vents contraires de l'économie (suite)

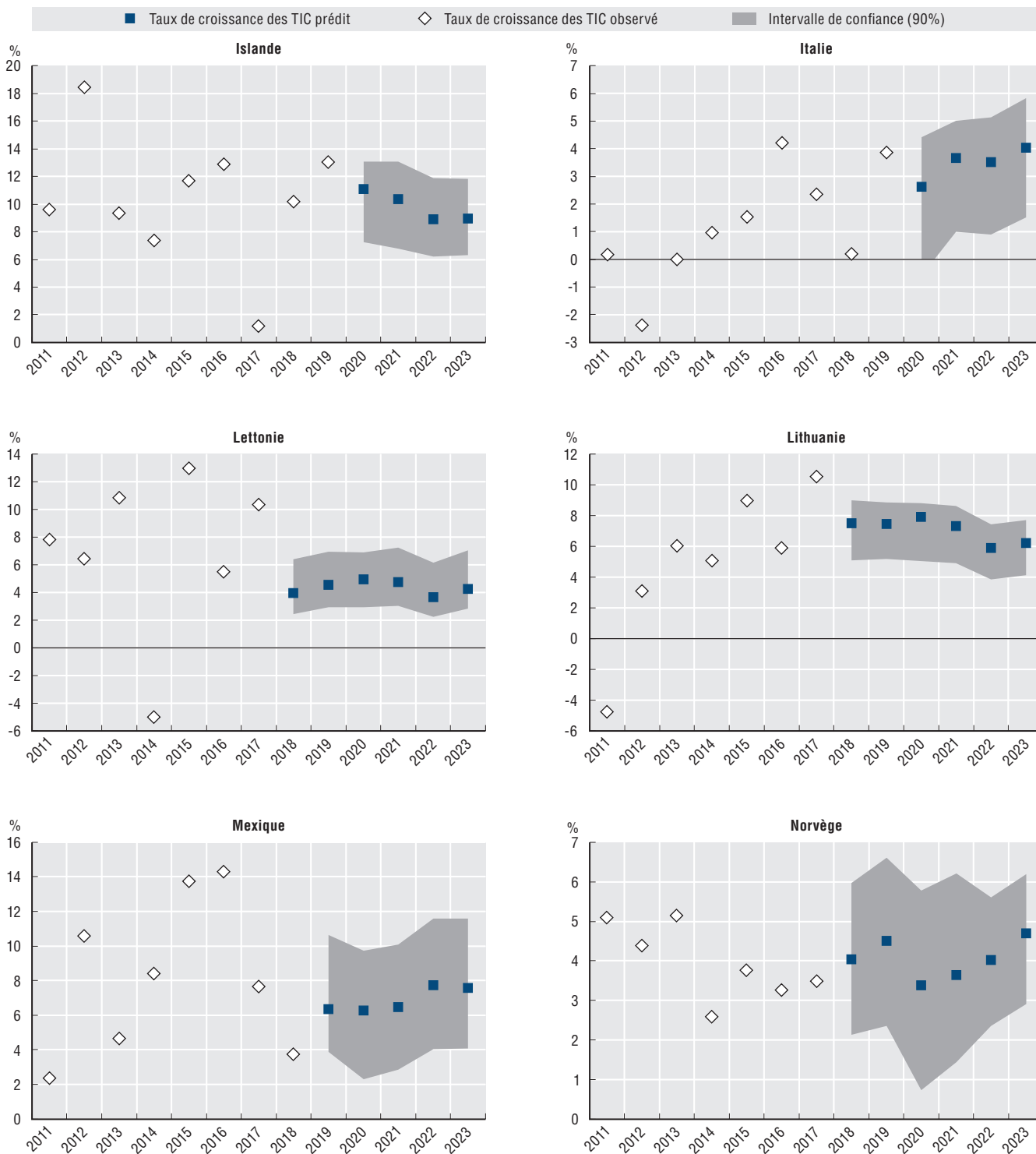
Taux de croissance observés et prévus du secteur des TIC, 2011-23





Graphique 1.4. Le secteur des TIC résiste face aux vents contraires de l'économie (suite)

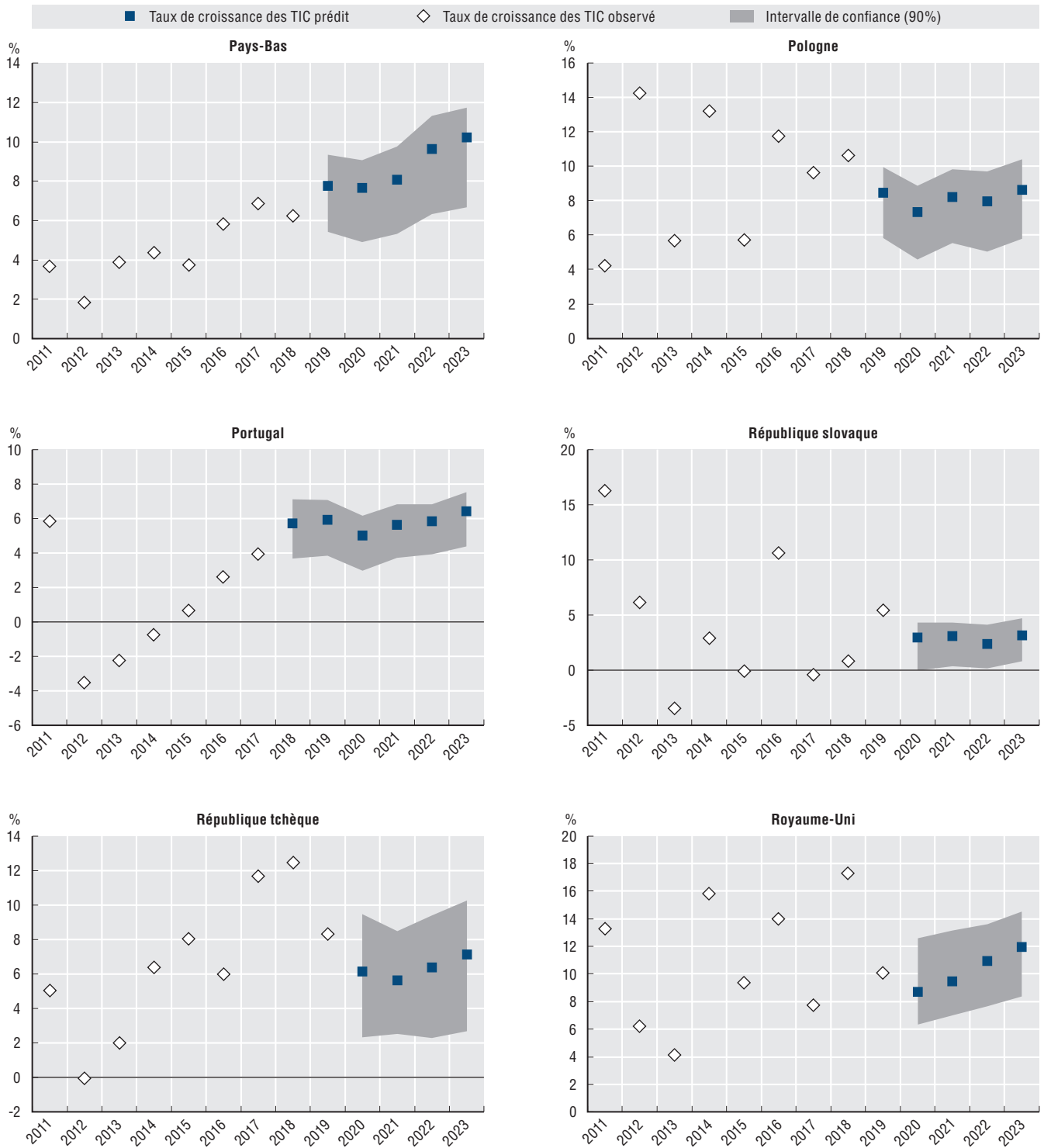
Taux de croissance observés et prévus du secteur des TIC, 2011-23



1. PERSPECTIVES DE CROISSANCE DU SECTEUR DES TIC

Graphique 1.4. Le secteur des TIC résiste face aux vents contraires de l'économie (suite)

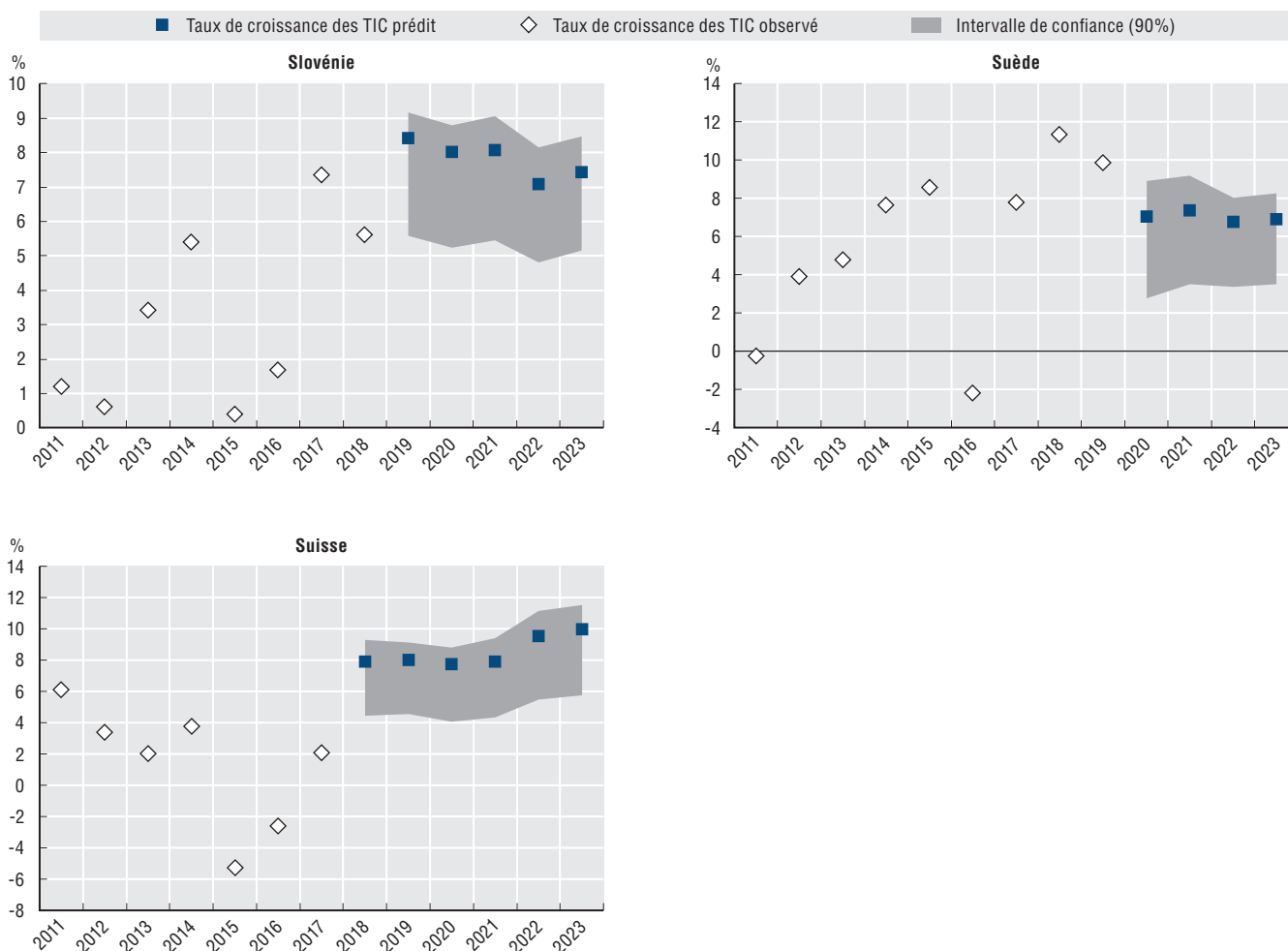
Taux de croissance observés et prévus du secteur des TIC, 2011-23





Graphique 1.4. Le secteur des TIC résiste face aux vents contraires de l'économie (suite)

Taux de croissance observés et prévus du secteur des TIC, 2011-23



Notes : TIC = Technologies de l'information et des communications. Ce graphique présente les taux de croissance observés et prévus du secteur des TIC dans 27 pays de l'OCDE de 2011 à 2023 dans leurs intervalles de confiance de 90 %. En fonction des pays, les prédictions immédiates commencent en 2018 ou ultérieurement. Les données historiques relatives aux taux de croissance issues de la Base de données STAN de l'OCDE (« Taux de croissance des TIC observé ») sont représentées par des diamants blancs, tandis que les taux de croissance prévus du secteur des TIC (« Taux de croissance des TIC prédit ») apparaissent avec des carrés bleus.

Source : Calculs des auteurs, d'après la Base de données STAN de l'OCDE et les données Google Trends (consulté le 19 février 2024).

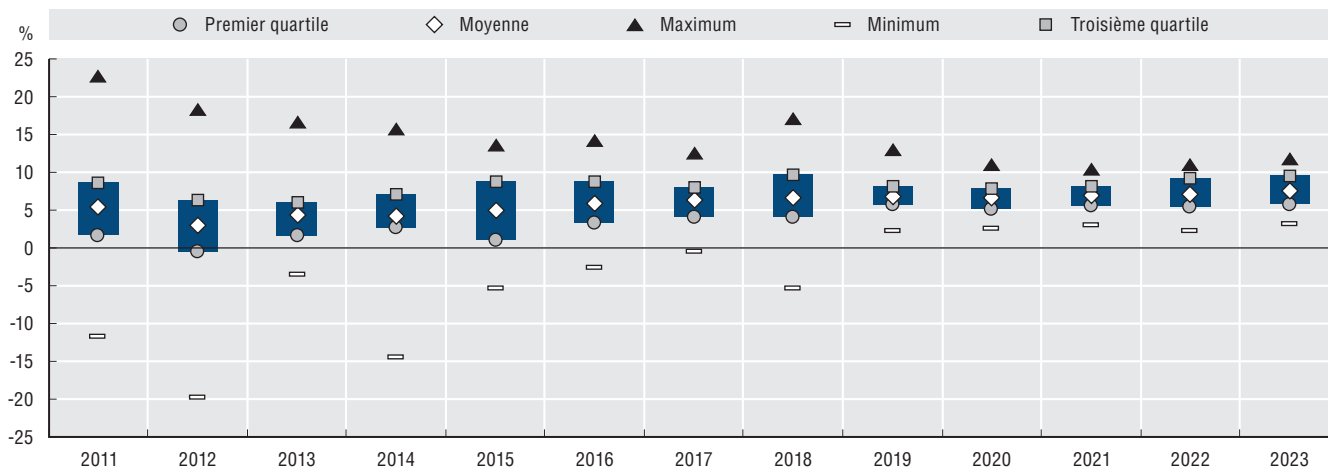
StatLink <https://stat.link/ncaiuv>

Les taux de croissance moyens confirment les évolutions observées au niveau des pays. Le graphique 1.5 illustre les taux de croissance moyens du secteur des TIC pour les pays de l'OCDE entre 2011 et 2023. Les taux moyens à partir de 2011 sont ensuite calculés à l'aide des données observées issues de la base STAN. En fonction des pays, les taux moyens sont calculés sur la base des taux de croissance obtenus à l'aide du modèle de prévision immédiate à partir de 2018 (ou ultérieurement).

Le graphique 1.5 confirme le formidable dynamisme du secteur des TIC¹⁸. Si la croissance moyenne a décliné pendant la crise financière mondiale, elle est restée positive tout au long de la période. Après la crise financière, le taux de croissance moyen a cru de manière constante, année après année, sauf au début de la pandémie de COVID-19, où il a légèrement diminué. Le secteur des TIC a ensuite renoué avec la croissance, atteignant en 2023 le taux moyen le plus élevé sur l'ensemble de la période analysée.

Graphique 1.5. Le secteur des TIC fait preuve d'un dynamisme remarquable

Répartition des taux de croissance des TIC (observés et prévus), 2011-23



Source : Calculs des auteurs, d'après la Base de données STAN de l'OCDE et les données Google Trends (consulté le 19 février 2024). StatLink contient plus de données.

StatLink <https://stat.link/se9jam>

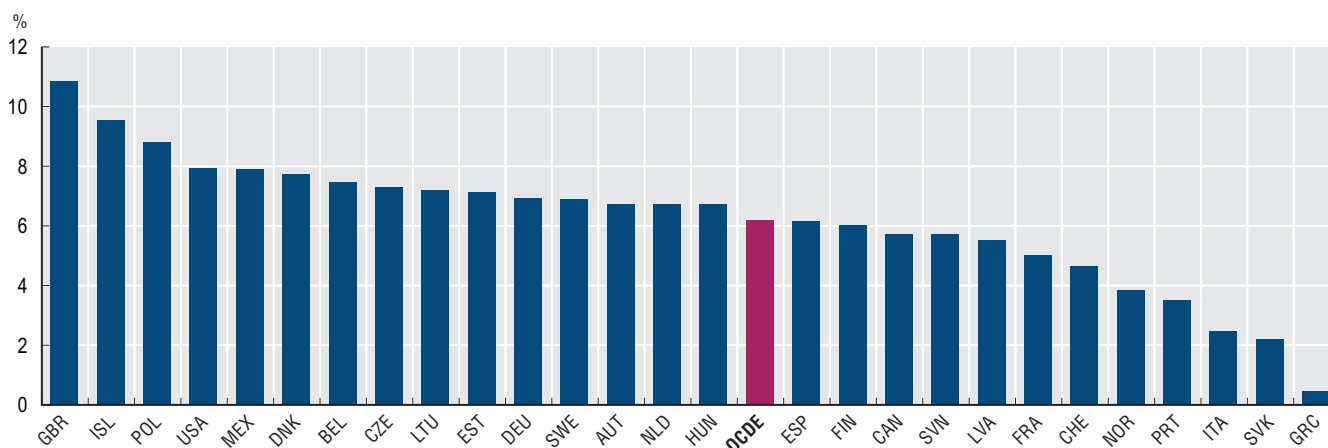
Au cours des dix dernières années, le secteur des TIC a progressé dans la plupart des pays de l'OCDE, mais à des degrés variables

Le dynamisme du secteur des TIC s'est également traduit par des taux de croissance positifs au niveau national. Le taux de croissance moyen au cours de la décennie passée (2013-23) est positif dans tous les pays (graphique 1.6). Pour autant, malgré la bonne tenue générale du secteur, un écart conséquent subsiste entre les pays enregistrant les taux de croissance les plus élevés et celles affichant les taux les plus faibles. Cet écart s'établit en effet à plus de 10 points de pourcentage.

D'après les données de la Base de données STAN, les prévisions immédiates calculées dans le présent chapitre et les prévisions immédiates pour l'ensemble de l'économie issues de l'outil de suivi hebdomadaire de l'OCDE (OCDE, 2023^[25]), le secteur des TIC a enregistré au cours de la dernière décennie (de janvier 2013 à avril 2023) une progression presque trois fois plus rapide que celle de l'ensemble de l'économie dans les pays de l'OCDE. Pendant cette période, sa croissance moyenne a dépassé 8 % dans trois pays : l'Islande, la Pologne et le Royaume-Uni. Les deux pays en tête de peloton – l'Islande et le Royaume-Uni – ont affiché des taux de croissance moyens supérieurs à 9 % pendant la période considérée. À l'autre extrémité du spectre, la Grèce, l'Italie et la République slovaque ont enregistré les taux moyens inférieurs à 3 %.

Graphique 1.6. Les taux de croissance des TIC varient considérablement entre les pays

Taux de croissance moyens du secteur des TIC (observés et prévus), 2013-23



Note : Ce graphique présente les taux de croissance moyens observés et prévus des TIC par pays.

Source : Calculs des auteurs, d'après la Base de données STAN de l'OCDE et les données Google Trends (consulté le 19 février 2024). StatLink contient plus de données.

StatLink <https://stat.link/rp9di8>

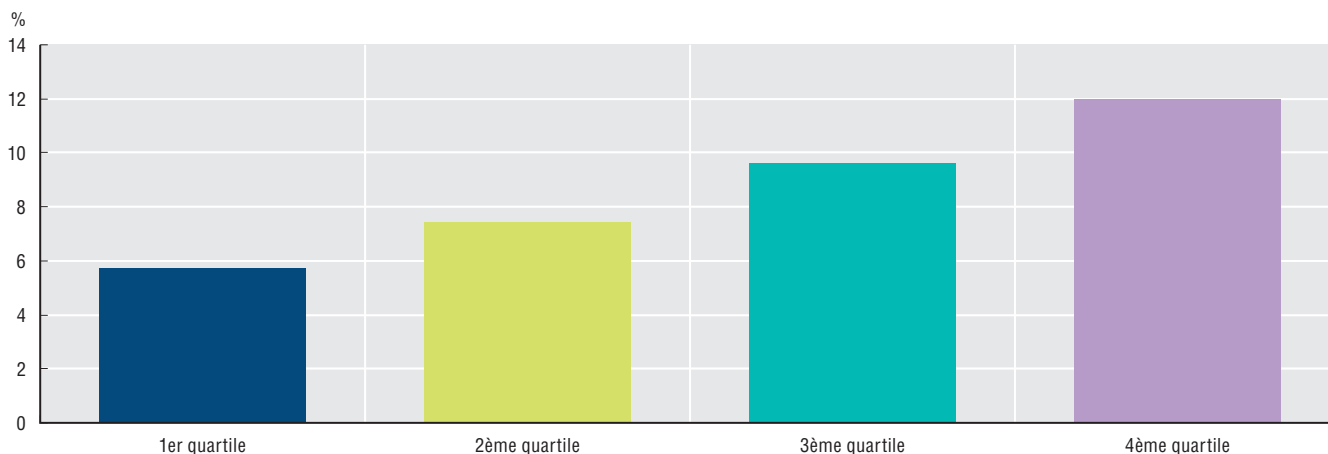


Les taux de croissance du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE tendent néanmoins à converger

En 2023, les pays affichant la plus forte croissance du secteur des TIC (25 % supérieurs, ou quatrième quartile) avaient un taux de croissance moyen du secteur des TIC de 11.9 %. La même année, les pays affichant les taux de croissance les plus faibles du secteur des TIC (25 % inférieurs, ou premier quartile) avaient un taux de croissance moyen de 5.7 % (graphique 1.7).

Graphique 1.7. Six points de pourcentage séparent les pays leaders des moins performants dans le secteur des TIC

Taux de croissance prévus pour le secteur des TIC par quartile, 2023



Note : Ce graphique présente la distribution des taux de croissance prévus pour les TIC en 2023, par quartile.

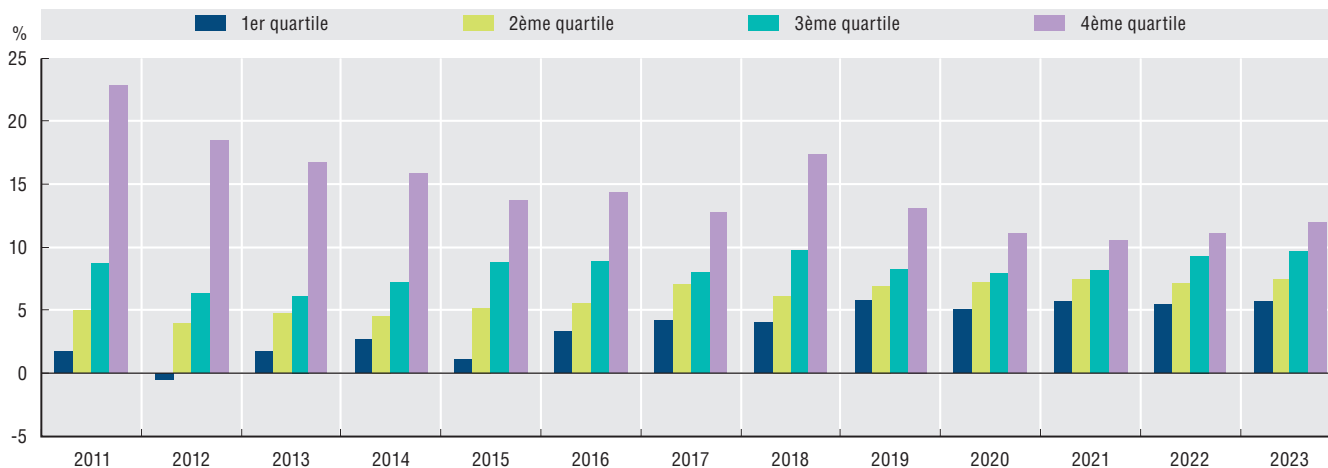
Source : Calculs des auteurs, d'après la Base de données STAN de l'OCDE et les données Google Trends (consulté le 19 février 2024). StatLink contient plus de données.

StatLink <https://stat.link/ls5z31>

L'écart important entre les pays des premier et quatrième quartiles s'est toutefois réduit au fil du temps (graphique 1.8). En 2011, le taux de croissance moyen du quatrième quartile treize fois supérieur au taux moyen du premier quartile. En 2016, le taux moyen du quatrième quartile était quatre fois supérieur à celui du premier quartile. En 2023, la croissance moyenne du quatrième quartile n'était plus que deux fois supérieure à celle du premier quartile. Les écarts de taux de croissance du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE ont donc continué de se rétrécir.

Graphique 1.8. Les taux de croissance du secteur des TIC convergent entre les pays

Taux de croissance moyens du secteur des TIC (observés et prévus) par quartile, 2011-23



Notes : Ce graphique présente la distribution des taux de croissance des TIC observés et prévus de 2011 à 2023 par quartile. Les valeurs de 2011 à 2018 (au plus tôt) proviennent de la Base de données STAN en fonction du pays, tandis que celles de 2019 (ou 2020) à 2023 sont des estimations prévisionnelles.

Source : Calculs des auteurs, d'après la Base de données STAN de l'OCDE et les données Google Trends (consulté le 19 février 2024). StatLink contient plus de données.

StatLink <https://stat.link/3vnbo2>

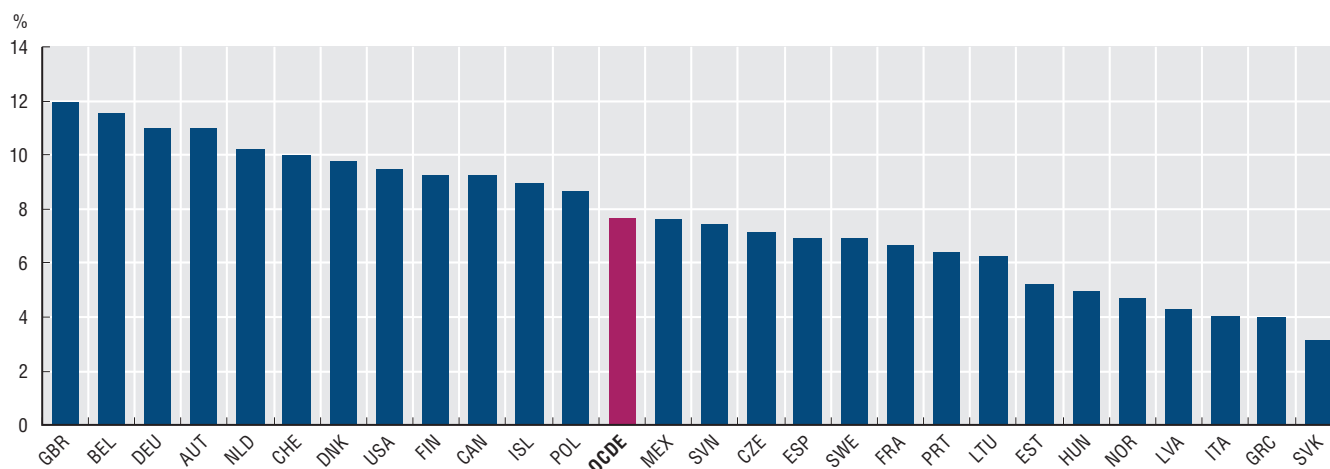
Le secteur des TIC a enregistré une croissance vigoureuse dans tous les pays de l'OCDE en 2023

Les prévisions immédiates permettent de produire une analyse à jour de la croissance économique du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE. Elles montrent en premier lieu que le secteur des TIC est vigoureux. Si entre 2011 et 2022, la croissance s'élevait en moyenne à 5,7 %, elle a atteint 7,6 % en 2023.

Dans de nombreux pays de l'OCDE, 2023 a été une année importante pour la croissance du secteur. Dix pays ont enregistré des taux de croissance supérieurs à 9 % : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, les États-Unis, la Finlande, les Pays-Bas, le Royaume-Uni et la Suisse. En Belgique et au Royaume-Uni, ils ont même dépassé 11 %. Même dans les pays affichant les taux les plus faibles, à l'instar de la Grèce et de la République slovaque, elle était malgré tout supérieure à 3 %.

Graphique 1.9. La croissance du secteur des TIC est forte dans tous les pays

Taux de croissance prévus du secteur des TIC, 2023



Source : Calculs des auteurs d'après la Base de données STAN de l'OCDE et des données de Google Trends (consulté le 19 février 2024).

StatLink <https://stat.link/6ohkvz>

Il est essentiel de mesurer le secteur des TIC pour en évaluer les performances et concevoir des politiques rationnelles

La nécessité de concevoir des politiques fondées sur des données probantes va croissant à mesure que la transformation numérique s'intensifie et a des incidences sociétales et économiques de plus en plus profondes. Il est essentiel d'améliorer la mesure à bref délai de la transformation numérique de l'économie afin d'élaborer des politiques publiques propres à soutenir une économie et une société numériques innovantes et inclusives, et en évaluer l'efficacité. Les statistiques disponibles sur l'adoption des technologies numériques par les entreprises et les ménages apportent certes des éclairages importants. Cependant, elles ne permettent pas de mesurer l'évolution de la valeur monétaire de l'économie numérique. Les tableaux des ressources et des emplois en matière de numérique apporteront des informations solides dans ce domaine à moyen terme. En attendant, on manque de données actuelles, comparables à l'échelle internationale, sur l'évolution de l'économie numérique.

L'« économie numérique » touche désormais tous les secteurs de l'économie. Celui des TIC n'en reste pas moins au cœur de la transformation numérique et joue un rôle essentiel dans la poursuite de l'innovation numérique. Lorsqu'ils conçoivent les cadres d'action dans le domaine du numérique, les pouvoirs publics se concentrent généralement sur les règles, les réglementations, les politiques et les stratégies liées au secteur des TIC, qui couvre, entre autres, l'informatique, l'électronique, les télécommunications et les technologies de l'information. Des données à jour sur les performances du secteur sont essentielles pour évaluer l'efficacité de ces outils. C'est pourquoi le présent chapitre utilise des données relatives au secteur des TIC en complément des statistiques officielles. S'appuyant sur un modèle de prévision immédiate qui exploite les données Google Trends et les techniques d'apprentissage automatique, il fournit aux pouvoirs publics et aux décideurs des données actuelles et comparables sur la croissance économique du secteur des TIC dans les pays de l'OCDE.



Le modèle de prévision immédiate utilisé dans ce chapitre pourrait également être utilisé pour mesurer en temps réel les taux de croissance d'autres secteurs, au-delà du secteur « de base » des TIC. Des estimations en temps réel des taux de croissance de tous les secteurs à forte intensité numérique permettraient par exemple de dresser un panorama plus complet de la croissance des composantes numériques de l'économie. Sans compter que des prévisions immédiates des taux de croissance de tous les secteurs donneraient aux décideurs un aperçu en temps réel des performances des secteurs à forte intensité numérique par rapport aux secteurs relativement moins tournés vers le numérique.

Références

- Bureau of Economic Analysis (2018), "Defining and measuring the digital economy", Bureau of Economic Analysis, US Department of Commerce, <https://www.bea.gov/sites/default/files/papers/defining-and-measuring-the-digital-economy.pdf>. [7]
- Calvino, F., et al. (2018), « A taxonomy of digital intensive sectors », *Documents de travail de l'OCDE sur la science, la technologie et l'industrie*, n° 2018/14, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/f404736a-en>. [8]
- Cavallo, A., P. Mishra et A. Spilimbergo (2022), « E-commerce during COVID: Stylized facts from 47 economies », *Documents de travail du FMI*, n° 19, Washington, D.C., <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2022/01/28/E-commerce-During-Covid-Stylized-Facts-from-47-Economies-512014>. [13]
- Choi, H. et H. Varian (2012), « Predicting the present with Google Trends », *Economic Record*, vol. 88, pp. 2-9, <https://doi.org/10.1111/j.1475-4932.2012.00809.x>. [23]
- Combes, S. et C. Bortoli (2016), « Nowcasting with Google Trends, the more is not always the better », *CARMA 2016: 1st International Conference on Advanced Research Methods in Analytics*, pp. 15-22, <https://archive.carmaconf.org/carma2016/wp-content/uploads/pdfs/4226.pdf>. [22]
- Dernis, H., et al. (2021), « Who develops AI-related innovations, goods and services? : A firm-level analysis », *Documents de travail de l'OCDE sur la science, la technologie et l'industrie*, n° 121, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/3e4aedd4-en>. [14]
- Ferrara, L. (2022), « When are Google data useful to nowcast GDP? An approach via preselection and shrinkage », *Journal of Business & Economic Statistics*, vol. 41/4, pp. 1108-1202, <https://doi.org/10.1080/07350015.2022.2116025>. [26]
- Horvát, P. et C. Webb (2020), « The OECD STAN Database for industrial analysis : Sources and methods », *Documents de travail de l'OCDE sur la science, la technologie et l'industrie*, n° 2020/10, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/ece98fd3-en>. [21]
- Jaax, A., F. Gonzales et A. Mourougane (2021), « Nowcasting aggregate services trade », *Documents de travail de l'OCDE sur la politique commerciale*, n° 253, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/0ad7d27c-en>. [18]
- Kingma, D. et J. Ba (2015), « Adam: A Method for Stochastic Optimization », *3rd International Conference for Learning Representations*, San Diego, CA, 7-9 May, arXiv:1412.6980, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>. [24]
- Meertens, Q. et al. (2020), « A data-driven supply-side approach for estimating cross-border Internet purchases within the European Union », *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, vol. 183/1, pp. 61-90, <https://doi.org/10.1111/rssa.12487>. [11]
- Mitchell, J. (2021), « Digital supply-use tables : Making digital transformation more visible in economic statistics », *OECD Going Digital Toolkit Notes*, n° 8, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/91cbdd10-en>. [4]
- Mourougane, A. (2021), « Measuring digital trade », *OECD Going Digital Toolkit Notes*, n° 18, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/48e68967-en>. [10]
- Nakazato, S. et M. Squicciarini (2021), « Artificial intelligence companies, goods and services : A trademark-based analysis », *Documents de travail de l'OCDE sur la science, la technologie et l'industrie*, n° 2021/06, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/2db2d7f4-en>. [15]
- Nicoletti, G. et S. Scarpetta (2003), « Régulation, productivité et croissance dans les pays de l'OCDE : OECD Evidence », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 347, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/078677503357>. [17]
- OCDE (2023), *OECD Handbook on compiling digital supply use tables*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/11a0db02-en>. [3]
- OCDE (2023), « OECD Weekly tracker of economic activity », page web, <https://www.oecd.org/economy/weekly-tracker-of-gdp-growth> (consulté le 10 Juin 2023). [25]
- OCDE (2019), « BBVA big data on online credit card transactions : The patterns of domestic and cross-border e-commerce », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 278, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/8c408f92-en>. [12]
- OCDE (2019), *Measuring the digital transformation : A roadmap for the future*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264311992-en>. [9]
- OCDE (2015), *The OECD Model Survey on ICT Access and Usage by Households and Individuals, 2nd Revision*, OCDE, Paris, <https://web-archiver.oecd.org/2015-10-26/376629-ICT-Model-Survey-Access-Usage-Households-Individuals.pdf>. [1]
- OCDE (2015), *The OECD Model Survey on ICT Usage by Businesses, 2nd Revision*, OECD, Paris, <https://web-archiver.oecd.org/2015-10-26/376630-ICT-Model-Survey-Usage-Businesses.pdf>. [2]
- OCDE (2002), *Measuring the information economy 2002*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264099012-en>. [20]

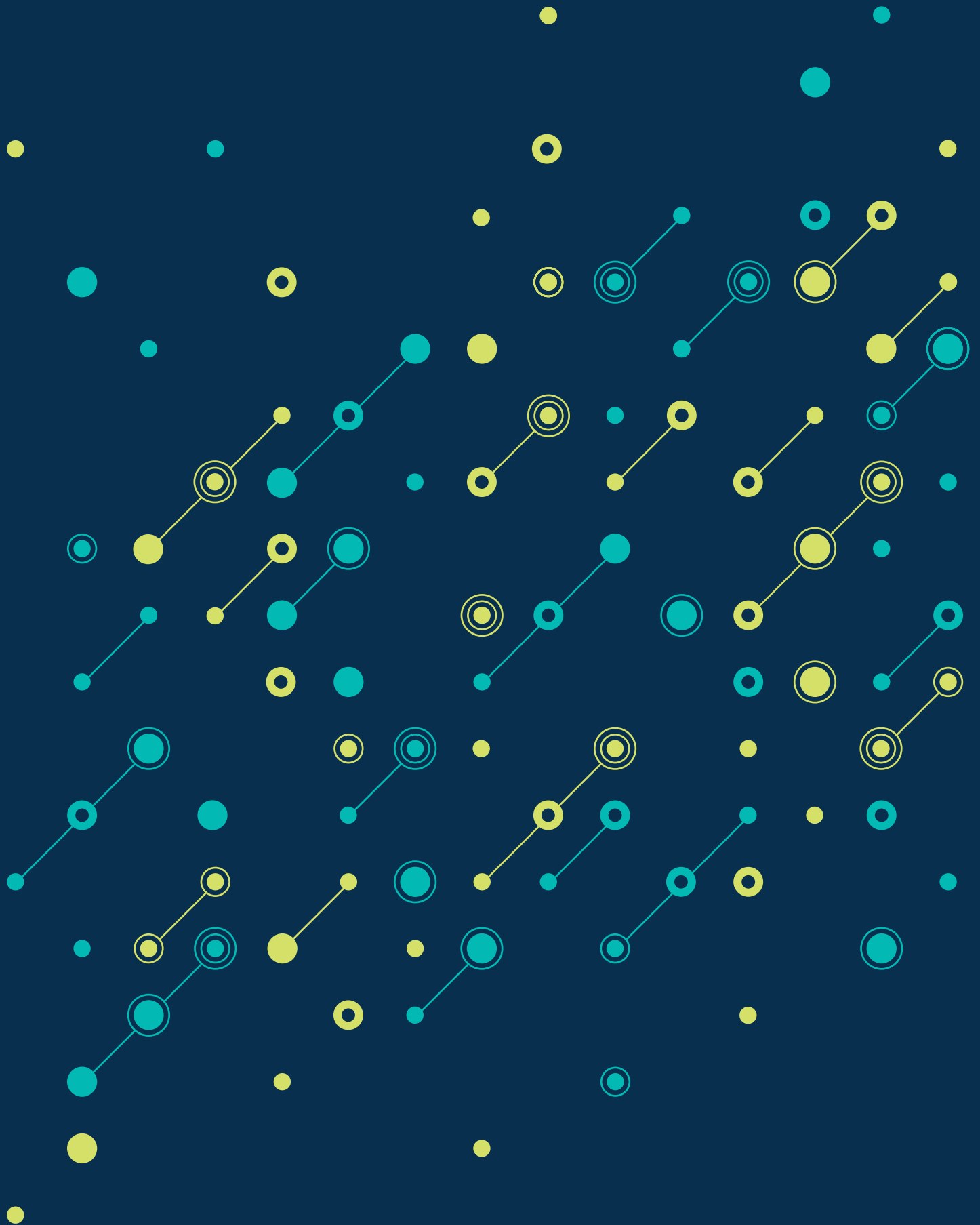
- Samek, L., M. Squicciarini et E. Cammeraat (2021), « The human capital behind AI : Jobs and skills demand from online job postings », *Documents de travail de l'OCDE sur la politique scientifique, technologique et industrielle*, n° 120, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/2e278150-en>. [16]
- Statistique Canada (2019), « Mesurer les activités économiques numériques au Canada : estimations initiales », *Les nouveautés en matière de comptes économiques canadiens*, Statistique Canada, Ottawa, <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/13-605-x/2019001/article/00002-fra.htm>. [6]
- Umana Dajud, C. (à paraître), « Nowcasting the growth rate of the ICT sector », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/20716826>. [5]
- Woloszko, N. (2020), « Tracking activity in real time with Google Trends », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 1634, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/6b9c7518-en>. [19]

Notes

- <https://goingdigital.oecd.org/fr>.
- <https://goingdigital.oecd.org/fr/indicator/08>.
- Plus d'informations sur STAN sont disponibles à l'adresse suivante : <http://oe.cd/stan>.
- Des travaux récents montrent que les données Google Trends sont moins utiles pour mesurer la croissance du PIB global lorsque l'on dispose de données officielles (Ferrara, 2022_[26]). Pour le PIB global, les délais s'échelonnent entre un et trois mois dans la plupart des pays. En revanche, au niveau sectoriel, ils sont beaucoup plus longs et dépassent généralement 12 mois. Par conséquent, les sources de données non traditionnelles restent plus utiles pour obtenir des informations sur la croissance économique au niveau sectoriel qu'elles ne le sont au niveau agrégé.
- Un autre modèle utilisant en entrée les taux de croissance du PIB global a également été testé. Toutefois, le modèle exploitant les données Google Trends a produit de meilleurs résultats. Ceux-ci sont exposés dans le document technique d'accompagnement (Umana Dajud, à paraître_[5]).
- <https://oecd.ai/fr>.
- Pour plus d'informations sur la base de données STAN, voir : <http://oe.cd/stan>.
- La valeur ajoutée brute en volumes (VALK) issue de la Base de données STAN est calculée à l'aide de déflateurs des prix. Les chiffres correspondent à la valeur en prix courants pour l'année de référence 2015. Pour de plus amples informations sur le calcul de la valeur ajoutée brute en volumes, voir la documentation relative à la Base de données STAN, à l'adresse : <http://oe.cd/stan>.
- La liste exhaustive des catégories est consultable à l'adresse : <https://serpapi.com/google-trends-categories>.
- L'utilisation de ce seuil pour l'analyse permet d'éviter une variance excessive au sein de l'ensemble de données.
- Après abandon des observations présentant une variance supérieure à dix, la taille de l'échantillon passe de 7 328 880 à 6 186 710 observations (1 142 170 observations ont donc été supprimées). Les 1 131 catégories restent malgré tout présentes dans l'échantillon réduit.
- Malgré une variance plus élevée, les combinaisons pays-catégories supprimées présentent des propriétés statistiques similaires à celles de l'échantillon complet. La moyenne et l'écart type s'élèvent respectivement à 35.97 et 25.60 pour l'échantillon complet. Pour les observations supprimées, ils sont de 35.52 et 24.78. Pour les observations utilisées dans le cadre de l'exercice de prévision immédiate, la moyenne est de 36.06 et l'écart type de 24.78.
- Le modèle est entraîné à l'aide de la bibliothèque scikit-learn 1.2.1 de Python.
- La définition des hyperparamètres établie par Google est consultable à l'adresse suivante : <https://developers.google.com/machine-learning/guides/text-classification/step-5>. Le taux d'apprentissage et le nombre de couches cachées en sont des exemples.
- Plus on s'éloigne de la dernière valeur observée utilisée pour entraîner le modèle, plus la précision de la REQM diminue.



16. La Base de données STAN ne contient pas de données relatives à VALK dans le secteur des TIC pour les pays suivants : Australie, Chili, Colombie, Corée, Costa Rica, Irlande, Israël, Japon, Luxembourg, Nouvelle-Zélande et Türkiye.
17. Les taux de croissance sectoriels affichent une variance bien plus importante que les taux de croissance du PIB total. Cette caractéristique des données sectorielles explique dans une large mesure le niveau des intervalles de confiance du modèle de prévision immédiate (90 %) par rapport à ceux des modèles utilisant une méthodologie similaire pour les taux de croissance du PIB total (95 %) (Woloszko, 2020^[35]).
18. Voir par exemple https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=ICT_sector_-_value_added,_employment_and_R%26D et <https://www.cbs.nl/en-gb/news/2020/42/ict-sector-growing-faster-than-the-economy>.



Chapitre 2

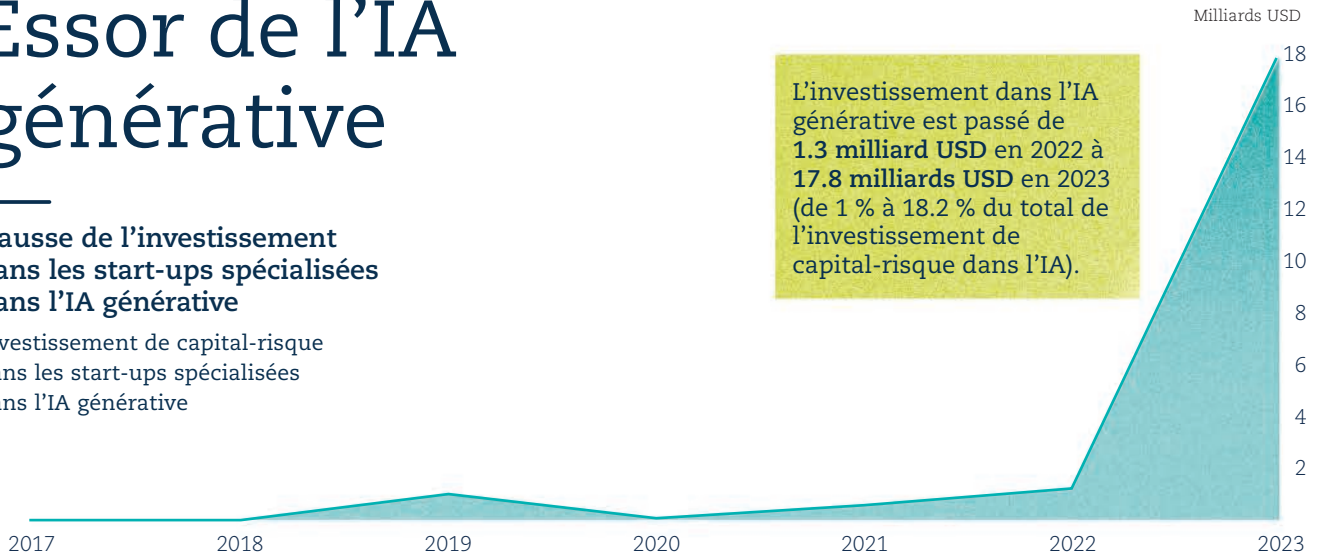
L'avenir de l'intelligence artificielle

Le paysage de l'intelligence artificielle (IA) a considérablement évolué depuis 1950, date à laquelle Alan Turing a posé pour la première fois la question à savoir si les machines pouvaient penser. Aujourd'hui, l'intelligence artificielle transforme les sociétés et les économies. Elle promet de générer des gains de productivité, d'améliorer le bien-être et d'aider à relever les défis mondiaux tels que le changement climatique, la raréfaction des ressources et les crises sanitaires. Cependant, l'adoption mondiale de l'IA soulève des questions notamment en lien avec les notions de confiance, d'équité, de respect de la vie privée, de sécurité et de responsabilité. L'IA avancée suscite une réflexion sur l'avenir du travail, des loisirs et de la société. Le présent chapitre examine les développements technologiques actuels et attendus de l'IA, réfléchit aux opportunités et aux risques que les spécialistes en prospective anticipent pour l'avenir et donne un aperçu de la manière dont les pays mettent en œuvre les Principes de l'OCDE relatifs à l'IA. Ce faisant, il aide à construire une compréhension commune des opportunités et des risques clés pour garantir que l'IA soit digne de confiance et utilisée au bénéfice de l'humanité et de la planète.

Essor de l'IA générative

Hausse de l'investissement dans les start-ups spécialisées dans l'IA générative

Investissement de capital-risque dans les start-ups spécialisées dans l'IA générative



Hausse des incidents et dangers liés à l'IA générative

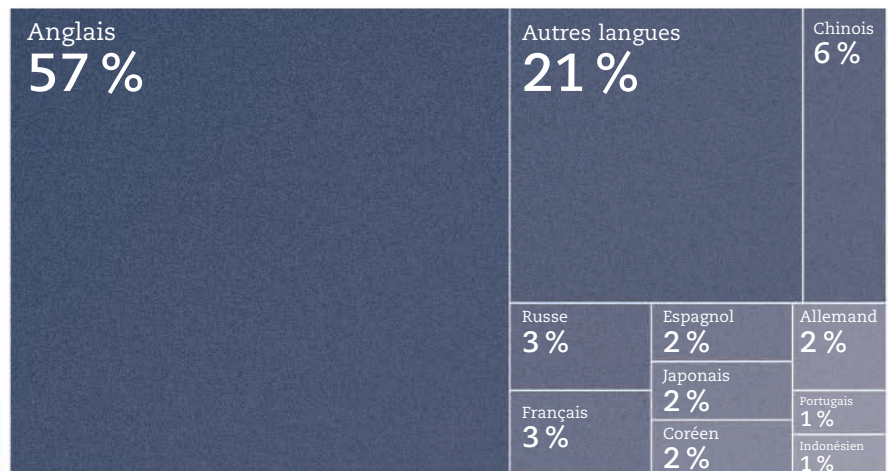
Incidents et dangers liés à l'IA générative rapportés par des organes de presse réputés à l'échelle mondiale (moyenne mobile sur trois mois)



Écarts linguistiques dans les ensembles de données d'IA

Répartition par langue des ensembles de données ouvertes d'entraînement d'IA sur Hugging Face, 2024

L'entraînement des modèles de langue pose d'importantes difficultés aux pays dont l'anglais n'est pas la langue principale.



Source : OECD.AI (consulté le 10 mars 2024).

Principaux constats

Les innovations techniques ont rendu possible une IA générative si avancée que les personnes qui l'utilisent pourraient ne plus être en mesure de faire la différence entre les contenus créés par l'être humain et générés par l'IA.

- À la fin de 2022, les progrès de l'IA générative en ont surpris plus d'un, même si certains chercheurs avaient anticipé une telle évolution. La collaboration et l'interdisciplinarité entre les décideurs publics, les développeurs de l'IA et les chercheurs est essentielle pour suivre le rythme des progrès de l'IA et combler les lacunes en matière de connaissances.

Les travaux de recherche et les avis de experts suggèrent que les futurs impacts de l'IA pourraient varier considérablement, promettant des avantages socio-économiques considérables, mais présentent également des risques substantiels qu'il convient de gérer.

- L'avenir de l'IA pourrait apporter des avantages considérables, notamment des gains de productivité accrus, l'accélération des progrès scientifiques et de nouveaux moyens de lutter contre le changement climatique. Toutefois, les avancées de l'IA présentent également des risques importants tels que la prolifération de mésinformation et de désinformation ainsi que des atteintes aux droits humains.

Les trajectoires et les risques à long terme de l'IA sont souvent étudiés et largement débattus.

- La plupart des modèles d'IA actuels peuvent être considérés comme « étroits », c'est-à-dire conçus pour effectuer une tâche spécifique, mais certains experts avancent que les modèles de fondation sont une forme précoce d'IA plus « générale ». Cela inclut le progrès une intelligence artificielle générale (IAG) – un concept controversé qui peut être décrit comme une machine dotée d'une intelligence de niveau humain ou supérieur dans un large éventail de contextes.
- Certains d'expert affirment que les difficultés liées à l'alignement des résultats de la machine sur les préférences humaines pourraient entraîner une perte de contrôle de l'IAG par l'humain. Cependant, la plausibilité de l'IAG et la nature de l'IAG font débat. De nombreux risques futurs ne nécessitent pas l'IAG pour se manifester, ce qui fait dire à d'autres quel le fait de se concentrer sur une IAG hypothétique détourne l'attention des risques à court terme.

La recherche et le développement dans le domaine de l'IA ainsi que les investissements en capital-risque consacrés à l'IA sont sur le point d'augmenter.

- Depuis la mi-2019, la République populaire de Chine (ci-après la « Chine ») a publié davantage de travaux de recherche en IA que les États-Unis ou que l'Union européenne. L'Inde progresse également, ayant plus que doublé ses publications de recherche en IA depuis 2015.
- Entre 2015 et 2023, les investissements mondiaux en capital-risque dans les start-ups de l'IA ont triplé (de 31 milliards USD à 98 milliards USD), avec les investissements dans l'IA générative en particulier qui ont augmenté de 1 % du total des investissements en capital-risque en IA en 2022 (1.3 milliard USD) à 18.2 % (17.8 milliards USD) en 2023, malgré la contraction des marchés de capitaux.

Le développement et l'utilisation de l'IA devraient continuer à dépendre de l'accès à des infrastructures de calcul.

- Les disparités de capacité de calcul pourraient s'aggraver entre les pays ou à l'intérieur de ceux-ci. De plus en plus, au niveau national, les instances du secteur public n'ont pas les ressources informatiques suffisantes pour entraîner des modèles d'IA avancée.

Les bénéfices et les risques de l'IA ont une portée mondiale, ce qui rend la coopération internationale indispensable pour assurer la complémentarité, l'efficacité et l'interopérabilité des politiques et des lois relatives à l'IA.

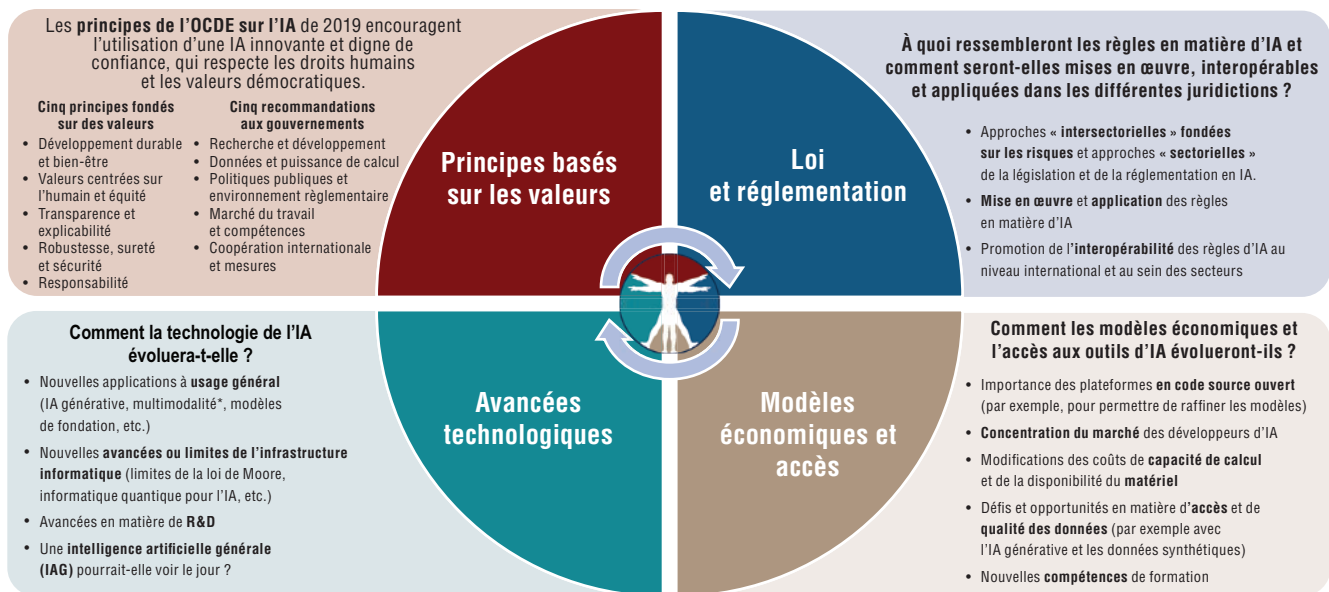
- Les systèmes d'IA du monde entier peuvent utiliser les mêmes intrants et outils de l'IA tels que les algorithmes, les modèles et les ensembles de données d'entraînement. Cela rend les pays et les organisations vulnérables à des risques similaires tels que les biais, les atteintes aux droits humains et les vulnérabilités ou défaillances en matière de sécurité.



L'intelligence artificielle transforme nos économies et nos sociétés, mais la question est de savoir si le monde est prêt. L'IA promet d'aider à réaliser des gains de productivité, d'améliorer notre bien-être et de résoudre des défis mondiaux tels que le changement climatique, la raréfaction des ressources et les crises sanitaires. Cependant, l'adoption de l'IA dans le monde entier soulève des questions et des défis. L'IA a progressé de manière significative, suscitant une réflexion sur l'avenir du travail, l'éducation, les loisirs, et la société.

Le présent chapitre examine les développements technologiques actuels et attendus de l'IA, réfléchit aux opportunités et aux risques que les experts en perspectives anticipent pour l'avenir et donne un aperçu de l'avancement de la mise en œuvre des Principes de l'OCDE relatifs à l'IA par les pays. Il examine les facteurs interdépendants susceptibles de façonner la gouvernance de l'IA dans les décennies à venir (graphique 2.1) afin de contribuer à une compréhension commune des opportunités et des risques clés pour garantir que l'IA soit digne de confiance et utilisées au bénéfice de l'humanité et de la planète.

Graphique 2.1. Exemples de facteurs interdépendants susceptibles de façonner la gouvernance de l'IA dans les décennies à venir



Note : *L'IA multimodale combine plusieurs types de données (images, textes, contenus audios, etc.) à l'aide de modèles et d'algorithmes d'apprentissage automatique. Elle est indispensable à la recherche et aux applications en IA dans des domaines tels que l'industrie manufacturière et la robotique (The Alan Turing Institute, 2023^[1]).

Source : Adapté du graphique 1.S.2. du Coup de projecteur « Les réseaux sans fil de prochaine génération et l'écosystème de la connectivité » de ce volume.

Le paysage technologique de l'IA d'aujourd'hui et de demain

Le paysage technologique de l'IA a considérablement évolué depuis les années 1950, lorsque le mathématicien britannique Alan Turing s'est le premier demandé si les machines peuvent penser (Turing, 1950^[2]). L'IA, terme forgé en 1956, est passée de l'IA symbolique, où les humains construisaient des systèmes basés sur la logique, à l'« hiver » de l'IA dans les années 1970, puis à l'ordinateur Deep Blue, qui jouait aux échecs dans les années 1990. Le 21^e siècle a vu des percées dans la branche de l'IA appelée apprentissage automatique qui a amélioré la capacité des machines à faire des prédictions à partir de données historiques (OCDE, 2019^[3]). Ces dernières années ont vu l'émergence de l'IA générative, y compris des grands modèles de langue, qui peuvent générer des contenus nouveaux et permettre des applications orientées vers le consommateur telles que des agents conversationnels avancés disponibles accessible d'une simple pression sur un écran (OCDE, 2023^[4]). Pour beaucoup, l'IA est devenue une réalité en 2022, quand l'outil ChatGPT d'OpenAI est devenu l'application grand public à la plus forte croissance de tous les temps (Hu, 2023^[5]). Pour comprendre l'évolution des développements technologiques de l'IA à ce jour, et la trajectoire qu'elles pourraient emprunter dans les années à l'avenir, les responsables de politiques publiques ont besoin d'une compréhension commune des principaux termes associés à l'IA (encadré 2.1) ainsi que de la fonction de production de base de l'IA, décrite par trois catalyseurs : les algorithmes, les données et les ressources informatiques (« capacité de calcul »).

Encadré 2.1. L'ABC de l'IA

L'IA fait l'objet d'une grande attention dans les médias et les cercles de politiques publiques. Au milieu de cet afflux de gros titres et d'analyses, les responsables de l'action publique ont besoin d'une compréhension commune des termes clés de l'IA pour pouvoir suivre le rythme des progrès rapides de l'IA et y répondre avec des politiques sur l'IA qui résistent à l'épreuve du temps. Pour les besoins de ce chapitre, les termes suivants sont employés :

- **Intelligence artificielle** : « Un système d'intelligence artificielle est un système automatisé qui, pour des objectifs explicites ou implicites, déduit, à partir d'entrées reçues, comment générer des résultats en sortie tels que des prévisions, des contenus, des recommandations, ou des décisions qui peuvent influencer sur des environnements physiques ou virtuels. Différents systèmes d'IA présentent des degrés variables d'autonomie et d'adaptation après déploiement » (OCDE, 2024_[6]).
- **Algorithme** : « Ensemble d'instructions (c'est-à-dire, à l'exclusion des données) à suivre dans l'ordre pour résoudre un problème. [L'algorithme] peut être abstrait et mis en œuvre dans différents langages de programmation et bibliothèques logicielles » (EU-US Trade and Technology Council, 2023_[7]).
- **Capacité de calcul pour l'IA** : « La capacité de calcul pour l'IA comprend une ou plusieurs couches de matériels et de logiciels utilisés pour étayer, de manière efficace, les charges de travail et les applications spécialisées propres à l'IA » (OCDE, 2023_[8]).
- **Modèle de fondation** : Modèle entraîné sur de grandes quantités de données – en général, par auto-supervision à grande échelle –, qu'il est possible d'adapter (d'ajuster) à un large éventail de tâches en aval. On peut citer les exemples suivants : BERT (Google) et GPT-3 (OpenAI) (Bommasani et al., 2021_[9]).
- **IA générative** : IA capable de créer de nouveaux contenus – textes, images, contenus audio et vidéo – à partir de ses données d'entraînement et, habituellement, en réponse à des invites. La récente croissance de l'IA générative, avec la couverture médiatique dont elle a bénéficié, notamment pour ce qui est de la production de textes et d'images, a placé les capacités d'IA sous les projecteurs, ce qui a suscité de vifs débats au sein du public et dans les milieux universitaires et politiques (Lorenz, Perset et Berryhill, 2023_[10]).
- **Modèle de langue d'IA** : Modèle capable de traiter, d'analyser ou de générer du texte en langue naturelle après avoir été entraîné sur de grandes quantités de données au moyen de techniques pouvant aller d'approches fondées sur des règles à des modèles statistiques ou d'apprentissage profond. Les agents conversationnels, les moteurs de traduction automatique et les assistants virtuels à commande vocale sont tous des applications des modèles de langue. Les modèles de langue ne sont pas tous génératifs par nature, et peuvent être de petite taille comme de grande taille (OCDE, 2023_[4]).
- **Apprentissage automatique** : « Branche de l'intelligence artificielle et de l'informatique qui s'intéresse au développement de systèmes capables d'apprendre et de s'adapter sans avoir besoin de suivre des instructions explicites, imitant par là le mode d'apprentissage de l'être humain, de manière à améliorer progressivement leur exactitude, en utilisant des algorithmes et des modèles statistiques pour analyser et déduire des inférences de schémas décelés dans les données » (traduction libre) (EU-US Trade and Technology Council, 2023_[7]). Le processus d'« apprentissage » fondé sur les techniques d'apprentissage automatique est appelé « entraînement ». Une technique d'apprentissage automatique appelée « réseau neuronal », et sa version plus avancée appelée « apprentissage profond », a contribué à l'accélération du développement de l'IA (OCDE, 2019_[3]).
- **IA multimodale** : IA consistant à combiner plusieurs types de données (images, textes, contenus audio, etc.) à l'aide de modèles et d'algorithmes d'apprentissage automatique. L'IA multimodale est indispensable à la recherche et aux applications en IA dans des domaines tels que l'industrie manufacturière et la robotique (The Alan Turing Institute, 2023_[11]).

Notes : Cette liste de termes a été établie sur la base de sources diverses aux fins de la rédaction du présent chapitre. Elle n'est pas exhaustive. Le Conseil du commerce et de la technologie UE-États-Unis a publié une deuxième édition du *Terminology and Taxonomy for Artificial Intelligence* (Terminologie et taxonomie pour l'intelligence artificielle) en avril 2024. Pour de plus amples informations, veuillez consulter : <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/eu-us-terminology-and-taxonomy-artificial-intelligence-second-edition>.



Les progrès des réseaux neuronaux et de l'apprentissage profond donnent naissance à des modèles et des systèmes d'IA toujours plus gros, plus avancés et plus gourmands en capacité de calcul

L'application des techniques d'apprentissage automatique, la disponibilité d'ensembles de données volumineux et de matériels informatiques plus rapides et plus puissants ont convergé. Ensemble, ils augmentent considérablement les capacités, l'impact et la disponibilité des modèles et des systèmes d'IA, passant de discussions académiques à des applications concrètes remarquables. Inspirés du cerveau humain, les réseaux neuronaux sont composés de couches de « neurones », également appelés « nœuds », qui traitent les données d'entrée avec des pondérations et des biais pour obtenir des résultats spécifiques (Russell et Norvig, 2016^[11]). Un sous-ensemble d'algorithmes dans le domaine des réseaux neuronaux – appelés « réseaux de neurones profonds » (dans le champ d'études et l'ensemble des techniques désignés sous le terme d'apprentissage profond) – permet à des systèmes fondés sur des machines d'« apprendre », à partir d'exemples, à faire des prédictions, également appelées « inférences », sur la base de grande quantité de données traitées au cours de la phase d'entraînement. Les réseaux de neurones profonds se distinguent principalement par le fait qu'ils sont généraux et qu'ils nécessitent peu d'adaptation (ou de « nettoyage ») des données d'entrée pour pouvoir établir des prédictions exactes.

En 2017, une équipe de recherche a présenté un nouveau type d'architecture de réseau neuronal appelé « transformeur » qui est devenu une innovation conceptuelle fondamentale à l'origine d'avancées majeures dans le domaine des modèles de langue d'IA. Un transformeur apprend à détecter comment des éléments de données, par exemple les mots d'une phrase, s'influencent et dépendent les uns des autres (Vaswani et al., 2023^[12]). Ce qui le distingue des précédents réseaux neuronaux, c'est qu'il peut traiter les données d'une séquence, par exemple les mots d'un texte, en parallèle. Cela a permis aux développeurs d'IA de concevoir des modèles de langue de plus grande taille comportant un nombre beaucoup plus élevé de paramètres (les pondérations numériques qui définissent le modèle) et affichant une meilleure efficacité (OCDE, 2023^[4] ; Vaswani et al., 2023^[12]). Les transformeurs ont rendu possibles des avancées considérables dans les domaines de la reconnaissance de la langue (agents conversationnels, par exemple) et des sciences (repliement des protéines, par exemple). Ils gagnent aussi en popularité dans le domaine de la vision par ordinateur (Islam, 2022^[13]). Les modèles de transformeurs les plus connus sont AlphaFold2 (DeepMind), GPT-4 (OpenAI), LaMDA (Google) et BLOOM (Hugging Face) (Collins et Ghahramani, 2021^[14] ; Hugging Face, 2022^[15] ; Merritt, 2022^[16]).

Les chercheurs étudient actuellement la question de savoir si les transformeurs peuvent créer des systèmes d'IA « généralistes » et « multimodaux » capables d'exécuter des centaines de tâches différentes dans les domaines de la robotique, de la vision par ordinateur, des environnements simulés, des langues naturelles, et plus encore. Par exemple, le réseau Gato développé par Google DeepMind (2022) présente certaines de ces capacités, puisqu'il peut aussi bien empiler des blocs avec un bras robotisé, jouer à des jeux vidéo, légendier des images et discuter avec ses utilisateurs. Au contraire des précédents modèles d'IA qui ne pouvaient apprendre qu'une seule tâche à la fois, certains nouveaux modèles de transformeurs peuvent apprendre plusieurs tâches en même temps, ce qui leur permet de basculer de l'une à l'autre et d'acquérir de nouvelles compétences sans oublier celles qu'ils ont déjà acquises (Heikkilä, 2022^[17] ; Reed et al., 2022^[18]). Cependant, les modèles et systèmes d'IA actuels peuvent encore produire des inexactitudes factuelles, des hallucinations (inventions de faits de façon crédible, souvent quand une bonne réponse n'est pas trouvée dans les données d'entraînement), des incohérences et des malentendus quand ils sont utilisés dans de nouveaux contextes, ce qui fait qu'il faut souvent une assistance ou une supervision humaine pour assurer leur bon fonctionnement. Selon certains experts, les systèmes et modèles d'IA avancés sont un pas en avant vers des formes d'IA plus performantes et plus générales (voir l'encadré 2.2) ; certaines voix vont jusqu'à dire qu'il s'agit d'un progrès vers l'émergence hypothétique d'une « intelligence artificielle générale » (IAG), annonciatrice de bénéfices et de risques considérables. Ces questions font l'objet de vifs débats au sein de la communauté d'experts de l'IA (encadré 2.2).

Les modèles de fondation rendent possible une généralisation croissante de l'IA à travers un éventail de domaines d'application, de secteurs d'activité et de tâches

Les récentes innovations en matière d'IA ont fait évoluer les capacités des modèles et systèmes spécifiques à une tâche vers des modèles et des systèmes plus flexibles et applicables à une diversité de domaines, de secteurs et de tâches. Ces avancées sont centrées sur les « modèles de fondation », c'est-à-dire des modèles entraînés sur de grandes quantités de données qui peuvent être adaptés à un large éventail de tâches en aval, comme la série de transformeurs génératifs pré-entraînés (GPT, *Generative Pretrained Transformers*) d'OpenAI (Lorenz, Perset et Berryhill, 2023^[10] ; Bommasani et al., 2021^[9] ; Jones, 2023^[23]). Ces modèles de fondation peuvent être perfectionnés ou « affinés », par exemple à l'aide de données spécifiques afin d'obtenir des informations pertinentes pour un secteur en particulier ou adaptées à un large spectre de tâches distinctes (Bommasani et al., 2021^[9]).

Encadré 2.2. Des systèmes d'IA à usage de plus en plus général

De l'avis de certains experts, les grands modèles de langue et les autres modèles d'IA générative les plus récents sont capables d'appliquer des résultats de façon générale à tout un éventail de contextes. Cependant, il y a débat sur la mesure dans laquelle ils peuvent généraliser, plutôt que simplement reproduire, par imitation, des informations contenues dans leurs ensembles de données.

Depuis leur création dans les années 1950, les systèmes d'IA ont été « étroits » et spécifiques à un contexte. Toutefois, en raison des progrès récents, certains experts affirment que les « modèles de base » de pointe évoluent vers une nature plus générale.

Les modèles de fondation sont entraînés sur de grandes quantités de données, et peuvent être adaptés à un large éventail de tâches en aval. Certains experts vont jusqu'à dire que ces modèles représentent une étape significative sur la voie de l'émergence supposée d'une intelligence artificielle générale (IAG), même si la définition de cette IAG, ses principes sous-jacents et l'horizon auquel elle pourrait apparaître sont très vivement débattus. L'IAG est un concept controversé qui peut être décrit comme une machine ayant une intelligence de niveau humain ou supérieur dans un large éventail de contextes et de domaines.

Beaucoup d'experts du domaine estiment que mettre l'accent sur cette notion spéculative d'IAG peut contribuer à masquer les avantages et les risques importants des systèmes d'IA déjà déployés ou qui le seront à court ou à moyen terme. Pour sortir de ce débat, certains experts en IA se sont ainsi mis à parler d'« intelligence artificielle capable » (IAC) pour décrire les systèmes d'IA potentiellement transformateurs qui nécessitent une supervision humaine minimale, mais qui pourraient ne pas atteindre l'état hypothétique de l'IAG.

Des chercheurs de DeepMind (Google) ont proposé un cadre de classification de l'avancée des capacités, fondé sur les niveaux de performance, de généralisation et d'autonomie des systèmes d'IA. Leur objectif est de fournir un langage commun qui permette de comparer les modèles d'IA, d'en évaluer les risques, et d'en mesurer les progrès.

L'IAG fait l'objet de nombreux débats et d'une large couverture médiatique. Même si de plus en plus d'experts de disciplines très diverses se penchent sur la question de la réalisation de systèmes d'IA plus généraux, leurs avis, leurs prévisions et leur façon d'appréhender les termes clés du domaine varient très largement.

Source : D'après Russell et Norvig (2016)^[11] ; OCDE (2019)^[3], (2023)^[4] ; Bubeck et al. (2023)^[19] ; Morris et al. (2023)^[20] ; Suleyman (2023)^[21] ; Elangovan, He et Verspoor (2021)^[22].

Les modèles de fondation existants partagent plusieurs caractéristiques communes. Premièrement, ils incluent souvent des milliards de paramètres, ce qui en fait des systèmes de très grande taille. Deuxièmement, il peut être difficile d'expliquer leurs résultats du fait de la complexité des procédés de calcul. Cela s'est traduit par des performances et des résultats sont impressionnants, dépassant même les attentes des développeurs. Cependant, les étapes ou le processus suivi par le modèle pour l'obtention du résultat ne peuvent souvent pas être expliqués. Troisièmement, l'entraînement des modèles de fondation actuels exige des capacités de calcul et des volumes de données considérables, ainsi que des talents de spécialistes de l'IA, ce qui signifie que leur développement est très coûteux (Dunlop, Moës et Küspert, 2023^[24]). L'avenir nous dira si, avec l'évolution de la technologie, du matériel, des logiciels et des méthodes d'entraînement, les modèles de fondation du futur continuent de nécessiter autant de données, de capacité de calcul et de paramètres.

Pour beaucoup, l'émergence récente des modèles de fondation constitue un « changement de paradigme » et un progrès technologique majeur. Grâce aux modèles de fondation, certains modèles d'IA peuvent transférer des capacités d'un domaine à un autre par exemple en combinant plusieurs types de données d'un domaine à un autre (image, texte, contenu audio, etc.). Les modèles de base, en particulier ceux qui sont à code source libre (c'est-à-dire « en *open source* »), peuvent également permettre aux développeurs et aux chercheurs en IA disposant de ressources limitées d'affiner et de déployer l'IA dans leurs domaines respectifs sans nécessairement avoir besoin d'un accès à du matériel de calcul avancé ou à de grands ensembles de données, ni d'engager des coûts importants pour entraîner le modèle de fondation au départ.

Les modèles de fondation continueront probablement de stimuler l'avancement des capacités d'IA, offrant ainsi des possibilités prometteuses d'innovation et de gains de productivité dans divers domaines et secteurs, mais posant également plusieurs défis. La dépendance à l'égard de ces modèles – par exemple les entreprises en aval plus petites



et moins bien capitalisées telles que les start-ups – pourrait créer une dynamique de dépendance entre utilisateurs et producteurs de ces modèles. De fait, le coût et la complexité des modèles de fondation ont limité leur développement à des entreprises bien capitalisées, telles que les modèles GPT-4 (OpenAI/Microsoft), BERT (Google) ou LLaMA 2 (Meta), ou à des organisations et des gouvernements qui peuvent se permettre de financer leur entraînement.

Il est souvent difficile et financièrement coûteux de comprendre ce que contiennent les ensembles de données d'entraînement des modèles de fondation, et vérifier la validité des résultats exige parfois une expertise spécialisée. De plus, il arrive que les responsables du développement de ces modèles ne divulguent pas certaines informations essentielles pour diverses raisons techniques et commerciales. Les mécanismes de distribution mis en place par les équipes de développement, notamment les interfaces de programmation d'application (API), peuvent masquer certaines propriétés du modèle. Cela rend difficile l'évaluation de la façon dont le modèle est aligné sur certains principes, ou encore son utilisation en aval d'une manière qui vise à promouvoir la transparence, l'explicabilité et la responsabilité (Dunlop, Moës et Küspert, 2023^[24]).

Ces questions illustrent le déséquilibre croissant potentiel entre ceux qui peuvent réaliser les premières étapes de construction de ces modèles, les plus gourmandes en ressources, et ceux qui sont dépendantes de modèles pré-entraînés (c'est-à-dire, les modèles de fondation). Les propriétaires des modèles d'IA les plus avancés pourraient limiter l'accès à ces outils. Cela constitue un défi pour les responsables de l'élaboration des politiques et les pouvoirs publics, à l'heure où ils cherchent à créer des règles du jeu équitables permettant aux groupes plus modestes et moins bien dotés en ressources d'innover (OCDE, 2023^[25]). Ce défi stratégique pourrait inclure des questions telles que l'accès aux outils au service de l'innovation et la dynamique du marché du point de vue de la concurrence.

La poursuite du développement et de l'utilisation de l'IA continuera de dépendre de l'accès à des infrastructures de calcul

L'infrastructure de calcul (ou « capacité de calcul pour l'IA ») est une composante déterminante du développement d'une IA, et devrait continuer d'être un moteur de l'amélioration des capacités d'IA au fil du temps. Elle se distingue des autres intrants tels que les données ou les algorithmes car elle repose sur des « piles » (couches) de matériel et d'infrastructure physique en plus des logiciels spécialisés en IA (OCDE, 2023^[8]). L'amélioration de la capacité de calcul pour l'IA a permis de remplacer les processeurs à usage général, tels que les unités centrales de traitement (CPU, *Central Processing Unit*), par des matériels spécialisés nécessitant moins de temps et d'énergie par calcul. Aujourd'hui, les modèles d'IA avancée sont principalement entraînés sur du matériel spécialisé optimisé pour certains types d'opérations, par exemple des unités de traitement graphique (GPU), des unités de traitement de tenseur (TPU) et des unités de traitement neuronal (NPU). En effet, entraîner une IA sur un processeur à usage général est moins efficace (OCDE, 2023^[8]). Le volume croissant de l'infrastructure de calcul dédiée à l'IA a permis à la fois des progrès en IA et des progrès technologiques au niveau du matériel d'IA lui-même.

La demande de capacité de calcul pour l'IA a augmenté de façon spectaculaire, en particulier pour les réseaux de neurones destinés à l'apprentissage profond (OCDE, 2023^[8]). Se procurer du matériel spécialisé spécifiquement construit pour l'IA peut être difficile en raison de la complexité des chaînes d'approvisionnement, comme en témoignent les goulets d'étranglement dans le secteur des semi-conducteurs (Khan, Mann et Peterson, 2021^[26]). Les circuits intégrés ou puces informatiques fabriqués à partir de semi-conducteurs sont les « cerveaux de l'équipement électronique moderne, qui stockent l'information et exécutent les opérations logiques permettant à des terminaux de type smartphone, ordinateur et serveur de fonctionner » et sont un intrant essentiel de la capacité de calcul pour l'IA (OCDE, 2019^[27]). Tout appareil électronique peut posséder plusieurs circuits intégrés assurant des fonctions spécifiques, comme des unités centrales de traitement ou des puces spécialement conçues pour la gestion de puissance, la mémoire ou le graphisme (GPU utilisées pour l'IA, par exemple). La chaîne d'approvisionnement en semi-conducteurs est de plus en plus sollicitée depuis quelques années, surtout depuis que les technologies numériques fondées sur l'IA se banalisent, notamment dans les appareils de l'internet des objets (IoO), les réseaux électriques intelligents ou encore les véhicules autonomes. Elle est également très concentrée, donc d'autant plus vulnérable aux chocs (OCDE, 2019^[27]).

L'entraînement des IA avancées et les calculs d'inférence connexes exigent des ressources de calcul importantes, ce qui a un impact sur l'environnement: consommation d'énergie et d'eau, émissions de carbone, déchets électroniques et extraction de ressources naturelles telles que les terres rares. Les experts ont soulevé des préoccupations relatives aux effets environnementaux directs de l'IA (imputables aux opérations d'entraînement ou d'inférence), particulièrement avec l'IA générative qui devient plus accessible, avec des applications comme les agents conversationnels qui augmentent la demande de temps de serveur et le besoin d'inférences. Certains fournisseurs de capacité de calcul donnent des estimations spécifiques concernant l'IA, mais ce type de mesure normalisée reste rare (OCDE, 2022^[28]).

Si les progrès de l'IA sont considérables grâce à l'augmentation des vitesses des ordinateurs et la loi de Moore (qui énonce que la vitesse et la puissance de calcul des ordinateurs doublent tous les deux ans), des experts avertissent néanmoins que l'on pourrait atteindre les limites de ces possibilités d'accroissement, ce qui pose des questions concernant les futures avancées des performances informatiques (OpenAI, 2018^[29] ; Sevilla et al., 2022^[30]). Des chercheurs réfléchissent à de nouveaux moyens de poursuivre ces améliorations continues : processeurs plus puissants, transmission plus rapide des données, capacités accrues de mémoire et de stockage, réseaux de la prochaine génération comme la 6G, systèmes informatiques distribués et en périphérie plus étendus et plus rapides, informatique quantique, et bien d'autres solutions encore. Des travaux sont également consacrés à l'informatique neuromorphique, qui s'inspire de la cognition humaine, afin de rendre les processeurs plus efficaces, c'est-à-dire capables de fonctionner avec une puissance inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle des systèmes informatiques traditionnels (Schuman et al., 2022^[31]). D'autres méthodes informatiques fondées sur des ordinateurs photoniques, qui consistent à tirer parti des propriétés particulières des photons, sont également à l'étude pour les applications de l'IA (Wu et al., 2023^[32]).

La disponibilité de grandes quantités de données pour entraîner l'IA a considérablement accru les capacités des systèmes, notamment leur capacité à générer des contenus réalistes

Avoir accès à des données est indispensable pour entraîner, tester et valider une IA. La demande de données d'entraînement (les « données d'entrée de l'IA ») a fortement augmenté, en particulier avec l'essor de l'IA générative et des grands modèles de langue. Aujourd'hui, les données utilisées pour entraîner l'IA sont agrégées à partir de sources diverses, parmi lesquelles des ensembles de données sélectionnés, des accords de partage de données, des collectes de données d'utilisateurs, des stockages de données préexistants et la technique de l'« extraction » de données en libre accès sur l'internet.

La disponibilité et la collecte des données posent des questions de politiques publiques, en particulier quand ces données contiennent des informations relatives à des personnes identifiables (données à caractère personnel, par exemple) ou des matériels protégés, sous licence ou droit d'auteur notamment (logiciels, textes, images, sons ou vidéos). De plus, le fait qu'il existe peu de textes lisibles par la machine rédigés dans d'autres langues que l'anglais pourrait limiter les avantages de l'IA pour certains groupes linguistiques, notamment ceux de langue minoritaire. Un examen des ensembles de données d'entraînement d'IA disponibles sur Hugging Face a conclu que l'anglais représente plus de la moitié de l'ensemble des langues. Cela met en exergue le possible manque de diversité linguistique des ensembles de données d'entraînement d'IA (OECD.AI, 2024^[33]) (graphique 2.2).

Graphique 2.2. Plus de la moitié des ensembles de données d'entraînement d'IA sont en anglais

Répartition des langues, en pourcentage, dans les ensembles de données d'entraînement d'IA proposés par Hugging Face, sur un total de 225 langues, 2024



Notes : Ce graphique représente la distribution linguistique de tous les ensembles de données. Les ensembles de données multilingues et de traduction sur Hugging Face contiennent plus d'une langue et sont donc comptés deux fois. Plus d'informations méthodologiques sur <https://oecd.ai/huggingface> (consulté le 10 mars 2024).

Source : OECD.AI (2024)^[33] avec des données de Hugging Face. Pour plus d'informations, veuillez consulter : <https://oecd.ai/en/data?selectedArea=ai-models-and-datasets>.

StatLink  <https://stat.link/x52wvk>

Des technologies renforçant la protection de la vie privée font leur apparition, notamment des méthodes informatiques confidentielles et l'apprentissage fédéré

L'utilisation de grandes quantités de données à caractère personnel dans certains ensembles de données d'entraînement de l'IA pose aux pouvoirs publics des questions liées à la protection des droits à la vie privée. Plusieurs techniques font en ce moment leur apparition pour aider à préserver la vie privée lorsque de grands ensembles de données sont utilisés, par exemple pour l'apprentissage automatique (OCDE, 2023^[34]). Ces « technologies protectrices de la vie privée » peuvent faciliter la mise en œuvre de principes de protection de la vie privée tels que la minimisation des données, la



limitation de l'utilisation et les garanties de sécurité. Par exemple, l'« informatique confidentielle » vise à faire en sorte qu'il soit impossible pour une entreprise qui héberge des données ou qui y accède, que ce soit dans le nuage ou sur des appareils en périphérie, de voir les données sous-jacentes telles que les données à caractère personnel des internautes, sans devoir au préalable les déverrouiller avec des méthodes de chiffrement contrôlées (O'Brien, 2020^[35] ; Mulligan et al., 2021^[36]). Un autre exemple est l'« apprentissage fédéré » où chaque utilisateur peut entraîner un modèle avec les données contenues sur son propre appareil. Les résultats sont ensuite transférés vers un serveur central et combinés au sein d'un modèle amélioré repartagé entre tous les utilisateurs (Zewe, 2022^[37]). Des chercheurs élaborent également des méthodes d'entraînement de moteurs d'apprentissage automatique avec des données chiffrées. Par exemple, avec la technique du chiffrement homomorphique, les données sous-jacentes demeurent non divulguées pendant tout le processus d'entraînement, ce qui renforce la protection de la vie privée tout en permettant une utilisation effective des données (OCDE, 2019^[3])

S'il est reconnu que les technologies protectrices de la vie privée permettent de protéger la confidentialité des données (à caractère personnel ou non) et que les applications qui en découlent parviendront bientôt à maturité, beaucoup en sont encore au stade de la recherche et n'ont pas encore été déployées à grande échelle et utilisées en production dans des systèmes d'IA directement destinés aux consommateurs. De plus, il est généralement admis que l'utilisation de ces technologies peut encore être associée à des atteintes à la vie privée, d'où l'importance de ne pas les considérer comme la panacée.

L'utilisation de données de synthèse suscite beaucoup d'intérêt comme approche possible pour protéger la vie privée. Les données de synthèse sont des données générées par des simulations informatiques, des algorithmes d'apprentissage automatique ou d'autres méthodes fondées sur des règles ou des statistiques, qui préservent les propriétés statistiques de l'ensemble de données d'origine¹. Elles sont utilisées pour entraîner des IA lorsque les données sont rares ou contiennent des informations confidentielles ou relatives à des personnes identifiables. Il peut s'agir d'ensembles de données de langues minoritaires ; de données destinées à entraîner des modèles de vision par ordinateur à reconnaître des objets rarement présents dans les ensembles de données d'entraînement usuels ; ou encore de données sur différents types d'accidents possibles dans les systèmes de conduite autonome (OCDE, 2023^[25]). Il reste néanmoins des problèmes à résoudre, par exemple « la réidentification est toujours possible si les fichiers de données source apparaissent dans les données synthétiques » (Office of the Privacy Commissioner of Canada, 2022^[38]). De plus, comme dans le cas de l'anonymisation et de la pseudonymisation, les données de synthèse peuvent aussi faire l'objet d'attaques de réidentification (Stadler, Oprisanu et Troncoso, 2020^[39]).

L'IA générative pourrait permettre d'obtenir des ensembles de données plus représentatifs, mais soulève également des inquiétudes quant à leur manipulation

Certains types d'IA, notamment l'IA générative, peuvent aussi produire de nouvelles données, des travaux créatifs et des inférences ou des prédictions concernant des individus ou un thème en particulier, qui, par la suite, pourraient servir de données d'entrée à une autre IA (il s'agirait ainsi de « données de sortie d'IA » utilisées pour entraîner une autre IA) (Staab et al., 2023^[40]). De telles données risquent de ne pas préserver les propriétés statistiques des données d'origine et, par conséquent, ne doivent pas être amalgamées avec des données de synthèse. Néanmoins, la capacité de l'IA à générer de nouvelles données et de nouveaux contenus a été mise en avant comme un moyen de produire des ensembles de données plus larges et, en définitive, plus représentatifs aux fins des phases d'entraînement. De récentes recherches concluent toutefois que l'utilisation de contenus générés par IA peut dégrader les modèles d'IA au fil du temps. Cela pourrait conduire à un « effondrement du modèle » : recourir à des contenus générés par un modèle pendant la phase d'entraînement ferait apparaître des « défauts irréversibles » dans les résultats du modèle, amenant à « oublier » (Shumailov et al., 2023^[41]). Ceci est particulièrement inquiétant si les données d'entraînement sont collectées par extraction sur l'internet, et qu'il n'est pas possible de vérifier si les données d'un échantillon en particulier ont été générées par IA.

Les contenus générés par IA peuvent être manipulés dans le but de nuire, par exemple dans le cadre de campagnes de désinformation ou de désinformation et pour influencer l'opinion publique (OCDE, 2023^[25]). Les recherches actuelles donnent à penser qu'il n'y a pas de moyen fiable pour détecter un contenu généré par IA, même en utilisant des systèmes de filigrane ou des détecteurs fondés sur des réseaux neuronaux. Les contenus générés par IA pourraient se répandre largement sans être détectés, ce qui rendrait possibles des méthodes sophistiquées de spam, des opérations de désinformation ou de désinformation (fausses informations à des fins de manipulation), la production de résumés inexacts de documents, ou encore le plagiat (Sadasivan et al., 2023^[42]). Des acteurs malveillants pourraient s'adonner, à peu de frais et à grande échelle, à des « empoisonnements de données », c'est-à-dire le fait d'ajouter des données inexacts ou fallacieuses dans des ensembles de données d'entraînement afin de modifier le comportement d'un modèle ou de réduire son exactitude, par exemple pour qu'il produise de faux résultats dans des situations particulières ou dans toutes les situations.

La réglementation relative à l'IA générative est en train d'émerger en réponse à la généralisation de ces outils à la fin de 2022. Toutefois, le retard dans les politiques publiques, la mise en œuvre et l'application de ces réponses dans le monde entier pourrait dégrader la qualité du discours public en ligne et la qualité de l'information sur l'internet. Il pourrait être très difficile, sinon impossible, de remédier à ces dommages dans les prochaines années (OCDE, 2023_[43]).

Les ressources en code source ouvert peuvent rendre les progrès plus largement accessibles mais elles créent d'autres problèmes

Beaucoup de ressources et d'outils de développement de l'IA sont en code source ouvert et disponibles dans le domaine public, ce qui facilite leur adoption à large échelle et permet d'appliquer le principe de la contribution participative à la résolution des questions. Citons à titre d'exemple TensorFlow (Google) et PyTorch (Meta) (des bibliothèques open source pour le langage de programmation Python), qui peuvent être utilisées pour entraîner des réseaux neuronaux d'applications de vision par ordinateur et de détection d'objets. Des entreprises et des chercheurs ont entrepris de partager publiquement des outils et des ensembles de données d'entraînement post-curation afin de promouvoir la diffusion de l'IA (OCDE, 2019_[3]). Ces dernières années, les développeurs de code source libres ont adapté et développé des modèles d'IA remarquables à une vitesse impressionnante. (Benaich et al., 2022_[44]).

La communauté de code source ouvert pour l'IA utilise des plateformes telles que GitHub et Hugging Face pour accéder à des ensembles de données, des codes ou des référentiels de modèles d'IA en code source ouvert, et pour échanger des informations sur les évolutions de l'IA. Entre 2012 et 2022, le nombre de projets d'IA en code source ouvert dans le monde (mesuré par le nombre de « référentiels » ou « projets » GitHub liés à l'IA) a été multiplié par plus de 100, ce qui témoigne de la popularité croissante des plateformes de logiciels libres (OECD.AI, 2023_[45]). De plus, l'IA est devenue plus accessible grâce aux plateformes sans code ou à faible niveau de code : ces interfaces conviviales contribuent en effet à lever en grande partie les obstacles à l'entrée sur le marché de l'entraînement et de l'utilisation des IA (Marr, 2022_[46]).

Si plusieurs entreprises d'IA exploitent des modèles et des systèmes d'IA propriétaires et commercialisent l'accès à ces outils, certaines les rendent disponibles en code source ouvert, par exemple Meta et son modèle de langue LLaMA 2 (Meta, 2023_[47]). L'émergence de plusieurs modèles d'IA en code source ouvert est un facteur d'accélération de l'innovation et du développement qui pourrait atténuer la dynamique « tout au gagnant » qui a permis à quelques entreprises de s'approprier la majeure partie du marché (Dickson, 2023_[48]). Cependant, travailler en code source ouvert comporte d'autres risques potentiellement importants tels que l'absence ou l'insuffisance des moyens de se protéger contre les utilisations malveillantes.

Les capacités de vision par ordinateur continuent de progresser mais les applications telles que la reconnaissance faciale soulèvent des inquiétudes

Depuis son apparition dans les années 1960, la vision par ordinateur est essentielle au développement d'une IA capable de percevoir le monde autour d'elle et d'y réagir (Russell et Norvig, 2016_[11]). Ce sont les avancées en détection et reconnaissance faciales ou en classification d'images qui ont permis d'importants progrès technologiques dans des domaines tels que le légendage d'images et la traduction d'images (le procédé consistant à reconnaître les caractères présents dans une image pour en extraire le texte qu'elle contient). Certaines techniques de vision par ordinateur ont désormais atteint leur pleine maturité, comme la détection et la reconnaissance faciales ou la classification d'images.

La reconnaissance faciale, une application clé rendue possible par la vision par ordinateur, fait l'objet de beaucoup d'attention dans le débat public et dans les sphères institutionnelles, à l'heure où les pays se préparent à élaborer des lois pour régir l'IA. Dans de nombreux pays et territoires, elle s'est trouvée au cœur de discussions sur les applications « à haut risque » de l'IA et, notamment, sur la question de son utilisation par les forces de l'ordre. Les risques de biais algorithmiques et d'atteintes à la confidentialité des données ont conduit, à diverses reprises, à des appels et à des actions visant à limiter certaines utilisations des technologies de reconnaissance faciale, par exemple dans l'espace public (OCDE, 2021_[49]). Une analyse de technologies commerciales de reconnaissance faciale fondées sur l'IA a montré qu'elles identifiaient les visages à la peau claire et ceux d'hommes avec plus d'exactitude que les visages à la peau foncée et ceux de femmes (Buolamwini et Gebu, 2018_[50] ; Anderson, 2023_[51]). Dans de nombreux cas, le biais est dû à l'utilisation de larges ensembles de données d'entraînement à l'intérieur desquels il manque des échantillons représentatifs de la diversité des groupes dans la population. Cela met en exergue le rôle important que les données de synthèse peuvent jouer en générant des ensembles de données plus représentatifs utilisables pour l'entraînement. La technologie de reconnaissance faciale a également été associée à des identifications erronées et des arrestations indues, principalement dans des communautés racisées (Benedict, 2022_[52]). Par exemple, en Chine, un système de reconnaissance faciale a pris un visage affiché sur un bus pour une piétonne en train de traverser illégalement la rue (Shen, 2018_[53]). Des exemples comme celui-là montrent qu'il est possible d'utiliser cette technologie puissante à



des fins malveillantes pour nuire à certains groupes de population. C'est pourquoi différentes juridictions envisagent de renforcer la réglementation et, notamment l'interdiction d'utiliser l'IA par les autorités publiques à des fins de reconnaissance biométrique.

Des experts ont identifié des considérations importantes que les responsables de l'élaboration des politiques doivent prendre en compte pour garantir des technologies de vision par ordinateur dignes de confiance. Premièrement, il importe de prêter attention aux larges ensembles de données utilisées pour l'entraînement des modèles qui ont récemment donné lieu à des atteintes à la vie privée, des biais ou des atteintes au droit d'auteur. Deuxièmement, les modèles d'IA eux-mêmes nécessitent souvent de grandes architectures de calcul qui consomment énormément d'énergie, et posent des problèmes, notamment d'explicabilité, car ils sont trop complexes pour être compris par l'être humain. C'est pourquoi certains chercheurs s'emploient à améliorer l'explicabilité, par exemple à l'aide de méthodes telles que l'« interprétabilité mécaniste », qui consiste à analyser les éléments des modèles par rétro-ingénierie pour les rendre compréhensibles par l'être humain (Conmy et al., 2023^[54]). Troisièmement, l'impact du déploiement de l'IA dans le monde réel doit être examiné de près, en particulier les effets sociaux et économiques de l'IA, par exemple ses conséquences en termes d'équité (OCDE, 2023^[25]).

Les robots deviennent plus performants et plus intelligents grâce à l'IA

Les robots peuvent être définis comme des « agents physiques qui exécutent des tâches en manipulant le monde physique » avec des composants mécaniques tels que des bras, des articulations, des roues et des capteurs (caméras et lasers) leur permettant de percevoir un environnement (Russell et Norvig, 2016^[11]). L'IA peut être « incorporée » dans des robots aux fins de l'exécution d'un large éventail de tâches parmi lesquelles la fabrication et l'assemblage, le transport et l'entreposage, et diverses applications en situation d'urgence, lorsque l'intervention humaine peut être dangereuse ou physiquement impossible. En associant la robotique à des modèles de génération d'images ou de contenus audio ou vidéo, on peut aussi produire des systèmes avancés dotés de capacités multimodales combinant ces fonctions (Lorenz, Perset et Berryhill, 2023^[10]).

De plus amples améliorations technologiques pourraient résulter en une croissance rapide du marché d'applications robotiques. Certaines estimations donnaient déjà le marché des robots mobiles autonomes à 2.7 milliards USD en 2020 et, selon les projections, il pourrait atteindre 12.4 milliards USD d'ici à 2030 (Allied Market Research, 2022^[55]).

Des progrès ont également lieu en robotique neuromorphique, la discipline qui étudie les machines contrôlées par des ondes cérébrales plutôt que par une commande vocale par exemple. Cela pourrait rendre possible la mise point d'implants cérébraux et d'« exosquelettes » motorisés portables par des personnes, qui utilisent l'apprentissage automatique et des capteurs pour collecter et traiter des données en temps réel (Lim, 2019^[56]). La technique du jumeau numérique fondé sur l'IA (copie d'un système ou d'un réseau à des fins de modélisation) a également été étudiée dans des applications de téléchirurgie, en plus des robots et de la réalité virtuelle, dans les situations où il est nécessaire que la latence du réseau soit faible (réseaux rapides) et que la sécurité et la fiabilité soient élevées (Laaki, Mîche et Tammi, 2019^[57]). De telles évolutions pourraient augmenter considérablement la solidité et la fiabilité des prothèses orthopédiques, rendre plus précises les applications de téléchirurgie, voire favoriser la chirurgie robot-assistée dans l'espace et dans des zones isolées, ainsi que d'autres applications de santé de pointe (Bryant, 2019^[58] ; Newton, 2023^[59]).

L'augmentation d'échelle des modèles d'IA continuera-t-elle de faire progresser leurs capacités ?

Dans le domaine de l'apprentissage profond, les recherches relatives aux « lois d'échelle » apportent des éclairages sur les trajectoires prévisibles de « l'augmentation d'échelle » de l'IA (amélioration de l'IA par entraînement de modèles avec davantage de paramètres, de capacité de calcul et de données, ce qui engendre souvent des coûts d'entraînement substantiels). Ces lois approximatives décrivent la relation entre la performance d'un modèle d'IA et l'échelle de ses principaux intrants. Par exemple, des chercheurs ont observé une augmentation de la performance des modèles de langue avec l'accroissement de la capacité de calcul, la taille de l'ensemble de données et le nombre de paramètres (Kaplan et al., 2020^[60]). Les modèles de langue plus grands sont généralement plus performants, ce qui indique une relation entre performance et échelle.

Cependant, il pourrait ne pas être possible de redimensionner les modèles à l'infini si le travail de développement des IA devient limité par l'accès à la capacité de calcul et aux données. À mesure que le nombre de paramètres des modèles d'IA augmente, des arbitrages pourraient devenir nécessaires, par exemple entre le coût de la capacité de calcul et la quantité de mémoire requise. Par ailleurs, d'autres voix s'élèvent pour dire que les grands modèles de langue fondés sur l'inférence probabiliste n'ont aucune capacité de raisonnement, donc pourraient ne jamais produire des résultats entièrement exacts (LeCun, 2022^[61]). Par conséquent, certains émettent l'hypothèse que les architectures de modèles actuelles ne permettront jamais d'atteindre une précision et une généralisation complètes

Certains experts se demandent également si les modèles de recherche avec agents conversationnels fondés sur l'IA (tels que Chat GPT) bénéficieront effectivement des lois d'échelle, étant donné les coûts considérables à mobiliser pour réentraîner les modèles sous-jacents afin qu'ils restent d'actualité et puissent continuer de fournir aux internautes les informations les plus récentes (Marcus, 2023^[62]). Enfin, certains travaux montrent que l'augmentation d'échelle des modèles pourrait aller plus vite que la disponibilité des données dans les années à venir (Villalobos et al., 2022^[63]).

Les prédictions concernant les trajectoires et les conséquences futures de l'IA varient selon les experts

Les recherches en IA et les discussions autour de l'action publique dans ce domaine portent souvent sur les problèmes que pose l'IA aujourd'hui. Pourtant, les conséquences à long terme de systèmes d'IA toujours plus perfectionnés restent, quant à elles, très incertaines et vivement débattues. Les experts mettent en avant un certain nombre de risques futurs possibles, dont certains se manifestent déjà de diverses manières. En même temps, des experts et d'autres membres de la communauté s'attendent à ce que l'IA produise des avantages considérables voire révolutionnaires. Il est indispensable de mener des activités prospectives pour mieux comprendre les conséquences potentielles de l'IA à long terme et commencer à les façonner dès à présent afin de maximiser les bénéfices de l'IA tout en veillant à en limiter les risques (OCDE, à paraître^[64]).

La veille stratégique et les autres activités prospectives peuvent aider les responsables de l'action publique à anticiper les futurs possibles et, ainsi, à travailler dès à présent à leur donner forme. La veille stratégique est un moyen structuré et systématique d'utiliser l'idée que l'on se fait de l'avenir pour anticiper les changements et s'y préparer. Elle consiste à examiner différents futurs plausibles, ainsi que les opportunités et les risques associés. Elle permet de mettre au jour les hypothèses implicites, de remettre en cause les perspectives dominantes, et d'envisager des résultats possibles qui, sans cela, auraient pu être ignorés. Elle fait intervenir une panoplie de méthodes : analyse prospective pour identifier les changements émergents, analyse des « mégatendances » pour révéler et examiner les directions que l'avenir pourrait prendre, et exploration de scénarios pour nous aider à nous préparer à différents futurs (OCDE, à paraître^[64]).

Prenant acte du fait que les évolutions futures de l'IA pourraient présenter à la fois de formidables opportunités à l'échelle mondiale et des risques considérables, 28 pays et l'Union européenne réunis en novembre 2023 ont signé la Déclaration de Bletchley, au travers de laquelle la communauté internationale s'engage à coopérer dans le domaine de l'IA pour s'assurer qu'elle est conçue, développée, déployée et utilisée de façon sécuritaire, et de manière à être centrée sur l'humain, digne de confiance et responsable (AI Safety Summit, 2023^[65]). Cette Déclaration prévoit également la tenue d'une série de Sommets sur la sécurité de l'IA, afin de tout mettre en œuvre pour que les avantages et risques que l'IA pourrait présenter à l'avenir restent un thème d'importance et de débat à l'échelle internationale.

L'IA devrait produire d'importants bénéfices à l'avenir

Même si la plupart des gros titres médiatiques concernent les risques, l'IA devrait aussi produire des avantages considérables. Dans le cadre du Processus du G7 d'Hiroshima sur l'intelligence artificielle générative, les membres du G7 ont, à l'unanimité, fait savoir qu'ils considéraient les gains de productivité, la promotion de l'innovation et de l'entrepreneuriat et la matérialisation de solutions aux enjeux mondiaux comme quelques-unes des principales possibilités offertes par les technologies d'IA au niveau mondial, y compris pour les économies émergentes et en développement. Ils ont souligné également que l'IA générative pouvait aider la société à relever certains défis urgents, comme l'amélioration des soins de santé, la recherche d'une issue à la crise climatique, et l'avancement vers la réalisation des Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies (OCDE, 2023^[66]). Les avantages potentiels de l'IA sont les suivants :

- **Améliorer la productivité et la croissance économique.** Les projections concernant la contribution possible de l'IA à la croissance du PIB sont variables. Certaines études de marché estiment que le marché mondial de l'IA, incluant les matériels, les logiciels et les services, pourrait afficher un taux de croissance annuel composé de 18,6 % entre 2022 et 2026, ce qui porterait le marché de l'IA à 900 milliards USD en 2026 (IDC, 2022^[67]). D'autres estimations placent le marché de l'IA à plus de 1 500 milliards USD d'ici à 2030 (Thormundsson, 2022^[68]). S'agissant de l'IA générative en particulier, il est estimé qu'elle pourrait faire augmenter le PIB mondial de 7 % en dix ans (Goldman Sachs, 2023^[69]).
- **Accélérer les progrès scientifiques.** L'IA a le potentiel de déclencher des innovations et d'accélérer la vitesse des progrès scientifiques (OCDE, 2023^[70]). Elle pourrait accroître la productivité des scientifiques et aider à surmonter certains goulets d'étranglement des ressources auparavant insurmontables, avec des gains de temps et une utilisation plus efficace des ressources (Ghosh, 2023^[71]). Des effets de cet ordre sont déjà visibles avec l'IA qui rend possibles des progrès dans des domaines tels que la fusion nucléaire et la découverte de nouveaux anticorps déterminants pour sauver des vies (Stanford, 2023^[72] ; Yang, 2023^[73]).



- **Renforcer l'éducation.** L'IA pourrait offrir des possibilités de tutorat personnalisé et autres opportunités d'apprentissage personnalisé, pour l'heure réservées aux seules personnes qui en ont les moyens économiques, ce qui permettrait d'élargir l'accès de toutes et tous à une éducation de qualité (Molenaar, 2021^[74]). Du côté de l'enseignement, l'IA pourrait aider les professeurs à créer des supports pédagogiques et des plans de cours adaptés aux besoins de leurs élèves (Fariani, Junus et Santoso, 2023^[75]).
- **Améliorer les soins de santé.** Les progrès des technologies d'IA pourraient transformer de nombreux aspects des services de santé et des prestations de soins de santé. Cela pourrait recouvrir des interventions au niveau individuel conçues pour donner des informations personnelles de santé, ainsi que des interventions d'amélioration de diagnostic permettant d'alléger la charge de travail des prestataires de soins de santé (Anderson et Rainie, 2018^[76] ; Davenport et Kalakota, 2019^[77]).

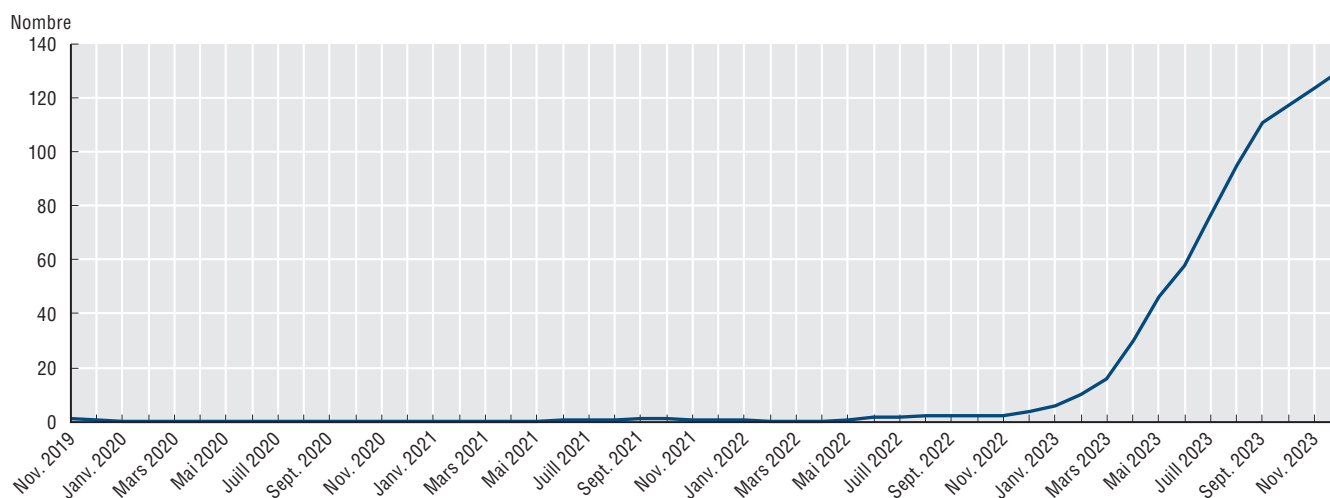
Les avantages potentiels de l'IA s'accompagnent de risques et de trajectoires futures incertaines

Les experts, la société civile et les pouvoirs publics ont mis de l'avant de nombreux risques possibles de l'IA. Par exemple, la Déclaration de Bletchley mentionne la possibilité d'apparition de risques imprévus, tels que ceux que pourraient entraîner la désinformation ou la manipulation de contenus, et les risques de sécurité que pourraient poser des modèles d'IA étroits ou à usage général hautement performants, les capacités les plus sophistiquées des modèles les plus avancés pouvant causer des dommages substantiels voire catastrophiques.

Bien que l'attention ait été portée sur la prévention des effets négatifs des systèmes d'IA avancés à moyen et à long terme, certains risques sont déjà apparents. Les premiers travaux de suivi des incidents liés à l'IA ont montré que les incidents et les dangers associés à l'IA générative dont il est fait mention dans la presse ont augmenté de manière exponentielle depuis 2022 (graphique 2.3) (OCDE, 2023^[66]). Les membres du G7 estiment que les principaux dangers de l'IA générative à court terme sont la désinformation et la manipulation, l'atteinte aux droits de la propriété intellectuelle et les menaces pour la vie privée (OCDE, 2023^[66]).

Graphique 2.3. Le nombre d'incidents et de dangers liés à l'IA générative mentionnés dans les médias de bonne réputation a augmenté de façon exponentielle depuis 2022

Nombre d'incidents et de dangers associés à l'IA générative enregistrés dans Event Registry, moyenne mobile sur trois mois, 2019-23



Notes : Ce graphique montre la moyenne mobile sur trois mois du nombre réel d'incidents et de dangers signalés. Les résultats peuvent différer de l'analyse précédente en raison des modifications apportées à la méthodologie de regroupement des articles en incidents.

Source : OCDE, 2024^[78], Dispositif de surveillance des incidents liés à l'IA, d'après des données d'Event Registry. Pour plus d'informations, veuillez consulter : www.oecd.ai/incidents.

StatLink <https://stat.link/kwm9sp>

L'IA pourrait amplifier les phénomènes de mésinformation et de désinformation à une échelle sans précédent. L'IA générative peut produire de nouvelles images ou vidéos en réponse à des invites textuelles ou des messages audio en changeant de ton ou d'accent à partir de données d'entrée relativement limitées (par exemple, le court enregistrement d'une voix humaine). Aujourd'hui déjà, les produits de l'IA générative peuvent être difficiles à distinguer des créations humaines (Kreps, McCain et Brundage, 2022^[79]), ce qui soulève des questions pour l'action publique concernant la facilité avec laquelle on peut utiliser l'IA pour produire de la mésinformation, de la désinformation, de fausses informations

(infox), des hypertrucages et d'autres contenus manipulés convaincants (Sessa, 2022_[80]). Les défis peuvent être colossaux quand les questions touchent à la science, par exemple l'efficacité des vaccins et le changement climatique, et dans des contextes politiques polarisés. Des mesures d'atténuation commencent à apparaître, comme les filigranes et la détection d'hypertrucages fondée sur l'IA, mais les approches actuelles ont des limitations importantes et pourraient ne pas suffire pour lutter contre les problèmes à venir (Lorenz, Perset et Berryhill, 2023_[10]). De l'avis de certains experts, des systèmes d'IA de plus en plus avancés pourraient, au cours du temps, alimenter des phénomènes de persuasion de masse et de manipulation des populations (Anderson et Rainie, 2018_[76]), ce qui causerait des préjudices matériels aux niveaux individuel et sociétal et éroderait la confiance de la société et les échanges d'informations factuelles qui sous-tendent le travail scientifique, la prise de décision fondée sur des éléments probants et la démocratie (OCDE, 2022_[81]).

Les « hallucinations », la « pollution informationnelle » et l'« empoisonnement de données » nuisent à la qualité des données et érodent la confiance du public. Les productions de l'IA peuvent affaiblir la qualité des données en ligne, puisque l'IA crée parfois des « hallucinations » ((inventions de faits de façon crédible, souvent quand une bonne réponse n'est pas trouvée dans les données d'entraînement). Cela peut contribuer à la « pollution informationnelle » : il devient possible que des données générées par IA fragilisent le « bien commun » en ligne et créent un cercle vicieux, où d'autres modèles d'IA sont entraînés avec des données de qualité inférieure produites par l'IA (Lorenz, Perset et Berryhill, 2023_[10]). L'IA pourrait aussi être utilisée par des acteurs malveillants pour saboter ou détériorer des données robustes, ce que l'on appelle « l'empoisonnement de données » (OCDE, 2023_[43]).

L'IA pourrait fortement perturber les marchés du travail. L'IA avancée pourrait aider les gens à trouver un emploi, mais aussi déplacer des professionnels hautement qualifiés ou, à tout le moins, modifier la nature de certains emplois. L'IA avancée peut être conçue pour aider les humains sur le marché du travail, y compris avec des « robots collaboratifs » ou « cobots ». Toutefois, certains chercheurs et experts craignent que l'IA de plus en plus performante, telle que l'IA capable d'agir en tant qu'agent autonome, ne remplace dans certains cas des tâches hautement qualifiées et bien rémunérées (par exemple, les programmeurs, les avocats ou les médecins), ce qui entraînerait des perturbations économiques et sociales. (Metz, 2023_[82] ; Clarke et Whittlestone, 2022_[83] ; Russell, 2021_[84]). Même si l'IA ne cause pas une perte nette d'emplois, il est probable que les tâches qui composent le travail changent radicalement et, partant, que cela modifie les besoins de compétences (OCDE, 2023_[85] ; OCDE, 2023_[86]).

Intégrer l'IA dans des infrastructures critiques pourrait comporter des risques importants. L'IA est de plus en plus intégrée dans des infrastructures critiques car elle peut augmenter la rapidité et l'efficacité, la sécurité et/ou la fiabilité, ou réduire les coûts (Laplante et al., 2020_[87]). Cependant, certaines voix préviennent que cela pourrait permettre à des acteurs malveillants d'utiliser l'IA pour causer des dommages dans le monde physique ou virtuel (Zwetsloot et Dafoe, 2019_[88] ; OCDE, 2022_[89]). Déployée dans des installations vitales comme des usines chimiques ou des centrales nucléaires, l'IA pourrait poser de graves risques de sécurité et de sûreté pour l'ensemble de la société si la fiabilité ou la sûreté de ses modèles et systèmes s'avèrent insuffisantes.

Les modèles et systèmes d'IA peuvent accentuer les biais et creuser les inégalités. En reproduisant les biais existants, dont ceux qui contiennent ses données d'entraînement, l'IA peut propager, automatiser et perpétuer des préjudices sociaux, des stéréotypes et des facteurs de discrimination dans ses résultats. Ceci pourrait marginaliser ou exclure encore davantage certains groupes de population (Bender et al., 2021_[90] ; NIST, 2022_[91]). Par exemple, il a été montré que les outils d'IA générative produisent des avatars numériques ou des images de femmes ouvertement sexualisées, tandis que les hommes sont représentés comme plus professionnels et concentrés sur leur carrière (Heikkilä, 2022_[92]). D'autres observations ont mis en évidence des biais concernant certaines religions (Abid, Farooqi et Zou, 2021_[93]). Par ailleurs, plus l'IA gagne en complexité, plus elle pourrait exacerber les tensions entre les économies avancées et les économies émergentes, et créer des inégalités d'accès aux opportunités et aux ressources. Ces risques pourraient être aggravés par le « biais d'automatisation » – la tendance à se fier aux résultats d'une IA parce qu'ils semblent rationnels et neutres – que l'on observe quand des personnes acceptent les résultats d'une IA sans chercher à les contrôler ou presque (Horowitz, 2023_[94] ; Alon-Barkat et Busuioc, 2022_[95]). Dans le même temps, des outils d'IA peuvent aider, au niveau opérationnel, à interpréter et à questionner des décisions complexes générées par IA et, ce faisant, dissuader de leur accorder une confiance excessive. De façon plus générale, l'inégalité d'accès aux ressources d'IA risque de créer et de creuser des écarts à l'intérieur des pays et entre les pays, par exemple entre les économies émergentes et développées.

L'IA générative suscite des préoccupations concernant la protection des données et de la vie privée. Les grandes quantités de données utilisées pour entraîner l'IA, en particulier l'IA générative, suscitent des préoccupations concernant la protection des données et de la vie privée. Le traitement de données à caractère personnel aux fins de l'entraînement d'un modèle ou leur utilisation pour l'automatisation de la prise de décision peuvent entrer en conflit avec les exigences des réglementations sur la protection des données. Par exemple, quand des données sont utilisées pour de la prise de décision automatisée, le Règlement général sur la protection des données (RGPD) de l'Union européenne exige de



l'opérateur qu'il fournisse « des informations utiles concernant la logique sous-jacente », ce qui peut poser des difficultés lorsque l'information nécessaire à l'entraînement de l'IA a été traitée par un réseau de neurones de type « boîte noire » qui n'est ni explicable ni répliquable par l'être humain.

Les droits de propriété intellectuelle sont un autre domaine avec des obstacles et des inconnues. L'IA générative, en particulier, soulève des questions concernant les droits de propriété intellectuelle : contenus non soumis à licence dans des données d'entraînement ; risques de voir les créations d'une IA porter atteinte à un droit d'auteur, une marque ou un brevet ; et interrogations concernant la propriété des travaux générés par IA. L'IA générative est entraînée avec des quantités massives de données collectées sur internet, parmi lesquelles des données soumises au droit d'auteur, souvent sans l'autorisation des détenteurs des droits. La question de savoir si cette pratique peut être autorisée est débattue dans les différentes juridictions, et beaucoup d'affaires sont actuellement en cours d'examen (Zirpoli, 2023^[96]). Les décisions légales qui seront prises créeront des précédents et auront un impact sur la capacité du secteur de l'IA générative à entraîner des modèles. Comme tous les systèmes juridiques du monde ne gèrent pas de la même façon les droits de propriété intellectuelle, le traitement des travaux générés par IA varie d'un pays à un autre (Murray, 2023^[97]). Même si la plupart des pays et territoires conviennent du fait que des travaux produits par une IA ne peuvent pas bénéficier de la protection du droit d'auteur (Craig, 2021^[98]), les avis pourraient évoluer à mesure que l'IA se généralise.

De nombreuses solutions sont proposées pour aider à récolter les bénéfices et atténuer les risques liés à l'IA

Il est nécessaire d'agir dès à présent pour parer aux imprévus et dessiner les futurs possibles de l'IA. De nombreuses solutions à même d'aider à récolter les bénéfices de l'IA et à en atténuer les risques ont été proposées par des chercheurs, des experts et des philosophes. L'OCDE, par l'intermédiaire de son Groupe d'experts sur les futurs de l'IA, a recensé près de 70 solutions envisageables, actuellement examinées et analysées². Les membres du groupe d'experts partagent le même avis concernant les solutions possibles les plus importantes qui figurent dans la liste plus bas :

- règles en matière de responsabilité en cas de dommages causés par une IA ;
- obligation pour un système d'IA de révéler qu'il utilise l'IA lorsqu'il interagit avec un être humain ;
- R-D sur les moyens d'évaluer les capacités et les limitations des systèmes d'IA, et de prévenir les accidents, les mauvaises utilisations et d'autres conséquences dommageables ;
- lignes rouges de l'IA, notamment avec des réglementations interdisant certaines utilisations ou certains résultats de l'IA ; et
- entraînement et déploiement contrôlés des modèles et systèmes d'IA à haut risque.

Les experts ne sont pas parvenus au même niveau de consensus quant à d'autres solutions telles que des moratoires ou des interdictions frappant l'IA avancée et des déclarations internationales sur la gestion des risques potentiels de l'IA.

Démystifier les débats sur le maintien du contrôle humain des systèmes d'IA et l'alignement des systèmes d'IA sur les valeurs humaines

Le risque que les humains perdent le contrôle des systèmes d'IA a fait l'objet d'une attention particulière en 2023, tant dans les médias que lors du sommet sur la sécurité de l'IA organisé par le Royaume-Uni. Toutefois, le sujet est controversé. Dans un sondage mené en 2023 par le groupe d'experts de l'OCDE sur les futurs de l'IA, les personnes interrogées ont classé la perte de contrôle autant parmi les risques les plus importants que les moins importants de l'IA.

À mesure que les systèmes d'IA deviendront plus performants et qu'on leur confiera davantage la responsabilité de tâches importantes, une absence ou un défaut d'alignement des valeurs et des objectifs de la machine sur ceux de l'être humain pourrait, de l'avis de certains experts, présenter le risque que des systèmes d'IA se mettent à agir contre l'intérêt de l'être humain. Cette inquiétude a donné naissance au champ de recherche de l'« alignement de l'IA », qui vise à identifier des moyens de s'assurer que le comportement des systèmes d'IA est systématiquement cohérent avec les préférences, les valeurs et les intentions humaines (Russell, 2019^[99] ; Dietterich et Horvitz, 2015^[100] ; Dung, 2023^[101] ; Bekenova et al., 2022^[102]).

Il peut être difficile de déterminer si les objectifs qu'un système d'IA cherche à atteindre correspondent bien aux intentions et aux buts de ses créateurs. Certains problèmes ont fait leur apparition, comme celui du « piratage de récompense » (*reward hacking*), lorsqu'un modèle trouve des moyens imprévus et potentiellement dommageables d'atteindre son objectif en exploitant les signaux de récompense (Skalse et al., 2022^[103] ; Cohen, Hutter et Osborne, 2022^[104]). Par exemple, pour augmenter la participation active des internautes, des systèmes d'IA déployés pour gérer des contenus sur des réseaux sociaux pourraient promouvoir des articles défendant des points de vue extrêmes afin de susciter des réactions, alors que la population bénéficierait davantage (et les préférences humaines réelles peuvent en rendre compte) d'un contenu équilibré et non polarisé (Grallet et Pons, 2023^[105]).

Un certain nombre d'experts estiment qu'on ne dispose pas à présent de méthodes suffisamment robustes pour assurer l'alignement des systèmes d'IA sur les valeurs humaines (OCDE, 2022_[89]) et que cette question est l'un des principaux « problèmes non résolus » en matière de gouvernance de l'IA (Hendrycks et al., 2022_[106]). Dans l'enquête de 2023 du Groupe d'experts de l'OCDE sur les futurs de l'IA, le fait qu'il n'existe pas de méthodes robustes pour assurer l'alignement entre les résultats des systèmes d'IA et les valeurs humaines est classé comme l'un des risques futurs possibles les plus importants. En articulant le concept d'alignement avec celui de contrôle, des membres de la communauté d'expertise de l'IA ont formulé la théorie selon laquelle les conséquences négatives déjà observées aujourd'hui avec des systèmes d'IA relativement basiques pourraient être poussées à l'extrême si des systèmes d'IA hautement performants étaient mis au point, potentiellement selon un processus si rapide que l'être humain ne pourrait pas maintenir le contrôle, par exemple si les machines acquièrent la capacité de s'améliorer elles-mêmes de manière indépendante (Cotton-Barratt et Ord, 2014_[107]).

Un autre problème sous-jacent tient au fait que les systèmes d'IA, s'ils peuvent très efficacement poursuivre des objectifs que l'être humain leur a fixés, peuvent parfois le faire d'une façon que les développeurs n'avaient pas anticipée. Pour atteindre leur but, les systèmes d'IA sont susceptibles de créer des sous-objectifs (des moyens au service d'une fin) en contradiction flagrante avec les valeurs et l'intention qui sous-tendaient les objectifs définis par l'être humain. Il a même été avancé que cela pourrait conduire à des machines résistant à leur débranchement, puisque l'état « débranché » peut être considéré comme allant à l'encontre de la réalisation des objectifs (Russell, 2019_[99]). Cependant, comme indiqué dans l'encadré 2.2, l'émergence d'une intelligence artificielle générale – le niveau d'avancement dont on théorise qu'il est nécessaire pour de tels scénarios – est hypothétique et très controversée. Des experts expliquent que la réalisation-même d'une IAG pourrait être une tâche extrêmement complexe et difficile, ce qui fait de la notion de « problème de l'alignement » un concept prématuré manquant de définitions et de frontières claires et communément admises (LeCun, 2022_[109]). Les recherches dans ce domaine peuvent être ardues, en raison du nombre limité d'articles publiés dans des revues à comité de lecture, du manque de techniques de modélisation appropriées et de l'absence de définitions spécifiques et d'une terminologie standardisée (McLean et al., 2021_[110]).

Vers un avenir où l'IA est digne de confiance : considérations intéressantes l'action publique

Les progrès rapides des capacités de l'IA n'ont pas encore été accompagnés de garanties quant à la fiabilité et à la sécurité de l'IA. L'IA, qui évolue vite, pourrait produire des résultats dangereux, en particulier puisqu'on n'attend pas d'avoir appréhendé toutes les conséquences et risques du déploiement des produits fondés sur l'IA pour les transférer des contextes de recherche vers des environnements d'utilisation grand public. Les techniques d'IA avancées telles que l'apprentissage profond posent des problèmes de sécurité et d'assurance particuliers, parce que les experts de la technologie et les responsables de l'élaboration des politiques n'en comprennent pas pleinement le fonctionnement donc ne peuvent pas avoir recours aux garde-fous traditionnels pour en assurer la fiabilité. Le manque d'explicabilité empêche de comprendre la façon dont les systèmes d'IA génèrent leurs résultats (sous la forme de prédictions, de contenus, de recommandations, ou de décisions), d'où les problèmes en matière de transparence, de robustesse et de responsabilité. Plus les applications d'IA sont à usage général, plus il est difficile d'entraîner les modèles et systèmes à produire une réponse appropriée dans chaque scénario envisageable – au contraire des modèles d'IA dits « étroits », ciblés sur l'optimisation de résultats dans un contexte bien défini.

À l'heure actuelle, on comprend peu et on s'entend peu sur la gravité possible des risques de l'IA à l'avenir. Les experts devraient sensibiliser les responsables du développement des politiques publiques aux risques liés à l'IA et les aider à mieux les comprendre, et identifier les principales sources de ces risques. Pour aider à atténuer certains de ces risques, il faudra élaborer des méthodes plus poussées pour l'interprétation et l'assurance de l'IA, et faire en sorte que les développeurs puissent déployer des modèles et des systèmes qui se comportent comme prévu de façon fiable, même dans des contextes inédits.

Progression des pays sur la voie du déploiement d'une IA digne de confiance

Les priorités de R-D en IA figurent en bonne place dans les programmes stratégiques nationaux, avec des investissements appelés à se poursuivre dans les années à venir

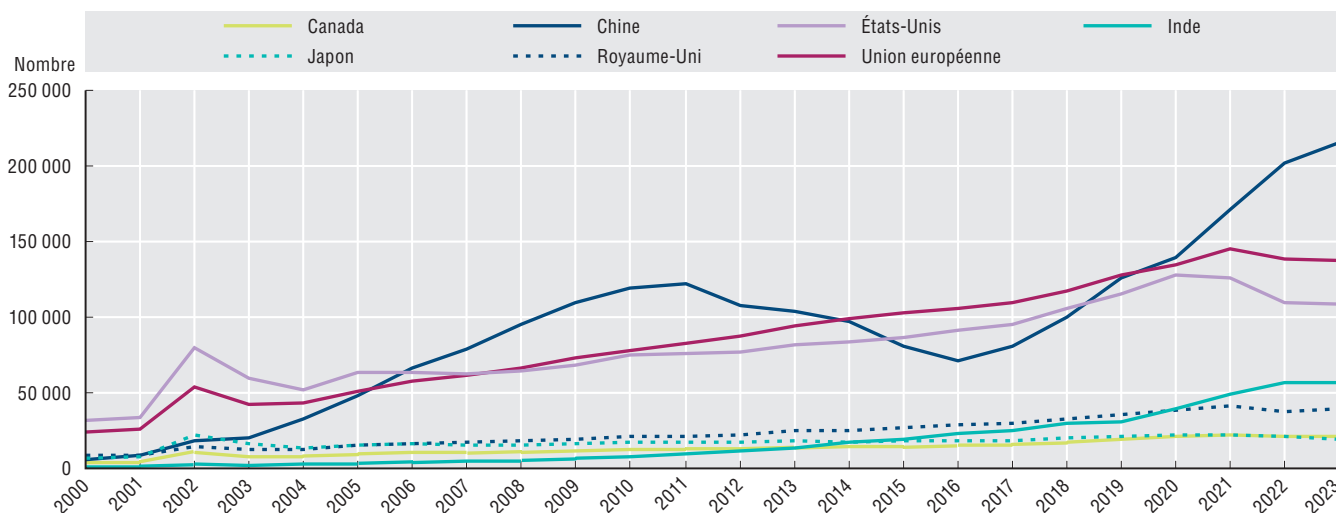
Les investissements dans la R-D en IA sont l'une des priorités des stratégies nationales en matière d'IA : les pouvoirs publics et les entreprises redoublent d'efforts pour tirer de l'IA un maximum de gains de productivité et de croissance économique. Cette tendance se maintiendra dans les années à venir. Les progrès spectaculaires de la R-D fondée sur l'IA font émerger des modèles économiques, des produits et des secteurs d'activité entièrement nouveaux, ce qui met en exergue l'importance de la recherche fondamentale, en particulier à l'heure où les pays s'emploient à consolider leurs capacités de R-D afin de rattraper les acteurs qui font la course en tête : la Chine, les États-Unis et l'Union européenne (OECD.AI, 2023_[111]).



Il est possible de mesurer les progrès de la R-D en IA en examinant le nombre de travaux sur l'IA publiés dans les différents pays. Si les États-Unis et l'Union européenne ont vu leurs publications de recherche sur l'IA (articles parus dans des périodiques, livres, actes de conférence et publications dans des référentiels universitaires tels qu'arXiv) augmenter régulièrement au cours des dernières décennies, la Chine a vu les siennes augmenter spectaculairement, et l'Inde aussi a enregistré des avancées notables (graphique 2.4). Depuis la mi-2019, la Chine a publié plus de travaux de recherche sur l'IA que les États-Unis ou que l'Union européenne. En Inde, le nombre de publications de recherche sur l'IA a plus que doublé depuis 2015 (OECD.AI, 2023^[111]).

Graphique 2.4. La Chine, l'Union européenne et les États-Unis publient le plus de travaux de recherche sur l'IA, suivis de l'Inde où la progression est notable

Nombre de publications de recherche sur l'IA par juridiction, 2000-23



Notes : Ce graphique montre l'évolution du nombre de publications de recherche sur l'IA dans un échantillon de pays chefs de file entre 2000 et 2023. Les publications OpenAlex sont des documents scientifiques tels que des articles parus dans des périodiques, des livres, des actes de conférence et des mémoires.

Source : OECD.AI (2023)^[111] d'après des données OpenAlex consultables à l'adresse : www.oecd.ai/en/data?selectedArea=ai-research.

StatLink <https://stat.link/fyepua>

Mais le nombre de publications sur l'IA ne suffit pas à donner une image complète de la qualité et de l'impact de ces publications. L'analyse du nombre de fois qu'une publication est citée peut être un indicateur approximatif de l'« impact » (un plus grand nombre de citations pouvant indiquer un plus fort impact). Depuis 2022, la part des États-Unis dans le total des publications de recherche sur l'IA à fort impact est en baisse, tandis que celle de la Chine est en hausse régulière : la Chine a d'ailleurs dépassé les États-Unis et l'Union européenne en 2019 (graphique 2.5). Pour ce qui est des institutions qui publient le plus de travaux sur l'IA, on observe qu'en 2023, sept des dix premières étaient implantées en Chine, les trois autres se trouvant respectivement en France, aux États-Unis et en France³ (OECD.AI, 2023^[111]).

Les pays allouent des financements importants à la R-D en IA par l'intermédiaire de divers instruments, dont les principaux sont la mise en œuvre de politiques, de plans et de programmes axés sur la R-D en IA, l'établissement d'instituts et de centres nationaux de recherche en IA et la consolidation de réseaux et de plateformes de collaboration au service de la recherche en IA. Les points forts de la Corée, des États-Unis, de la France, de la Türkiye, de l'Union européenne et de la Chine sont présentés ci-dessous.

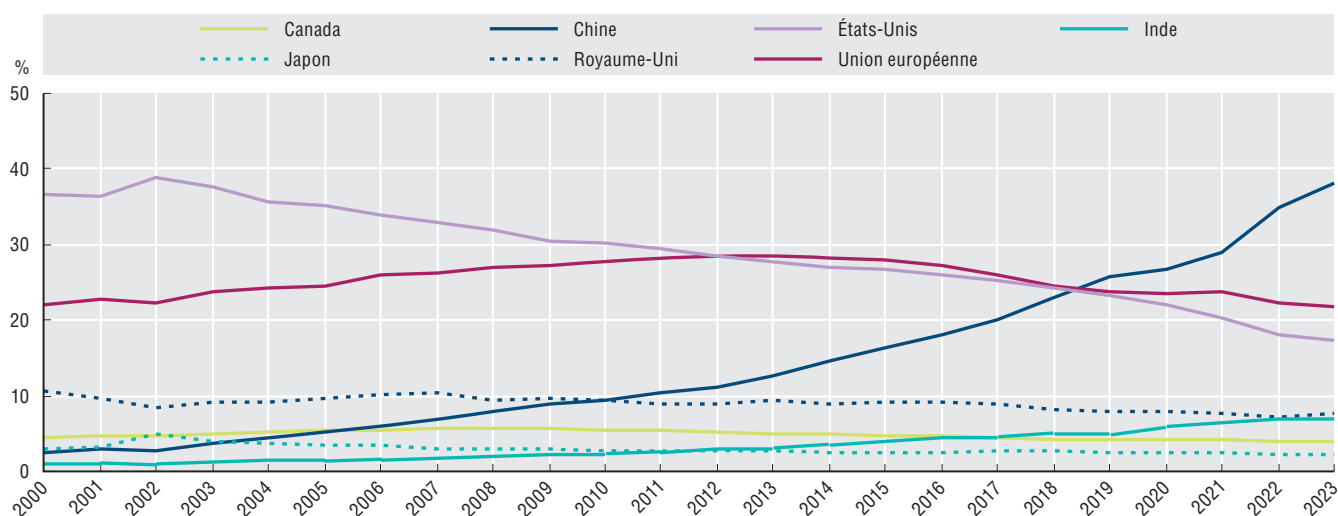
En 2021, le gouvernement de la **Corée** a annoncé un Plan de promotion de l'IA sur le thème de « l'IA dans toutes les régions pour notre population ». Il se concentre sur la création d'un « village de l'IA » dans la ville de Gwang-ju, qui servira de base à l'innovation en matière d'IA, ainsi que sur des projets dans tout le pays, en tenant compte des forces et des industries clés de chaque région. (Ministry of Science and ICT, 2021^[113])

Les **États-Unis**, au travers de leur Loi de 2020 relative à l'initiative nationale en faveur de l'IA (National AI Initiative Act), ont pris des mesures pour maintenir leur position de leader du domaine. En 2023, le Bureau de l'initiative nationale sur l'IA (National AI Initiative Office, NAIIO) a aidé à l'affectation de plusieurs milliards USD à des projets de R-D en IA liés et

non liés à la défense (NCST, 2022_[115]), dans le sillage des plans stratégiques nationaux sur la R-D en IA de 2016 et 2019. Le budget de 2023 comprend le financement de la Fondation nationale pour la science (*National Science Foundation*, NSF) qui soutient depuis longtemps la recherche en IA, notamment en accordant des bourses de recherche dédiées. En 2018, la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) a annoncé un investissement dans la R-D en IA de plus de 2 milliards USD. Le NSF et le Bureau de la politique scientifique et technologique de la Maison Blanche (*White House Office of Science and Technology Policy*, OSTP) ont récemment proposé d'établir une ressource nationale de recherche en IA (*National AI Research Resource*, NAIRR) qui fournirait aux chercheurs un accès à des ressources critiques (capacités de calcul, données, logiciels et ressources d'entraînement) au service de la R-D en IA (NAIRR Task Force, 2023_[116]).

Graphique 2.5. La part de la Chine dans le total des publications sur l'IA « à fort impact », en augmentation régulière depuis 2000, a dépassé celles des États-Unis et de l'Union européenne en 2019

Pourcentage de publications de recherche sur l'IA à fort impact par juridiction, 2000-23



Notes : Ce graphique montre l'évolution du pourcentage de publications de recherche sur l'IA « à fort impact » dans un échantillon de pays chefs de file entre 2000 et 2022. Les publications OpenAlex sont des documents scientifiques tels que des articles parus dans des périodiques, des livres, des actes de conférence et des mémoires. L'impact d'une publication est calculé en divisant le nombre de citations par le nombre moyen de citations dans la sous-discipline considérée, et en pondérant en fonction du nombre d'années écoulées depuis la parution de la publication (ce qui permet d'atténuer le poids des publications plus anciennes). Une publication est dite « à fort impact » si son score figure dans le quartile supérieur.

Source : OECD.AI (2023)_[111] d'après des données OpenAlex consultables à l'adresse : www.oecd.ai/en/data?selectedArea=ai-research.

StatLink <https://stat.link/ge2oxq>

En 2018, la France s'est appuyée sur sa Stratégie nationale pour l'IA (SNIA) pour lancer un Programme national de recherche en IA (PNRIA) en allouant à ce programme 45 % du budget de la stratégie, soit environ 700 millions EUR (INRIA, 2023_[112]).

Pour sa part, la République de Türkiye finance des projets et des programmes de R-D en IA en lançant des appels à propositions ou en accordant des subventions, y compris pour de la recherche pluridisciplinaire en encourageant la collaboration entre champs de recherche. Le Conseil de la recherche scientifique et technologique de la Türkiye, un organe affilié au ministère de l'Industrie et des Technologies, et l'Institut national de l'IA ont financé plus de 2 000 projets de R-D et d'innovation. Le total des financements accordés à des projets universitaires de R-D dépasse 50 millions USD, tandis que les projets de R-D des entreprises ont reçu plus de 150 millions USD (TÜBITAK, 2023_[114]).

L'Union européenne a affecté 1 milliard EUR par an à l'IA, et notamment la R-D en IA, dans le cadre du budget plus large de 100 milliards EUR du programme Horizon Europe et du programme pour une Europe numérique (Commission européenne, 2023_[117]). Cela fait suite au Plan coordonné sur l'intelligence artificielle lancé en 2018, dans lequel les États membres soulignaient l'importance de coordonner la R-D en IA pour en maximiser l'impact, en particulier en établissant « des programmes partagés de collaboration entre les entreprises et les universités en matière de R-D et d'innovation en IA » (OECD.AI, 2024_[118]).

En Chine, les dépenses de R-D en IA couvrant la recherche fondamentale du ressort de la Fondation nationale des sciences naturelles de Chine et la recherche appliquée menée dans le cadre de grands programmes nationaux de R-D,



ont été estimées entre 1.7 et 5.7 milliards USD en 2018. Même s'il est difficile de valider des estimations précises des chiffres relatifs aux années suivantes, certains chercheurs jugent probable que le budget de R-D en IA de la Chine se soit rapproché de la limite haute de la fourchette d'estimation et qu'il ait augmenté au cours des dernières années (Acharya et Arnold, 2019_[119]). Cela va dans le sens des ambitions du pays énoncées dans son Plan de 2017 pour une IA de la nouvelle génération, et de son objectif de devenir le premier centre d'innovation du monde d'ici à 2030.

Les pays établissent également des instituts et des centres nationaux de recherche en IA.

- L'**Australie**, à travers son Plan d'action pour l'IA, a prévu 124 millions USD pour créer un Centre national sur l'IA en vue de développer plus avant la recherche en IA et la commercialisation des produits connexes (CSIRO, 2021_[120]).
- Au **Canada**, la Stratégie pancanadienne en matière d'IA met un fort accent sur la recherche et le talent ; l'Institut canadien de recherches avancées (ICRA) est chargé de conduire cette stratégie en partenariat avec le Gouvernement du Canada et trois instituts d'IA.
- Aux **États-Unis**, le Programme des instituts nationaux de recherche en IA (*National AI Research Institutes Program*) conduit par la Fondation nationale pour la science, est à la base du plus grand écosystème de recherche en IA du pays. Il est soutenu par un partenariat noué entre des agences fédérales et des entreprises leaders du secteur (National Science Foundation, 2023_[122]).
- Le réseau de R-D en IA du **Japon** a pour mission de favoriser les échanges d'information entre chercheurs en IA et de promouvoir la collaboration en R-D au Japon et à l'étranger.
- En **Suède**, les Instituts de recherche (*Research Institutes of Sweden*) combinent la recherche sur l'IA avec la recherche interdisciplinaire, un large éventail de bancs d'essai, des pôles d'innovation et des programmes pédagogiques.
- En **Türkiye**, l'Institut national de l'intelligence artificielle, établi en 2020, est conçu pour servir de moteur de la diffusion de l'IA. Faisant le lien entre la recherche universitaire et les besoins des entreprises, il est une partie prenante clé de la mise en œuvre de la Stratégie nationale turque en matière d'IA (2021-25) (Scientific and Technological Research Council of Türkiye, 2023_[121]).
- Au **Brésil**, le ministère de la Science, de la Technologie et de l'Innovation et des partenaires vont investir 1 million BRL par an pendant dix ans pour créer jusqu'à huit centres de recherche appliquée en IA, les investissements complémentaires étant apportés par des entreprises partenaires.
- En **Inde**, le Kotak-IISC AI-Machine Learning Centre (KIAC) créé en 2021 propose un cursus d'enseignement consacré à l'IA et effectue des recherches dans le domaine de l'apprentissage automatique (OECD.AI, 2021_[123]). D'autres initiatives sont axées sur le renforcement des réseaux de collaboration d'experts et des chercheurs.

Si, à l'échelle mondiale, l'investissement en capital-risque est en baisse depuis 2021, notamment dans le secteur de l'IA, l'investissement dans les start-ups de l'IA générative est en plein essor

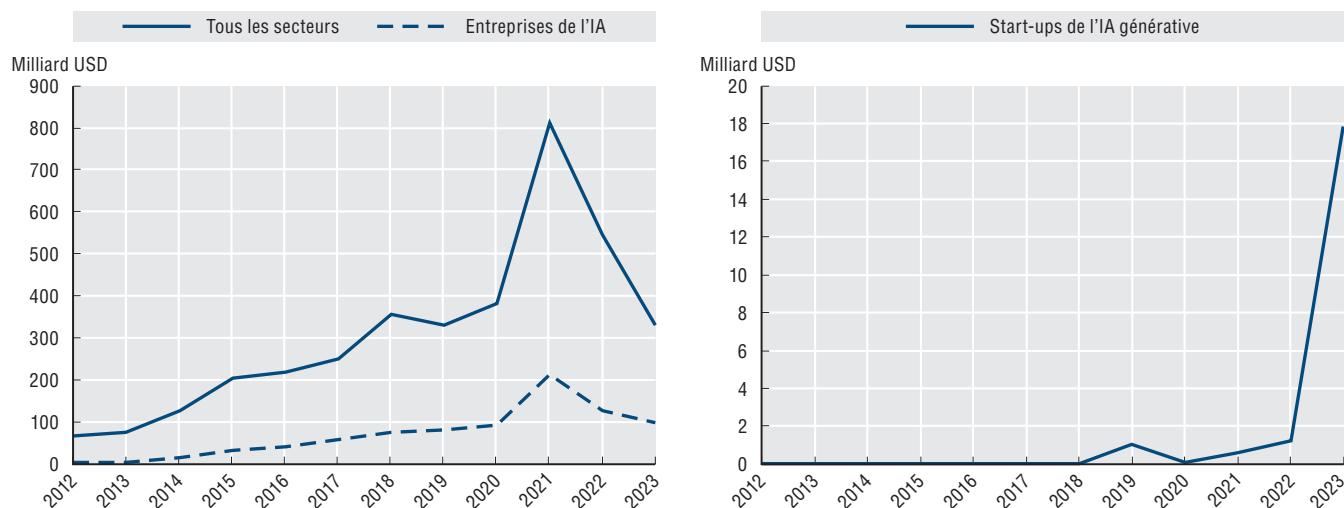
Entre 2015 et 2023, l'investissement en capital-risque consacré chaque année dans le monde aux start-ups de l'IA⁴ a plus que triplé, passant de plus de 31 milliards USD à près de 98 milliards USD (graphique 2.6) (OECD.AI, 2024_[124]). En particulier, entre 2020 et 2021, il a été multiplié par plus de 2.3 (de 92 milliards environ à 213 milliards). Ces capitaux étaient en très grande partie destinés à des entreprises d'IA basées aux États-Unis ou en Chine. Les États-Unis ont pour avantage d'avoir un marché solide pour la R-D du secteur privé et les financements en capital-risque : en 2022, ils ont totalisé plus des deux tiers des investissements mondiaux du secteur privé dans les services logiciels et informatiques (Commission européenne, 2023_[125]).

Dans le sillage de la contraction du marché mondial du capital-risque, l'investissement en capital-risque dans les entreprises d'IA a connu une forte baisse de plus de 50 % entre 2021 et 2023 (passant de 213 milliards USD à 98 milliards USD (OECD.AI, 2024_[124]). Cette évolution témoigne d'une tendance plus générale, les investisseurs choisissant de faire preuve de prudence après le boom technologique de la pandémie de COVID-19, et compte tenu de la hausse des taux d'intérêt et des tensions inflationnistes. L'exception à cette tendance baissière est l'investissement en capital-risque dans les start-ups de l'IA générative, qui a bondi d'1.3 milliard USD en 2022 à 17.8 milliards USD en 2023 (un bond de 1 % à 18.2 % du total des investissements en capital de risque dans le domaine de l'IA), sous l'impulsion majeure de l'investissement de 10 milliards USD de Microsoft dans OpenAI (graphique 2.6) (OCDE, 2023_[66]).

L'investissement en capital-risque consacré à l'IA a connu plusieurs phases au cours de la dernière décennie. En 2012 et 2013, il privilégiait les médias et le marketing, ainsi que les plateformes d'hébergement et l'infrastructure informatiques. Les années suivantes, il s'est tourné vers la mobilité et les véhicules autonomes, mais la part de ce secteur dans le total de l'investissement en capital-risque a fortement baissé après 2020. Sans surprise, les années de pandémie ont vu l'investissement en capital-risque consacré à l'IA se réorienter vers le secteur des soins de santé, des médicaments et des biotechnologies (OECD.AI, 2023_[126]).

Graphique 2.6. L'investissement en capital-risque dans les start-ups de l'IA générative est en plein essor depuis 2022, tandis que l'investissement en capital-risque dans tous les secteurs, et dans les start-ups de l'IA en particulier, baisse depuis 2021

Investissements en capital-risque dans les start-ups de l'IA et de l'IA générative, 2012-23



Notes : Les start-ups de l'IA ont été recensées d'après la classification transsectorielle et verticale Preqin et d'après une analyse automatisée, conduite par l'OCDE, des mots-clés contenus dans la description des activités des entreprises. Ces mots-clés (en anglais) liés à l'IA étaient des mots-clés génériques tels que *artificial intelligence* et *machine learning* ; des mots-clés liés aux techniques d'IA tels que *neural network*, *deep learning* et *reinforcement learning* ; et des mots-clés faisant référence aux domaines d'application de l'IA tels que *computer vision*, *predictive analytics*, *natural language processing* et *autonomous vehicles*. Pour plus d'informations, veuillez consulter : <https://oecd.ai/preqin>.

Source : OECD.AI (2024)^[124] avec des données de Preqin également consultables à l'adresse : www.oecd.ai/en/data?selectedArea=investments-in-ai-and-data.

StatLink <https://stat.link/e0fjz2>

Les pouvoirs publics développent les capacités humaines nécessaires à l'IA en réponse à la croissance de la demande de compétences en IA

L'IA est en train de changer la nature du travail. Les pays ont compris que, pour pouvoir en même temps gérer une transition équitable sur le marché du travail et rester dans le peloton de tête de la R-D en IA et de l'adoption de l'IA, il leur faut des politiques solides qui aident à développer les capacités humaines requises et attirer les meilleurs talents. Les effectifs de l'IA ont considérablement augmenté, puisque leur part dans l'emploi total est aujourd'hui près de trois fois supérieure à ce qu'elle était il y a moins de dix ans (Green et Lamby, 2023^[127]). Cependant, selon LinkedIn en 2023, il est deux fois plus probable pour un homme que pour une femme d'avoir un travail en rapport avec l'IA ou de déclarer des compétences en IA, ce qui suggère qu'il existe un écart de compétences entre les genres sur le marché mondial du travail lié à l'IA (OCDE, 2023^[128]).

Les talents spécialistes de l'IA sont très demandés et demeurent une main d'œuvre extrêmement mobile puisque les pays se font concurrence pour attirer chez eux des membres de ce petit cercle de personnes hautement qualifiées en IA. Par exemple, en 2022, des économies telles que le Luxembourg, le Canada, l'Allemagne et le Japon ont attiré davantage de talents de l'IA qu'elles n'en ont perdu (graphique 2.7). Au contraire, des pays comme l'Inde, la Grèce et la Lituanie ont enregistré un flux net de sorties de talents de l'IA. Cela pourrait indiquer une « fuite des cerveaux » dans le secteur de l'IA, les personnes hautement spécialisées partant pour des pays où les possibilités d'emploi sont meilleures. D'après la mesure de la variation en glissement annuel du nombre de membres de LinkedIn déclarant des compétences en IA, l'Inde a connu une forte croissance de ses talents en IA au cours des dernières années, devant les États-Unis, le Royaume-Uni et le Canada (OECD.AI, 2022^[129]).

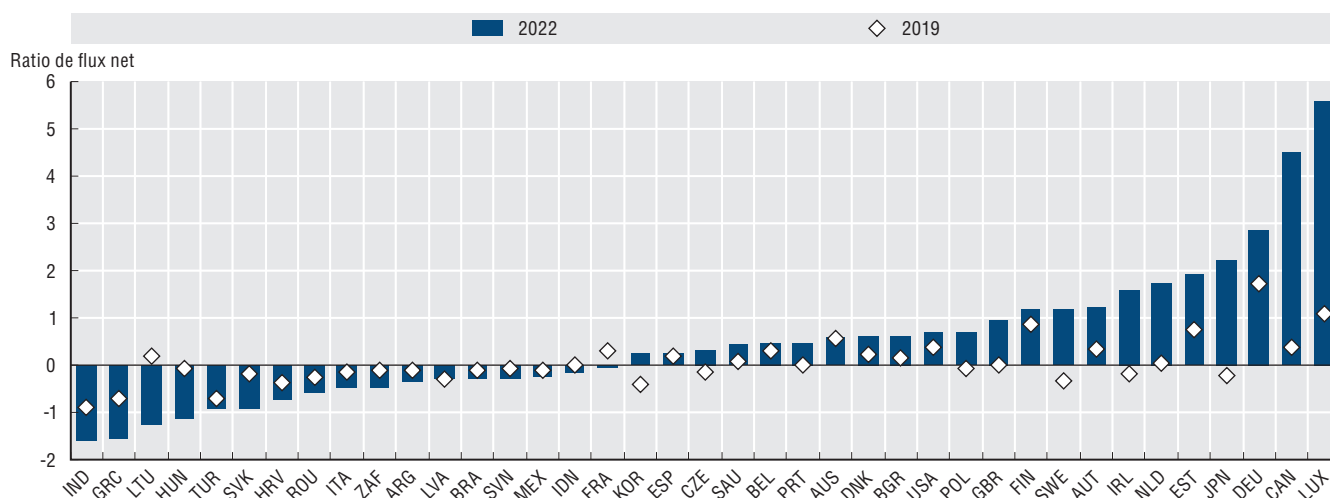
Les entreprises ayant dépassé les universités dans la course aux modèles d'IA avancée, les pays considèrent de plus en plus les capacités de calcul pour l'IA comme une ressource vitale à gérer avec soin

La demande de capacités de calcul pour l'IA a considérablement augmenté, comme en témoignent les cotations sur le marché des puces d'IA. En 2021, certains observateurs ont qualifié cette nouvelle tendance de « course à la puce d'IA », le marché des puces d'IA étant estimé à plus de 10 milliards USD, avec des recettes dont on prévoit qu'elles pourraient approcher les 80 milliards USD d'ici à 2027 (Pang, 2022^[130]). Les grandes entreprises technologiques ont fortement investi pour se joindre au mouvement.



Graphique 2.7. Les économies avancées se font concurrence pour attirer les talents de l'IA

Migration des compétences en IA entre pays en 2019 et 2022



Notes : Ce graphique montre les flux nets de migration des membres de LinkedIn ayant des compétences en IA en 2019 et en 2022 dans les pays où au moins 100 000 membres de LinkedIn déclarent des compétences en IA. Les flux de migration sont normalisés en fonction du nombre de membres de LinkedIn dans le pays correspondant.

Source : OECD.AI (2022)^[129] avec des données de LinkedIn, également consultables à l'adresse : www.oecd.ai/en/data?selectedArea=ai-jobs-and-skills. StatLink <https://stat.link/0kg1my>

Cette attention croissante portée à la capacité de calcul pour l'IA tient au fait que les développeurs de l'IA cherchent à obtenir les matériels et logiciels spécialisés dont elles ont besoin pour entraîner des IA avancées. De plus en plus souvent, ce sont les entreprises, et non les universités, qui fournissent et utilisent la capacité de calcul et la main d'œuvre requises pour la recherche en apprentissage automatique de pointe et pour l'entraînement de modèles d'IA dotés d'un grand nombre de paramètres (Ahmed et Wahed, 2020^[131] ; Ganguli et al., 2022^[132] ; Sevilla et al., 2022^[30]). Des disparités en termes de capacité de calcul disponible pourraient apparaître entre les secteurs public et privé et aller en s'aggravant car, de plus en plus souvent, les entités du secteur public ne disposent pas des ressources nécessaires à l'entraînement d'IA avancées (OCDE, 2023^[8]).

Sur la base du nombre de « supercalculateurs de pointe », les États-Unis et la Chine sont en tête en termes de capacité de calcul depuis 2012. Selon le Top500 de novembre 2023⁵, 35 économies se partagent ces 500 plus gros superordinateurs : les États-Unis (32 %), la Chine (21 %), l'Allemagne (7 %), le Japon (6 %), la France (5 %) et le Royaume-Uni (3 %), les 26 % restants étant répartis entre 29 économies (Top500, 2023^[133]). Les États-Unis et la Chine font la course en tête de liste depuis 2012 ; en Chine, le nombre de supercalculateurs a fortement augmenté depuis 2015.

Analyser où se trouvent les plus gros supercalculateurs du monde par le biais de la liste Top500 est un moyen indirect de mesurer la capacité de calcul dont dispose chaque pays, même si tous les ordinateurs recensés ne sont pas spécialisés et utilisés en IA. Les comparaisons internationales sont néanmoins compliquées par le fait que, depuis quelques années, certaines économies ont ralenti ou se sont abstenues de soumettre des données à la liste ces dernières années. En outre, le fait de compter le nombre de supercalculateurs ne donne qu'une image partielle de la capacité de calcul nationale, car certains supercalculateurs sont plus puissants que d'autres.

Un autre indicateur de la capacité de calcul nationale est la part des ordinateurs les plus puissants dans la liste Top500. Les États-Unis possèdent la plus grande proportion des supercalculateurs les plus puissants⁶ (53 %), suivis du Japon (10 %) et de la Chine (6 %) (Top500, 2023^[133]). Cette concentration des supercalculateurs dans les économies les plus avancées est un indicateur qui met en lumière les avantages et les risques des « économies d'échelle » liées aux matériels d'IA. D'un côté, la mise en commun des ressources dans des centres de calcul à très grande échelle crée des efficacités. D'un autre côté, elle peut également creuser les disparités en termes de capacité de calcul, puisque les économies cheffes de file peuvent investir davantage de ressources en R-D, en retirer davantage de bénéfices, et consolider leur position de leader pour les années à venir.

En plus de faire le bilan de leur capacité nationale de calcul dédiée à l'IA et de leurs besoins en la matière, les pays ont entrepris de lancer des initiatives pour accroître la capacité de calcul dédiée à l'IA dont disposent les établissements de recherche et les universités :

- Au **Canada**, la Stratégie pancanadienne en matière d'IA (2017, 2021) met à profit un réseau national d'instituts de recherche en IA et soutient l'acquisition de capacités de calcul haute performance pour la recherche en IA. En 2020, le pays a lancé son premier processus d'évaluation des besoins de l'infrastructure de recherche numérique (IRN) pour cerner les besoins de l'IRN et y répondre en mettant en place les services nécessaires dans le futur (Alliance de recherche numérique du Canada, 2020_[134]).
- En **Corée**, le Projet K-Cloud prévoit la fabrication et le déploiement de puces d'IA de toute première qualité au service de la mise en place d'une infrastructure infonuagique nationale améliorée.
- Les **États-Unis** prévoient de mettre des ensembles de données et des ressources informatiques de pointe à la disposition des équipes de recherche dans le cadre de la ressource NAIRR proposée, soutenue par le décret sur l'IA de 2023 (The White House, 2023_[137]).
- En 2022, le **Royaume-Uni** a conduit un examen sur l'avenir de la puissance de calcul (*Future of Compute Review*) pour examiner ses besoins en matière d'infrastructure de recherche numérique, notamment pour l'IA. L'examen a appelé à la constitution d'un écosystème de calcul intégré et à des investissements conséquents dans une infrastructure publique consacrée à l'IA (The Alan Turing Institute, 2022_[136]).
- En **Türkiye**, le Centre de l'informatique haute performance et en grille (*Turkish National e-Science e-Infrastructure*, TRUBA) est un établissement national qui met des infrastructures de calcul intensif et de stockage de données à la disposition de toutes les institutions et équipe de recherche. Son objectif principal est d'élargir et de renforcer les ressources de calcul et de stockage de données dont disposent les chercheurs à cet effet, il a déployé un réseau à travers tout le pays (Turkish National Science e-Infrastructure, 2023_[135]).
- Le projet commun EuroHPC de l'**Union européenne**, établi en 2018, encadre la coordination et le partage de ressources de calcul entre les membres de l'UE et des partenaires, avec un budget pour la période 2021-27 de 7 milliards EUR (Entreprise commune EuroHPC, 2022_[138]). À la fin de 2023, la Commission européenne a pris l'engagement d'élargir l'accès à l'infrastructure d'EuroHPC aux start-ups et PME européennes du secteur de l'IA et, plus largement, à toute la communauté de l'IA, dans le cadre d'une initiative consacrée aux start-ups dans le domaine de l'IA (European Commission, 2023_[139]). EuroHPC est également à l'origine d'un nouvel appel à la recherche et à l'innovation, qui doit permettre d'établir un centre européen de soutien destiné à aider les utilisateurs européens de l'IA à trouver des capacités de calcul intensif (EuroHPC, 2023_[140]).

Œuvrer à l'élaboration de politiques parées pour l'avenir qui garantissent une IA digne de confiance : les pays intègrent des principes fondés sur des valeurs dans leur législation, leur réglementation et leurs normes relatives à l'IA

Première norme intergouvernementale sur l'IA, les Principes de l'OCDE sur l'IA donnent un coup de projecteur sur ce que les pays membres et économies partenaires de l'OCDE ont considéré à juste titre comme une difficulté et une opportunité naissantes mais fondamentales pour les économies et les sociétés.

Depuis l'adoption de ces Principes en 2019, les initiatives des pouvoirs publics relatives à l'IA se sont multipliées dans les pays de l'OCDE et les économies partenaires. De nombreux pays et territoires disposent aujourd'hui d'un retour d'expérience du déploiement de leurs premières stratégies nationales en matière d'IA. Beaucoup sont en train de passer des principes à la pratique en transposant les Principes de l'OCDE sur l'IA en droit, en réglementation ou en normes à l'échelle nationale. Tandis que les mises en œuvre se poursuivent, des discussions sont menées sur la certification, l'évaluation des normes et les autorités chargées de l'application des lois en rapport avec l'IA, et aussi sur des questions plus ouvertes concernant l'interopérabilité avec les régimes existants de protection de la vie privée, des données et de la propriété intellectuelle.

Le champ de l'IA responsable s'est considérablement élargi. Au sein des administrations, des décideurs spécialistes de l'IA s'emparent de la question pour faire en sorte que les avantages de l'IA ne génèrent pas seulement des recettes mais aussi, plus largement, des avantages pour les sociétés et l'environnement. En 2016, quelques pays seulement disposaient d'une stratégie nationale en matière d'IA. En 2024, l'Observatoire de l'OCDE des politiques relatives à l'IA, en sa qualité de pôle de partage d'expériences et de pratiques exemplaires, recensait plus de 1 000 programmes d'action liés à l'IA dans 69 pays et territoires, dont plus de 354 concernant la réglementation de l'IA et les principes directeurs à suivre dans le domaine (OECD.AI, 2024_[118]).



Il est de plus en plus fréquent que les pays agissent pour promouvoir la gouvernance de l'IA, par exemple en proposant ou en appliquant des principes, des lois, des règlements ou des normes relatifs à l'IA. Certains pays et territoires ont choisi de penser la réglementation de l'IA dans le cadre d'une approche transsectorielle (Canada, Union européenne, Brésil) tandis que d'autres privilégient une approche plus sectorielle (Royaume-Uni, États-Unis).

En 2019, le **Canada** s'est doté, à travers sa Directive sur la prise de décisions automatisée, d'une réglementation relative aux systèmes décisionnels automatisés utilisés pour la prestation de services publics, qui recouvre également l'exigence d'une évaluation de l'incidence algorithmique (Gouvernement du Canada, 2019_[141]). Le Canada a également présenté la loi de mise en œuvre de la Charte numérique (projet de loi C-27) afin de réglementer l'utilisation de l'IA dans le secteur privé et l'économie. La législation proposée inclut de nouvelles règles pour l'IA dans la Loi sur l'intelligence artificielle et les données (Loi sur la mise en œuvre de la Charte du numérique, 2022_[142]). Le Canada souhaite que ses règles et réglementations soient interoperables avec d'autres réglementations émergentes en matière d'IA, telles que celles de l'Union européenne.

Aux **États-Unis**, la réglementation fédérale juridiquement contraignante comprend des règlements propres à certains secteurs ou domaines. Ils intègrent les principes existants de l'IA dans leur application, comme les initiatives spécifiques à l'IA visant à protéger les consommateurs par la Commission fédérale du commerce (FTC). En 2023, le Président a signé un décret sur le développement et l'utilisation d'une intelligence artificielle sûre, sécurisée et digne de confiance. Ce décret met en place diverses activités en rapport avec l'établissement de normes de sûreté et de sécurité de l'IA et diverses exigences applicables aux instances de l'administration publique et à d'autres acteurs pour assurer la protection de la vie privée, des droits civils, des consommateurs et des travailleurs, notamment (The White House, 2023_[137] ; The White House, 2023_[146]).

En 2019, le **Japon** a publié un ensemble de Principes sociaux en faveur d'une IA centrée sur l'humain, qui s'articule autour de trois valeurs (dignité, diversité et inclusion, durabilité) et comprend sept principes relatifs à l'IA (utilisation centrée sur l'humain, éducation et littéracie, vie privée, concurrence loyale, sécurité, innovation et équité, responsabilité et transparence) (Cabinet Office, 2019_[143]). En mai 2023, sous la présidence japonaise du G7, les leaders du G7 ont établi le Processus du G7, dit d'Hiroshima, sur l'IA générative afin d'examiner les possibilités et enjeux associés à l'IA générative. Puis, en décembre 2023, ils ont convenu de publier un Cadre d'action exhaustif relatif au processus d'Hiroshima sur l'IA ainsi que son futur plan de travail pour faire avancer le processus. Ce cadre d'action comprend le rapport de l'OCDE intitulé Vers une communauté de vues à l'échelle du G7 sur l'IA générative, des principes directeurs internationaux, un code de conduite international et une coopération autour de l'IA axée sur des projets (G7 Hiroshima Summit, 2023_[144] ; OCDE, 2023_[66]).

En 2023, le **Royaume-Uni** a proposé un cadre réglementaire de l'IA dans un livre blanc intitulé « *A Pro-innovation Approach to AI Regulation* », qui établit des principes axés sur les résultats à appliquer à l'IA dans des secteurs spécifiques. Le livre blanc propose que les instances de réglementation en tiennent compte lorsqu'elles élaborent des définitions et des politiques propres à ces secteurs. Cette approche promeut également le recours à l'expérimentation réglementaire, sous la forme d'initiatives de type banc d'essai ou bac à sable, afin d'aider les acteurs de l'innovation en IA à commercialiser de nouvelles technologies parallèlement au test des stratégies de réglementation possibles (UK Department for Science, Innovation & Technology, 2023_[145]). En novembre 2023, le Royaume-Uni a tenu le Sommet sur la sécurité de l'intelligence artificielle, dont deux des résultats sont la création d'un Institut sur la sécurité de l'IA (*AI Safety Institute*), pour conduire des recherches avancées en sécurité de l'IA, possiblement en collaboration avec les établissements analogues actuellement créés dans d'autres pays, et la commande d'un rapport sur l'état de l'art en IA (*AI Safety Summit*, 2023_[65]).

En 2021, l'**Union européenne** a proposé un règlement sur l'intelligence artificielle (la « loi sur l'IA de l'UE ») qui pourrait avoir une influence mondiale. Cette loi sur l'IA de l'UE accompagne le Plan coordonné dans le domaine de l'intelligence artificielle (2018, 2021) qui vise à faire de l'Union européenne un acteur mondial de premier plan de l'innovation dans une IA intégrant des valeurs (centrée sur l'humain, digne de confiance, sûre et durable) et à tenir compte des risques liés à l'IA en prévoyant des règlements et des normes harmonisés. Elle vise à éviter la fragmentation de la réglementation entre les États membres afin de limiter les utilisations dites « à haut risque » de l'IA, et notamment les pratiques qui pourraient menacer les valeurs de l'Union. Elle propose des obligations applicables à certaines applications d'IA à haut risque, l'interdiction d'utiliser les systèmes d'IA répertoriés comme présentant des risques inacceptables (par exemple, la notation sociale par un État), et des obligations en matière de transparence pour les applications d'IA présentant des risques limités (par exemple, pour les agents conversationnels) (Commission européenne, 2021_[147]).

Le **Brésil** a également proposé une réglementation sur l'IA, inspirée de la loi sur l'IA de l'UE et fondée sur trois piliers : protection des droits des personnes sur lesquelles l'IA a un impact, classification des niveaux de risque, et mesures de gouvernance applicables aux fournisseurs d'IA (Agência Senado, 2022_[148]).

En 2022, l'autorité de réglementation (*Infocomm Media Development Authority, IMDA*) de **Singapour** a lancé *A.I. Verify*, un système de vérification volontaire de la gouvernance de l'IA, comprenant un cadre et une boîte à outils, qui permet d'évaluer la performance d'un système d'IA par rapport à ce qu'en dit son développeur et aux principes sur l'IA convenus au niveau international (IMDA, 2022_[149]).

Les normes techniques joueront un rôle déterminant dans le déploiement d'une IA digne de confiance

Les instances d'établissement de normes sont bien placées pour aider à bâtir des consensus permettant de promouvoir l'interopérabilité entre juridictions et de réduire l'incertitude sur le marché pour les acteurs qui utilisent ou développent des IA dans les différentes régions du monde. Il sera important d'inviter largement tous les acteurs intéressés à prendre part à l'établissement de ces normes, de sorte que les différents points de vue soient pris en compte, au service d'une gestion efficace des risques. En octobre 2022, le **Royaume-Uni** a mis en place sa plateforme *AI Standards Hub* qui vise à promouvoir l'utilisation des normes techniques comme outils de gouvernance de l'IA en fournissant aux entreprises, aux autorités de réglementation et aux organisations de la société civile les informations et les outils pratiques leur permettant d'appliquer efficacement les normes sur l'IA et de contribuer à leur élaboration (*AI Standards Hub, 2022_[150]*). Aux **États-Unis**, le NIST s'est appuyé sur le Cadre de l'OCDE pour la classification des systèmes d'IA pour élaborer des lignes directrices techniques d'application volontaire relatives à la gestion des risques liés à l'IA, lesquelles ont reçu un large soutien. Dans l'**Union européenne**, le Comité européen de normalisation électrotechnique (*CEN-CENELEC*) est chargé de mettre au point des normes techniques en appui à la loi sur l'IA de l'UE. L'Organisation internationale de normalisation (*ISO*) a élaboré la norme *ISO/IEC 23053:2022* établissant un cadre pour les systèmes d'intelligence artificielle qui utilisent l'apprentissage machine, en complément de la norme *ISO 31000:2009* sur le management du risque qui s'applique indifféremment à tous les secteurs et activités (*ISO, 2022_[151] ; ISO, 2009_[152]*).

Les initiatives visant à encourager la coopération internationale au service d'une IA digne de confiance continuent de se multiplier

Depuis l'adoption des Principes de l'OCDE sur l'IA en 2019, un grand nombre d'initiatives et de partenariats internationaux en faveur d'une IA digne de confiance ont vu le jour :

- Les pays de l'OCDE et les économies partenaires ont adopté les **Principes de l'OCDE sur l'IA**, puis les membres du **G20** ont pris les mêmes engagements en adoptant les Principes du G20 relatifs à l'IA. Depuis l'adoption de ces principes, l'OCDE a travaillé avec les membres de la communauté mondiale de l'IA à l'application des Principes de l'OCDE sur l'IA, notamment en lançant l'Observatoire OCDE des politiques relatives à l'IA (*OECD.AI*) et le Réseau d'experts de l'IA auprès de l'OCDE (*ONE AI*) au début de 2020. En 2022, l'OCDE a en outre constitué un nouveau Groupe de travail sur la gouvernance de l'intelligence artificielle (*AIGO*) et continué d'élargir son réseau *ONE AI* qui compte désormais des centaines de participants dans le monde entier (*OECD.AI, 2024_[118]*).
- En 2022, le **Conseil de l'Europe** a créé un Comité sur l'intelligence artificielle (*CAI*) chargé d'élaborer un instrument juridique sur l'IA en s'appuyant sur les règles du Conseil concernant les droits humains, la démocratie et l'État de droit (*Conseil de l'Europe, 2023_[153]*).
- L'initiative **Globalpolicy.ai** est une coalition de huit⁷ organisations intergouvernementales ayant des mandats complémentaires sur l'IA (*GlobalPolicy.ai, 2023_[154]*).
- Le **Partenariat mondial sur l'intelligence artificielle (PMIA)**, lancé en juin 2020, est une initiative multipartite qui, par l'intermédiaire de plusieurs groupes de travail, vise la réalisation de projets concrets en vue de favoriser le développement d'une IA responsable sur la base des Principes de l'OCDE sur l'IA (*Partenariat Mondial sur l'Intelligence Artificielle (PMIA), 2023_[155]*).
- Enfin, la Recommandation sur l'éthique de l'intelligence artificielle, adoptée par les membres de l'**UNESCO** en 2021, a établi les principes essentiels d'une IA digne de confiance ainsi qu'une liste de domaines d'action stratégiques (*UNESCO, 2022_[156]*).

Il reste des défis importants à relever pour parvenir à des politiques sur l'IA pour l'avenir qui puissent susciter l'innovation

Les cadres de gouvernance de l'IA continueront d'évoluer. De nombreuses questions ouvertes se posent encore, qu'il faudra résoudre pour mettre au point des politiques parées pour l'avenir qui puissent à la fois apporter des réponses suffisantes aux préoccupations soulevées par l'IA, favoriser l'innovation et résister à l'épreuve du temps. Certaines de ces questions sont examinées ci-après : elles témoignent des considérations et arbitrages clés que les responsables de l'action publique se doivent de prendre en compte afin de préparer au mieux l'avenir de l'intelligence artificielle.



Comment les responsables de l'action publique peuvent-ils faire preuve de souplesse et rester en phase avec les avancées rapides de l'IA ? À la fin de 2022, les possibilités de l'IA générative ont surpris nombre de responsables de l'action publique. Il est indispensable de combler ces lacunes de connaissances en promouvant l'interdisciplinarité et la collaboration entre pouvoirs publics, les développeurs et communautés techniques chargés de l'IA afin de développer les capacités requises et de veiller à ce que les administrations publiques restent en phase avec les progrès de l'IA. Cela peut néanmoins s'avérer difficile car les informations divulguées par les acteurs qui développent des IA sont souvent limitées, par exemple quand les technologies liées à l'IA relèvent du secret commercial. À l'avenir, les autorités nationales et régionales de réglementation et de contrôle de l'application des lois auront un rôle déterminant à jouer pour à la fois protéger les développeurs et les utilisateurs contre l'usage abusif des technologies d'IA et créer un terrain propice à l'innovation et aux gains de productivité. Mais il faut du temps pour élaborer des textes législatifs et réglementaires *de jure* : les grandes entreprises technologiques sont souvent en avance dans la course et dictent des règles *de facto* tant que les lois et les mécanismes d'exécution n'existent pas encore.

Comment les pays et territoires réglementeront-ils efficacement une IA à usage de plus en plus général, et notamment les modèles de fondation ? Les systèmes d'IA avancés tels que GPT-4 (OpenAI) peuvent être utilisés dans, et adaptés à, un large éventail d'applications pour lesquelles ils n'avaient pas été intentionnellement et spécifiquement conçus, ce qui amène à se demander comment créer des règles adéquates pour les systèmes d'IA qui puissent s'appliquer dans différents contextes. On se préoccupe notamment de savoir de quelle façon élaborer une réglementation qui garantisse la sûreté d'application des systèmes d'IA lorsqu'ils sont utilisés dans des contextes pour lesquels ils n'ont pas été expressément entraînés et testés.

Comment les pays et territoires peuvent-ils éviter que les règles relatives à l'IA ne forment une mosaïque fragmentée et complexe ? La coopération internationale autour des politiques liées à l'IA est importante car, comme l'internet, l'IA ne connaît pas de frontières. Mais les pays cherchent chacun à prendre la tête dans le domaine, ce qui les conduit à mettre en œuvre des moyens d'action différents. Dans un monde où beaucoup d'entreprises ont pour habitude de faire des affaires à l'échelle internationale, il est fondamental que les normes relatives à l'IA soient interopérables, afin d'apporter stabilité et prévisibilité au secteur privé et de donner aux utilisateurs des assurances que les applications de l'IA ne seront pas exploitées à des fins abusives. De plus, une grande partie des modèles et des systèmes d'IA déployés dans le monde dépendent des mêmes ensembles de données et algorithmes pour leur entraînement, ce qui rend de nombreux pays vulnérables aux mêmes problèmes tels que les biais, les risques pour la sécurité, et les risques d'atteinte aux droits humains. Certaines tentatives d'interopérabilité ont déjà eu lieu. Par exemple, il est possible que la loi sur l'IA de l'UE soit à l'origine d'un « effet Bruxelles » dans d'autres juridictions, notamment au Canada et au Brésil où des stratégies fondées sur le risque et d'autres caractéristiques du modèle de l'UE sont actuellement observables. Les organisations internationales comme l'OCDE ont un rôle important à jouer : par exemple, la définition d'un système d'IA établie par l'OCDE devrait former la base de la définition de ce terme dans la loi sur l'IA de l'UE, ce qui favorisera l'interopérabilité.

Comment les utilisations à haut risque ou inacceptables de l'IA seront-elles gérées ? Les pays et territoires ont entrepris d'établir des règles pour promouvoir une IA digne de confiance et protéger les droits fondamentaux, sans créer d'obstacles indus à l'innovation. Si le traitement des utilisations à haut risque ou inacceptables de l'IA différerait d'une juridiction à l'autre, cela pourrait créer des vides juridiques et ouvrir la voie à l'arbitrage réglementaire. À cet effet, il pourrait être utile de créer des normes internationales minimales concernant l'atténuation des risques graves et des risques inacceptables. S'agissant de l'avenir, les responsables de l'élaboration des politiques devraient échanger de façon plus large sur les moyens de gérer efficacement tous les risques à long terme ou à plus grande échelle qui s'avèrent fondés, en plus de mettre en œuvre des stratégies pour atténuer et éviter les risques actuels de l'IA tels que les résultats dommageables générés par ses biais.

Comment préserver les droits fondamentaux tels que la protection de la vie privée dans un monde où une IA peut déduire des informations à caractère personnel non divulguées ? Parce qu'elles ont spectaculairement progressé, les capacités d'IA ont davantage la possibilité de faire des prédictions et de tirer des conclusions à partir de grandes quantités de données d'entraînement – ce qu'on appelle l'« inférence ». Cela pose la question de savoir si les systèmes d'IA, parmi lesquels les grands modèles de langue, pourraient attenter à la vie privée des individus en réussissant à déduire des informations à caractère personnel pourtant non partagées avec le modèle pendant son entraînement (Staab et al., 2023_[40]). Certains travaux de recherche donnent à penser que les grands modèles de langue actuels peuvent inférer des données à caractère personnel à une échelle inédite et, pour cette raison, appellent à débattre plus largement des conséquences des modèles de langue pour la protection de la vie privée, au-delà de ce que ces modèles peuvent « mémoriser » pendant leur entraînement (Staab et al., 2023_[40]). D'autres questions se posent concernant la meilleure façon d'obtenir le consentement des individus lorsque des données à caractère personnel sont utilisées pour l'entraînement d'une IA.

Comment préserver les droits de propriété intellectuelle ? Les accumulations de cas juridiques et les propositions de politiques publiques concernant la protection des droits de propriété intellectuelle, par exemple l'utilisation de matériels protégés par le droit d'auteur pour entraîner des IA, aideront à clarifier ces questions dans les années à venir. Les litiges autour de ces questions montrent qu'il est nécessaire d'élaborer des solutions pour tenir compte de la propriété intellectuelle dans le contexte de l'entraînement des IA. Les responsables de l'action publique peuvent examiner plus avant certains moyens d'action pour garantir à la fois le respect des droits de propriété intellectuelle et la mise à disposition de données en quantité suffisante pour l'entraînement des IA. Ces moyens d'action sont notamment le fait de fixer des règles et des codes de conduite applicables à la pratique d'extraction des données et le fait de favoriser la signature d'accords de partage de données justes et équitables.

Comment les différents secteurs de l'économie appliqueront-ils leur cadre réglementaire actuel à l'utilisation de l'IA ? Avec la généralisation des outils d'IA à presque tous les niveaux de l'économie, il est probable que différents secteurs appliqueront leur cadre réglementaire existant à l'utilisation de ces outils. Ce phénomène, que l'on observe déjà aujourd'hui (initiatives spécifiquement axées sur l'IA destinées à protéger les consommateurs, menées par la FTC aux États-Unis, par exemple), devrait s'accroître pour donner naissance à d'autres stratégies et approches relatives à la gouvernance de l'IA. Cela soulève la question de la promotion de l'interopérabilité entre les différentes approches sectorielles, parallèlement à leur interopérabilité avec les lois et règlements relatifs à l'IA qui sont en vigueur, au niveau national ou régional.

Comment veillera-t-on à la bonne exécution des nouvelles règles relatives à l'IA ? La bonne exécution des lois relatives à l'IA est une autre question en suspens. Comme on risque de voir émerger de multiples stratégies et panoplies réglementaires, avec des textes obligatoires et volontaires, des normes techniques et des instruments d'action, à la fois à l'échelon national et à l'échelle internationale, il sera d'autant plus difficile de contrôler la bonne application des règles. Par exemple, on ignore comment les autorités de réglementation fixeront les échéances de réalisation des évaluations de conformité, ce qui pourrait entraîner des chevauchements ou des doublons, comme entre les exigences relatives à l'IA et les exigences de protection des données. Les responsables de l'action publique et les autorités de réglementation devront combler les lacunes, éviter les chevauchements et résoudre les contradictions dans les lois et réglementations à mesure que les règles relatives à l'IA sont édictées et appliquées. Les entreprises pourraient être confrontées à des difficultés d'interprétation lors de la mise en œuvre d'exigences réglementaires complexes, et à des coûts de mise en conformité. Les mesures prises pour faire appliquer les lois pourraient aussi nécessiter des normes qui restent à établir.

Incertain et complexe, l'avenir de l'IA laisse entrevoir de grandes opportunités mais aussi des risques importants pour la société et les économies

Il est indispensable de bâtir une IA digne de confiance, utilisée de façon responsable, si l'on veut aller vers un avenir où l'IA inspire confiance et suscite des changements positifs. Pour que les implications à long terme de l'IA soient mieux comprises, les chercheurs devraient dialoguer et collaborer avec les responsables de l'élaboration des politiques, les praticiens de l'IA, les partenaires du secteur privé et les groupes de la société civile dans des enceintes multipartites telles que l'OCDE afin de s'assurer que leurs conclusions sont pertinentes, accessibles et transposables en mesures concrètes, dans l'optique d'aider à gérer au mieux les possibilités et les risques de l'IA aujourd'hui et demain. Il est indispensable qu'il existe une collaboration interdisciplinaire entre communautés techniques et communautés d'action aux niveaux national et international. Une telle collaboration peut favoriser l'apprentissage mutuel, la confiance, et la coopération entre les différents acteurs et parties prenantes, ainsi que l'élaboration de politiques et de pratiques relatives à l'IA qui soient inclusives, responsables et centrées sur l'humain et qui puissent résister à l'épreuve du temps.



Références

- Abid, A., M. Farooqi et J. Zou (2021), « Persistent anti-muslim bias in large language models », arXiv, 2105.05783, <http://arxiv.org/abs/2101.05783>. [93]
- Acharya, A. et Z. Arnold (2019), *Chinese public AI R&D spending: Provisional findings*, Center for Security and Emerging Technology, <https://doi.org/10.51593/20190031>. [119]
- Agência Senado (2022), « Comissão de juristas aprova texto com regras para inteligência artificial », [Le comité de juristes approuve un texte contenant des règles pour l'intelligence artificielle], 1 décembre, Agência Senado, <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2022/12/01/comissao-de-juristas-aprova-texto-com-regras-para-inteligencia-artificial>. [148]
- Ahmed, N. et M. Wahed (2020), « The de-democratization of AI: Deep learning and the compute Divide in Artificial Intelligence Research », arXiv, 2010.15581, <https://arxiv.org/abs/2010.15581>. [131]
- AI Safety Summit (2023), *The Bletchley Declaration by countries attending the AI Safety Summit, 1-2 novembre 2023*, AI Safety Summit, <https://www.gov.uk/government/publications/ai-safety-summit-2023-the-bletchley-declaration/the-bletchley-declaration-by-countries-attending-the-ai-safety-summit-1-2-november-2023>. [65]
- AI Standards Hub (2022), *AI Standards Hub*, site web, <https://aistandardshub.org> (consulté le 1er mars 2024). [150]
- Alliance de recherche numérique du Canada (2020), *Évaluation des besoins de l'infrastructure de recherche numérique au Canada*, <https://alliancecan.ca/fr/initiatives/evaluation-des-besoins-de-linfrastructure-de-recherche-numerique-au-canada>. [134]
- Allied Market Research (2022), *Autonomous mobile robot market: Global opportunity analysis and industry forecast, 2020-2030*, Allied Market Research, <https://www.alliedmarketresearch.com/autonomous-mobile-robot-market-A16218>. [55]
- Alon-Barkat, S. et M. Busuioc (2022), « Human-AI interactions in public sector decision making: "Automation bias" and "Selective adherence" to algorithmic advice », *Journal of Public Administration Research and Theory*, vol. 33/1, pp. 153-169, <https://doi.org/10.1093/jopart/muac007>. [95]
- Anderson, J. (2023), « You can't code for humanity: AI, algorithms, and the bias of machine learning », *Resources for Gender and Women's Studies: a Feminist Review*, vol. 4/1/2, pp. 18-19, <https://www.proquest.com/openview/7ca3ec23bcf12fcea7b8e664041536ec/1?cbl=27053&pq-origsite=gscholar&parentSessionId=OX0ibRA5003XxOL4riRGVrLr81h619v1KaL6U0u58Y%3D>. [51]
- Anderson, J. et L. Rainie (2018), « Artificial intelligence and the future of humans », 10 décembre, Pew Research Center, <https://www.pewresearch.org/internet/2018/12/10/artificial-intelligence-and-the-future-of-humans>. [76]
- Bekenova, Z. et al. (2022), « Artificial intelligence, value alignment and rationality », *TalTech Journal of European Studies*, vol. 12/1, pp. 79-98, <https://doi.org/10.2478/bjes-2022-0004>. [102]
- Benaich, N. et al. (2022), *State of AI report*, State of AI Report, <https://www.stateof.ai> (consulté le 28 février 2023). [44]
- Bender, E. et al. (2021), « On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? », *FAccT 2021 - Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*, Association for Computing Machinery, Inc., <https://doi.org/10.1145/3442188.3445922>. [90]
- Benedict, T. (2022), *The computer got it wrong: Facial recognition technology and establishing probable cause to arrest*, thèse, Washington and Lee University School of Law, HeinOnline, <https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/waslee79&div=21&id=&page=>. [52]
- Bommasani, R. et al. (2021), « On the opportunities and risks of foundation models », arXiv preprint, 2108.07258, <https://arxiv.org/pdf/2108.07258.pdf>. [9]
- Bryant, M. (2019), « How AI and machine learning are changing prosthetics », 29 mars, MedTech Dive, <https://www.medtechdive.com/news/how-ai-and-machine-learning-are-changing-prosthetics/550788>. [58]
- Bubeck, S. et al. (2023), « Sparks of artificial general intelligence: Early experiments with GPT-4 », arXiv, 2302.12712, <https://arxiv.org/pdf/2303.12712.pdf>. [19]
- Buolamwini, J. et T. Gebru (2018), « Gender shades: Intersectional accuracy disparities in commercial gender classification », *Proceedings of the 1st Conference on Fairness, Accountability and Transparency*, vol. 81, pp. 77-91, http://proceedings.mlr.press/v81/buolamwini18a.html?mod=article_inline. [50]
- Cabinet Office (2019), *Social principles of human-centric AI*, Bureau du Cabinet, Gouvernement du Japon, <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/jinkouchinou/pdf/humancentricai.pdf>. [143]
- Clarke, S. et J. Whittlestone (2022), « A survey of the potential long-term impacts of AI – How AI could lead to long-term changes in science, cooperation, power, epistemics and values », *AIES '22: Proceedings of the 2022 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society*, pp. 192-202, <https://doi.org/10.1145/3514094.3534131>. [83]

- Cohen, M., M. Hutter et M. Osborne (2022), « Advanced artificial agents intervene in the provision of reward », *AI Magazine*, vol. 43/3, pp. 282-293, <https://doi.org/10.1002/aaai.12064>. [104]
- Collins, E. et Z. Ghahramani (18 mai 2021), « LaMDA: Our Breakthrough Conversation Technology », Google blog, <https://blog.google/technology/ai/lamda>. [14]
- Commission européenne (2023), « Commission opens access to EU supercomputers to speed up artificial intelligence development », 16 novembre, Communiqué de presse, Commission européenne, Bruxelles, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_5739. [139]
- Commission européenne (2023), *Economics of industrial research and innovation* (base de données), <https://iri.jrc.ec.europa.eu/data#> (consulté le 19 mars 2023). [125]
- Commission européenne (2023), « Une approche européenne de l'intelligence artificielle », page web, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/policies/european-approach-artificial-intelligence> (consulté le 8 janvier 2024). [117]
- Commission européenne (2021), *Règlement du Parlement européen et du Conseil établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle (législation sur l'intelligence artificielle) et modifiant certains actes législatifs de l'Union*, COM(2021) 206 final, European Commission, Bruxelles, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A52021PC0206>. [148]
- Conmy, A. et al. (2023), « Towards automated circuit discovery for mechanistic interpretability », ArXiv, 2304.14997, <https://arxiv.org/pdf/2304.14997.pdf>. [54]
- Conseil de l'Europe (2023), *Revised zero draft [framework] convention on artificial intelligence, human rights, democracy and the rule of law*, Comité sur l'intelligence artificielle du Conseil de l'Europe, <https://rm.coe.int/fourth-evaluation-round-corruption-prevention-in-respect-of-members-of/1680aa193f>. [153]
- Cotton-Barratt, O. et T. Ord (2014), « Strategic considerations about different speeds of AI takeoff », 12 août, Future of Humanity Institute, Université d'Oxford, <https://www.fhi.ox.ac.uk/strategic-considerations-about-different-speeds-of-ai-takeoff>. [107]
- Craig, C. (2021), « The AI-copyright challenge: Tech-neutrality, authorship, and the public interest », *Osgood Legal Studies Research Paper*, 26 January, Osgood Hall Law School, York University, <https://ssrn.com/abstract=4014811>. [98]
- CSIRO (2021), « The National Artificial Intelligence Centre is launched, 14 December, News Release, Department of Industry, Science and Resources », Government of Australia, <https://www.industry.gov.au/news/national-artificial-intelligence-centre-launched>. [120]
- Davenport, T. et R. Kalakota (2019), « The potential for artificial intelligence in healthcare », *Future Healthcare Journal*, vol. 6/2, pp. 94-98, <https://doi.org/10.7861/futurehosp.6-2-94>. [77]
- Dickson, B. (8 mai 2023), *How open-source LLMs are challenging OpenAI, Google, and Microsoft*, TechTalks blog, <https://bdtechtalks.com/2023/05/08/open-source-llms-moats>. [48]
- Dietterich, T. et E. Horvitz (2015), « Rise of concerns about AI », *Communications of the ACM*, vol. 58/10, pp. 38-40, <https://doi.org/10.1145/2770869>. [100]
- DSIT (2023), « A pro-innovation approach to AI regulation », *Policy Paper*, n° 815, UK Department for Science, Innovation and Technology, <https://www.gov.uk/government/publications/ai-regulation-a-pro-innovation-approach/white-paper>. [145]
- Dung, L. (2023), « Current cases of AI misalignment and their implications for future risks », *Synthese*, vol. 202/138, <https://doi.org/10.1007/s11229-023-04367-0>. [101]
- Dunlop, C., N. Moës et S. Küspert (2023), « The value chain of general-purpose AI: A closer look at the implications of API and open-source accessible GPAI for the EU AI Act », Ada Lovelace Institute blog, <https://www.adalovelaceinstitute.org/blog/value-chain-general-purpose-ai/#content>. [24]
- Elangovan, A., J. He et K. Verspoor (2021), « Memorization vs. generalization: Quantifying data leakage in NLP performance evaluation », arXiv, 2021.01818, <https://arxiv.org/abs/2102.01818>. [22]
- EuroHPC (2023), « Open call to support HPC-powered artificial intelligence (AI) applications », 28 novembre 2023, Communiqué de presse, EuroHPC, https://eurohpc-ju.europa.eu/open-call-support-hpc-powered-artificial-intelligence-ai-applications-2023-11-28_en. [140]
- EuroHPC (2022), *Discover EuroHPC JU*, site web, https://eurohpc-ju.europa.eu/about/discover-eurohpc-ju_en (consulté le 8 janvier 2024). [138]
- EU-US Trade and Technology Council (2023), *EU-U.S. terminology and taxonomy for artificial intelligence*, First edition, EU-US Trade and Technology Council, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/eu-us-terminology-and-taxonomy-artificial-intelligence>. [7]
- Fariani, R., K. Junus et H. Santoso (2023), « A systematic literature review on personalised learning in the higher education context », *Technology, Knowledge and Learning*, vol. 28/2, pp. 449-476, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10758-022-09628-4>. [75]
- G7 Hiroshima Summit (2023), *Hiroshima AI process G7 digital & tech ministers' statement*, G7 Hiroshima Summit, <https://www.soumu.go.jp/hiroshimaaiprocess/pdf/document02.pdf>. [144]

- Ganguli, D. et al. (2022), « Predictability and surprise in large generative models », arXiv, 2202.07785 [cs], <https://arxiv.org/abs/2202.07785>. [132]
- Ghosh, A. (2023), « How can artificial intelligence help scientists? A (non-exhaustive) overview », in *Artificial Intelligence in Science : Challenges, Opportunities and the Future of Research*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/a8e6c3b6-en>. [71]
- GlobalPolicy.ai (2023), GlobalPolicy.ai, site web <https://globalpolicy.ai/en> (consulté le 8 janvier 2024). [154]
- Goldman Sachs (2023), « Generative AI could raise global GDP by 7% », 5 avril, Goldman Sachs, <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/generative-ai-could-raise-global-gdp-by-7-percent.html>. [69]
- Gouvernement du Canada (2019), *Directive sur la prise de décisions automatisée*, Secrétariat du Conseil du Trésor, Gouvernement du Canada, <https://www.tbs-sct.canada.ca/pol/doc-fra.aspx?id=32592>. [141]
- Grallet, G. et H. Pons (2023), « Yuval Noah Harari (Sapiens) versus Yann Le Cun (Meta) on artificial intelligence », 5 novembre, Le Point, https://www.lepoint.fr/sciences-nature/yuval-harari-sapiens-versus-yann-le-cun-meta-on-artificial-intelligence-11-05-2023-2519782_1924.php. [105]
- Green, A. et L. Lamby (2023), « The supply, demand and characteristics of the AI workforce across OECD countries », *Documents de travail de l'OCDE sur les questions sociales, l'emploi et les migrations*, n° 287, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/bb17314a-en>. [127]
- Heikkilä, M. (2022), « The hype around DeepMind's new AI model misses what's actually cool about it », 23 mai, MIT Technology Review, <https://www.technologyreview.com/2022/05/23/1052627/deepmind-gato-ai-model-hype>. [17]
- Heikkilä, M. (2022), « The viral AI avatar app Lensa undressed me—without my consent », 12 décembre, MIT Technology Review, <https://www.technologyreview.com/2022/12/12/1064751/the-viral-ai-avatar-app-lensa-undressed-me-without-myconsent>. [92]
- Hendrycks, D. et al. (2022), « Unsolved problems in ML safety », arXiv, 2109.13916, <https://arxiv.org/abs/2109.13916>. [106]
- Horowitz, M. (2023), « Bending the automation bias curve: A study of human and AI-based decision making in national security contexts », arXiv, 2306.16507, <https://arxiv.org/abs/2306.16507>. [94]
- Hugging Face (2022), « BLOOM », page web, https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/bloom (consulté le 27 février 2023). [15]
- Hu, K. (2023), « ChatGPT sets record for fastest-growing user base - analyst note », 2 février, Reuters, <https://www.reuters.com/technology/chatgpt-sets-record-fastest-growing-user-base-analyst-note-2023-02-01>. [5]
- IDC (2022), « IDC Forecasts 18.6% Compound Annual Growth for the Artificial Intelligence Market in 2022-2026 », 29 juillet, International Data Corporation, <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prEUR249536522>. [67]
- IMDA (2022), « About artificial intelligence », page web, <https://www.imda.gov.sg/How-We-Can-Help/AI-Verify> (consulté le 8 janvier 2024). [149]
- INRIA (2023), « Programme national de recherche en intelligence artificielle », page web, <https://www.inria.fr/fr/programme-national-recherche-intelligence-artificielle> consulté le 8 janvier 2024) (consulté le 8 janvier 2024). [112]
- Islam, K. (2022), « Recent advances in vision transformer: A survey and outlook of recent work », arXiv, 2203.01536, <https://arxiv.org/abs/2203.01536>. [13]
- ISO (2022), *ISO/IEC 23053:2022, Cadre pour les systèmes d'intelligence artificielle (IA) qui utilisent l'apprentissage machine (ML)*, International Organization for Standardization, Genève, <https://www.iso.org/fr/standard/74438.html>. [151]
- ISO (2009), « ISO 31000 - Management du risque », page web, <https://www.iso.org/fr/iso-31000-risk-management.html>. [152]
- Jones, E. (2023), « Explainer: What is a foundation model? », 17 juillet, Ada Lovelace Institute, <https://www.adalovelaceinstitute.org/resource/foundation-models-explainer>. [23]
- Kaplan, J. et al. (2020), « Scaling laws for neural language models », arXiv, 2001.08361, <https://arxiv.org/pdf/2001.08361.pdf>. [60]
- Khan, S., A. Mann et D. Peterson (2021), *The semiconductor supply chain: Assessing national competitiveness*, Center for Security and Emerging Technology, <https://cset.georgetown.edu/wp-content/uploads/The-Semiconductor-Supply-Chain-Issue-Brief.pdf>. [26]
- Kreps, S., R. McCain et M. Brundage (2022), « All the news that's fit to fabricate: AI-generated text as a tool of media misinformation », *Journal of Experimental Political Science*, vol. 9/1, pp. 104–17, <https://doi.org/10.7910/DVN/1XVYU3>. [79]
- Laaki, H., Y. Miche et K. Tammi (2019), « Prototyping a digital twin for real time remote control over mobile networks: Application of remote surgery », *IEEE*, vol. 7, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897018>. [57]
- Laplante, P. et al. (2020), « Artificial intelligence and critical systems: From hype to reality », *Computer*, vol. 53/11, pp. 45-52, <https://doi.org/10.1109/mc.2020.3006177>. [87]
- LeCun, Y. (2022), « A path towards autonomous machine intelligence », Openreview.net, <https://openreview.net/pdf?id=BZ5a1r-kVsf>. [61]

- LeCun, Y. (2022), « Publication LinkedIn », https://www.linkedin.com/posts/yann-lecun_i-think-the-phrase-agi-should-be-retired-activity-6889610518529613824-gl2F. [109]
- Lim, D. (2019), « Prosthetics controlled by brain implants in the offing, FDA says », 25 février, Dive Brief, <https://www.medtechdive.com/news/prosthetics-controlled-by-brain-implants-in-the-offing-fda-says/549042>. [56]
- Lorenz, P., K. Perset et J. Berryhill (2023), « Initial policy considerations for generative artificial intelligence », Documents de travail de l'OCDE sur l'intelligence artificielle, n° 1, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/fae2d1e6-en>. [10]
- Marcus, G. (2023), « Babbage: is GPT-4 the dawn of true artificial intelligence », The Economist Podcasts, <https://podcasts.apple.com/ca/podcast/economist-radio/id151230264?i=1000605454954>. [62]
- Marr, B. (2022), « The 10 best examples of low-code and no-code AI », Enterprise Tech, Forbes, <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2022/12/12/the-10-best-examples-of-low-code-and-no-code-ai/?sh=3035370574b5> (consulté le 27 février 2023). [46]
- McLean, S. et al. (2021), « The risks associated with Artificial General Intelligence: A systematic review », *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 35/5, pp. 649-663, <https://doi.org/10.1080/0952813x.2021.1964003>. [110]
- Merritt, R. (2022), « What is a transformer model? », 25 mars, NVIDIA Blog, <https://blogs.nvidia.com/blog/2022/03/25/what-is-a-transformer-model>. [16]
- Meta (2023), « Meta and Microsoft introduce the next generation of Llama », 18 juillet, Meta, <https://about.fb.com/news/2023/07/llama-2>. [47]
- Metz, C. (2023), « What exactly are the dangers posed by A.I.? », 7 mai, *The New York Times*, <https://www.nytimes.com/2023/05/01/technology/ai-problems-danger-chatgpt.html>. [82]
- Ministry of Science and ICT (2021), « Plan to spread the use of AI across all regions and industries' established », Communiqué de presse, https://www.korea.net/koreanet/fileDown?fileUrl=/upload/content/file/dc52b9c0fb0f4958812920c40ab4c164_20211102092303.pdf&fileName=211101+Plan+to+spread+the+use+of+AI+across+all+regions+and+industries+established.pdf. [113]
- Molenaar, I. (2021), « Personalisation of learning: Towards hybrid human-AI learning technologies » in *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the Frontiers with Artificial Intelligence, Blockchain and Robots*, Éditions OCDE, Paris, https://www.oecd-ilibrary.org/education/oecd-digital-education-outlook-2021_589b283f-en. [74]
- Morris, M. et al. (2023), « Levels of AGI: operationalizing progress on the path to AGI », arXiv, 2311.02462, <https://arxiv.org/abs/2311.02462>. [20]
- Mulligan, D. et al. (2021), « Confidential computing - a brave new world », 2021 International Symposium on Secure and Private Execution Environment Design (SEED), <https://doi.org/10.1109/SEED51797.2021.00025>. [36]
- Murray, M. (2023), « Generative and AI authored artworks and copyright law », *Hastings Communications and Entertainment Law Journal*, vol. 45, https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4152484. [97]
- NAIRR Task Force (2023), *Strengthening and democratizing the U.S. artificial intelligence innovation ecosystem: An implementation plan for a National Artificial Intelligence Research Resource*, National Artificial Intelligence Research Resource Task Force, Washington DC. [116]
- National Science Foundation (2023), « National AI research institutes », page web, https://nsf-gov-resources.nsf.gov/2023-08/AI_Research_Institutes_Map_2023_0.pdf?VersionId=TJXMSgV4U7Zgmad3iwYkg8Zffbm7KyNM (consulté le 1^{er} novembre 2024). [122]
- NCST (2022), *The networking & information technology R&D program and the National Artificial Intelligence Initiative Office*, National Science & Technology Council, Government of the United States, <https://www.nitrd.gov/pubs/FY2023-NITRD-NAIIO-Supplement.pdf>. [115]
- Newton, E. (2023), « Will neuromorphic-controlled robots soon become a reality? », 30 janvier, Tech Informed, <https://techinformed.com/will-neuromorphic-controlled-robots-soon-become-a-reality>. [59]
- NIST (2022), *Towards a standard for identifying and managing bias in artificial intelligence*, Édition spéciale (NIST-SP), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1270>, https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=934464. [91]
- O'Brien, C. (2020), « Why Intel believes confidential computing will boost AI and machine learning », 2 décembre, Venture Beat, <https://venturebeat.com/ai/why-intel-believes-confidential-computing-will-boost-ai-and-machine-learning>. [35]
- OCDE (à paraître), « Exploring artificial intelligence futures: Prospective milestones, risks and benefits » Documents de travail de l'OCDE sur l'intelligence artificielle, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/dee339a8-en>. [64]
- OCDE (2024), « Explanatory memorandum on the updated OECD definition of an AI system », Documents de travail de l'OCDE sur l'intelligence artificielle, n° 8, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/623da898-en>. [6]
- OCDE (2023), « A blueprint for building national compute capacity for artificial intelligence », Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique, n° 350, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/876367e3-en>. [8]

- OCDE (2023), « AI language models: Technological, socio-economic and policy considerations », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 352, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/13d38f92-en>. [4]
- OCDE (2023), *Artificial intelligence in science : Challenges, opportunities and the future of research*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/a8d820bd-en>. [70]
- OCDE (2023), « Emerging privacy-enhancing technologies : Current regulatory and policy approaches », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 351, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/bf121be4-en>. [34]
- OCDE (2023), *Perspectives de l'emploi de l'OCDE 2023 : Intelligence artificielle et marché du travail*, Éditions de l'OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/08785bba-en>. [86]
- OCDE (2023), *Processus du G7, dit d'Hiroshima, sur l'intelligence artificielle générative : Vers une vision commune à l'échelle du G7 sur l'IA générative*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/678bee9f-fr>. [66]
- OCDE (2023), « Risques de sécurité dans l'intelligence artificielle », *Forum mondial sur la sécurité numérique pour la prospérité*, https://www.oecd.org/digital/global-forum-digital-security/GFDSP-2023-agenda_FR.pdf. [43]
- OCDE (2023), « Summary of the OECD-MIT virtual roundtable on the future of artificial intelligence (AI) », OCDE, Paris, <https://wp.oecd.ai/app/uploads/2023/03/OECD-MIT-Workshop-1.pdf>. [25]
- OCDE (2023), « The shifting landscape of AI », 27 mars, présentation du Professeur Stuart Russell, Conférence internationale de 2023 sur l'IA sur le marché de l'emploi, l'innovation, la productivité et les compétences (AI-WIPS), <https://www.oecd-events.org/ai-wips-2023>. [85]
- OCDE (2022), *Instaurer la confiance et renforcer la démocratie : Préparer le terrain pour l'action gouvernementale*, Examens de l'OCDE sur la gouvernance publique, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/34a56a87-fr>. [81]
- OCDE (2022), « Measuring the environmental impacts of artificial intelligence compute and applications: The AI footprint », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 341, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/7babf571-en>. [28]
- OCDE (2022), « Summary of OECD expert discussion on future risks from artificial intelligence », OCDE, Paris, <https://wp.oecd.ai/app/uploads/2023/03/OECD-Foresight-workshop-notes-1.pdf>. [89]
- OCDE (2021), « State of implementation of the OECD AI Principles: Insights from national AI policies », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 311. Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/1cd40c44-en>. [49]
- OCDE (2019), *L'intelligence artificielle dans la société*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/b7f8cd16-fr>. [3]
- OCDE (2019), « Measuring distortions in international markets: The semiconductor value chain », *Documents de travail de l'OCDE sur la politique commerciale*, n° 234, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/8fe4491d-en>. [27]
- OECD.AI (2024), « AI Incidents Monitor (AIM) », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/en/incidents> (consulté le 14 février 2024). [78]
- OECD.AI (2024), « Données en temps réel : investissements en IA », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/fr/data?selectedArea=investments-in-ai-and-data,%20https:%2F%2Foecd.ai%2Fen%2Fdata%3FselectedArea%3Dinvestments-in-ai-and-data> (consulté le 10 mars 2024). [124]
- OECD.AI (2024), « Ensembles de données d'entraînement Hugging Face par langue », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/en/data?selectedArea=ai-models-and-datasets> (consulté le 10 mars 2024). [33]
- OECD.AI (2024), « Politiques et stratégies nationales en matière d'IA », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/fr/dashboards/overview> (consulté le 10 mars 2024). [118]
- OECD.AI (2023), « Données en temps réel : concentration des talents en IA par pays et sexe », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/en/data?selectedArea=ai-jobs-and-skills&selectedVisualization=ai-talent-concentration-by-country-and-gender> (consulté le 1^{er} novembre 2023). [128]
- OECD.AI (2023), « Données en temps réel : emplois et compétences en IA », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/en/data?selectedArea=aijobs-and-skills&selectedVisualization=ai-talent-concentration-by-country> (consulté le 14 février 2023). [129]
- OECD.AI (2023), « Données en temps réel : recherche en IA », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/fr/data?selectedArea=ai-research&selectedVisualization=ai-publications-by-country-over-time%20and%20https:%2F%2Foecd.ai%2Fen%2Fdata%3FselectedArea%3Dai-research&selectedVisualization=ai-publication-time-series-by-institution> (consulté le 13 mars 2023). [111]
- OECD.AI (2023), « Investissements en capital-risque dans l'IA par pays », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/fr/data?selectedArea=investments-in-ai-and-data&selectedVisualization=vc-investments-in-ai-by-country> (consulté le 19 mars 2023). [126]
- OECD.AI (2023), « Survol des tendances et données », *Observatoire de l'OCDE sur l'IA (base de données)*, <https://oecd.ai/fr/trends-and-data> (consulté le 27 février 2023). [45]
- OECD.AI (2021), *Observatoire de l'OCDE sur l'IA*, <https://oecd.ai/fr> (consulté le 30 septembre 2022). [123]

- Office of the Privacy Commissioner of Canada (2022), « When what is old is new again – The reality of synthetic data », OPC Privacy Tech-Know blog, <https://priv.gc.ca/en/blog/20221012/?id=7777-6-493564>. [38]
- OpenAI (2018), « AI and compute », Open AI blog, <https://openai.com/blog/ai-and-compute>. [29]
- Pang, G. (2022), « The AI chip race », *IEEE Intelligent Systems*, vol. 37/2, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9779606>. [130]
- Parlement du Canada (2022), *Loi sur la mise en œuvre de la Charte du numérique*, Parlement du Canada, <https://www.parl.ca/legisinfo/fr/projet-de-loi/44-1/c-27>. [142]
- Partenariat Mondial sur l'Intelligence Artificielle (PMIA) (2023), « About », site web, <https://gpai.ai/about> (consulté le 8 janvier 2024). [155]
- Reed, S. et al. (12 mai 2022), « A generalist agent », DeepMind blog, <https://www.deepmind.com/publications/a-generalist-agent>. [18]
- Russell, S. (2021), « Living with artificial intelligence », The Reith Lectures, BBC Radio 4, <https://www.bbc.co.uk/programmes/m001216k>. [84]
- Russell, S. (2019), *Human compatible: Artificial intelligence and the problem of control*, Viking. [99]
- Russell, S. et P. Norvig (2016), *Artificial intelligence: A modern approach*, Pearson Education, Inc. [11]
- Sadasivan, V. et al. (2023), « Can AI-generated text be reliably detected? », arxiv, 303.11156, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.11156>. [42]
- Schuman, C. et al. (2022), « Opportunities for neuromorphic computing algorithms and applications », *Nature*, vol. 2, <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00184-y>. [31]
- Scientific and Technological Research Council of Türkiye (2023), « Who we are », page web, <https://bilgem.tubitak.gov.tr/en/zye-corporate> (consulté le 8 janvier 2024). [121]
- Sessa, M. (2022), « What is gendered disinformation? », Israel Public Policy Institute, <https://www.ippi.org.il/what-is-gendered-disinformation>. [80]
- Sevilla, J. et al. (2022), « Compute trends across three eras of machine learning », arXiv, 2202.05924, <https://arxiv.org/abs/2202.05924>. [30]
- Shen, X. (2018), « Facial recognition camera catches top businesswoman « jaywalking » because her face was on a bus », 22 novembre, Abacus, <https://www.scmp.com/abacus/culture/article/3028995/facial-recognition-camera-catches-top-businesswoman-jaywalking>. [53]
- Shumailov, I. et al. (2023), « The curse of recursion: Training on generated data makes models forget », arXiv pre-print, 2305.17493, <https://arxiv.org/abs/2305.17493>. [41]
- Skalse, J. et al. (2022), « Defining and characterizing reward hacking », arXiv, 2209.13085 <https://arxiv.org/abs/2209.13085>. [103]
- Staab, R. et al. (2023), « Beyond memorization: Violating privacy via inference with large language models », arXiv, 2310.07298v1, <https://arxiv.org/pdf/2310.07298v1.pdf>. [40]
- Stadler, T., B. Oprisanu et C. Troncoso (2020), « Synthetic data -- Anonymisation Groundhog Day », *Proceedings of the 31st USENIX Security Symposium, Security 2022*, pp. 1451-1468, <https://doi.org/10.48550/arxiv.2011.07018>. [39]
- Stanford (2023), *Artificial Intelligence Index Report 2023*, Stanford University, <https://aiindex.stanford.edu/report>. [72]
- Suleyman, M. (2023), « Mustafa Suleyman: My new Turing test would see if AI can make \$1 million », 14 juillet, MIT Review, <https://www.technologyreview.com/2023/07/14/1076296/mustafa-suleyman-my-new-turing-test-would-see-if-ai-can-make-1-million>. [21]
- The Alan Turing Institute (2023), « First workshop on multimodal AI », page web, <https://www.turing.ac.uk/events/first-workshop-multimodal-ai#:~:text=Multimodal%20AI%20combines%20multiple%20types,finance%2C%20robotics%2C%20and%20manufacturing> (consulté le 8 janvier 2024). [1]
- The Alan Turing Institute (2022), *UK AI research infrastructure requirements review*, <https://www.turing.ac.uk/work-turing/uk-ai-research-infrastructure-requirements-review>. [136]
- The White House (2023), *Executive order on the safe, secure, and trustworthy development and use of artificial intelligence*, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2023/10/30/executive-order-on-the-safe-secure-and-trustworthy-development-and-use-of-artificial-intelligence>. [137]
- The White House (2023), « President Biden issues Executive Order on Safe, Secure, and Trustworthy Artificial Intelligence », 30 octobre (factsheet), The White House, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/10/30/fact-sheet-president-biden-issues-executive-order-on-safe-secure-and-trustworthy-artificial-intelligence>. [146]
- Thormundsson, B. (2022), « Artificial Intelligence (AI) market size/revenue comparisons 2018-2030 », 26 octobre, Statista, <https://www.statista.com/statistics/941835/artificial-intelligence-market-size-revenue-comparisons>. [68]
- Top500 (2023), *November 2023 List*, site web <http://www.top500.org> (consulté le 8 janvier 2024). [133]

- TÜBITAK (2023), « Centre of Excellence support program », site web, <https://www.tubitak.gov.tr/en/funds/academy/national-support-programmes>, <https://bilgem.tubitak.gov.tr/en/yze-ecosystem-call> (8 janvier 2024). [114]
- Turing, A. (2007), « Computing machinery and intelligence », dans *Parsing the Turing Test*, Springer, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-6710-5_3. [2]
- TRUBA (2023), TRUBA, site web, <https://www.truba.gov.tr/index.php/en/main-page> (consulté le 8 janvier 2024). [135]
- UNESCO (2022), *Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence*, UNESCO, Paris, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137>. [156]
- Vaswani, A. et al. (2023), « Attention is all you need », ArXiv, 1706.03762, <https://arxiv.org/abs/1706.03762>. [12]
- Villalobos, P. et al. (2022), « Will we run out of data? An analysis of the limits of scaling datasets in machine learning », <https://arxiv.org/abs/2211.04325>. [63]
- Wu, J. et al. (2023), « Analog optical computing for artificial intelligence », *Engineering*, vol. 10/133-145, <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.021>. [32]
- Yang, M. (2023), « Scientists use AI to discover new antibiotic to treat deadly superbug », 25 mai, *The Guardian*, <https://www.theguardian.com/technology/2023/may/25/artificial-intelligence-antibiotic-deadly-superbug-hospital>. [73]
- Zewe, A. (2022), « Collaborative machine learning that preserves privacy », 7 septembre, MIT News, <https://news.mit.edu/2022/collaborative-machine-learning-privacy-0907>. [37]
- Zirpoli, C. (2023), *Generative Artificial Intelligence and Copyright Law*, Congress, United States, <https://crsreports.congress.gov>. [96]
- Zwetsloot, R. et A. Dafoe (2019), « Thinking about risks from AI: Accidents, misuse and structure », 11 février, Lawfare, <https://www.lawfaremedia.org/article/thinking-about-risks-ai-accidents-misuse-and-structure>. [88]

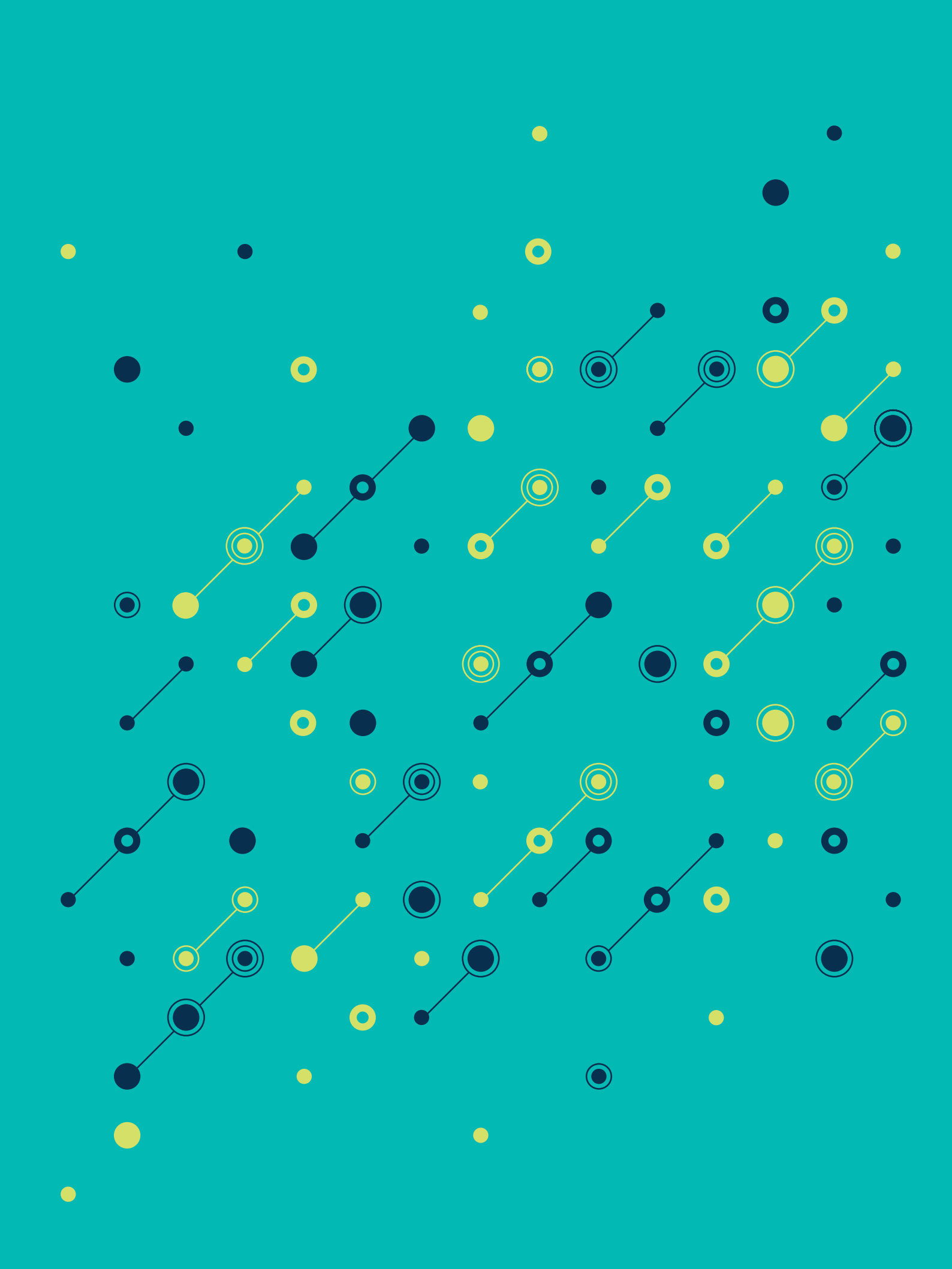
Notes

- « Les données de synthèse sont générées à partir de données/processus et d'un modèle entraîné pour reproduire les caractéristiques et la structure des données d'origine afin de parvenir à une distribution analogue. La mesure dans laquelle ces données de synthèse sont une approximation exacte des données d'origine est une mesure de l'utilité de la méthode et du modèle. » (traduction libre) (EU-US Trade and Technology Council, 2023_[7]).
- L'ensemble initial des solutions possibles pour les futurs de l'IA peut être consulté à l'adresse : <https://easyretro.io/publicboard/Lg97hwaJe8MJWJTe5uKGFjjtInh1/f63b59a0-0531-456e-82f2-d9bea1463fb9>.
- Au moment de la rédaction du présent document, les institutions de recherche figurant en tête de liste en 2023 d'après des données d'OpenAlex consultables sur OECD.AI étaient l'Académie chinoise des sciences (Chine), le Centre national de la recherche scientifique (France), l'Université de Tsinghua (Chine), l'Université Jiao Tong de Shanghai (Chine), l'Université de Zhejiang (Chine), l'Institut de technologie de Harbin (Chine), l'Université Beihang (Chine), l'Université des sciences et technologies de Huazhong (Chine), l'Université de Stanford (États-Unis) et la Max Planck Society (Allemagne). Les publications correspondantes sont en anglais et aussi dans d'autres langues. Les données sont consultables à l'adresse : <https://oecd.ai/en/data?selectedArea=ai-research&selectedVisualization=ai-publication-time-series-by-institution>.
- Les start-ups de l'IA ont été recensées d'après la classification transsectorielle et verticale Preqin et d'après une analyse automatisée, conduite par l'OCDE, des mots-clés contenus dans la description des activités des entreprises. Ces mots-clés (en anglais) liés à l'IA étaient des mots-clés génériques tels que *artificial intelligence* et *machine learning* ; des mots-clés liés aux techniques d'IA tels que *neural network*, *deep learning* et *reinforcement learning* ; et des mots-clés faisant référence aux domaines d'application de l'IA tels que *computer vision*, *predictive analytics*, *natural language processing* et *autonomous vehicles*.
- Depuis quelques années, on procède de plus en plus à des mises à jour des systèmes de supercalculateurs pour pouvoir aussi y exécuter des flux de calculs liés à l'IA. Pour autant, le Top500 établi ne permet pas de distinguer les supercalculateurs en fonction de leur capacité de calcul dédiée à l'IA. Il convient donc d'être prudent quand on cherche à tirer des conclusions de ce palmarès puisqu'il est fondé sur une méthodologie comparative (Linpack) plutôt que sur une définition précise du terme « supercalculateur ». En d'autres termes, tout supercalculateur peut figurer au palmarès s'il est capable de résoudre un ensemble d'équations linéaires en arithmétique à virgule flottante. Par ailleurs, la participation à l'élaboration de ce palmarès est volontaire ; comme certains pays ont



depuis quelques années ralenti ou interrompu leur contribution, les comparaisons internationales sur la base de ces données sont donc limitées et à examiner avec réserve. L'analyse de ce Top500 peut être un moyen indirect d'observer les disparités en termes de capacité de calcul qui sont en train d'apparaître ou de se creuser entre les économies, mais il convient de la compléter avec d'autres analyses propres à l'IA à mesure que les pays se penchent sur leurs besoins spécifiques en matière de capacité de calcul pour l'IA.

6. Performance maximale atteinte mesurée par Rmax en milliers de milliards (téra) d'opérations en virgule flottante par seconde (*floating-point operations per second*, flops), c'est-à-dire en téraflops.
7. Les organisations membres sont les suivantes : Agence des droits fondamentaux de l'Union européenne, Banque interaméricaine de développement, Banque mondiale, Commission européenne, Conseil de l'Europe, OCDE, Organisation des Nations Unies, UNESCO.



Coup de projecteur

Les réseaux sans fil de prochaine génération et l'écosystème de la connectivité

Le présent Coup de projecteur permet de passer en revue les tendances naissantes de la prochaine génération de réseaux sans fil qui façonnent l'écosystème de la connectivité. Ces tendances nous amènent à se demander comment rendre possible la commercialisation des technologies sans fil de prochaine génération et leur diffusion universelle. Le Coup de projecteur met en lumière les initiatives de recherche, l'évolution récente du marché et des progrès accomplis vers l'intégration des solutions de connectivité terrestre sans fil (5G et 6G, par exemple) et les technologies non terrestres, dont les satellites et autres plateformes aériennes. Dans ce cadre, ce Coup de projecteur identifie les défis en ce qui concerne la politique de gestion du spectre radioélectrique, la collaboration en matière réglementaire, l'interopérabilité, la durabilité environnementale, la sûreté et la sécurité numérique et la réduction des fractures numériques. Ces questions, de nature à la fois technique et réglementaire, doivent être traitées pour que l'avenir puisse se concrétiser tel qu'il a été envisagé.

L'avenir de la connectivité sans fil

Réseaux ultrarapides

Des recherches sur la

6G

sont menées partout dans le monde, notamment dans 15 pays de l'OCDE. Les déploiements commerciaux devraient intervenir après 2030.

5G 6G

Boom de la technologie satellite

Les constellations de satellites se multiplient et pourraient permettre d'étendre la connectivité aux zones rurales et mal desservies.

Satellites

De 200 km à 35 786 km

LEO : de 200 km à 2 000 km

MEO : de 2 000 km à OSG

OSG : 35 786 km

Stations sur plateformes à haute altitude (HAPS)

De 20 à 50 km

Connectivité de la Terre à l'espace

L'écosystème de connectivité intégrera à l'avenir des technologies sans fil terrestres et non terrestres.

Réseaux sans fil non terrestres

Réseaux sans fil terrestres



Stations de base mobiles terrestres
De 20 à 50 m environ

Source : Graphique créé par l'OCDE, d'après plusieurs sources dont l'Ofcom, l'Agence spatiale européenne et la GSMA.



Les réseaux de la prochaine génération suivent les progrès technologiques accomplis par l'industrie des communications, ainsi que la demande dont les réseaux de communication font l'objet aujourd'hui et celle escomptée pour l'avenir. Le volume de données transmis par l'intermédiaire de ces réseaux est en progression constante, du côté des particuliers comme de celui des entreprises, à la faveur des innovations ayant vu le jour dans le domaine des systèmes d'intelligence artificielle (IA), dans celui de l'internet des objets (IdO) ainsi qu'à d'autres technologies émergentes. Il y a tout lieu de penser que l'amélioration des communications et des interactions entre l'humain et la machine y occuperont une place importante, de même que les technologies d'augmentation des fonctions humaines appliquées à la communication sensorielle, dont l'haptique (internet des sens) qui sont susceptibles d'influencer la demande future sur les réseaux. Il faut ajouter à cela les véhicules entièrement automatisés, par exemple, qui auront eux aussi une incidence sur la demande à l'égard des réseaux sans fil.

La convergence des environnements et applications de réalité virtuelle, de réalité augmentée et de réalité étendue a une action déterminante non seulement sur les communications humaines, mais aussi sur la manière dont nous interagissons avec les machines et avec notre environnement, dans la mesure où le monde numérique, le monde humain et le monde physique tendent à se confondre (Hexa-X, 2022^[1]). Ces tendances des technologies immersives, qui sont étudiées au chapitre 3 des *Perspectives de l'économie numérique (Volume 1)*, exigeront une adaptation des réseaux haut débit existants. Qui plus est, les technologies haptiques – encore balbutiantes – progressent avec les applications de réalité augmentée et commencent à être utilisées, par exemple, pour la simulation d'opérations chirurgicales, dans le cadre de communications immersives, dans le domaine des soins, ainsi qu'au bénéfice des personnes malvoyantes ou malentendantes.

Toutes ces évolutions ont d'importantes conséquences pour les réseaux futurs : elles entraînent en effet la production de données en quantité considérable, qui exige davantage de débit et de capacités de traitement. La plupart de ces applications nécessitent par ailleurs une qualité de communication supérieure, autrement dit une vitesse plus élevée et un temps de réponse (latence) plus faible. Au-delà de ces exigences touchant à leur fonctionnement, les réseaux vont devoir acquérir une plus grande résilience, non seulement pour les applications critiques, mais aussi pour l'ensemble des cas d'usage. Surtout, les réseaux haut débit, après avoir reliées entre elles les personnes puis connecté des objets en tout genre, sont sur le point d'aborder une nouvelle étape dans leur évolution qui consistera à assurer, demain, une connectivité illimitée et intégrée en tout lieu. La question qui se pose est donc de savoir comment préparer les réseaux, en particulier les réseaux sans fil, à cette évolution technologique.

L'extension de la connectivité est à la fois nécessaire et souhaitable, puisque la transformation numérique en dépend. Aussi est-il indispensable d'acquérir une connaissance plus fine de l'écosystème de la connectivité, pour définir en la matière des politiques fondées sur des données probantes. Prenant en compte que l'OCDE définit des normes à caractère stratégique et non des normes techniques et que l'avenir de la technologie demeure nimbé d'incertitudes dans un domaine aussi dynamique que celui de l'infrastructure et des services de communication. Le présent « Coup de projecteur » vise à mettre en lumière les évolutions possibles des réseaux sans fil de la prochaine génération au cours des cinq à dix prochaines années, et tout spécialement la possibilité d'offrir une connectivité de qualité en tout lieu et à compléter les travaux de l'OCDE sur les tendances qui façonnent les réseaux futurs, comme l'intégration du nuage informatique, l'informatique en périphérie, la virtualisation et l'automatisation des réseaux (OCDE, 2022^[2]). Si l'on s'intéresse ici aux réseaux sans fil, la poursuite du déploiement de la fibre n'en demeure pas moins indispensable, quelle que soit la technologie d'accès au haut débit, pour améliorer le fonctionnement et la fiabilité des réseaux.

Le présent « Coup de projecteur » met en lumière deux grandes évolutions qui sont de nature à façonner les communications sans fil au cours de la prochaine décennie. La première se rapporte aux technologies terrestres de « l'après 5G », appelées à repousser les frontières des communications sans fil, la seconde aux réseaux non-terrestres (NTN, pour son acronyme en anglais)¹, dont les constellations de satellites en orbite terrestre basse (LEO) et divers types de plateformes aériennes.

L'intégration des réseaux terrestres sans fil (TN, pour son acronyme en anglais)² et des réseaux non-terrestres soulève de nouvelles difficultés, d'ordre tant technique que réglementaire. Des chercheurs se penchent désormais sur les modalités de cette intégration (autrement dit les topologies hybrides de connectivité). Dans l'avenir, des réseaux sans fil hybrides, satellites et terrestres, pourraient, par exemple, apporter des solutions de connectivité aux utilisateurs d'applications d'IdO, d'applications maritimes et aéronautiques (OCDE, 2022^[2]).

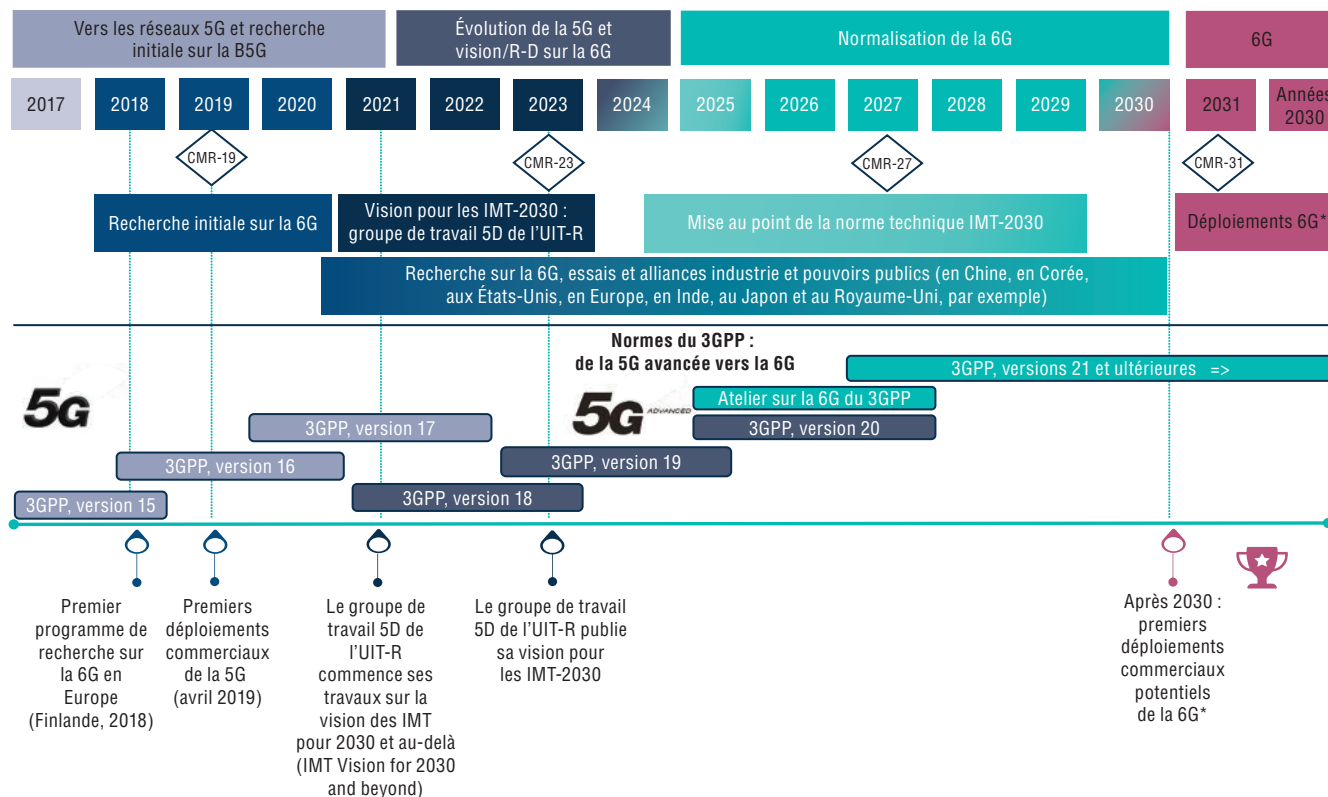


Connectivité terrestre : au-delà des technologies 5G

En quoi consistent les technologies de « l'après 5G », parfois désignées comme les technologies de sixième génération (6G) ? Cela reste encore à définir. Plusieurs pays, instituts de recherche et acteurs du secteur des communications (opérateurs et équipementiers, notamment) font de la recherche et développement consacrées aux technologies mobiles qui s'inscriront dans le prolongement de la 5G, et dont le lancement commercial est envisagé vers la fin de la décennie (OCDE, 2022_[2]). Des projets scientifiques sont ainsi en cours dans différents pays du monde (Allemagne, République populaire de Chine (dénommée ci-après « Chine »), Corée, États-Unis, Finlande, Japon, Royaume-Uni et Singapour, par exemple), ainsi qu'à l'échelle de l'Union européenne. Dans la zone OCDE, des initiatives publiques et/ou des alliances sectorielles axées sur la mise au point des technologies 6G ont vu le jour dans 15 pays³. Le Groupe de travail 5D de l'UIT-R a lancé son projet « Les IMT au-delà de 2030 », en 2021 (UIT, 2021_[3]), et fixé un échéancier de telle sorte que la définition des spécifications des Télécommunications mobiles internationales 2030 (IMT) soit achevée d'ici la fin de l'année 2029 (UIT-R, 2022_[4])⁴.

On trouvera dans le graphique 1.S.1 un calendrier de mise au point de la 6G, donné à titre indicatif. Si les recherches autour de la 6G sont en cours, la vision de la prochaine évolution des réseaux mobiles s'élabore à l'heure actuelle dans le contexte du déploiement des réseaux 5G. En janvier 2024, des services commerciaux 5G étaient disponibles dans 37 pays de l'OCDE sur 38, sous une forme ou une autre. Si bien la plupart des réseaux 5G commerciaux dépendent du réseau d'infrastructure 4G (réseaux 5G-NSA, pour *non-standalone*) et utilisent des normes spécifiques au niveau de l'interface radio (aussi appelé New Radio)⁵, le déploiement de réseaux autonomes (5G-SA, pour *standalone*) s'accélère.

Graphique 1.S.1. Vers la 6G : calendrier possible



Notes : B5G = Beyond 5G (Au-delà de la 5G).

*Calendrier descriptif à titre indicatif établi à des fins d'illustration. Le développement et la mise en service commercial de la 6G sont subordonnés à divers facteurs, dont la date à laquelle les pays en commenceront le déploiement.

Source : OCDE à partir de diverses sources bibliographiques. Parmi ces sources : les présentations de différentes parties prenantes lors de l'atelier UIT-R de juin 2022 sur le thème « Les IMT pour 2030 et au-delà » (UIT-R, 2022_[7]) [Wireless World Research Forum, Samsung Research, HAPS Alliance, European 6G Flagship Hexa X, NextG Alliance (États-Unis) ; Beyond 5G Promotion Consortium (Japon), one6G Association (Grèce) ; « 6G: Building Metaverse ready Mobile Networks » et « Use cases » (plusieurs universités), Agence finlandaise des transports et des communications ; Telecommunications Standards Development Society (Inde), p. ex.] ; (Ahokangas, Matinmikko-Blue et Yrjölä, 2023_[8]), « Envisioning a Future-Proof Global 6G from Business, Regulation, and Technology Perspectives » ; Qualcomm (2022_[9]), « Vision, market drivers, and research directions on the path to 6G », <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/Qualcomm-Whitepaper-Vision-market-drivers-and-research-directions-on-the-path-to-6G.pdf> ; Ericsson (2022_[10]), « 6G: Connecting a cyber-physical world », <https://www.ericsson.com/4927de/assets/local/reports-papers/white-papers/6g-connecting-a-cyber-physical-world.pdf> ; et 3GPP (2023_[11]), « Releases », <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases>.



La plupart des aspects révolutionnaires attendus de la 5G prendront sans doute corps avec la mise en place des réseaux 5G-SA qui reposent à la fois sur les normes 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*)⁶ relatives à l'architecture du réseau d'infrastructure 5G (5GC, ou 5G-Core) et sur la nouvelle technologie d'accès radio 5G (i.e. NR, Nouvelle Radio) (OCDE, 2022^[2]). De ce fait, les normes 5G vont continuer à évoluer, le 3GPP ayant d'ailleurs annoncé l'arrivée de la « 5G avancée » (avec la parution des versions 18 à 20 de ces normes), qui préparera l'avènement de la 6G.

La vision des IMT au-delà de 2030, que le Groupe de travail 5D de l'UIT-R a publié à la fin de l'année 2023, comprends les principales spécifications des technologies appelées à voir le jour après la 5G. Les organismes de normalisation pourront ensuite retranscrire les grandes valeurs et spécifications énoncées dans ce document, sous la forme de normes techniques. Le processus de normalisation de la 6G débutera sans doute après 2025 et il n'est pas exclu que les premières mises en service commerciales n'interviennent qu'après 2030. À propos de l'allocation du spectre, les travaux préparatoires visant à définir les éventuels besoins de fréquences additionnelles pour la 6G (« Le cadre IMT 2030 ») sont en cours (UIT-R, 2023^[5]). Cela a fait partie des discussions lors de la Conférence mondiale des radiocommunications (CMR) organisée par l'UIT en 2023, en vue de leur éventuelle inscription à l'ordre du jour de la CMR-27. Lors de la CMR-23 de novembre 2023, les discussions ont porté sur la question des fréquences adéquates et sur la nécessité d'un badge IMT (graphique 1.S.1). La CMR-23 s'est conclue par un accord sur l'analyse de la bande de 7 à 8,5 GHz pour les services 6G lors de la prochaine conférence CMR qui aura lieu en 2027 (LightReading, 2023^[6]).

Les débats sur la 6G, qui n'en sont qu'à leurs débuts, porteront à la fois sur des aspects qui procèdent d'une évolution, celle des réseaux 5G sans fil, et sur d'autres aspects qui ont un caractère plus révolutionnaire, ainsi que les applications sans fil associant communication et détection et l'utilisation croissante de bandes de fréquences plus élevées, comme celle des térahertz (OCDE, 2022^[2]). Les chercheurs estiment que l'intégration des données de capteurs et de la synchronisation du temps pourrait ouvrir la voie à de nouvelles applications de connectivité interactive et multipartite, au sein des mondes virtuel et réel, et à l'interface de l'un et de l'autre (UIT-R, 2022^[7]).

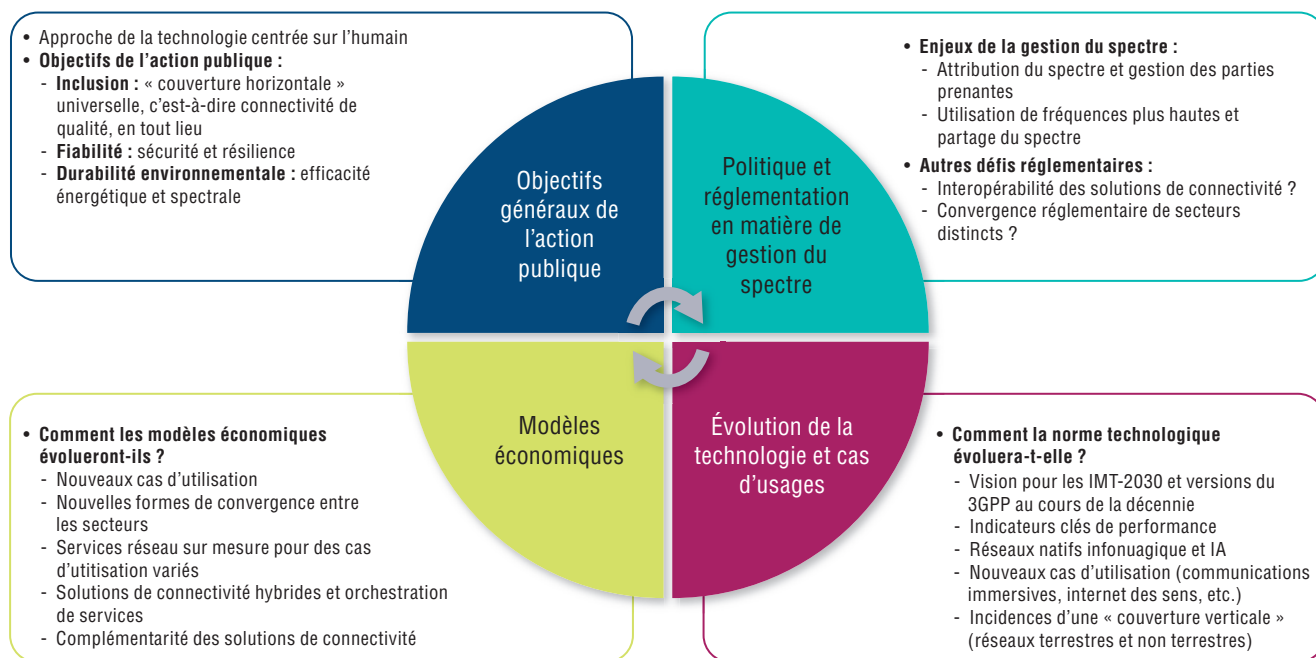
Tout comme dans le cas des générations précédentes de réseaux mobiles, plusieurs facteurs imbriqués façonneront sans doute l'avenir des réseaux mobiles sans fil et leur incidence sur l'évolution de l'écosystème de la connectivité. Cette évolution donnera probablement lieu à l'intégration de diverses solutions de connectivité sans fil autres que la connectivité mobile (les réseaux locaux sans fil [*Wireless Local Area Networks, WLAN*], comme le Wi-Fi et les réseaux non terrestres, par exemple) ainsi que des solutions de connectivité terrestre, telles que les câbles sous-marins, et une attention accrue portée à la connectivité à l'intérieur des immeubles. Au fur et à mesure que les réseaux deviennent plus sophistiqués, la constitution progressive d'un « réseau de réseaux » (également appelés « réseaux multicouches ») n'ira pas dans soulever de nouvelles difficultés. Les facteurs qui influent sur les réseaux mobiles de demain sont, entre autres, les suivants : i) les grands objectifs de l'action publique ou valeurs cardinales pris en considération pour créer la prochaine génération de ces réseaux ; ii) les questions relatives à la gestion du spectre et autres problèmes touchant à la réglementation ; iii) l'évolution des normes technologiques elles-mêmes, à la lumière des recherches, des expérimentations et des nouveaux cas d'usage ; iv) la mise en œuvre de ces nouveaux cas d'usage à travers l'évolution des modèles économiques (graphique 1.S.2).

Grands objectifs de l'action publique. Les travaux préparatoires à l'avènement de la 6G mettent entre autres l'accent sur diverses valeurs, à commencer par la durabilité environnementale, inclusion numérique et sécurité numérique. En ce qui concerne la durabilité environnementale, par exemple, celui-ci vise à garantir une efficacité énergétique et spectrale supérieure à celle des générations antérieures de réseaux mobiles. De son côté, promouvoir l'inclusion numérique se focalise à combler les écarts de connectivité par la mise en place d'une couverture « horizontale » universelle. Le renforcement de la sécurité numérique et la résilience des réseaux, qui reflètent tous deux la valeur « fiabilité » sont d'autres aspects essentiels. Plusieurs établissements et chercheurs ayant pris part aux récentes initiatives sur la 6G ont souligné que les nouvelles applications et technologies devaient s'inscrire dans une démarche centrée sur l'humain (6G Symposium, 2021^[13] ; OCDE, 2022^[2]). Certes, les notions de durabilité, d'inclusivité et de fiabilité, qui procèdent toutes d'une telle démarche, occupent une place importante dans les visions de la 6G mises à l'étude par les chercheurs, les alliances industrielles et les pays, néanmoins, il reste à savoir quelle place leur sera faite lors de la phase normalisation avec la définition d'indicateurs clés de performance.

À cet égard, les ministres du numérique et de la technologie des pays du G7 ont fait part de leur « vision commune des réseaux futurs dans l'ère Beyond 5G/6G » en 2023. La déclaration souligne l'importance des réseaux à haute capacité et à très faible latence pour permettre les applications critiques, le rôle des « réseaux multicouches » qui combinent les solutions des réseaux terrestres et des réseaux non terrestres pour assurer une « connectivité numérique » universelle, la nécessité de minimiser les incidences des réseaux sur l'environnement et l'importance de l'efficacité du spectre, de la modularité et de l'interopérabilité pour atteindre les objectifs de la politique (G7, 2023^[14]).



Graphique 1.S.2. Les facteurs imbriqués qui façonneront sans doute la 6G au cours de la prochaine décennie



Notes : NTN = Réseaux non terrestres (*non-terrestrial networks*) ; TN = Réseaux terrestres (*terrestrial networks*). Définitions : La *résilience* des réseaux de communication désigne leur aptitude à absorber les chocs tout en continuant d'offrir un niveau de service acceptable. Il est possible de la renforcer en veillant à la diversité du réseau et à sa redondance au moment de la planification et du déploiement de l'infrastructure. Un *incident de sécurité numérique* s'entend d'un événement, provoqué à dessein ou fortuit, susceptible d'interrompre la disponibilité, l'intégrité ou la confidentialité de données, de systèmes d'information ou de réseaux de communication.

Sources : OCDE, à partir de recherches documentaires sur les différentes visions de la 6G à l'examen (au mois de février 2023). Ces recherches ont été étayées, entre autres, par des présentations de différentes parties prenantes à l'atelier UIT-R « Les IMT pour 2030 et au-delà » (UIT-R, 2022^[7]) ; (Ahokangas, Matinmikko-Blue et Yrjölä, 2023^[8]), par le document de travail « Envisioning a Future-Proof Global 6G from Business, Regulation, and Technology Perspectives », et (Policy Tracker, 23 January 2023^[12]), par l'article intitulé « Do 5G and 6G change spectrum policy? », <https://www.policytracker.com/blog/our-new-podcast-spectrum-policy-101>.

Gestion du spectre et questions d'ordre réglementaire. Une série de facteurs influenceront la gestion et la réglementation du spectre. Il s'agit notamment de la recherche sur la 6G, de la pertinence continue du spectre à bande basse et moyenne et de l'importance accrue des politiques visant à améliorer les réseaux sans fil, à l'attribution des fréquences, à gérer les parties prenantes et à garantir l'interopérabilité. Quelques-uns des cas d'usage à l'étude dans le cadre des travaux sur la 6G prévoient l'utilisation de bandes de fréquences plus élevées, telles que la bande des ondes millimétriques (au-dessus de 24 GHz) et les ondes térahertz (au-dessus de 100 GHz)⁷. En décembre 2022, par exemple, l'Institut européen des normes de télécommunications (ETSI, pour son acronyme en anglais) a établi un groupe de spécification industrielle sur les communications en ondes térahertz en tant que solution technologique envisageable pour la 6G, l'accent étant mis sur les applications à forte intensité de données, comme la réalité virtuelle et la réalité augmentée, et sur des applications combinant des fonctionnalités de détection et des fonctionnalités de communication, comme la téléprésence holographique (ETSI, 2022^[15]). Il y a tout lieu de penser que les bandes de fréquences inférieures et médianes resteront largement utilisées (GSMA, 2023^[16]).

Qui plus est, les mesures de gestion du spectre contribuant à améliorer les réseaux sans fil de manière fondamentale vont devenir plus nécessaires qu'auparavant. Ainsi, les modèles de partage des fréquences ne feront que gagner en importance, tout comme les normes d'équipement qui, sans avoir de rapport direct avec l'exploitation des réseaux de communication, n'en affectent pas moins l'efficacité d'utilisation du spectre (c'est le cas des normes relatives au fonctionnement des récepteurs)⁸. La flexibilité dans la gestion du spectre, y compris l'accès flexible au partage du spectre, sera essentielle compte tenu de l'incertitude considérable de la demande, à la fois en termes de nouvelles applications et de nouveaux services, ainsi que des diverses options pour fournir les services de communication sans fil de la prochaine génération (Ofcom, 2023^[17]). D'autre part, à mesure que la place des nouveaux acteurs issus de secteurs autres que celui des télécommunications grandit dans l'écosystème de la connectivité sans fil à haut débit, l'attribution des bandes de fréquences et la gestion des parties prenantes vont devenir plus cruciales encore. Parmi les problèmes rencontrés en lien avec la réglementation, en dehors de la politique de gestion du spectre, citons l'interopérabilité des différentes



solutions de connectivité et la gestion de la convergence de secteurs distincts qui ne relèvent pas nécessairement de la compétence des autorités de régulation des communications.

Évolution de la technologie et des cas d'usages. Certains chercheurs sont convaincus que la 6G pourrait faire émerger de nouveaux cas d'usage en ce qu'elle permettrait des communications ubiquitaires ainsi que la création de systèmes combinant communication, détection et localisation, avec une fiabilité élevée et une faible latence (Bourdoux et al., 2020^[18] ; Ofcom, 2021^[19])⁹. La couverture universelle et la qualité d'expérience accrue seront rendues possibles par deux facteurs distincts. Premièrement par les recherches sur l'utilisation de surfaces intelligentes, faites de matériaux artificiels (ou métamatériaux), le long des rues et dans les bâtiments pour s'affranchir des limites physiques des réseaux sans fil traditionnels. Deuxièmement par l'avènement de topologies hybrides terrestres/aériennes (Ofcom, 2021^[19]). Citons, parmi les applications des technologies 6G actuellement à l'étude, les services multimédias avancés, par exemple la réalité étendue immersive, les hologrammes, les jumeaux numériques, les appels tridimensionnels (3D), la communication haptique (c'est-à-dire avec transmission du toucher et du mouvement), les solutions de mobilité entièrement automatisées, et les capteurs IdO inspirés des nanotechnologies (Alleven, 2021^[20]).

Les chercheurs aussi font observer que la 6G devra, dès le départ et par définition, être compatible avec l'infonuagique et l'IA pour optimiser la gestion des réseaux, la consommation d'énergie et l'efficacité spectrale et offrir des fonctionnalités renforcées de sécurité numérique. L'utilisation de l'IA combinée à un mode « inactif » ou « en veille », déjà disponible pour la 5G (OCDE, 2022^[2]), est également envisagée pour les futurs réseaux sans fil afin d'améliorer l'efficacité énergétique. Avec l'avènement de l'informatique quantique, la « sécurité dès la conception » sera essentielle pour la 6G, y compris les caractéristiques résistantes aux attaques quantiques (Fitzek et al., 2022^[21]). En outre, les réseaux totalement virtualisés et définis par logiciel pourront sans doute prendre en charge des solutions efficaces par rapport au coût et rétro-compatibles pour atteindre les objectifs d'inclusion, dans la mesure où les pays vont probablement déployer les réseaux 6G en plusieurs étapes (Wireless World Research Forum, 2022^[22]). De nouvelles applications se profilent également dans le secteur automobile (véhicule entièrement autonome), celui des soins (hôpital sans fil adapté à l'IA) et l'industrie (réalité virtuelle, informatique en périphérie et robotique) (6G Flagship, 2023^[23]). L'utilisation de bandes de fréquences de plus en plus élevées pour obtenir un meilleur débit couplé à des exigences de couverture accrues peut avoir une incidence sur la consommation d'énergie des réseaux. En ce sens, la recherche sur la 6G se concentre sur la conciliation entre les exigences de communication et de la détection des applications 6G et l'efficacité énergétique (Fitzek et al., 2022^[21]). Qui plus est, les recherches en cours sur la 6G se sont aussi concentrées sur l'extension de la « couverture verticale » avec l'intégration des réseaux terrestres (TN) cellulaires et des réseaux non terrestres (NTN), qui pourrait s'étendre aux réseaux à satellite en orbite basse (LEO), moyenne (MEO) et géostationnaire (OSG), aux réseaux air-sol (A2G) et autres plateformes aériennes, dont éventuellement les stations placées sur des stations de plateformes à haute altitude (HAPS).

Modèles économiques. De multiples questions affectent l'émergence de modèles commerciaux pour la 5G et la 6G, notamment le déploiement itératif de la 5G et son impact généralisé sur les économies, ainsi que les types de partenariats nécessaires pour exploiter pleinement le potentiel de la 6G. Dans la mesure où la 5G intégrale (5G-SA) n'est pas encore une réalité dans la plupart des pays, quelques parties prenantes s'interrogent d'abord sur la manière dont elle va influencer sur la transformation numérique avant que les réseaux 6G ne deviennent accessibles au plus grand nombre. La mise en œuvre des cas d'usage de la 5G-SA, en particulier, pourrait révéler des applications futures et des modèles économiques envisageables avec la 6G, lorsque la connectivité sera susceptible de dépendre d'un modèle de « réseau en tant que service » pour des cas d'usage sur mesure. Certaines des difficultés rencontrées lors du déploiement de la 5G-SA – qui permettra d'étendre les fonctionnalités révolutionnaires de la 5G à l'ensemble des secteurs de l'économie – aideront peut-être à imaginer l'avenir, et notamment à identifier la nature des partenariats à nouer pour que la société retire tous les bienfaits de la 6G. Dans ce contexte, il est probable que de nouvelles formes de collaboration verront le jour entre les différents secteurs avec l'avènement de solutions de connectivité hybrides et de réseaux multicouches. La question de savoir si les diverses solutions de connectivité sont complémentaires ou concurrentes va sans doute avoir une influence déterminante sur les modèles économiques. Qui plus est, les modèles de commercialisation des cas d'usage envisagés, qui sont d'ores et déjà un sujet de préoccupation dans le cas de la 5G, seront vraisemblablement au cœur des grands débats qui façonneront les modèles économiques sur lesquels s'appuiera la prochaine génération de réseaux sans fil.

Quoique la présente section soit consacrée aux technologies mobiles qui viendront après la 5G, il y a lieu de noter les progrès actuels d'autres solutions de connectivité sans fil qui, en parallèle aux réseaux cellulaires (mobiles) et aux réseaux sans fil non terrestres, peuvent satisfaire aux exigences de fonctionnement de différents cas d'usage issus de la transformation numérique. Les réseaux locaux sans fil (WLAN), comme les réseaux Wi-Fi, forment un cas d'usage particulièrement important dans lequel des fréquences non soumises à licence d'exploitation servent à assurer la connectivité, en intérieur principalement, de réseaux domestiques fixes et de réseaux locaux d'entreprise. Les réseaux Wi-Fi jouent également un rôle important dans le délestage du trafic mobile (OCDE, 2022^[24], 2022^[2]). Dans le prolongement des générations précédentes de normes Wi-Fi, la norme technique Wi-Fi 6¹⁰ doit améliorer le



fonctionnement de ces réseaux, notamment ceux déployés en extérieur à grande échelle (comme les points d'accès extérieur), accroître le débit en environnement dense et réduire la consommation électrique des dispositifs (Oughton et al., 2021^[25]). Si elles n'en sont qu'à leurs débuts, les discussions déjà engagées au sujet de la norme Wi-Fi 7¹¹ portent essentiellement sur le renforcement de la qualité de fonctionnement en réponse à des cas d'usage assortis d'exigences de service plus élevées quant au débit et au temps de latence, comme les applications de réalité virtuelle ou de réalité augmentée (Oughton et al., 2021^[25]). La publication de la norme Wi-Fi 7 est attendue pour mai 2024 (IEEE, 2022^[26] ; OCDE, 2022^[24]).

Le développement de la prochaine génération de technologies sans fil, comme la 6G, soulève une multitude de questions encore sans réponse. Vivrons-nous dans un monde hyperconnecté en 2030 ? Si oui, quelles en seront les conséquences ? Y a-t-il de nouveaux risques et de nouveaux défis pour les réseaux ? Quels sont les principaux motifs de préoccupation en ce qui concerne la sécurité, la résilience et la capacité en données ? Sur le plan des exigences de connectivité, comment les gestionnaires du spectre peuvent garantir un accès adéquat à la ressource grâce à un régime efficient de gestion du spectre, adapté à la diversité des cas d'usage, dans un contexte de rareté de cette ressource ?

La correction des disparités d'accès à la connectivité, qui plus est, revêt un caractère fondamental. La fracture numérique affecte au premier chef les catégories de population les plus vulnérables, comme les ménages ruraux ou modestes. À la fin de l'année 2022, quelque 34 % de la population mondiale étaient encore « hors ligne » (UIT, 2023^[27]). De ce fait, l'une des grandes questions est de savoir comment encourager l'investissement et la concurrence afin d'offrir une connectivité haut débit financièrement accessible et de qualité à tout un chacun, quel que soit l'endroit où l'on habite. En outre, comment œuvrer ensemble à l'édification d'un écosystème propice à l'éclosion d'applications d'IA et d'IdO dignes de confiance et transcendant les frontières nationales ? Il sera nécessaire que les pays aient une même manière d'appréhender la réglementation et l'action publique, et que les normes soient interopérables.

Connectivité non terrestre : progrès des technologies satellites et autres technologies sans fil non terrestres

Les satellites offrent déjà une connectivité internet aux utilisateurs finaux, en particulier dans les zones non ou mal desservies par les réseaux terrestres (zones rurales et isolées, p. ex.), et à venir en soutien à ces réseaux par des services de raccordement. En outre, d'autres technologies aériennes sont en cours de développement pour combler les disparités au regard de la connectivité et des dispositions commencent à être prises pour assurer l'intégration des réseaux terrestres (TN) et non terrestres (NTN).

Haut débit par constellations de satellites géostationnaires ou non géostationnaires

L'évolution de la technologie satellite, conjuguée à l'amélioration des capacités de lancement et à une diminution du coût et de la taille des dispositifs terminaux, a abaissé les barrières à l'entrée sur le marché et élargi la gamme des solutions de connectivité satellite. L'émergence de diverses constellations, destinées pour certaines (Starlink ou Kuiper, p. ex.) à assurer des services de communication aux utilisateurs finaux, notamment dans les zones rurales ou isolées, et pour d'autres (OneWeb, Telesat, O3B, Rivada et Kuiper) à étendre la portée des réseaux terrestres existants, vient compléter l'écosystème de la connectivité. Il faut ajouter à cela le nombre croissant de satellites servant à offrir des solutions d'IdO dans les zones isolées ou destinés au secteur de la logistique, notamment pour la couverture aérienne et maritime (Swarm Technologies, Hiber, Kinéis et Globalstar, p. ex.). Toutes ces applications ont pour objet d'assurer une connectivité « universelle ».

Par le passé, la connectivité satellite a été assurée pour l'essentiel à l'aide de satellites en orbite géostationnaire (OSG), dont la rotation est synchronisée avec celle de la Terre. Malgré leur large zone de couverture, ces satellites coûtent, en règle générale, relativement cher à produire et pâtissent d'une latence importante puisque les signaux radioélectriques sont émis et reçus à 36 000 km d'altitude. Des solutions plus récentes reposent sur les satellites en orbite terrestre basse (LEO) ou moyenne (MEO), appelés également satellites non géostationnaires (non OSG), dont les coûts individuels de fabrication et de lancement sont inférieurs, en fonction de la taille et de la complexité de l'engin (OCDE, 2017^[28]). Néanmoins, leur orbite plus basse exige des constellations bien plus nombreuses pour fournir des services ininterrompus car chaque satellite desservant une zone relativement restreinte au niveau global. Il en résulte que les coûts globaux excèdent souvent ceux d'une flotte de satellites géostationnaires.

Plusieurs entreprises projettent de déployer des constellations en orbite basse, ou les ont déjà déployées, pour offrir une connectivité satellite, ainsi Starlink, OneWeb, Boeing, Telesat et Amazon (avec le projet Kuiper). Starlink et OneWeb ont lancé leurs premiers satellites en 2019. Tandis que toutes deux ont achevé le déploiement de leur constellation de première génération et réfléchissent d'ores et déjà à la suivante (Gen2), les responsables du projet Kuiper envisagent



une première mise en service commerciale vers le milieu de l'année 2025. Kuiper a lancé avec succès ses deux premiers satellites prototypes en octobre 2023 (Amazon, 2023^[29]), et commencera à offrir des services bêta aux clients en 2024. En janvier 2024, Starlink comptait 5 374 satellites en orbite et OneWeb 634 (Planet 4589, 2024^[30]). En décembre 2022, SpaceX a placé 54 satellites Starlink de seconde génération sur de nouvelles orbites afin de renforcer la capacité de son réseau dans la bande des 27-30 GHz. L'entreprise a annoncé qu'elle pourra ainsi desservir davantage de clients et fournir un service plus rapide, notamment dans les zones où la concentration d'abonnés est supérieure aux capacités de prise en charge (Howell, 2022^[31]).

Les satellites de nouvelle génération destinés aux constellations tant géostationnaires que non géostationnaires, et appelés également satellites à haut débit (HTS, *high-throughput satellites*) offrent une multitude de possibilités émergentes. Les satellites HTS utilisent généralement les bandes 10,7-12,7 GHz, 13,75-14,5 GHz, 17,8-18,6 GHz, 18,8-20,2 GHz, 27,5-30 GHz, 37,5-42 GHz, 47,2-50,2 GHz et 50,4-52,4 GHz, avec des faisceaux larges, des faisceaux étroits, des faisceaux orientables et une technologie de réutilisation des fréquences. Cela devrait leur permettre d'accroître leur qualité de fonctionnement ainsi que leur capacité et d'apporter un surcroît de cette dernière dans les zones où elle est le plus nécessaire¹². Il s'ensuit qu'il sera possible d'utiliser des terminaux distants de plus petite taille, leur puissance et leur débit accrus les rendant plus rapides, ce qui réduira les coûts d'équipement dans le cas des satellites géostationnaires (OCDE, 2022^[24]). En outre, les liaisons entre satellites se perfectionnent également dans le sens d'une accélération des vitesses de transmission, ce qui est particulièrement utile dans le cas de constellations, dans la mesure où l'on peut ainsi acheminer les données/éléments de contenu vers la région du monde qui convient (IETF, 2022^[32]). À titre d'exemple, ces liaisons peuvent également accélérer le transfert au sol des données collectées par des satellites d'observation de la Terre en les faisant transiter par des satellites de communication, ce qui revient à faire converger les réseaux de communication et de détection, dans l'espace comme au sol¹³.

De nouveaux progrès laissent désormais entrevoir la possibilité d'utiliser la connectivité satellite pour les terminaux mobiles, dans le cadre de services de messagerie, grâce à l'inclusion des satellites dans la norme 3GPP depuis la version 15 de celle-ci¹⁴. Quelques opérateurs de communications mobiles nouent aujourd'hui des partenariats avec des fournisseurs de services satellites pour élargir la couverture de leurs réseaux ; c'est le cas de T-Mobile, aux États-Unis, qui s'est entendu avec Starlink (SpaceX) pour fournir des services de messagerie écrite à ses clients dans tout le pays, y compris dans les parcs nationaux et autres régions isolées (T-Mobile, 2022^[33]). La dynamique se renforce également du côté des fournisseurs de matériel. Plusieurs fabricants de téléphones portables (Apple ou Samsung, p. ex.), fournisseurs de puces (MediaTek, Qualcomm) et opérateurs mobiles ont annoncé des innovations autorisant l'établissement de liaisons satellites pour les communications d'urgence (Apple, 2023^[34] ; Browne, 2023^[35] ; McGregor, 2023^[36] ; Qualcomm, 2023^[37]).

Aux États-Unis, la Federal Communications Commission (FCC) (« Commission fédérale des communications ») a fait savoir que, eu égard au nombre croissant des nouvelles demandes d'autorisation de réseaux à satellite, faisant intervenir de nouveaux modèles commerciaux, acteurs et technologies, elle avait créé un « bureau des affaires spatiales » pour soutenir ce secteur en plein essor. La FCC a également édicté une nouvelle règle ramenant de 25 à 5 ans le délai de désorbitation des satellites en orbite basse et elle a publié en décembre 2022, un avis de proposition de réglementation à l'effet de simplifier sa procédure d'examen des demandes d'autorisation de réseaux à satellite (FCC, 2022^[38]). En outre, en mars 2023, la FCC a proposé un nouveau cadre (avis de proposition de réglementation) destiné à faciliter une collaboration novatrice entre les opérateurs de satellites et les fournisseurs de services mobiles, afin de permettre ainsi une connexion directe entre les services spatiaux et les utilisateurs de smartphone dans les zones isolées, non desservies ou mal desservies. La FCC propose de permettre aux opérateurs de réseaux à satellite non OSG autorisés de demander accès aux fréquences terrestres, sous certaines conditions (FCC, 2023^[39]). Des entreprises comme AST Spacemobile et Lynk ont pu tester leurs services de communication satellite-téléphone aux États-Unis dans le cadre de licences délivrées à titre expérimental (Clark, 2023^[40]).

Des pays de l'OCDE, dont l'Allemagne, le Canada, la Colombie, la France et le Royaume-Uni, ont d'ores et déjà autorisé des constellations de satellites non OSG, afin de tirer parti des réseaux à satellite pour atteindre leurs objectifs nationaux de connectivité, comptant assurer par ce moyen la desserte de zones peu ou pas couvertes par les réseaux terrestres (OCDE, 2022^[24]). C'est ainsi qu'au mois de février 2022, le ministère colombien des Technologies de l'information et des communications (MinTIC) a introduit un nouveau régime réglementaire pour les services satellite pour encourager le développement de la connectivité satellite dans le pays, notamment dans les zones difficiles d'accès (MinTIC, 2022^[41]).

La Commission européenne a annoncé récemment travailler à la création d'un « système européen de connectivité spatiale sécurisée » faisant appel aux satellites (Commission européenne, 2022^[42]). En novembre 2022, le Parlement européen et le Conseil de l'UE ont annoncé la conclusion d'un accord provisoire en vue du déploiement d'une constellation de satellites, baptisée IRIS, qui comprendra des satellites OSG, des satellites MEO et des satellites LEO (Evroux, 2023^[43]). Cette constellation doit aider l'UE dans la poursuite des priorités qui sont les siennes en matière de connectivité, pour



le secteur public comme pour les particuliers et les entreprises, dans l'intérêt de l'économie, de l'environnement, de la sécurité et de la défense (Commission européenne, 2022_[44]).

Les développements dans le domaine des communications satellites soulèvent des enjeux d'ordre à la fois technique et réglementaire, notamment en ce qui concerne la gestion du spectre¹⁵. L'encadrement de l'utilisation du spectre radioélectrique par les satellites afin d'éviter les brouillages intervient à deux niveaux : au niveau international, l'UIT en assurant la coordination, et au niveau national, sous la responsabilité des autorités compétentes (OCDE, 2022_[24]). L'UIT gère le processus de coordination à l'échelle internationale et tient à jour le Fichier de référence international des fréquences, où sont répertoriées les fréquences utilisées dans l'espace (UIT, 2022_[45]). Les autorités nationales de régulation des communications, y compris les responsables de la gestion du spectre, supervisent les fiches de notification des systèmes à satellites proposés et soumettent les demandes d'attribution de fréquences à l'UIT ; il leur incombe également d'autoriser les stations terriennes (OCDE, 2022_[24]). Une autre question essentielle, sur le plan de la réglementation, consiste à savoir si le nombre de satellites proposés est réaliste, compte tenu des risques liés aux débris spatiaux (OCDE, 2022_[24])¹⁶.

Stations de plateformes à haute altitude

Les Stations de plateformes à haute altitude (HAPS), peuvent être décrites comme des stations de base ou des nœuds de réseau aériens fonctionnant dans la stratosphère, à 20 km au-dessus du sol (UIT-R, 2020_[46])¹⁷. Elles promettent de combler les disparités en matière de connectivité dans les zones rurales et isolées (OCDE, 2021_[47]). Avec un rayon cellulaire qui peut atteindre 100 km, contre 8 en zone rurale dans le cas des IMT-2020¹⁸, elles créent une zone de couverture cellulaire équivalant à la ville de Paris (1 000 km²) (UIT-R, 2022_[48])¹⁹. Les plateformes HAPS ont depuis peu gagné en viabilité grâce aux progrès dans le domaine de l'efficacité énergétique, entre autres facteurs (UIT, 2022_[49])²⁰. Ainsi, le perfectionnement des technologies utilisées devrait permettre l'avènement de stations de base IMT en haute altitude (HIBS, *high-altitude IMT base stations*) – ou « stations HAPS comme stations de base IMT », selon la terminologie de l'UIT-R – et les rend mieux à même d'offrir une solution de connexion à ceux qui n'en ont pas encore (RSPG, 2021_[50]).

En plus d'améliorer la couverture et la capacité au sol, les HAPS, comme les satellites, peuvent contribuer à fournir une connectivité aux avions et aux drones volant à des altitudes inférieures. Elles permettraient ainsi la création de corridors de connectivité en dehors de la zone de couverture des réseaux terrestres (au-dessus des mers et océans, p. ex.) et offriraient une fiabilité et une résilience accrues en étant utilisées conjointement avec ces mêmes réseaux.

S'agissant d'objets volants, les HAPS sont soumises à la réglementation aéronautique en plus de la réglementation relative au spectre des fréquences radioélectriques. Elles peuvent être plus légères que l'air, dans le cas par exemple de ballons, ou plus lourdes au contraire, dans le cas par exemple de planeurs motorisés. Les vents étant plus faibles dans la stratosphère que dans les couches inférieures de l'atmosphère, il leur faut moins d'énergie pour se maintenir en position. Elles ont également cet avantage d'offrir une large zone de couverture pour la connectivité mobile (Araripe d'Oliveira, Cristovão Lourenço de Melo et Campos Devezas, 2016_[51]).

La dernière décennie a connu plusieurs tentatives de commercialiser des solutions HAPS afin de combler les disparités d'accès à la connectivité, ainsi le projet Loon de Google, abandonné en 2021 (Reynolds, 2018_[52] ; Singh, 2021_[53]). SoftBank, par l'entremise de sa filiale HAPS Mobile, s'est employée à développer plusieurs éléments de l'écosystème HAPS (HAPS Mobile, 2023_[54]). Si l'utilisation des plateformes aériennes est encore confidentielle, c'est peut-être en raison des difficultés techniques que présente l'intégration des stations HAPS/HIBS dans les réseaux mobiles existants du fait des risques de brouillage. Elle implique d'autre part que les bandes de fréquences attribuées aux communications mobiles ne fassent pas l'objet de restrictions d'utilisation par le service mobile aéronautique²¹ (UIT-R, 2022_[48]).

La viabilité économique des plateformes aériennes dépend aussi de la disponibilité de fréquences pour les services correspondants (OCDE, 2022_[24]). La CMR-23 doit étudier les nouvelles identifications possibles pour l'utilisation des stations HIBS dans le cadre des réseaux IMT (UIT, 2022_[49]). Les stations HAPS/HIBS seront sans doute déployées plus largement, dans la mesure où elles constituent une solution efficace pour assurer la connectivité des consommateurs habitant des zones rurales qui n'ont tout au plus qu'un accès limité aux services de communication.

Topologies de connectivité hybride : vers l'intégration des technologies de réseau terrestres et non terrestres

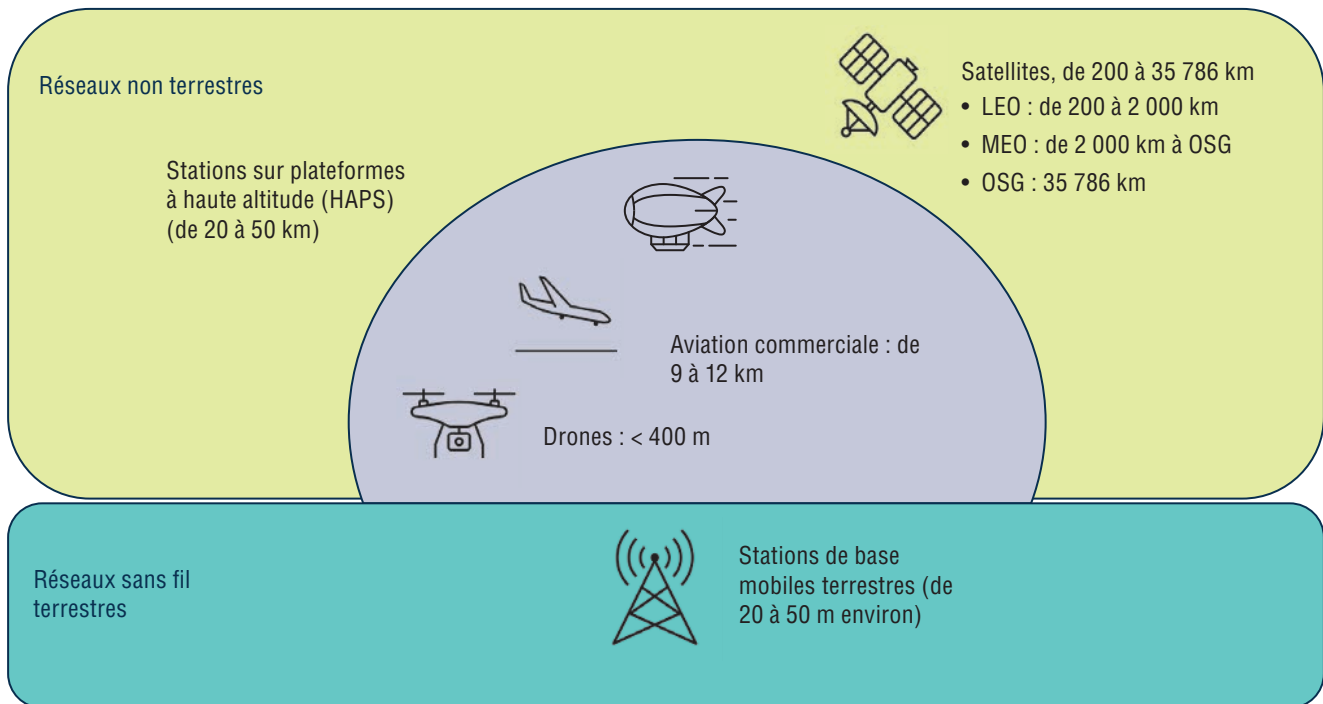
L'intégration des diverses technologies sans fil terrestres et non terrestres constitue une prochaine étape de développement de l'écosystème de la connectivité. Certains fournisseurs haut débit ont commencé à étudier comment la connectivité satellite et d'autres technologies de communication aérienne pourraient compléter les réseaux terrestres pour fournir des communications sans solution de continuité avec une couverture élargie, par exemple, grâce à des solutions de



raccordement (Fletcher, 2021_[55]) ou par le déploiement de réseaux hybrides, satellites et terrestres, pour les applications d'IdO (Erwin, 2021_[56]). C'est ainsi que Deutsche Telekom (DT) se targue d'avoir réalisé la première connexion 5G sans solution de continuité à travers différentes couches de réseau, entre stratosphère, espace (réseau satellite Intelsat) et réseau mobile (HT Group, 2023_[57])²².

Le secteur des télécommunications ambitionne par ailleurs d'intégrer les réseaux terrestres et non terrestres dans le cadre de projets dédiés à la 6 G (graphique 1.S.3)²³. L'objectif est d'assurer aux utilisateurs une connectivité mondiale, ubiquitaire et continue, tant au sol que dans les airs, grâce à l'intégration de solutions mobiles terrestres et de réseaux à satellite en orbite moyenne (MEO), de réseaux à satellites géostationnaires (OSG) et de réseaux de communication air-sol, de plateformes HAPS et d'autres plateformes aériennes. Les réseaux intégrés en 3D avec une architecture à plusieurs couches combinent les atouts des réseaux terrestres et des réseaux non terrestres (plateformes aériennes et réseaux à satellite). De cette façon, ils pourraient fournir aux utilisateurs, au sol et dans les airs, une connectivité améliorée, fiable, sûre et robuste grâce à une architecture de réseau souple et adaptative associant diverses technologies (Ozger et al., 2023_[58]). Néanmoins, cette intégration ne va pas sans difficultés puisque les technologies sont très différentes les unes des autres, n'offrent pas les mêmes caractéristiques de fonctionnement et ne sont pas toutes exploitées par la même entreprise.

Graphique 1.S.3. Vers l'intégration verticale : convergence des réseaux terrestres et des réseaux non terrestres



Note : LEO = Orbite terrestre basse (*low earth orbit*) ; MEO = Orbite terrestre moyenne (*medium earth orbit*) ; OSG = Orbite géostationnaire.

Source : Création des auteurs à partir de différentes sources, dont : Ofcom (2021_[19]), « Technology Futures – spotlight on the technologies shaping communications for the future », Agence spatiale européenne (2020_[61]), « Types of orbits », GSMA (2021_[62]), « High Altitude Platform Systems: Towers in the skies ».

L'architecture multicouche suppose une interaction entre le secteur aéronautique, le secteur des communications mobiles terrestres et l'industrie spatiale. Une collaboration s'impose donc entre ces différents secteurs qui, par le passé, se sont fait concurrence pour l'utilisation du spectre radioélectrique. Le monde de l'aéronautique, par exemple, rencontre diverses difficultés du fait que ses systèmes de communication hérités du passé ont assez peu évolué sur le plan technologique et ont des difficultés à opérer dans certaines plages de fréquences attribuées à ses services. D'un autre côté, le secteur poursuit sa transformation numérique, qui nécessite une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'espace aérien avec les aéronefs connectés et la grande diversification des objets volants, avec par exemple l'apparition d'aéronefs sans pilote et d'aéronefs électriques à décollage et atterrissage verticaux (ADAV électriques), comme les « taxis volants », qui pourraient contribuer à rendre l'environnement urbain plus convivial et plus sain (encadré 1.S.1) (AESA, 2022_[59]). Ainsi, en novembre 2022, la France a ouvert une plateforme d'essai dédiée aux taxis volants électriques (Bloomberg, 2022_[60]).



Encadré 1.S.1. Les aéronefs électriques à décollage et atterrissage verticaux utilisés comme taxis volants, moyens de transports de demain

Les systèmes de transport aérien futurs, et en particulier la mobilité aérienne urbaine à bord de véhicules volants, offrent un domaine d'application passionnant aux recherches visant actuellement à assurer l'intégration des réseaux terrestres et des réseaux non terrestres. Plusieurs fabricants envisagent de mettre en service commercial des aéronefs électriques à décollage et atterrissage verticaux (ADAV électriques), ou « taxis volants », à l'horizon 2025 ou 2026. À titre d'exemple, les entreprises qui travaillent à la conception d'ADAV électriques sont entre autres Airbus SE (France), Archer Aviation et Joby Aviation (États-Unis), Lilium (Allemagne), Vertical Aerospace (Royaume-Uni) et Volocopter (Allemagne) (NASA, 2020_[63]). Les organisateurs des Jeux olympiques de Paris 2024 ambitionnent de faire de cette manifestation sportive le premier événement où de tels engins seront utilisés comme moyens de transport (Alcock, 2022_[64]). S'ils seront guidés par un pilote embarqué, les ADAV électriques pourraient, à plus long terme, devenir autonomes.

Les zones qui seront dédiées au décollage et à l'atterrissage des ADAV électriques sont appelées des vertiports*. Avec la multiplication des aéronefs sans pilote dans les couches inférieures de l'atmosphère, la gestion de l'espace aérien acquiert une importance fondamentale. Elle s'effectue à l'aide du système de gestion du trafic des aéronefs sans pilote (UTM, *unmanned aircraft system traffic management*) (FAA, 2023_[65]). Cet outil est complémentaire au système de gestion du trafic aérien (ATM, *Air Traffic Management*) qui s'applique aux aéronefs dans l'espace aérien**. Les ADAV électriques disposeront de postes de pilotage évolués, équipés d'un système de communication combinant les anciens systèmes de communication aéronautique et les réseaux de communication mobile. Ils auront donc besoin de différentes bandes de fréquences attribuées aux réseaux mobiles, aux réseaux à satellite et aux services aéronautiques.

La mise en service de ces nouveaux aéronefs va exiger une modification en profondeur de la réglementation aéronautique, qui est en cours. Qui plus est, le maintien d'un trafic aérien sûr et fiable impose de prendre en considération les questions touchant à la sécurité soulevées par le survol des villes. Le secteur aéronautique est aujourd'hui d'avis qu'il faudra faire un usage intensif des réseaux mobiles commerciaux pour répondre à la demande croissante de transmission de données depuis les aéronefs, tout en conservant les anciens systèmes de communication aéronautique en solution de repli (AESA, 2022_[59]).

Notes : * L'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA) définit un vertiport comme étant « une surface de terre ou d'eau ou une structure utilisée ou destinée à être utilisée pour l'atterrissage et le décollage des ADAV » (AESA, 2022_[59]).

** D'après l'Agence européenne de la sécurité aérienne (AESA), « l'ATM est un agrégat des fonctions à bord et au sol (services de la circulation aérienne, gestion de l'espace aérien, et gestion des courants de trafic aérien) requises pour assurer l'évolution sûre et efficace de l'aéronef pendant toutes les phases de vol » (AESA, 2022_[59]).

Les solutions de connectivité proposées par les opérateurs de communications mobiles terrestres peuvent être utiles au secteur aéronautique, ne serait-ce que pour les services de communication qui ne sont pas d'importance critique et dont les anciens systèmes encore en service pourraient dès lors être délestés. Cette option serait plus rationnelle que la mise au point de nouveaux systèmes propres au secteur aéronautique (AESA, 2022_[59]).

Parmi les exemples de projets de recherche dans ce domaine, on signalera le programme conjoint SESAR 3 (*Single European Sky Air Traffic Management Research*), financé par l'Union européenne SESAR 3 qui doit assurer la modernisation de l'infrastructure européenne de gestion du trafic aérien, dans les airs et au sol, ainsi que les procédures opérationnelles connexes, pour contribuer à l'avènement de systèmes de transport aérien plus intelligents, plus durables, mieux connectés et plus accessibles (SESAR 3, 2022_[66]). Dans le cas d'espèces, la connectivité à haut débit multicouche, par exemple sous la forme de réseaux 6G futurs, exigerait une intégration, sous une forme ou une autre, avec les systèmes aéronautiques numériques. Le développement des services de communication dans les réseaux aéroportés, conjugué à la mobilité aérienne urbaine du futur, aux drones et autres aéronefs sans pilote, est appelé à porter la demande à l'égard d'un vaste ensemble de services de communication haut débit. Le but est de permettre des communications sans limites sur et entre les réseaux terrestres, les réseaux aéroportés et les réseaux à satellite (Celtic-Next, 2022_[67]).

L'industrie satellite cherche à définir de nouveaux modèles économiques et de nouvelles solutions de connectivité. Bien que l'inclusion des satellites dans la norme 3GPP ait déjà permis davantage d'interactions entre les opérateurs de communications mobiles terrestres et les entreprises de communication par satellite, de nouvelles possibilités pourraient bien s'ouvrir et de nouveaux partenariats pourraient voir le jour dans l'avenir. Parmi les partenariats noués



récemment, citons celui qui lie Starlink aux opérateurs KDDI et Salt (KDDI, 2022^[68] ; Swinhoe, 2023^[69]), et celui conclu entre OneWeb et VEON (OneWeb, 2023^[70]). Kuiper a également annoncé des accords avec Verizon et Vodafone pour étendre la portée de leurs réseaux mobiles (Vodafone, 2023^[71] ; Verizon, 2021^[72]).

L'un des éléments qui ouvrent la voie à un écosystème plus intégré entre les réseaux terrestres et les réseaux non terrestres se trouve être le développement de terminaux d'utilisateur dotés d'interfaces radioélectriques normalisées, capables de se connecter aux réseaux terrestres et aux réseaux à satellite sans solution de continuité. L'évaluation des interfaces radioélectriques IMT terrestres et des interfaces radioélectriques IMT satellites menées par les Groupes de travail 5D et 4B de l'UIT-R (UIT-R, 2022^[73]) mérite d'être suivie par les pays et les acteurs du secteur.

La convergence d'un secteur aéronautique confronté à une demande de transmission de données en hausse, d'un secteur des communications par satellite à la recherche de nouveaux cas d'usage et d'un secteur des communications terrestres sans-fil au prise avec une croissance exponentielle du trafic mobile pourrait servir de fondement à l'émergence de réseaux à topologie hybride avec intégration des réseaux terrestres et des réseaux non terrestres. En outre, la combinaison de différentes solutions de connectivité, reposant sur des technologies, des structures industrielles et des interfaces clients différentes, influe sur la dynamique du marché. Cela met en lumière des problèmes d'ordre technique liés à la collaboration réglementaire, à la gestion du spectre, à la sécurité numérique et à la fracture numérique, entre autres

La collaboration. L'une des principales questions qui se posent a trait aux dispositions que les pouvoirs publics pourraient prendre pour encourager une collaboration en matière de réglementation constructive entre trois secteurs distincts : les activités spatiales, l'aéronautique et les communications mobiles. Eu égard aux cadres réglementaires en vigueur, les responsabilités sont réparties entre les différentes autorités sectorielles.

La politique de gestion du spectre. L'émergence de réseaux à topologie hybride débordant les frontières nationales et allant du sol jusqu'à l'espace aérien plaide sans doute en faveur d'un accès au spectre plus dynamique et flexible et d'un meilleur partage de cette ressource afin d'offrir des avantages à tous les utilisateurs.

La sécurité numérique. Au-delà des questions touchant à la sécurité physique et à la sûreté des avions traditionnels et autres objets volants, la sécurité numérique revêt une haute importance pour les réseaux sans fil de prochaine génération. Ceux-ci pourraient également recouvrir les communications par satellite et le traitement de données dans le cadre de solutions infonuagiques dans l'espace aérien.

La fracture numérique. Enfin, en lien avec les avancées technologiques prometteuses qui vont façonner l'écosystème de la connectivité au cours de la prochaine décennie, il demeure indispensable de combler les disparités en matière de connectivité par le déploiement d'une infrastructure haut débit de qualité et celui de services à des prix compétitifs.



Références

- 3GPP (2023), « Introducing 3GPP », page web, <https://www.3gpp.org/about-us/introducing-3gpp> (consulté le 5 mars 2023). [75]
- 3GPP (2023), « Releases », page web, <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases> (consulté le 5 mars 2023). [11]
- 6G Flagship (2023), « Verticals - 6G Flagship », page web, <https://www.6gflagship.com/research/verticals> (consulté le 6 mars 2023). [23]
- 6G Symposium (2021), « 6GSymposium Europe: Shaping Industry and Society Beyond 6G », page web, <https://www.6gworld.com/spring-2021-6g-symposium-agenda> (consulté le 17 mars 2023). [13]
- AESA (2022), *Future connectivity for aviation - White paper*, Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne, <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/future-connectivity-aviation>. [59]
- Agence spatiale européenne (2020), « ESA - Types of orbits », page web, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits#GEO (consulté le 5 mars 2023). [61]
- Ahokangas, P., M. Matinmikko-Blue et S. Yrjölä (2023), « Envisioning a future-proof global 6G from business, regulation, and technology perspectives », *IEEE Communications Magazine*, vol. 61/2, pp. 72-78, <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200310>. [8]
- Alcock, C. (2022), « Quiet Flights Will be Key to eVTOL Aircraft Victory at 2024 Paris Olympic Games | FutureFlight », 18 avril, <https://www.futureflight.aero/news-article/2022-04-15/quiet-evtol-flights-will-be-benchmark-olympic-gold-paris-2024-games>. [64]
- Alleven, M. (2021), « If mmWave sounds crazy, just wait for 6G and Terahertz », Rapport spécial, 30 July, Fierce Wireless, <https://www.fiercewireless.com>. [20]
- Amazon (2023), « All systems go: Amazon confirms 100% success rate for Project Kuiper Protoflight mission », 16 novembre, Communiqué de presse, <https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/amazon-project-kuiper-protflight-mission-november-2023-update>. [29]
- Apple (2023), « Use emergency SOS via satellite on your iPhone 14 – Apple support », page web, <https://support.apple.com/en-us/HT213426> (consulté le 7 mars 2023). [34]
- Araipe d'Oliveira, F., F. Cristovão Lourenço de Melo et T. Campos Devezas (2016), « High-Altitude Platforms — Present Situation and Technology Trends », *Technology Management*, vol. 8/3, pp. 249-262, <https://www.scielo.br/j/jatm/a/JQv95PgKcDctrn95vLLV8qN/?format=pdf&lang=en>. [51]
- Bloomberg (2022), « Paris opens flying taxi hub targeting flights for 2024 Olympics - Bloomberg », <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-11-10/paris-opens-flying-taxi-hub-targeting-flights-for-2024-olympics> (consulté le 14 novembre 2022). [60]
- Bourdoux, A. et al. (2020), « 6G white paper on localization and sensing », *Research Visions*, n° 12, 6G Flagship, <https://www.6gflagship.com/6g-white-paper-on-localization-and-sensing>. [18]
- Browne, R. (2023), « Samsung turns to space with satellite-enabled smartphone chip », 23 February, CNBC, <https://www.cnn.com/2023/02/23/samsung-turns-to-space-with-satellite-enabled-smartphone-chip.html>. [35]
- Celtic-Next (2022), *Project 6G-SKY*, <https://www.celticnext.eu/project-6g-sky> (consulté le 22 février 2023). [67]
- CEPT (2022), « CEPT Workshops - CEPT workshop on satellite innovations and regulatory challenges », page web, <https://www.cept.org/ecc/tools-and-services/cept-workshops/cept-workshop-on-satellite-innovations-and-regulatory-challenges> (consulté le 5 mars 2023). [74]
- Chuberre, N. et C. Michel (2018), « Satellite components for the 5G system », 4 January, 3GPP, <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/sat-ntn>. [78]
- Clark, M. (2023), « The FCC wants to get satellite-to-smartphone service rolling », 16 March, *The Verge*, <https://www.theverge.com/2023/3/16/23643215/fcc-satellite-to-smartphone-regulation-proposal>. [40]
- Commission européenne (2022), *Espace : L'Union lance un système de connectivité par satellite et approfondit son action sur la gestion du trafic spatial, pour une Europe plus numérique et résiliente*, Commission européenne, Bruxelles, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP_22_921 (consulté le 8 March 2022). [42]
- Commission européenne (2022), « La Commission se félicite de l'accord politique sur le lancement d'IRIS² », 15 février, Communiqué de presse, Commission européenne, Bruxelles, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_22_6952?utm_source=Ookla%20Insights&utm_medium=email&utm_campaign=Express_2023-02-22_09:00:00&utm_content=Starlink%20Resurgence. [44]
- Ericsson (2022), « 6G – Connecting a cyber-physical world - Ericsson », *White Paper*, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/a-research-outlook-towards-6g>. [10]



- Erwin, S. (2021), « Lockheed Martin signs agreement with Omnispace to explore 5G in space », 23 March, Spacenews, <https://spacenews.com/lockheed-martin-signs-agreement-with-omnispace-to-explore-5g-in-space>. [56]
- ETSI (2022), « ETSI launches a new group on Terahertz, a candidate technology for 6G », 12 décembre, Communiqué de presse, ETSI, <https://www.etsi.org/newsroom/press-releases/2158-etsi-launches-a-new-group-on-terahertz-a-candidate-technology-for-6g?jij=1676631829546>. [15]
- Evroux, C. (2023), « EU secure connectivity programme 2023-2027: Building a multi-orbital satellite constellation », Briefing, Parlement européen, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2022\)729442?utm_source=Ookla%20Insights&utm_medium=email&utm_campaign=Express_2023-02-22_09:00:00&utm_content=Starlink%20Resurgence?%20Speeds%20Increase%20in%20Europe%20and%20Oceania](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)729442?utm_source=Ookla%20Insights&utm_medium=email&utm_campaign=Express_2023-02-22_09:00:00&utm_content=Starlink%20Resurgence?%20Speeds%20Increase%20in%20Europe%20and%20Oceania). [43]
- FAA (2023), « Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) », page web, https://www.faa.gov/uas/research_development/traffic_management (consulté le 6 mars 2023). [65]
- FCC (2023), « FCC Proposes Framework to Facilitate Supplemental Coverage From Space », 16 mars, Communiqué de presse, Federal Communications Commission, Washington, D.C., <https://www.fcc.gov/document/fcc-proposes-framework-facilitate-supplemental-coverage-space>. [39]
- FCC (2022), « FCC Takes Latest Step to Improve Satellite Application Process », 22 décembre, Federal Communications Commission, Washington, D.C., <https://www.fcc.gov/document/fcc-takes-latest-step-improve-satellite-application-process>. [38]
- Fletcher, B. (2021), « Musk says Starlink “nice complement” to fiber, 5G », 29 mars, Fierce Wireless, <https://www.fiercewireless.com/wireless/musk-says-starlink-satellite-broadband-complements-fiber-5g>. [55]
- G7 (2023), *G7 digital and tech track annex 2: G7 vision for future networks in the beyond 5G/6G era*, https://www.soumu.go.jp/joho_kokusai/g7digital-tech-2023/topics/pdf/pdf_20230430/annex2.pdf. [14]
- GSMA (6 février 2023), « Setting the stage for 6G », GSMA Spectrum blog, <https://www.gsma.com/spectrum/setting-the-stage-for-6g>. [16]
- GSMA (2021), « High altitude platform systems: Towers in the skies », White Paper, juin, GSMA, <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2021/06/GSMA-HAPS-Towers-in-the-skies-Whitepaper-2021.pdf>. [62]
- HAPS Mobile (2023), HAPS Mobile, site web, <https://www.hapsmobile.com/en> (consulté le 20 mars 2023). [54]
- Hexa-X (2022), *A flagship for B5G/6G vision and intelligent fabric of technology enablers connecting human, physical, and digital worlds*, Hexa X, https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2021/05/Hexa-X_D1.2.pdf. [1]
- Howell, E. (2022), « SpaceX launches 54 upgraded Starlink satellites, lands rocket in 60th flight of 2022 », 28 décembre, Space.com, <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites-5-1-group-launch>. [31]
- HT Group (2023), « Cooperation between Deutsche Telekom and the European Space Agency with a world premiere in Croatia », 2 février, Communiqué de presse, Agence Spatiale Européenne (ASE) et Deutsche Telekom, <https://www.t.ht.hr/en/Press/press-releases/6727/Cooperation-between-Deutsche-Telekom-and-the-European-Space-Agency-with-a-world-premiere-in-Croatia.html>. [57]
- IEEE (dir. pub.) (2022), *IEEE future networks, enabling 5G and beyond: 6G activities in Germany*, <https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/december-2022/6g-activities-in-germany>. [21]
- IEEE (2022), « Official IEEE 802.11 working group project timelines - 2022-02-23 », page web, https://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm (consulté le 2 March 2022). [26]
- IETF (2022), « Problems and requirements of satellite constellation for Internet », présentation pour la Réunion 114, novembre, Internet Engineering Task Force, Datatracker. [32]
- KDDI (2022), « KDDI launches the 1st mobile tower powered by SpaceX’s Starlink in Japan », 1er décembre, KDDI Corporation, <https://news.kddi.com/kddi/corporate/english/newsrelease/2022/12/01/6415.html>. [68]
- LightReading (2023), *6GHz, satellites and 6G addressed at WRC-23*, <https://www.lightreading.com/6g/6ghz-satellites-and-6g-addressed-at-wrc-23#close-modal>. [6]
- McGregor, J. (2023), « MediaTek brings practical satellite communications to mobile devices », 24 février, Forbes, <https://www.forbes.com/sites/tiriasresearch/2023/02/24/mediatek-brings-practical-satellite-communications-to-mobile-devices/?sh=4cab78c632be>. [36]
- Ministère fédéral allemand de l’éducation et de la recherche (2023), *6G TakeOff: Holistic 3D communication networks for 6G*, <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/6g-takeoff>. [79]
- MinTIC (2022), « Resolución número 000376 del 3 de febrero de 2022 » [Résolution n° 000376, 3 février], https://www.mintic.gov.co/portal/715/articles-198598_resolucion_00376_2022_v20220204.pdf. [41]
- NASA (2020), « STEM learning: Advanced air mobility: What is AAM? Student guide », National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/what-is-aam-student-guide_0.pdf. [63]
- OCDE (2022), « Broadband networks of the future », *Documents de travail de l’OCDE sur l’économie numérique*, n° 327, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/755e2d0c-en>. [2]



- OCDE (2022), « Developments in spectrum management for communication services », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 332, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/175e7ce5-en>. [24]
- OCDE (2021), « Bridging connectivity divides », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 315, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/e38f5db7-en>. [47]
- OCDE (2019), « The road to 5G networks: Experience to date and future developments », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 284, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/2f880843-en>. [77]
- OCDE (2017), « The evolving role of satellite networks in rural and remote broadband access », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 264, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/7610090d-en>. [28]
- Ofcom (2023), *Spectrum management for next generation wireless broadband: Flexible access and spectrum sharing*, Ofcom, https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0036/269784/next-generation-wireless-broadband-oct-23.pdf. [17]
- Ofcom (2021), *Technology futures: Spotlight on the technologies shaping communications for the future*, 14 janvier, Ofcom, <https://www.ofcom.org.uk/consultations-and-statements/category-2/emerging-technologies>. [19]
- OneWeb (2023), « VEON and OneWeb partner to deliver seamless communication and digital services », 1er mars, Communiqué de presse, OneWeb, <https://oneweb.net/resources/veon-and-oneweb-partner-deliver-seamless-communication-and-digital-services>. [70]
- Oughton, E. et al. (2021), « Revisiting wireless Internet connectivity: 5G vs Wi-Fi 6 », *Telecommunications Policy*, vol. 45/5, <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102127>. [25]
- Ozger et al. (2023), « 6G for connected sky: 6G-SKY Visions to integrate terrestrial and non-terrestrial networks », Sommet EuCNC et 6G, 6-9 juin, Göteborg, Suède. [58]
- Planet 4589 (2024), « Enormous “mega” satellite considerations », *Jonathan's Space Report*, page web, <https://planet4589.org/space/con/conlist.html> (consulté le 5 mars 2023). [30]
- Policy Tracker (23 janvier 2023), « Our new podcast: Spectrum Policy 101 », Policy Tracker blog, <https://www.policytracker.com/blog/our-new-podcast-spectrum-policy-101>. [12]
- Qualcomm (2023), « Qualcomm Introduces Snapdragon satellite, the world's first satellite-based solution capable of supporting two-way messaging for premium smartphones and beyond », 5 janvier, Communiqué de presse, Qualcomm, <https://www.qualcomm.com/news/releases/2023/01/qualcomm-introduces-snapdragon-satellite--the-world-s-first-sate>. [37]
- Qualcomm (2022), *Vision, market drivers, and research directions on the path to 6G*, décembre, Qualcomm, <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/Qualcomm-Whitepaper-Vision-market-drivers-and-research-directions-on-the-path-to-6G.pdf>. [9]
- Reynolds, M. (2018), « Facebook and Google's race to connect the world is heating up », 26 juillet, Wired UK, <https://www.wired.co.uk/article/google-project-loon-balloon-facebook-aquila-internet-africa>. [52]
- RSPG (2021), *RSPG Opinion on a Radio Spectrum Policy Programme (RSPP) RSPG21-033 FINAL 2*, RSPG, https://radio-spectrum-policy-group.ec.europa.eu/system/files/2023-01/RSPG21-033final-RSPG_Opinion_on_RSPP.pdf. [50]
- SESAR 3 (2022), *Recherche sur la gestion du trafic aérien dans le ciel unique européen 3*, site web, <https://www.sesarju.eu> (consulté le 14 février 2023). [66]
- Singh, M. (2021), « Alphabet shuts down Loon internet balloon company », 21 janvier, TechCrunch, <https://techcrunch.com/2021/01/21/google-alphabet-is-shutting-down-loon-internet>. [53]
- Swinhoe, D. (2023), « SpaceX's Starlink signs direct-to-cell deal with Swiss telco Salt », 3 mars, Datacenter Dynamics, <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/spacexs-starlink-signs-direct-to-cell-deal-with-swiss-telco-salt>. [69]
- T-Mobile (2022), « T-Mobile takes coverage above and beyond with SpaceX », 25 août, Communiqué de presse, T-Mobile, https://www.t-mobile.com/news/un-carrier/t-mobile-takes-coverage-above-and-beyond-with-spacex?utm_source=Ookla%20Insights&utm_medium=email&utm_campaign=Express_2022-09-20_20:00&utm_content=Starlink%20Slowed%20in%20Q2,%20Competitors%20Mounting%20Challenges. [33]
- UIT (2023), *Measuring digital development: Facts and Figures 2023*, Union internationale des télécommunications, Genève, https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2023 (consulté le 6 mars 2023). [27]
- UIT (2022), « HAPS – Stations placées sur des plates-formes à haute altitude », page web, <https://www.itu.int/fr/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx> (consulté le 8 mars 2022). [49]
- UIT (2022), « ITU and space: Ensuring interference-free satellite orbits in LEO and beyond », 8 février, Union internationale des télécommunications, Genève, <https://www.itu.int/hub/2022/02/itu-space-interference-free-satellite-orbits-leo> (consulté le 8 March 2022). [45]
- UIT (2021), « Beyond 5G: What's next for IMT? », 2 février, Union internationale des télécommunications, Genève, <https://www.itu.int/en/myitu/News/2021/02/02/09/20/Beyond-5G-IMT-2020-update-new-Recommendation> (consulté le 9 août 2022). [3]
- UIT-R (2023), *New Recommendation ITU-R M.2160 on the “IMT-2030 Framework”*, novembre, <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/Pages/default.aspx>. [5]



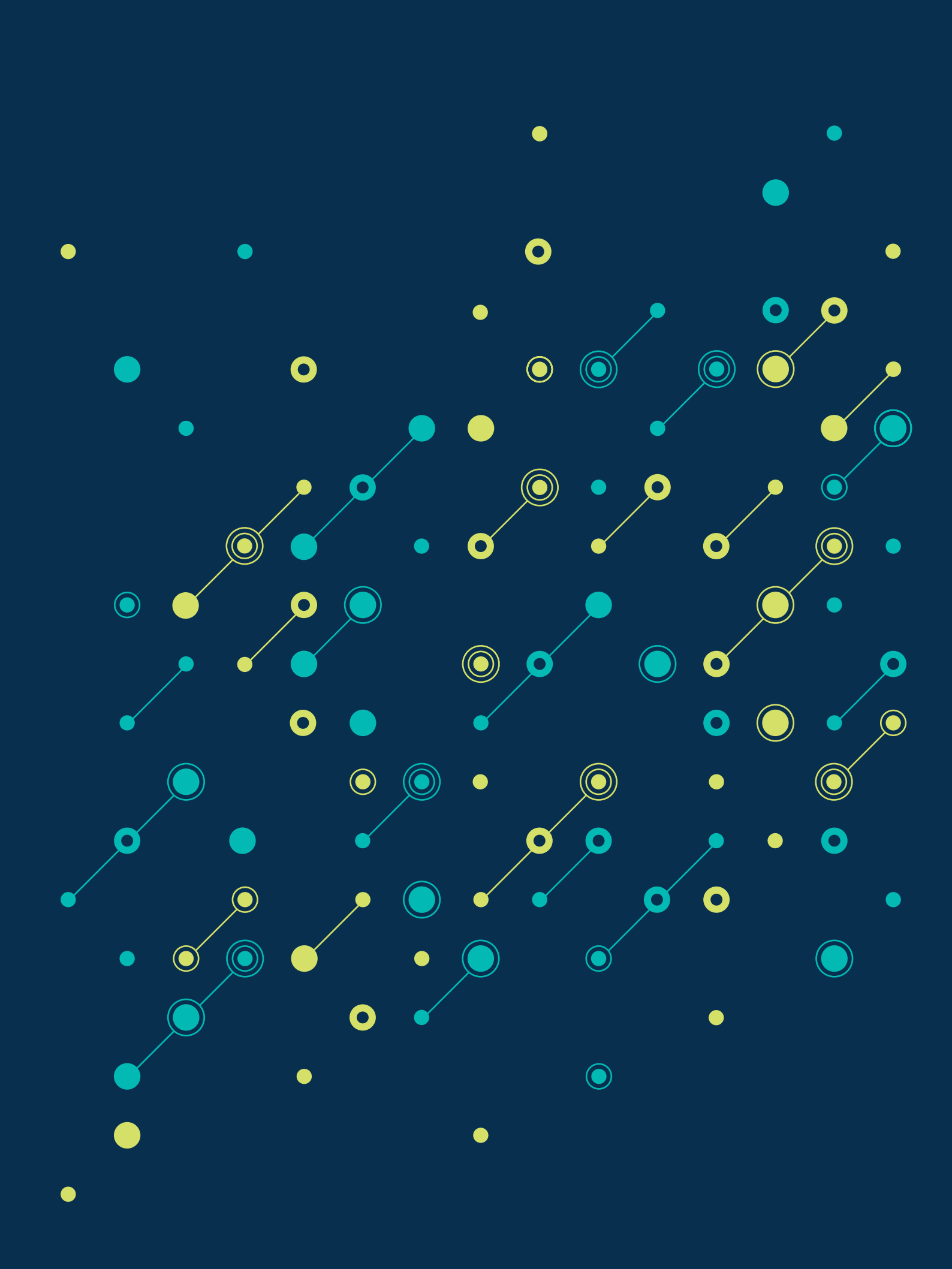
- UIT-R (2022), *Meeting Report No. 41 Attachment 2.12 to Chapter 2 of document 5D/136*, Groupe de travail 5D : Atelier « ITU for 2030 and beyond », 14 juin, <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/Pages/wsp-imt-vision-2030-and-beyond.aspx>. [4]
- UIT-R (2022), *Unlocking the potential of the stratosphere*, Groupe de travail 5D : Atelier « IMT for 2030 and Beyond », HAPS Alliance, 14 juin, <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/Pages/wsp-imt-vision-2030-and-beyond.aspx>. [48]
- UIT-R (2022), *Vision, requirements and evaluation guidelines for satellite radio interface(s) of IMT-2020*, Union internationale des télécommunications, Genève, <https://www.itu.int/hub/publication/r-rep-m-2514-2022>. [73]
- UIT-R (2022), « Workshop on “IMT for 2030 and Beyond” », page web, <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/Pages/wsp-imt-vision-2030-and-beyond.aspx> (consulté le 6 mars 2023). [7]
- UIT-R (2020), *Règlement des radiocommunications 2020*, Union internationale des télécommunications, <https://www.itu.int/hub/publication/r-reg-rr-2020>. [46]
- UIT-R (1997), « Final Acts CMR-97 », Conférence mondiale des radiocommunications, Genève, https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.5-1997-PDF-F.pdf. [76]
- Verizon (2021), « 5G + LEO: Verizon and Project Kuiper team up to develop connectivity solutions », 26 octobre, Communiqué de presse, <https://www.verizon.com/about/news/5g-leo-verizon-project-kuiper-team>. [72]
- Vodafone (2023), « Vodafone and Amazon's Project Kuiper to extend connectivity in Africa and Europe », 5 septembre, Communiqué de presse, <https://www.vodafone.com/news/technology/vodafone-and-amazons-project-kuiper-extend-connectivity-africa-and-europe>. [71]
- Wireless World Research Forum (2022), « WWRF Vision for “IMT 2030 and beyond” », Présentation à l'atelier UIT-R WP5D « IMT for 2030 and Beyond », 14 juin. [22]

Notes

1. Selon le 3GPP, le NTN désigne les réseaux ou segments de réseaux utilisant un véhicule aérien ou spatial pour la transmission (Chuberre et Michel, 2018_[78]).
2. Aux termes du Règlement des radiocommunications de l'UIT, la radiocommunication de Terre (ou terrestre) s'entend de toute radiocommunication autre que les radiocommunications spatiales ou la radioastronomie. Voir le Règlement des radiocommunications de l'UIT, article 1, section 1 « Termes généraux », paragraphe 1.7 (UIT-R, 2020_[46]).
3. D'après le questionnaire du PISC sur la réglementation, diffusé pour les besoins des *Perspectives de l'économie numérique* et des rapports à paraître en 2023-24, auquel 37 pays de l'OCDE sur 38 ont répondu.
4. Dans le cas des générations précédentes de communications mobiles, comme la 4G et la 5G, il s'est écoulé de huit à douze ans entre le moment où la « vision technologique » a été énoncée, et les normes correspondantes adoptées, et celui où les opérateurs ont effectué la première mise en service commercial. Ainsi, dans le cas de la 5G, le Groupe de travail 5D de l'UIT-R a donné en 2012 sa « vision » des IMT-2020 (5G) et la mise en service commercial a commencé en avril 2019, la plupart des opérateurs de réseau ayant lancé leur offre dans le courant de l'année 2020.
5. La « 5G non autonome » (Non-Standalone, NSA-5G pour l'acronyme en anglais) signifie qu'une grande partie du réseau s'appuiera sur la technologie 4G déployée, mais que les appareils pourront utiliser la norme de nouvelle technologie d'accès radio 5G ou « 5G New Radio » dans le réseau d'accès radio (RAN). Deux étapes importantes du processus de normalisation de la 5G par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project) sont les spécifications de la « 5G non autonome » (NSA-5G), achevées en décembre 2017, et les spécifications de la « 5G autonome » (Standalone, SA-5G), achevées en juin 2018. Ces deux étapes font partie de la version 15 de la « norme 5G » du 3GPP et ont marqué la première phase du processus de normalisation de la 5G conforme aux exigences de l'IMT-2020 de l'UIT. Par conséquent, la différence entre NSA-5G et SA-5G réside dans le fait que le premier nécessite le déploiement de l'équipement actuel du réseau central 4G, tandis que le second nécessite le déploiement d'un tout nouveau réseau (OCDE, 2019_[77]).
6. Le 3rd Generation Partnership Project (3GPP) réunit sept organismes de normalisation des télécommunications (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC). Les spécifications qu'il définit concernent les technologies de télécommunication cellulaire, y compris l'accès radio, le réseau d'infrastructure et les fonctionnalités de service (3GPP, 2023_[75]).



7. De plus, les équipements et les dispositifs capables de fonctionner dans la gamme des térahertz reposeront sur des semi-conducteurs avancés, ce qui pourrait accroître les défis en matière de contrôle du spectre.
8. Pour de plus amples renseignements au sujet de l'évolution récente de la politique de gestion du spectre dans les pays de l'OCDE, le lecteur se reportera à OCDE (2022_[24]).
9. Les radars ou systèmes de détection ont été développés indépendamment des technologies de communication mobile. La convergence de ces deux types de technologies suscite un intérêt croissant. En l'occurrence, l'utilisation de la bande des ondes millimétriques ou des ondes térahertz combinée au MIMO massif (*multiple input multiple output*, entrées multiples, sorties multiples) et à l'apprentissage automatique pourrait accroître la résolution spatiale et permettre ainsi de déceler des mouvements, même légers, comme des mouvements de doigts. Les systèmes de communication en ondes térahertz devraient offrir un débit extrêmement élevé et une très faible latence et rendre ainsi possible la conception de systèmes combinant communication, détection et localisation. Aussi sont-ils jugés très prometteurs pour les systèmes 6G (Ofcom, 2021_[19]).
10. La norme Wi-Fi 6 correspond à la norme de réseau IEEE 802.11ax.
11. Wi-Fi 7 fait référence à la norme de réseau IEEE 802.11be.
12. Il serait ainsi possible de passer des faisceaux larges à une multitude de faisceaux plus étroits et de concentrer la puissance d'émission sur une zone restreinte, ce qui améliorera la qualité de la liaison et permettra de réutiliser plusieurs fois la même fréquence, accroissant ainsi la capacité totale de chaque satellite.
13. L'attribution de fréquences aux liaisons entre réseaux à satellite dans les bandes attribuées aux services à satellites aux alentours de 12, 18 et 28 GHz était inscrite au point 1.17 de l'ordre du jour de la Conférence mondiale des radiocommunications de l'UIT (CMR-23), qui s'est tenue du 20 novembre au 15 décembre 2023.
14. La version 17 de la norme 3GPP (verrouillée en 2022) prévoit deux formes de communications entre satellites et appareils mobiles : les réseaux IdO non terrestres (IoT-NTN), qui permettent des communications à faible débit de données, et les réseaux non terrestres d'accès radio développé (NR-NTN), qui prennent en charge les communications haut débit, comme les appels vidéo (McGregor, 2023_[36]).
15. Diverses parties prenantes ont ouvert un dialogue sur le sujet, dont la Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications (CEPT) (CEPT, 2022_[74]).
16. Le Comité sur les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (CUPEEA) est l'organe des Nations Unies chargé des objets et débris spatiaux, tandis qu'à l'échelon national, c'est aux agences ou ministères chargés des affaires spatiales qu'il incombe de définir le cadre réglementaire relatif à ces objets.
17. Les stations placées sur des plateformes en haute altitude (HAPS, *High-altitude platform stations*) sont définies, dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT, comme des stations radioélectriques installées sur un objet placé à une altitude comprise entre 20 et 50 km et en un point spécifié, nominal, fixe par rapport à la Terre (UIT-R, 2020_[46]).
18. Le terme IMT-2020 recouvre les prescriptions, publiées par l'UIT-R en 2015, applicables aux réseaux, appareils et services 5 G.
19. L'idée d'utiliser des plateformes stratosphériques pour fournir des services de communication remonte à la fin des années 1960, époque où les premiers projets expérimentaux ont été menés. Les activités de R-D consacrées aux plateformes aériennes, dont la dénomination a varié au fil du temps, se poursuivent sans discontinuer depuis lors (Araripe d'Oliveira, Cristovão Lourenço de Melo et Campos Devezas, 2016_[51]).
20. Les stations de plateformes en haute altitude (HAPS, *High-altitude platform stations*) sont définies, dans le Règlement des radiocommunications de l'UIT, comme des stations radioélectriques installées sur un objet placé à une altitude comprise entre 20 et 50 km et en un point spécifié, nominal, fixe par rapport à la Terre (UIT-R, 2020_[46]). Leur définition initiale a été adoptée lors de la Conférence mondiale des radiocommunications (CMR) de 1997, et des fréquences leur ont été attribuées dans la bande des 47-48 GHz (UIT-R, 1997_[76]). Cette définition a été revue par la suite par l'UIT.
21. Service mobile assurant la transmission de signaux entre les stations aéronautiques et les stations d'aéronefs.
22. L'Agence spatiale européenne et DT sont convenus, par un protocole d'accord, de travailler ensemble sur les réseaux hybrides du futur, en vue de fournir des solutions de connectivité plus résilientes et plus sûres (HT Group, 2023_[57]).
23. Par exemple, voir « Le décollage de la 6G » en Allemagne, <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/6g-takeoff> (Ministère fédéral allemand de l'éducation et de la recherche, 2023_[79]).



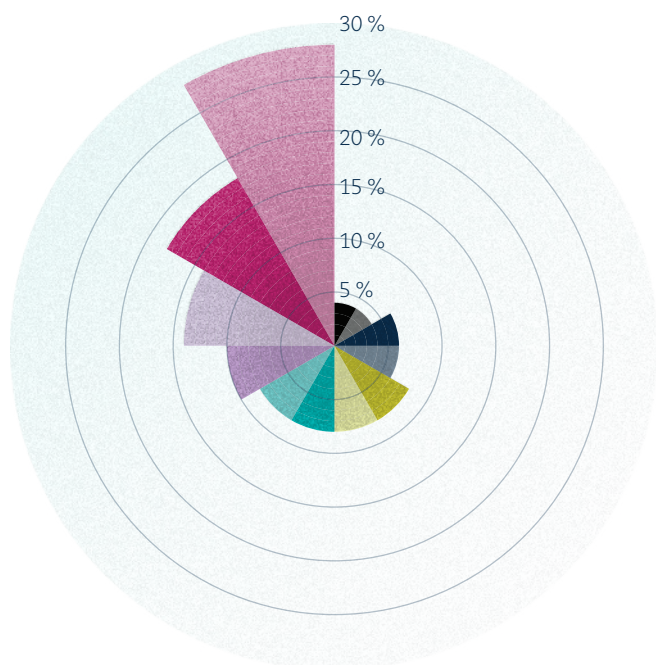
Chapitre 3

Diffusion des technologies numériques et données

Les technologies numériques et les données ont modifié en profondeur les modes de vie et de travail des individus, le fonctionnement des entreprises et les marchés sur lesquels elles opèrent, et les interactions entre les pouvoirs publics et les citoyens, ouvrant la voie à la fois à de nombreuses possibilités et à des défis nouveaux. Alors que les pouvoirs publics et le secteur privé transfèrent progressivement leur prestation de services du monde physique vers l'environnement en ligne, l'accès aux technologies numériques et leur utilisation efficace deviennent essentiels pour garantir l'égalité des chances et l'inclusion. Les technologies comme l'infonuagique et l'internet des objets (IdO) se sont diffusées rapidement ces dernières années. La croissance de la productivité reste cependant atone, y compris dans les secteurs à forte intensité numérique. L'adoption des technologies dépendantes des données demeure faible. Le présent chapitre aborde ces deux problématiques, avant de mettre en évidence les mesures que les pouvoirs publics peuvent prendre pour faire en sorte que les technologies numériques et les données soient davantage porteuses d'inclusivité et de productivité.

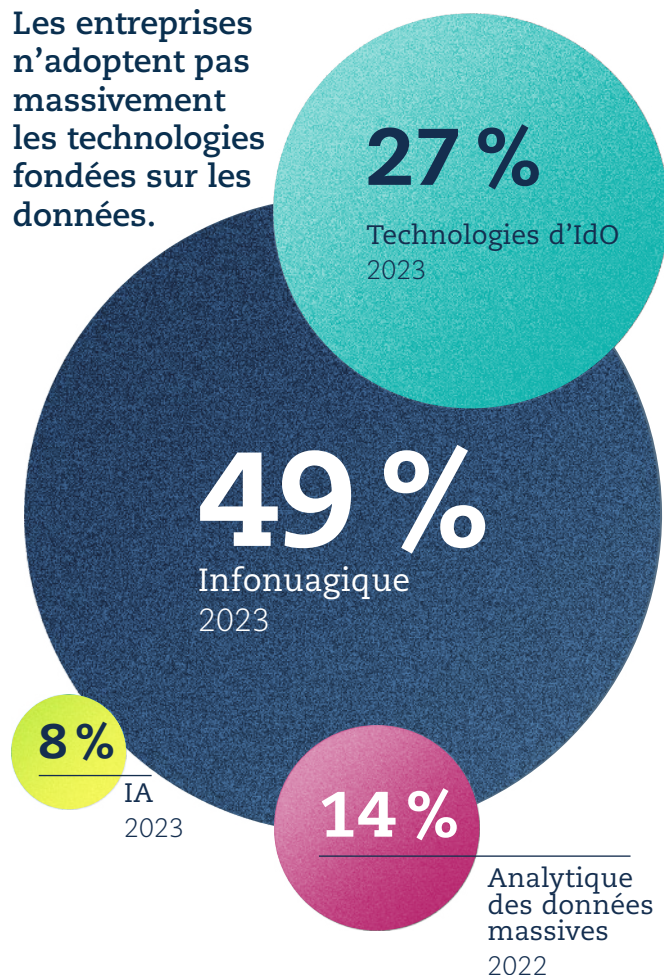
Les technologies se diffusent rapidement, mais des disparités demeurent

Dans les pays de l'OCDE, 28 % des entreprises TIC ont utilisé l'IA en 2023, un taux inégalé dans les autres secteurs.



- 4% ● Construction
- 4% ● Hébergement et restauration
- 6% ● Commerce de détail
- 6% ● Transport et entreposage
- 8% ● Administration et activités d'appui
- 8% ● Activités de fabrication
- 8% ● Électricité, gaz, eau, gestion des déchets
- 8% ● Commerce de gros
- 10% ● Activités immobilières
- 15% ● Activités professionnelles et techniques
- 18% ● Activités financières et d'assurances
- 28% ● Tech. de l'information et des communications

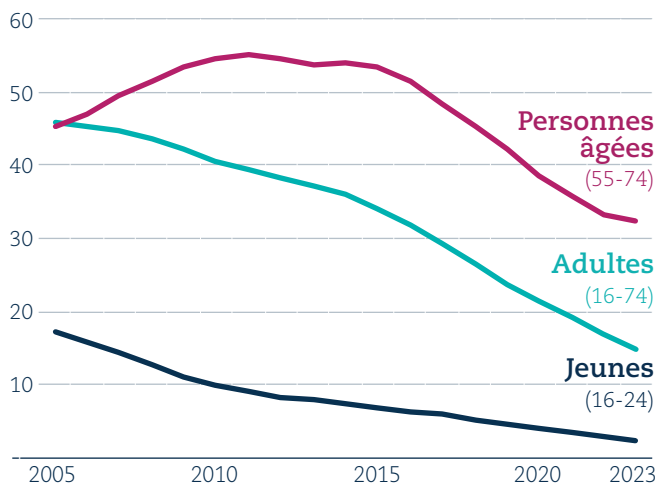
Les entreprises n'adoptent pas massivement les technologies fondées sur les données.



Les adultes les plus instruits sont davantage susceptibles d'utiliser l'internet (+15 points).

Écarts d'utilisation de l'internet entre les personnes les plus instruites et les moins instruites, par classe d'âge

Écart (personnes les plus instruites – les moins instruites) (en points de pourcentage)



Principaux constats

L'accès aux services en ligne et la capacité à les utiliser efficacement sont des conditions essentielles à l'égalité des chances et l'inclusion

- Les disparités d'utilisation de l'internet sont marquées, que ce soit entre les classes d'âge ou selon le niveau d'instruction ou de revenu. Les internautes les plus jeunes et les plus instruits mènent un éventail plus large d'activités en ligne.
- Les personnes disposant des compétences requises sont généralement mieux armées pour mettre à profit les technologies numériques, un constat mis en évidence pendant la crise du COVID-19.
- L'adoption de services en ligne particuliers a progressé pendant la pandémie de COVID-19, surtout parmi les personnes déjà présentes sur l'internet, ce qui laisse à penser que cette tendance pourrait perdurer. Par ailleurs, nombreuses sont les personnes qui pratiquent deux ou trois jours de télétravail par semaine lorsque leur emploi le permet.
- Tous les effets de la pandémie ne s'inscriront pas nécessairement dans la durée ; la part du commerce électronique de détail se rapproche d'ailleurs des niveaux observés avant la pandémie.

Les technologies dépendantes des données se diffusent lentement

- Alors que l'adoption de l'infonuagique et de l'internet des objets (IdO) a été forte dans la zone OCDE, celle de l'analytique des données massives et de l'intelligence artificielle (IA) reste faible.
- L'adoption de l'IA se concentre dans le secteur des services d'information et de communication, où en moyenne 28 % des entreprises l'utilisent en 2023 dans l'OCDE, plus que dans tout autre secteur.
- La taille des entreprises est un déterminant plus important de l'adoption des technologies dépendantes des données que de celle de l'infonuagique et de l'IdO.
- Si le nombre d'appareils d'IdO a rapidement augmenté, la pénurie de semi-conducteurs en a freiné la progression.

Les politiques devraient viser à favoriser l'adoption équitable des services en ligne, la diffusion des technologies et l'exploitation du potentiel des données

- Pour favoriser l'adoption équitable des services en ligne, les pouvoirs publics devraient montrer l'exemple en fournissant des services en ligne inclusifs, centrés sur l'humain. Ils devraient investir dans les compétences tout en apportant un appui aux personnes présentant le plus de risques de se retrouver dépassées.
- Il est possible d'accélérer la diffusion des technologies en assurant aux entreprises des conditions équitables d'accès aux ressources clés, notamment aux données.

À quelle vitesse les individus, les consommateurs et les entreprises adoptent-ils les technologies numériques ? Qui en bénéficie et qui risque de rester sur le bord de la route ? Ce chapitre commence par examiner l'adoption de l'internet et l'utilisation des services en ligne par les individus, en mettant en évidence les différences entre les groupes socio-démographiques et socio-économiques, et l'impact de la pandémie de COVID-19. On y étudie ensuite la diffusion des technologies numériques dans les entreprises, en s'intéressant en particulier à celles qui dépendent des données, comme l'analytique des données massives et l'intelligence artificielle (IA), avant d'aborder les incidences sur l'action des pouvoirs publics.

La capacité à utiliser efficacement l'internet est essentielle à l'égalité des chances et l'inclusion

Les technologies numériques offrent des possibilités d'améliorer la vie et le bien-être des individus. Toutefois, elles suscitent également des inquiétudes de longue date, notamment concernant leurs incidences sur l'égalité des chances et l'inclusion. Ces inquiétudes sont de trois types, tels qu'indiqués ci-après.

Premièrement, dans la mesure où elles procurent des avantages non négligeables aux personnes qui sont à même de les utiliser efficacement, elles pourraient aggraver les fractures qui existent de longue date. Les programmes d'enseignement en ligne, par exemple, offrent la possibilité d'accéder à des contenus éducatifs de qualité, à faible coût, tout en bénéficiant



d'une grande souplesse. Or, si les compétences ou l'enseignement formel sont une condition préalable pour utiliser ces programmes en toute efficacité, les personnes déjà défavorisées risquent d'en tirer des avantages moindres (OCDE, 2020^[1]).

Deuxièmement, un nombre sans cesse croissant de services, de la correspondance écrite aux achats, en passant par les services bancaires et les interactions avec les pouvoirs publics, sont proposés en ligne et rencontrent un public de plus en plus large. Il en résulte que le coût par interaction de la fourniture de ces services hors ligne augmente. Par conséquent, les équivalents physiques des services en ligne et leur infrastructure – bureaux de poste, agences bancaires, librairies, etc. – sont en déclin dans une grande partie de la zone OCDE¹. En Allemagne, par exemple, le nombre de succursales bancaires pour 10 000 habitants est passé de plus de 7.0 en 1995 à moins de 2.5 en 2021. Sur la même période, aux États-Unis, le nombre de librairies a chuté de cinq pour 100 000 habitants à moins de deux. Cette « dématérialisation des services » menace de laisser les personnes non connectées et celles qui ne disposent pas des ressources nécessaires pour utiliser les services en ligne avec des choix réduits et des coûts de transaction plus élevés (Défenseur des Droits, 2022^[2]).

Enfin, à mesure que les interactions sociales et les activités culturelles passent de plus en plus par l'environnement numérique, l'accès aux cybertechnologies et la capacité à les utiliser en toute efficacité deviennent des facteurs essentiels d'inclusion sociale. L'exclusion numérique se manifeste sous de nombreuses formes, que les décideurs s'adressent au public par le biais des médias sociaux, que les familles et amis échangent via des groupes de discussion, et que les gens n'aient pas la capacité de prendre part aux conversations de la vie courante traitant de phénomènes culturels propres au cyberenvironnement, pour en citer quelques-unes. Plus les interactions sociales et les phénomènes culturels basculent vers l'internet, plus l'accès et l'utilisation universels deviennent importants.

La crise du COVID-19 a contribué à l'accélération des tendances de longue date décrites plus haut. Au plus fort de la pandémie, lorsque le travail, la classe et les rendez-vous médicaux ont dû basculer en ligne du fait des confinements, les personnes qui ne disposaient pas d'un accès de qualité ou des compétences nécessaires pour utiliser les technologies numériques ont été fortement pénalisées. Celles dont les emplois se prêtaient davantage au télétravail – emplois généralement adossés à des niveaux d'instruction élevés – étaient plus susceptibles de continuer de travailler (Dey et al., 2021^[3]). Par ailleurs, les dépenses de consommation en ligne ont progressé plus fortement dans les économies où la part du commerce électronique était plus élevée avant la pandémie, avec à la clé un creusement de la fracture numérique entre les pays (Cavallo, Mishra et Spilimbergo (2022)^[4]).

La diffusion et la fréquence d'utilisation de l'internet ont progressé, mais des disparités demeurent

La diffusion et la fréquence d'utilisation de l'internet ont progressé rapidement dans les pays de l'OCDE. Parmi les adultes âgés de 16 à 74 ans, plus de neuf personnes sur dix (93 %), soit 945 millions d'individus, ont accédé à l'internet au moins une fois au cours des 12 derniers mois². Plus de quatre adultes sur cinq (87 %), soit 888 millions de personnes, l'ont utilisé quotidiennement ou presque. En 2005, ces parts s'élevaient respectivement à seulement une personne sur deux (52 %) et une sur trois (32 %).

Dans dix pays de l'OCDE, à savoir en Corée, au Danemark, en Finlande, en Islande, au Luxembourg, en Norvège, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni, en Suède et en Suisse, plus de 97 % de la population a accédé à l'internet au cours des trois derniers mois (graphique 3.1)³. À l'inverse, plus de 15 % de la population adulte ne l'avaient pas utilisé en Colombie, aux États-Unis, en Grèce, au Mexique. Toutefois, les pays qui affichaient par le passé des taux d'utilisation plus faibles ont souvent enregistré les hausses les plus marquées. En Türkiye, par exemple, seuls 7 % de la population utilisaient l'internet quotidiennement en 2005, contre 82 % en 2023.

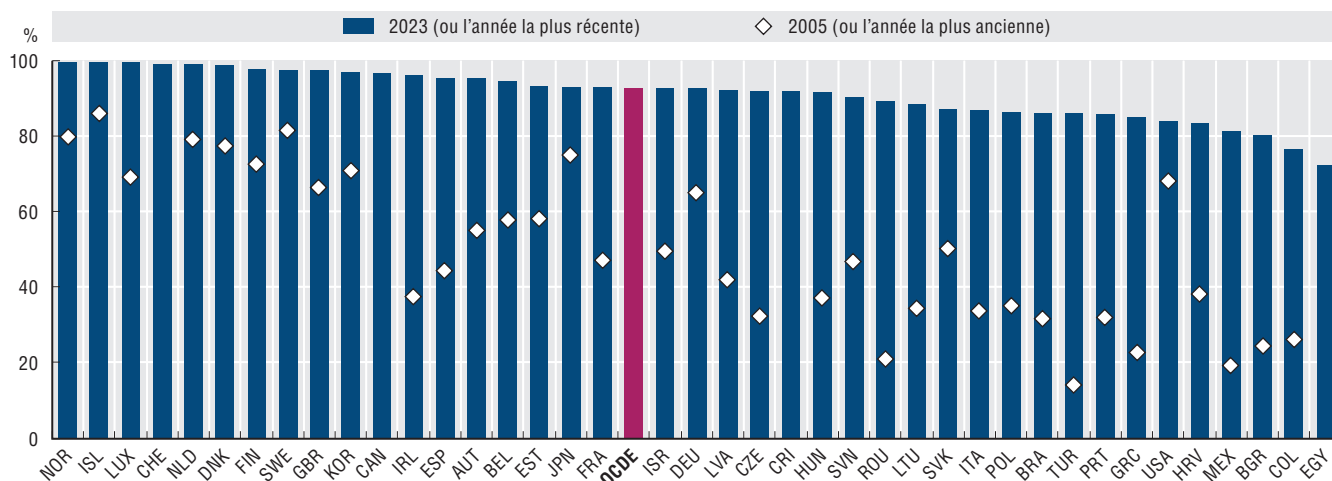
On observe une convergence des taux d'adoption de l'internet dans les pays de l'OCDE. Pour autant, une fracture numérique notable subsiste par rapport au reste du monde, où vit plus de 80 % de la population. La moitié seulement de la population résidant dans les pays à revenu faible ou intermédiaire accède à l'internet (UIT, 2022^[6]). Dans les 28 pays à faible revenu, seule une personne sur cinq a utilisé l'internet au cours des trois derniers mois.

Le graphique 3.2^{4,5} met en évidence les disparités d'utilisation de l'internet entre différents groupes socio-économiques et socio-démographiques, représentées par les écarts de taux d'adoption selon l'âge, le niveau d'instruction, le genre et le quintile de revenu. Les disparités sont importantes entre les classes d'âge et entre les individus disposant de niveaux d'instruction différents. Les jeunes âgés de 16 à 24 ans sont plus susceptibles d'avoir utilisé l'internet que les personnes âgées de 55 à 74 ans, avec une différence de 15 points en moyenne ; l'écart entre les plus instruits et les moins instruits est de 15 points lui aussi. Les disparités entre les genres sont moins prononcées. En réalité, les femmes sont plus susceptibles d'utiliser l'internet dans un peu plus du tiers des pays pour lesquels on dispose de données. Enfin, la différence entre les personnes appartenant au cinquième quintile de la distribution des revenus des ménages et celles du premier quintile est en moyenne de 12 points.

3. DIFFUSION DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES ET DONNÉES

Graphique 3.1. L'adoption de l'internet a progressé

Utilisation de l'internet au moins une fois au cours des trois derniers mois par les adultes (âgés de 16 à 74 ans), 2005 (ou l'année la plus ancienne) et 2023 (ou l'année la plus récente)



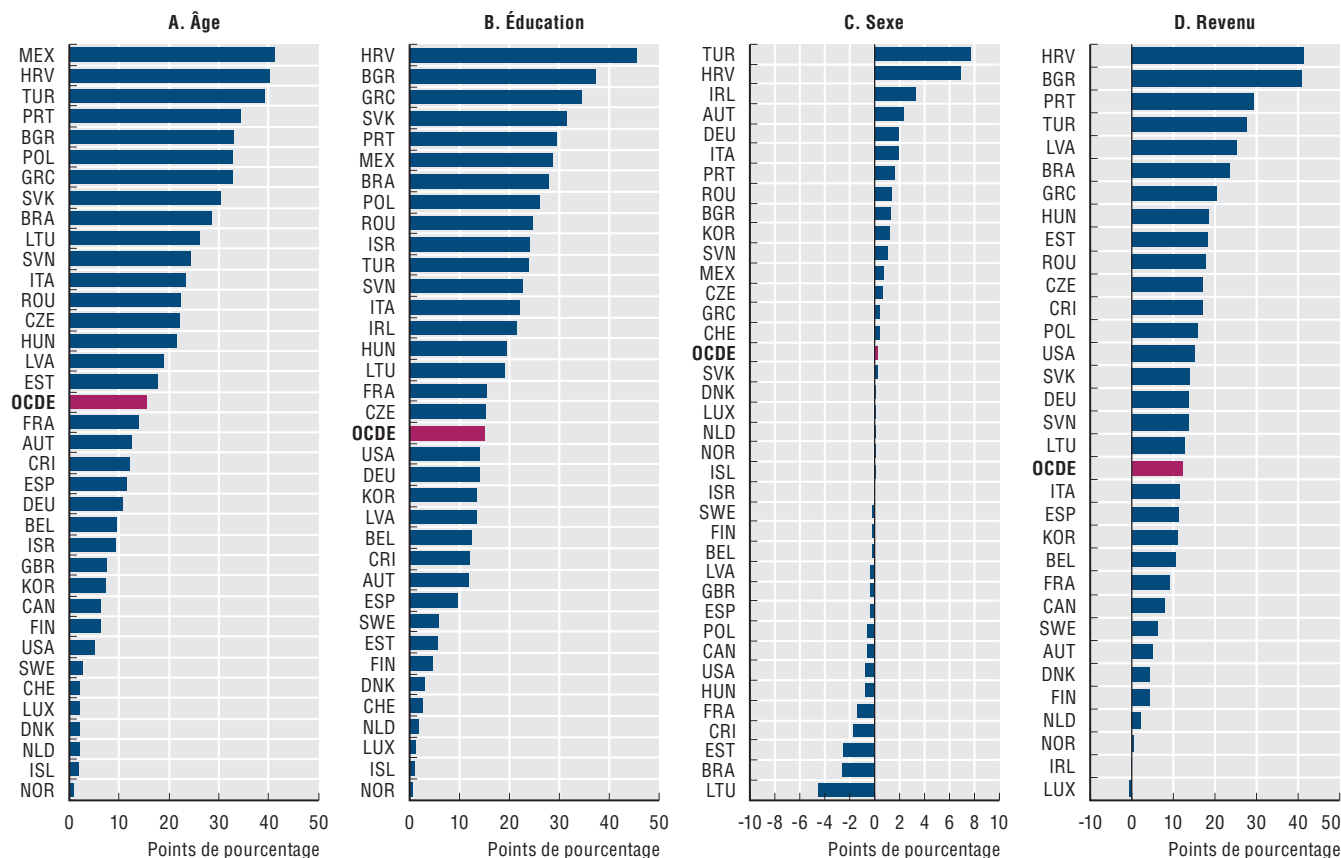
Note : Voir la note de fin de chapitre 3.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023_[5]).

StatLink <https://stat.link/zk47t3>

Graphique 3.2. Les disparités d'utilisation de l'internet sont marquées selon les classes d'âge, le niveau d'instruction et le quintile de revenu

Écart quant à la part des adultes ayant utilisé l'internet au moins une fois au cours des trois derniers mois, 2023 (ou l'année la plus récente)



Note : Voir les notes de fin de chapitre 4 et 5.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023_[5]).

StatLink <https://stat.link/j90o71>

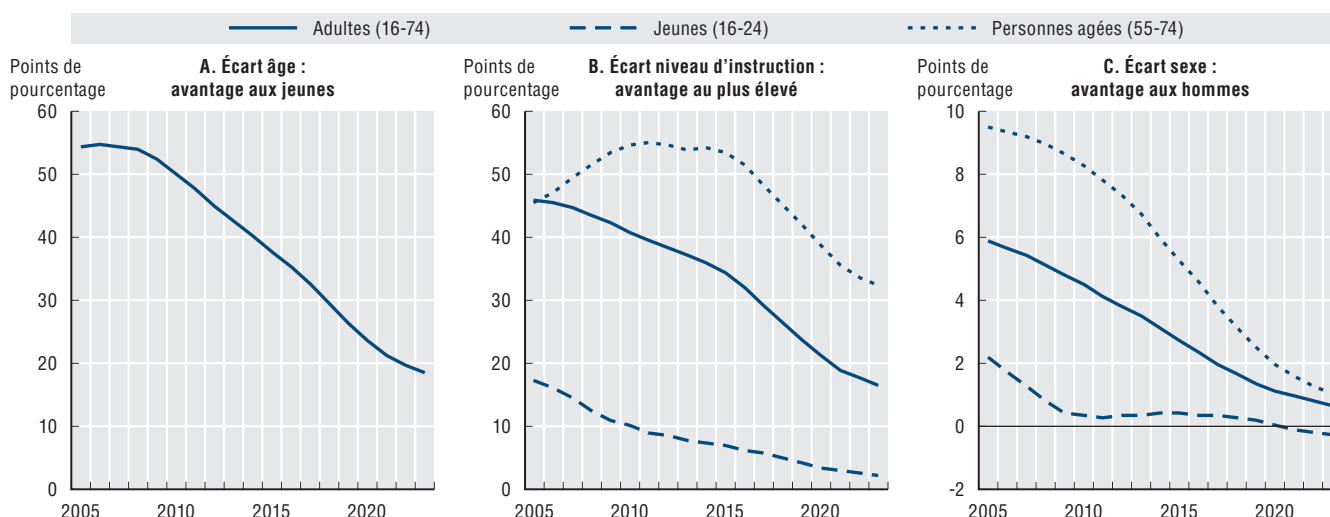


Ces observations vont dans le même sens que d'autres données. Une enquête réalisée aux États-Unis en 2021 révèle que seuls 7 % des adultes du pays n'utilisent pas l'internet, mais que le taux atteint 25 % pour les adultes âgés de 65 ans ou plus (Perrin et Atske, 2021^[7]). Le niveau d'instruction et le revenu des ménages semblent également jouer un rôle dans l'utilisation de l'internet. En revanche, on n'observe pas de différence statistiquement significative selon le genre, la race et l'origine ethnique, ou le type de communauté.

Le graphique 3.3⁴ illustre l'évolution des écarts moyens d'utilisation de l'internet (au moins une fois au cours des trois derniers mois) dans tous les pays de l'OCDE pour lesquels on dispose de données. Les écarts moyens entre les classes d'âge et entre les niveaux d'instruction ont diminué d'environ 3 points par an depuis 2010. Les disparités moyennes d'utilisation de l'internet entre les genres, déjà beaucoup plus faibles par le passé, tendent aussi à se réduire, mais à un rythme plus lent. Les deuxième et troisième parties du graphique 3.3 donnent également à voir les évolutions des écarts moyens selon le niveau d'instruction et le genre par classe d'âge. Un léger écart en faveur des hommes subsiste parmi les plus âgés, alors que depuis 2010 environ, on n'observe pas d'écart moyen important entre les genres parmi les jeunes. De même, l'écart moyen d'utilisation de l'internet par les jeunes selon le niveau d'instruction est proche de zéro, même si la tendance semble avoir marqué le pas ces dernières années. Après un pic autour de 55 points pendant la première moitié de la dernière décennie, l'écart moyen d'utilisation parmi les plus âgés, selon le niveau d'instruction, tend également à se réduire, mais reste notable, à 32 points environ⁶.

Graphique 3.3. Les disparités d'utilisation de l'internet se réduisent, mais restent notables parmi la population âgée

Écarts moyens dans les pays de l'OCDE, 2005-23



Notes : Estimations d'après une régression polynomiale locale avec une fenêtre d'une unité. Voir également la note de fin de chapitre 4.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023^[5]).

StatLink <https://stat.link/7qx38g>

Alors que les disparités au regard des principales dimensions tendent à se creuser avec l'âge, elles devraient se réduire à l'avenir. Combien de temps cela prendra-t-il ? Les observations décrites plus haut laissent à penser que les disparités d'utilisation de l'internet selon l'âge baissent d'environ 3 points par an ; les écarts moyens pourraient donc être comblés dans les pays d'ici à la fin de la décennie. Ces chiffres pourraient toutefois être trompeurs, les données ne couvrant que les adultes jusqu'à 74 ans. Or, la part des 75 ans et plus va de 3 % en Colombie, au Mexique et en Türkiye à plus de 12 % en Italie et au Japon (ONU DESA, 2022^[8]), et augmente dans tous les pays de l'OCDE.

Dans cette classe d'âge, en 2020-22, dans neuf pays de l'OCDE pour lesquels on dispose de données, la part des personnes qui n'utilisent pas l'internet s'échelonne entre 9 % en Norvège et 90 % au Mexique, la moyenne s'établissant à 64 %. Ces taux sont en moyenne cinq fois plus élevés que pour la classe d'âge 55-74 ans. Une projection établie à partir des données de l'Italie, où près de quatre personnes de 75 ans ou plus sur cinq ont indiqué en 2021 n'avoir jamais utilisé l'internet, laisse à penser qu'environ un quart d'entre elles pourrait être dans la même situation en 2030⁷. En d'autres termes, les taux de non-adoption pourraient rester élevés parmi les plus âgés pendant une bonne partie de la prochaine décennie.

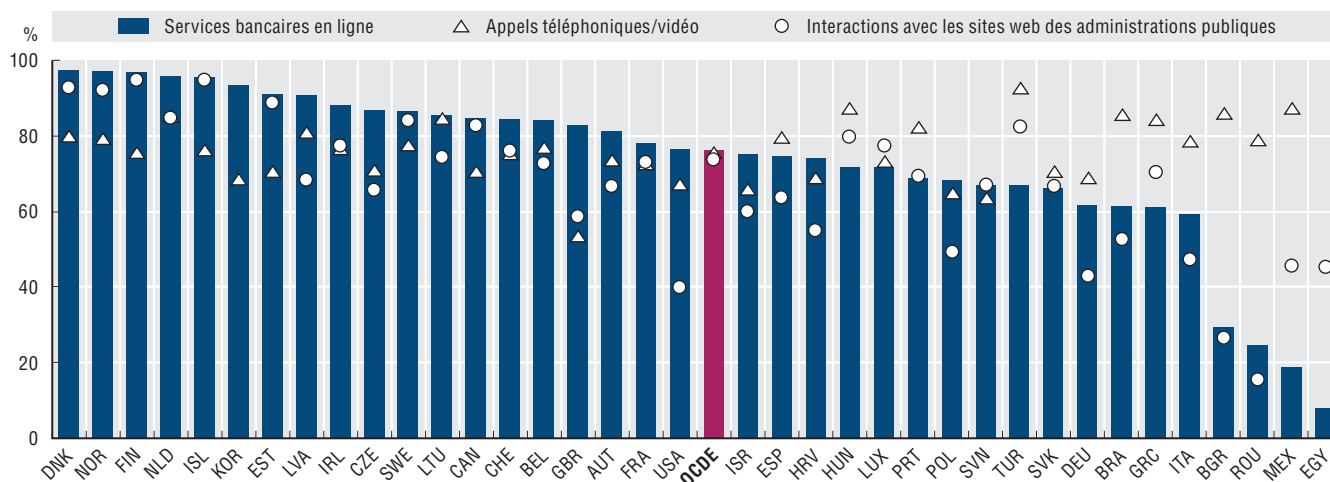
Les niveaux d'instruction et de compétences TIC nécessaires varient selon les activités en ligne

Si l'accès à l'internet est devenu la norme pour la grande majorité des personnes vivant dans les pays de l'OCDE, il importe de comprendre de quelle façon elles l'utilisent. La connectivité offre aujourd'hui un large éventail de possibilités, de la communication de base et du recueil d'informations aux activités de loisirs, en passant par l'achat de biens et de services, l'éducation et la recherche d'emploi, ou encore les interactions avec les pouvoirs publics.

Il peut exister d'importantes disparités d'adoption de services en ligne spécifiques selon les pays. Par exemple, les taux d'adoption moyens des appels vidéo et des services bancaires en ligne par les internautes se situent tous deux autour de 76 % (graphique 3.4)⁸. Pour autant, si les taux d'adoption des services bancaires varient de 8 % à 97 %, ceux des appels vidéo dépassent 50 % dans tous les pays observés ici, et vont de 53 % à 93 %. En comparaison des services bancaires, les services d'administration en ligne, qui semblent exiger des compétences similaires, affichent des taux d'adoption du même ordre de grandeur (74 % en moyenne). Dans 28 des 37 pays pour lesquels on dispose de données, les internautes sont plus susceptibles de recourir aux services bancaires qu'aux services d'administration en ligne. Pour ces derniers, on observe par ailleurs d'importants écarts d'utilisation selon les pays, avec des taux d'adoption qui varient de 15 % à 95 %.

Graphique 3.4. L'adoption des services bancaires et des services d'administration en ligne varie selon les pays

Adoption des services bancaires sur l'internet, recours aux appels vidéo et interactions avec les sites web des administrations publiques parmi les internautes âgés de 16 à 74 ans, 2023 (ou l'année la plus récente)



Note : Voir la note de fin de chapitre 8.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023_[5]).

StatLink  <https://stat.link/ai41lj>

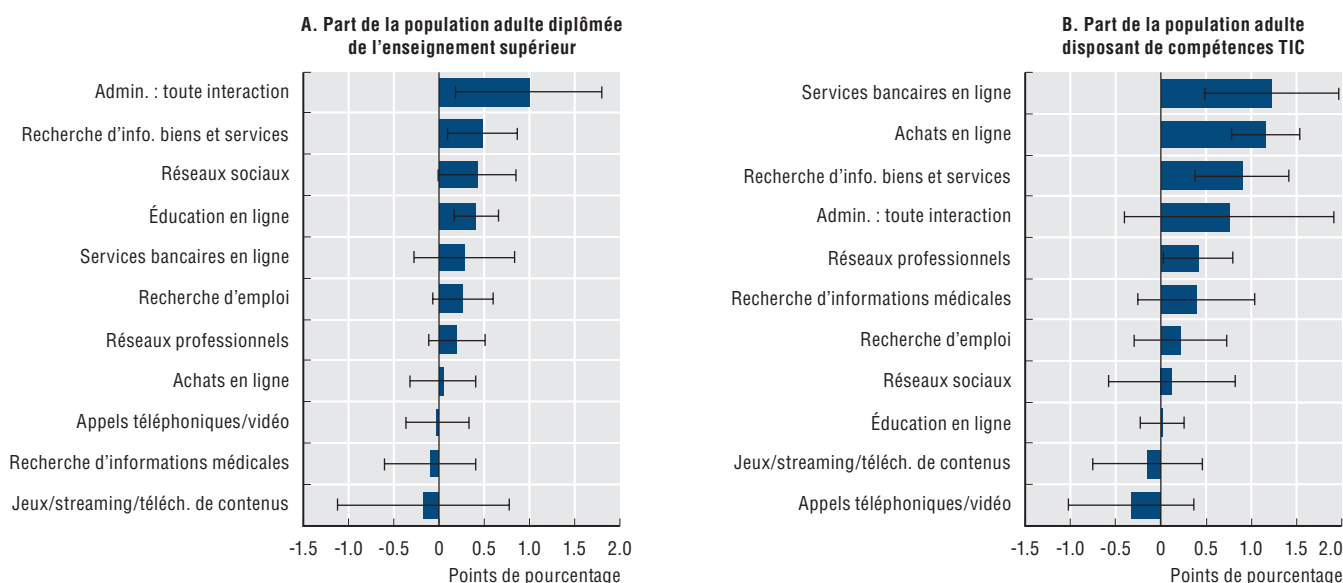
Pour mieux comprendre les facteurs à l'origine des disparités d'adoption, par les internautes, des services en ligne dans les pays, on a effectué une régression des taux d'adoption avant la pandémie de COVID-19 sur trois variables : la part des adultes diplômés de l'enseignement supérieur, la part des adultes disposant d'une expérience de l'informatique et n'ayant pas échoué à un test élémentaire sur les technologies de l'information et des communications (TIC), et le revenu par habitant. Les résultats sont présentés ci-après ainsi que dans le graphique 3.5 et le tableau d'annexe 3.A.1.

Premièrement, ils montrent que l'adoption d'activités comme les appels vidéo, le streaming ou le téléchargement de contenus n'est pas liée ni au niveau d'éducation formelle, ni aux compétences TIC. L'éducation formelle joue cependant un rôle particulièrement important dans la propension à interagir avec les sites web des administrations publiques : une augmentation d'un point de la part de la population adulte diplômée de l'enseignement supérieur, par exemple, est associée à une hausse d'un point de la part des internautes qui utilisent le cyberspace pour interagir avec les pouvoirs publics. Elle est également associée à une plus grande propension à recourir à l'internet pour rechercher des informations sur des biens et des services et à utiliser les réseaux sociaux, bien que les effets soient moindres. Enfin, on observe une corrélation statistiquement significative entre l'éducation formelle et l'adoption des services d'enseignement en ligne. Si l'effet sur l'éducation est ici plus limité que pour d'autres activités, l'estimation est néanmoins importante par rapport au taux d'adoption moins élevé de l'enseignement en ligne – seulement 12 points en moyenne.



Graphique 3.5. Il existe une corrélation entre, d'une part, les activités en ligne telles que le recours aux services bancaires et les achats sur l'internet, et d'autre part, l'éducation formelle et les compétences TIC

Coefficients estimés des régressions des taux d'adoption des services en ligne par les internautes (2015-19) sur l'éducation formelle (2015), la part de la population disposant de compétences TIC élémentaires (2011-18) et le PIB par habitant (2015)



Note : Voir le tableau d'annexe 3.A.1.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023^[5] ; 2016^[9] ; 2023^[10] ; 2023^[11]).

StatLink <https://stat.link/fyzwiu>

Deuxièmement, même après la prise en compte de l'éducation formelle et du produit intérieur brut (PIB) par habitant, les compétences TIC tendent à être fortement corrélées aux activités visant à configurer ou impliquant des opérations monétaires : services bancaires en ligne, achats sur l'internet et recherche d'informations sur des biens et des services. L'ampleur des effets est importante : une augmentation d'1.0 point de la part de la population adulte disposant de compétences TIC est associée à une hausse de 1.2 point tant de l'adoption des services bancaires en ligne que du recours aux achats sur l'internet. On observe en outre, bien que dans une moindre mesure, une corrélation positive partielle entre les compétences TIC et la participation aux réseaux professionnels.

Enfin, peu d'éléments laissent à penser que le PIB par habitant détermine le comportement en ligne, une fois pris en compte les effets du niveau d'instruction et des compétences. La moitié des coefficients estimés sont négatifs, et la plupart ne sont pas statistiquement significatifs. On note une faible corrélation statistique uniquement pour le recours aux appels vidéo et aux achats sur l'internet : une augmentation de 10 % du PIB par habitant est associée à une baisse de l'ordre de 1.7 point de l'adoption des appels vidéo et une hausse du recours aux achats sur l'internet de 1.3 point.

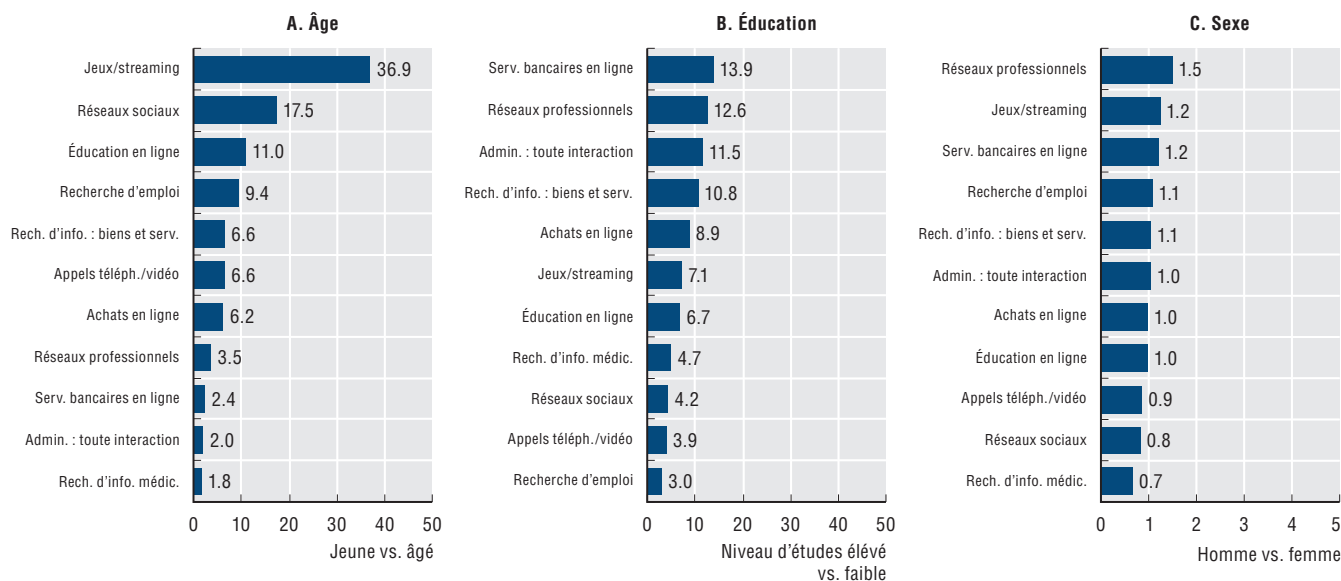
Les internautes les plus jeunes et les plus instruits mènent un éventail plus large d'activités en ligne

Les écarts de taux d'adoption selon les groupes dépendent du niveau global d'adoption. Par exemple, ils sont nécessairement réduits si le niveau d'adoption global de la population est proche soit de 100 %, soit de 0 % (Klasen et Lange, 2012^[12] ; Oster, 2009^[13]). Les taux d'adoption dépendent en outre de la période de référence (à savoir la période que les participants sont invités à prendre en considération lorsqu'ils répondent aux questions d'une enquête), qui correspond généralement à trois mois (elle est de douze mois pour certains indicateurs utilisés dans ce chapitre). Il peut donc être trompeur de comparer les différences de taux en valeur absolue (à savoir en points) ou les différences relatives de diverses activités.

Pour se faire une idée de l'importance de caractéristiques socio-économiques et socio-démographiques spécifiques, mieux vaut comparer les rapports de probabilité, en prenant par exemple la probabilité de l'adoption par les jeunes et celle de l'adoption par les personnes âgées, le rapport correspondant au taux d'adoption divisé par le taux de non-adoption. Un rapport de probabilité supérieur à l'unité traduirait une plus grande adoption parmi les jeunes, tandis qu'un rapport inférieur à un indiquerait une adoption plus élevée parmi les personnes âgées. Le graphique 3.6 propose une comparaison des rapports de probabilité d'adoption moyens entre les jeunes et les plus âgés, entre les personnes disposant d'un niveau d'instruction élevé et les moins instruits, et entre les hommes et les femmes, pour différentes activités en ligne.

Graphique 3.6. Les internautes les plus jeunes et les plus instruits mènent un éventail plus large d'activités en ligne

Rapports moyens de probabilité d'adoption des services en ligne, internautes adultes, 2023 (ou l'année la plus récente)



Note : Voir la note de fin de chapitre 8.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023^[5]).

StatLink <https://stat.link/7wzisiq>

Dans l'ensemble, les internautes les plus jeunes et les plus instruits affichent systématiquement une probabilité plus élevée de mener des activités en ligne, ce qui laisse à penser qu'ils sont plus susceptibles de prendre part à un éventail plus large d'activités sur l'internet. Toutefois, l'importance de l'âge et de l'éducation varie sensiblement selon les activités. Par exemple, les écarts de probabilité entre les internautes de différentes générations sont particulièrement marqués pour les activités de loisirs en ligne et la participation aux réseaux sociaux. Ils sont moins prononcés pour des activités telles que les interactions en ligne avec les administrations publiques, les services bancaires en ligne et la participation à des réseaux professionnels. Les écarts les plus faibles concernent l'utilisation de l'internet pour accéder à des informations médicales, dont la demande est susceptible d'augmenter avec l'âge.

Ainsi que l'on peut s'y attendre compte tenu des résultats présentés plus haut pour les différents pays, le niveau d'éducation va de pair avec une probabilité plus élevée d'adoption de certaines activités. Il s'agit de la participation à des réseaux professionnels, du recours aux services bancaires en ligne, des interactions avec les pouvoirs publics, de la recherche d'informations sur des biens et des services, et des achats sur l'internet. Les internautes instruits sont également, en moyenne, sept fois plus susceptibles d'utiliser l'internet pour accéder à des services d'éducation en ligne.

En revanche, il est intéressant de noter que les internautes disposant d'un niveau d'instruction élevé sont en moyenne seulement trois fois plus susceptibles d'utiliser l'internet pour chercher un emploi. Ce constat pourrait résulter de deux forces antagonistes : d'une part, les personnes moins instruites tendent à être plus exposées au risque de chômage et sont en conséquence associées à une demande plus élevée de tous les types de services de recherche d'emploi (OCDE, 2023^[14] ; Mincer, 1991^[15]). D'autre part, les personnes plus instruites sont davantage susceptibles d'utiliser les services de recherche d'emploi en ligne, et les offres d'emploi publiées sur l'internet tendent à concerner des professions qui exigent des niveaux d'éducation élevés (CIMT, 2020^[16]).

Enfin, les écarts de probabilité d'adoption des services en ligne entre les hommes et les femmes sont beaucoup moins prononcés. Les femmes tendent à être plus susceptibles de rechercher des informations médicales et d'utiliser les réseaux sociaux et les appels vidéo. Les hommes sont plus enclins à mener des activités liées aux jeux et au streaming et à utiliser les services bancaires en ligne et les réseaux professionnels. Ces constats vont notamment dans le sens des résultats d'une étude en Norvège, qui révèle que les adolescents masculins sont cinq fois plus susceptibles que les filles de jouer à des jeux vidéo en ligne, tandis que les adolescentes ont une plus forte propension à utiliser les médias sociaux (Leonhardt et Overå, 2021^[17]).



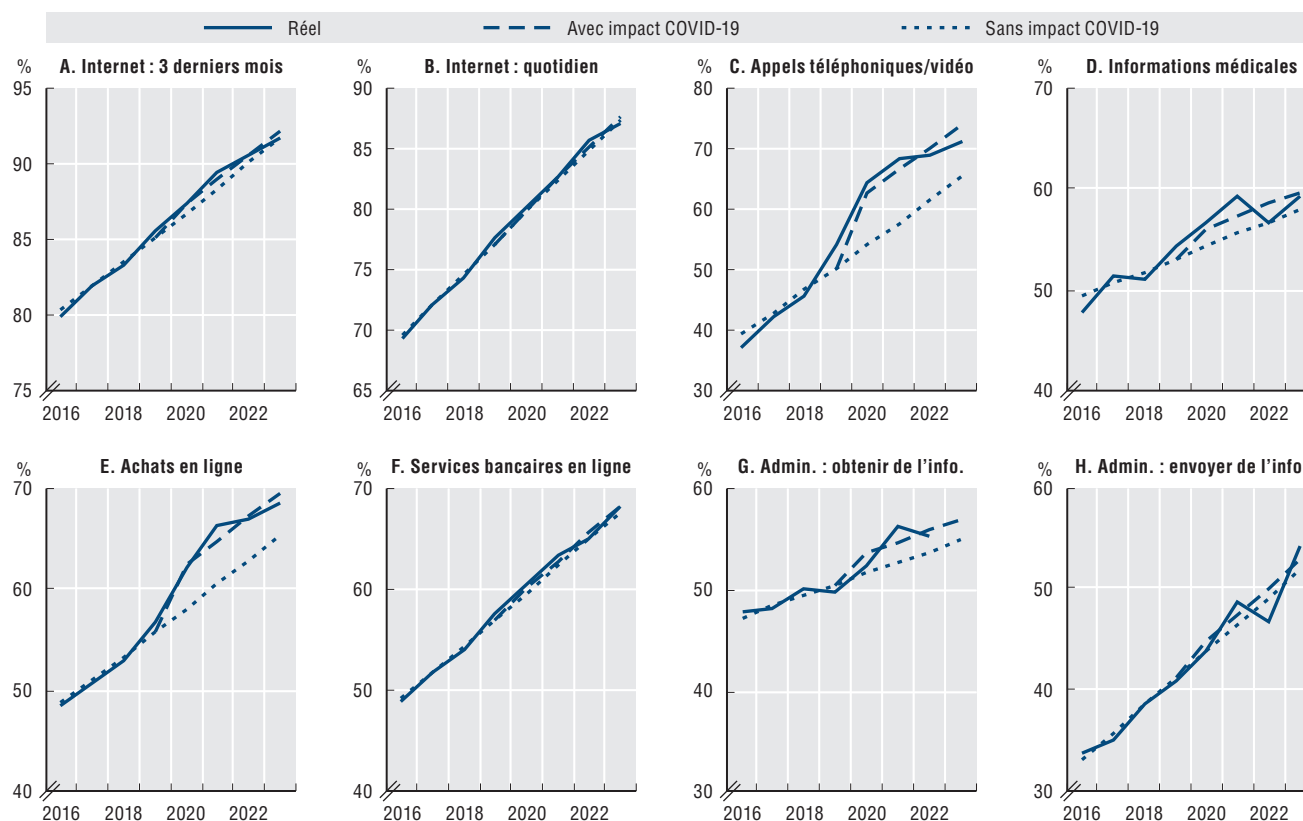
La crise du COVID-19 a poussé les individus à davantage se tourner vers les services en ligne... du moins temporairement

À partir des premiers mois de 2020, la pandémie de COVID-19 a façonné l'évolution de l'utilisation des services en ligne. La demande de services de communication haut débit s'est envolée, certains opérateurs enregistrant jusqu'à 60 % d'augmentation du trafic internet par rapport à la période d'avant-crise (OCDE, 2020^[18]). Pendant les confinements, le télétravail et l'enseignement à distance sont devenus la norme pour de nombreux travailleurs, élèves et étudiants. Une plus forte demande de services de visioconférence a, par ricochet, contribué à l'explosion du trafic internet (Aksoy et al., 2022^[19] ; Ker, Montagnier et Spiezia, 2021^[20])⁹. Le commerce électronique est également monté en flèche, les clients évitant de se rendre dans les espaces clos des magasins. Dans l'Union européenne, les ventes au détail, que ce soit par l'intermédiaire des entreprises de vente par correspondance ou sur l'internet, ont augmenté en avril 2020 de 30 % en glissement annuel (OCDE, 2020^[21]). Aux États-Unis, elles ont progressé de plus de 40 % en 2020 (Brewster, 2022^[22]). Les pouvoirs publics ont été aux avant-postes de la gestion de la pandémie, avec notamment la mise en place de services en ligne tels que des portails d'information dédiés et des applications destinées à faciliter le traçage des cas contacts, stocker les certificats de vaccination, ou aider au travail et à l'apprentissage à domicile.

Ces évolutions transparissent-elles dans les taux d'adoption ? Les deux premières parties du graphique 3.7 montrent qu'avant la pandémie, l'utilisation de l'internet au cours des trois mois ayant précédé l'enquête progressait en moyenne de 1.6 points par an, alors que l'utilisation quotidienne de l'internet augmentait à un rythme annuel de 2.6 points (voir également le tableau d'annexe 3.A.2). Dans les deux cas, ainsi que pour les services bancaires en ligne, la pandémie n'a pas provoqué de changement radical, ce qui laisse à penser que les restrictions imposées n'ont pas entraîné une hausse des nouveaux internautes.

Graphique 3.7. L'adoption des services en ligne a progressé pendant la pandémie

Taux d'adoption moyens des services en ligne et évolutions par rapport aux niveaux observés avant la pandémie, 2016-23



Notes : Les taux moyens « Réel » indiqués sur les graphiques sont corrigés des variations de tailles d'échantillons d'une année sur l'autre. Voir également le tableau d'annexe 3.A.2 et les notes y afférentes.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023^[5]).

StatLink <https://stat.link/3tump5>

Les chiffres attestent néanmoins de l'impact de la pandémie sur l'utilisation des services en ligne. Si les taux d'adoption des appels vidéo progressaient déjà en moyenne de 3.7 points avant la crise du COVID-19, on observe une hausse supplémentaire d'environ 8.6 points pendant la pandémie (partie C). En d'autres termes, la pandémie a accéléré d'environ deux ans et demi la progression des taux d'adoption des appels vidéo. De même, avec l'arrivée de la pandémie en 2020, les taux d'adoption des achats en ligne (partie E) ont augmenté de 4.4 points supplémentaires.

La crise du COVID-19 a également eu un impact sur la part de la population adulte interagissant avec les administrations publiques par le biais de leurs sites web. Le recours aux trois types d'interactions avec les sites internet des administrations publiques couverts par les données (à savoir l'obtention d'informations, le téléchargement de formulaires et l'envoi d'informations) progressait de 1.8 point en moyenne avant la pandémie (non illustré). À partir du début de la crise, il a augmenté de 2.1 points supplémentaires. Les effets semblent être essentiellement liés à une augmentation, en 2021, de la part des adultes utilisant les sites internet des administrations pour obtenir des informations, plutôt qu'à une progression de la proportion d'adultes transmettant des informations via leurs portails en ligne (voir les deux dernières parties du graphique 3.7). Toutefois, après avoir atteint un pic de 56 % en 2022, il semble que la proportion d'individus obtenant des informations par l'intermédiaire de sites web des administrations publiques soit en train de revenir à sa tendance pré-pandémique. En revanche, la proportion d'adultes envoyant des informations aux administrations publiques dépasse désormais la tendance post-COVID.

Autre constat, plus surprenant peut-être, la pandémie n'a pas eu d'effet perceptible sur la propension des adultes à rechercher des informations d'ordre médical (partie D). Après avoir atteint un pic de 59 % en 2021 en pleine pandémie, ce taux semble être revenu à sa tendance postpandémique en 2023. Néanmoins, les taux d'adoption ne rendent pas compte de l'intensité d'utilisation. Pour mieux comprendre l'effet de la pandémie sur des activités en ligne particulières, on devra s'appuyer sur des données différentes. L'inscription dans la durée de l'utilisation accrue des services en ligne n'est pas non plus claire : la pandémie a-t-elle contribué à une augmentation durable de l'adoption des services, ou y aura-t-il un retour aux niveaux d'avant la crise, (suggéré par certaines parties du graphique 3.7) ? Dans les paragraphes qui suivent, deux activités reposant sur les technologies numériques et la connectivité, à savoir le télétravail et le commerce électronique, sont analysées de manière plus approfondie.

Si le recours accru au télétravail semble se pérenniser...

L'expérience d'un recours accru au télétravail pendant la pandémie de COVID-19 s'est révélée pour beaucoup positive et pourrait avoir contribué à une amélioration sensible du bien-être et de la productivité. Si les employeurs doivent vraisemblablement trouver un juste équilibre entre les perspectives d'économies et les effets néfastes potentiels sur la productivité, les travailleurs apprécient de toute évidence la possibilité de travailler à domicile deux ou trois jours par semaine. Dans une enquête réalisée par Barrero, Bloom et Davis (2021_[23]) auprès de travailleurs aux États-Unis, la moitié des personnes interrogées ont indiqué qu'elles seraient disposées à renoncer à une augmentation salariale de 5 % pour qu'une partie de leur temps de travail puisse être effectué à domicile.

Nombreux sont ceux qui se demandent si la mise en place du télétravail à grande échelle n'est pas en passe de devenir une constante de l'avenir du travail (OCDE, 2020_[24]). Deux études empiriques de l'OCDE semblent le montrer. La première (Adrián et al. (2021_[25])) examine la part des offres d'emploi publiées en ligne en 2020 et 2021 qui mettent en avant le télétravail, ce qui constitue un indicateur avancé de son adoption. Les auteurs observent que la proportion d'offres d'emploi faisant mention du travail à distance a plus que triplé pendant la pandémie, passant de 2.5 % en janvier 2020 à 8.5 % en décembre 2021. Or, si le durcissement des restrictions est à l'origine de cette hausse, leur levée n'a pas eu par la suite d'effet négatif analogue. En d'autres termes, alors que la pandémie a été le catalyseur d'un passage au télétravail, l'effet semble s'inscrire dans la durée.

Dans le deuxième rapport (Crisciolo et al. (2021_[26])) sont exposés les résultats d'une enquête de l'OCDE sur le télétravail, réalisée auprès de travailleurs et de managers, dans 25 pays. Bien qu'elle mette en évidence des différences entre les deux groupes (les travailleurs aspirant à plus de télétravail que les managers), la plupart des répondants a semblé, dans les deux cas, considérer que l'intensité idéale de télétravail était de deux à trois jours. Des travaux empiriques fondés sur une enquête mensuelle menée aux États-Unis laissent à penser que les préférences des managers et des travailleurs ont convergé au fil de la pandémie et que les salariés ont continué de travailler à domicile environ 30 % du temps à partir de début 2022 (Barrero, 2022_[27] ; Barrero, Bloom et Davis, 2021_[23]).

En revanche, les données les plus récentes de l'enquête mensuelle montrent que l'écart entre le nombre de jours de télétravail souhaité par les employés et les intentions des employeurs est resté stable, à approximativement une demi-journée. De plus, des éléments récents font apparaître un effet négatif sur la productivité du télétravail (Atkin, Schoar et Shinde, 2023_[29] ; Emanuel et Harrington, 2023_[28]). Il sera donc intéressant de voir si la fréquence du télétravail



continuera de baisser après le pic observé pendant la pandémie, en particulier une fois que les tensions sur les marchés du travail se seront atténuées. Enfin, les avantages du télétravail ne seront pas répartis équitablement. De fait, les travailleurs mieux rémunérés et plus instruits sont généralement plus susceptibles de pouvoir travailler à leur domicile (Brussevich, Dabla-Norris et Khalid, 2020^[30] ; Garrote Sanchez et al., 2021^[31]), ce qui soulève des questions quant à l'égalité des chances.

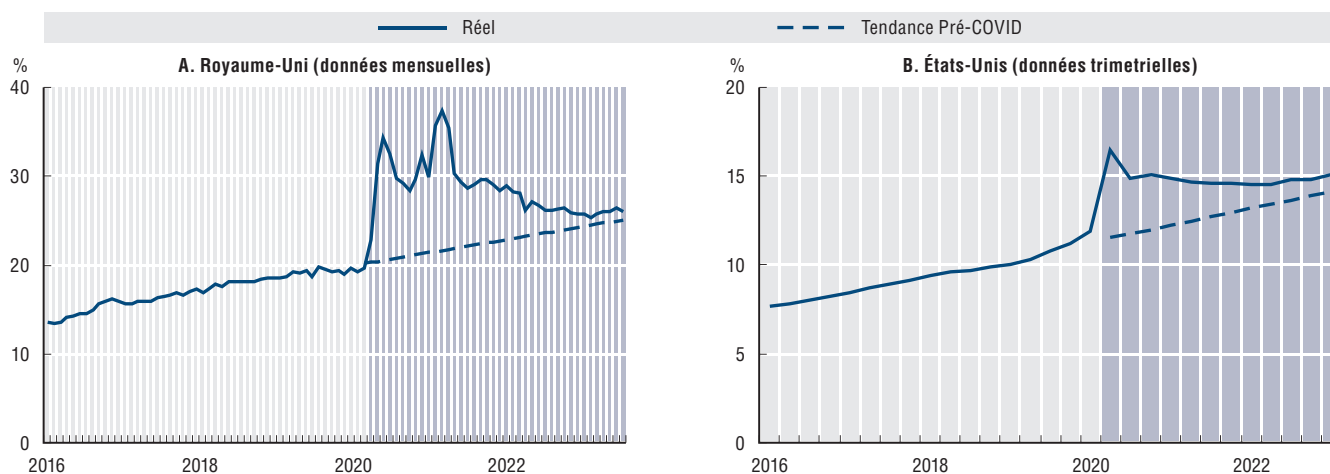
...la forte progression du commerce électronique donne des signes de ralentissement

Si le recours accru au télétravail par rapport aux niveaux d'avant la pandémie paraît s'inscrire dans la durée, il semble que le net essor du commerce électronique observé pendant la crise du COVID-19 ait été transitoire. Une étude du FMI fondée sur des données de l'un des principaux fournisseurs de cartes de crédit a d'abord révélé que dans l'ensemble, la part des achats en ligne dans les dépenses totales a progressé de 10.3 % en 2019 à 14.9 % au plus fort de la pandémie (Cavallo, Mishra et Spilimbergo, 2022^[4]). Toutefois, les données les plus récentes (pour septembre 2021) examinées par les auteurs montrent que les pics de la part des dépenses en ligne se dissipaient déjà à un niveau agrégé. Alors que la part des dépenses en ligne est restée supérieure aux niveaux observés avant la pandémie dans environ la moitié des 47 pays auxquels les auteurs se sont intéressés, la différence n'est que de 0.6 point en moyenne.

Ces observations vont dans le sens des données les plus récentes du Royaume-Uni et des États-Unis sur la catégorie la plus restreinte des ventes au détail réalisées dans le cadre du commerce électronique (graphique 3.8). Au pic enregistré en février 2021, la part du commerce électronique dans les ventes au détail totales au Royaume-Uni avait augmenté de 16 points par rapport à la tendance initiale, mais amorçait une descente avec la levée des restrictions. Mi-2023, l'écart n'était plus que de 0.9 point. Aux États-Unis, où sont publiées des données trimestrielles, la part du commerce électronique dans les ventes au détail totales a atteint un sommet à 5 points au-dessus de l'évolution observée avant la pandémie, puis s'est stabilisée à environ 1 point de la tendance initiale pendant le premier semestre de 2022. Elle continue certes de progresser, mais à un rythme globalement conforme à celui observé avant la crise du COVID-19.

Graphique 3.8. L'essor initial du commerce électronique pendant la pandémie de COVID-19 s'est en grande partie dissipé

Ventes au détail dans le cadre du commerce électronique, en pourcentage des ventes totales, T1 2016 – T2 2023, Royaume-Uni et États-Unis



Notes : Pour les deux séries, les chiffres sont corrigés des variations saisonnières. Les évolutions d'avant la pandémie sont estimées en effectuant une régression de la part des ventes en ligne sur la variable temporelle pour la période allant de T1 2016 à T4 2019 (États-Unis) et de janvier 2016 à février 2020 (Royaume-Uni).

Source : Calculs des auteurs d'après Office for National Statistics (ONS) (2023^[32]) et U.S. Census Bureau (2023^[33]).

StatLink <https://stat.link/gho1n4>

Pendant la pandémie, les personnes disposant des compétences requises étaient mieux à même de mettre à profit les services en ligne

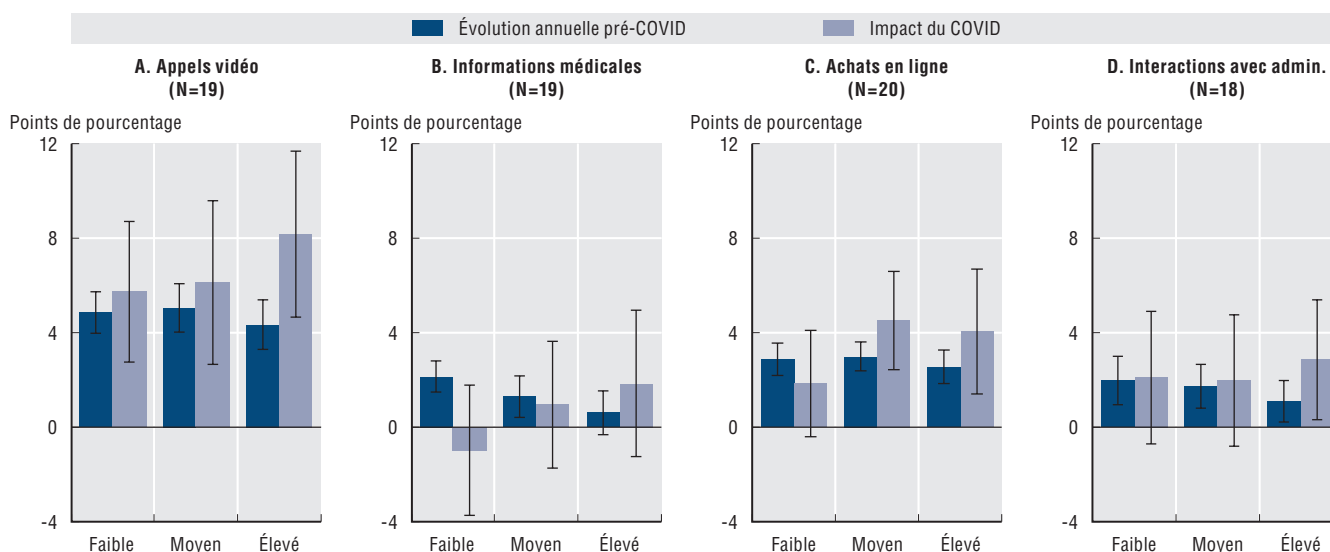
Lorsque la pandémie de COVID-19 a contraint les individus à se confiner, de nombreux services en ligne, jusque-là accessoires, sont devenus essentiels. Si l'existence de fractures numériques était évidente avant la crise, les preuves des incidences de la pandémie sur ces fractures n'apparaissent que maintenant. L'une des manières d'aborder cette question consiste à se demander si la crise a modifié les schémas de convergence. La convergence des taux d'adoption

entre différents groupes s'observe généralement à des niveaux importants d'adoption globale, puisque les groupes affichant des chiffres élevés n'ont plus de marge pour tirer davantage les taux vers le haut (Oster, 2009^[13]).

Le graphique 3.9 et le tableau d'annexe 3.A.3 proposent des estimations de l'évolution annuelle moyenne des taux d'adoption avant le début de la crise du COVID-19 et de l'impact ponctuel induit par la pandémie, selon le niveau d'instruction. Avant la pandémie de COVID-19, on observait généralement une convergence entre les taux d'adoption des personnes peu instruites et les taux de celles disposant de niveaux d'instruction élevés, les premiers affichant des progressions marquées. Ce constat vaut pour les appels vidéo, l'utilisation de l'internet pour accéder à des informations médicales et les interactions avec les administrations publiques par le biais de leurs sites web ; les hausses des taux d'adoption des achats en ligne étaient en revanche réparties plus équitablement.

Graphique 3.9. La pandémie de COVID-19 s'est souvent accompagnée d'un ralentissement de la convergence des taux d'adoption des services en ligne

Évolution annuelle des taux d'adoption et impact de la pandémie de COVID-19, selon le niveau d'instruction, adultes âgés de 16 à 74 ans, 2016-23



Note : Voir le tableau d'annexe 3.A.3.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023^[5]).

StatLink  <https://stat.link/x460gb>

Le déclenchement de la crise du COVID-19 a changé la donne. Tous les groupes ont enregistré une augmentation supplémentaire des taux d'adoption des appels vidéo, des achats en ligne et des interactions avec les administrations par le biais de leurs sites web. Cependant, les hausses ont été plus marquées chez les personnes disposant d'un niveau d'instruction plus élevé. Mais pour ce qui est de l'utilisation de l'internet pour chercher des informations médicales, pour aucun des groupes on ne constate d'augmentation nette (voir également le graphique 3.7). Ces observations vont dans le sens de travaux récents fondés sur des données relatives aux recherches effectuées sur le web aux États-Unis, qui révèlent que les individus résidant dans des zones de codes postaux associés à des revenus moyens faibles affichent une hausse des recherches d'informations médicales en ligne moins importante que les individus vivant dans des zones plus aisées (Suh et al., 2022^[34]).

D'autres éléments montrent que la pandémie a accentué les fractures numériques. Les données d'une enquête réalisée en Allemagne, par exemple, conduisent à penser que les femmes, les jeunes, les personnes instruites et, surtout, les personnes confiantes dans leurs compétences numériques étaient beaucoup plus portées à indiquer que l'internet était devenu plus important à leurs yeux pendant la pandémie (Bürger et Grau, 2021^[36])¹⁰. Seuls 17,5 % des personnes ayant déclaré disposer d'une connaissance « très mauvaise » ou « assez mauvaise » des technologies numériques (près de trois Allemands sur dix) ont indiqué que l'internet était devenu plus important à leurs yeux pendant la pandémie. De même, les diplômés de l'enseignement supérieur étaient plus susceptibles d'indiquer avoir fait de nouveaux usages de l'internet durant la pandémie que les personnes disposant d'un niveau d'instruction plus faible (McClain et al., 2021^[36]), tandis que les enfants issus de ménages à bas revenu rencontraient davantage d'obstacles pour apprendre à distance que ceux issus de ménages à haut revenu (McClain et al., 2021^[36]).



Les technologies dépendantes des données se diffusent lentement

Les sections précédentes ont montré que l'utilisation efficace des technologies numériques devient un déterminant important de la capacité des personnes à prendre part à la société et tirer le meilleur parti des possibilités économiques. Si l'adoption des services en ligne a progressé rapidement, des disparités notables demeurent, souvent liées à des différences de niveaux d'éducation et de compétences. Dans la section suivante, on s'intéresse à l'adoption des technologies numériques par les entreprises.

La diffusion inégale des technologies numériques dépendantes des données pourrait saper la croissance de la productivité

La croissance soutenue à long terme dépend des gains de productivité, qui eux-mêmes nécessitent l'adoption de nouvelles technologies par les entreprises (Stokey, 2021_[37]). Or, malgré le rôle croissant que les technologies numériques jouent dans les entreprises, la croissance de la productivité du travail dans les pays de l'OCDE a marqué le pas après 2005 et ne s'est pas redressée depuis (Goldin et al., 2021_[38]). Si de nombreux facteurs peuvent expliquer ce ralentissement de la productivité, des études empiriques relèvent un fléchissement de la dynamique des entreprises (Calvino, Criscuolo et Verlhac, 2020_[39]) et un schéma pouvant correspondre à une moindre diffusion des technologies des entreprises à la frontière de la productivité vers les entreprises technologiquement moins avancées (Andrews, Criscuolo et Gal, 2016_[40]).

Bien que les secteurs à forte intensité numérique soient en moyenne plus dynamiques que les autres secteurs de l'économie – avec des taux d'entrée et de sortie d'entreprises et de réallocation d'emplois supérieurs –, ils sont également touchés par le ralentissement. En réalité, la dynamique des entreprises y a décliné plus rapidement que dans les autres secteurs (Calvino, Criscuolo et Verlhac, 2020_[39] ; Calvino et Criscuolo, 2019_[41]). Les entreprises peu productives, qui tendent à être plus jeunes et de plus petite taille que celles à la frontière de la productivité, éprouvent davantage de difficultés à combler leur retard dans les secteurs à forte intensité numérique (Corrado et al., 2021_[42] ; Berlingieri et al., 2020_[43]). Des travaux empiriques ont établi un lien entre, d'une part, l'augmentation de la dispersion de la productivité et la concentration des marchés, ainsi que la perte de dynamique des entreprises, et, d'autre part, l'essor du capital incorporel (dont font partie les logiciels et les données) (Corrado et al., 2021_[42] ; Crouzet et Eberly, 2019_[44]), l'association des systèmes logiciels propriétaires, des données et du capital organisationnel (Bessen, 2022_[45]), ou le rôle croissant des données dans l'économie (Akcigit et Ates, 2021_[46] ; Arrieta-Ibarra et al., 2018_[47]).

En complément de ces études, on examine dans la présente section les taux d'adoption de différentes technologies numériques, la rapidité à laquelle elles se diffusent dans les entreprises, et les schémas d'adoption en fonction des secteurs et de la taille des entreprises. On s'intéresse en particulier à trois groupes de technologies : l'infonuagique, qui ne peut fonctionner sans la connectivité et peut être considérée comme permettant un accès flexible à diverses autres TIC ; l'internet des objets (IdO), série d'innovations qui allie du matériel (des appareils équipés de capteurs et de circuits intégrés), des logiciels et la connectivité ; et l'analytique des données massives et l'IA, qui exigent des données utilisées comme intrants¹¹.

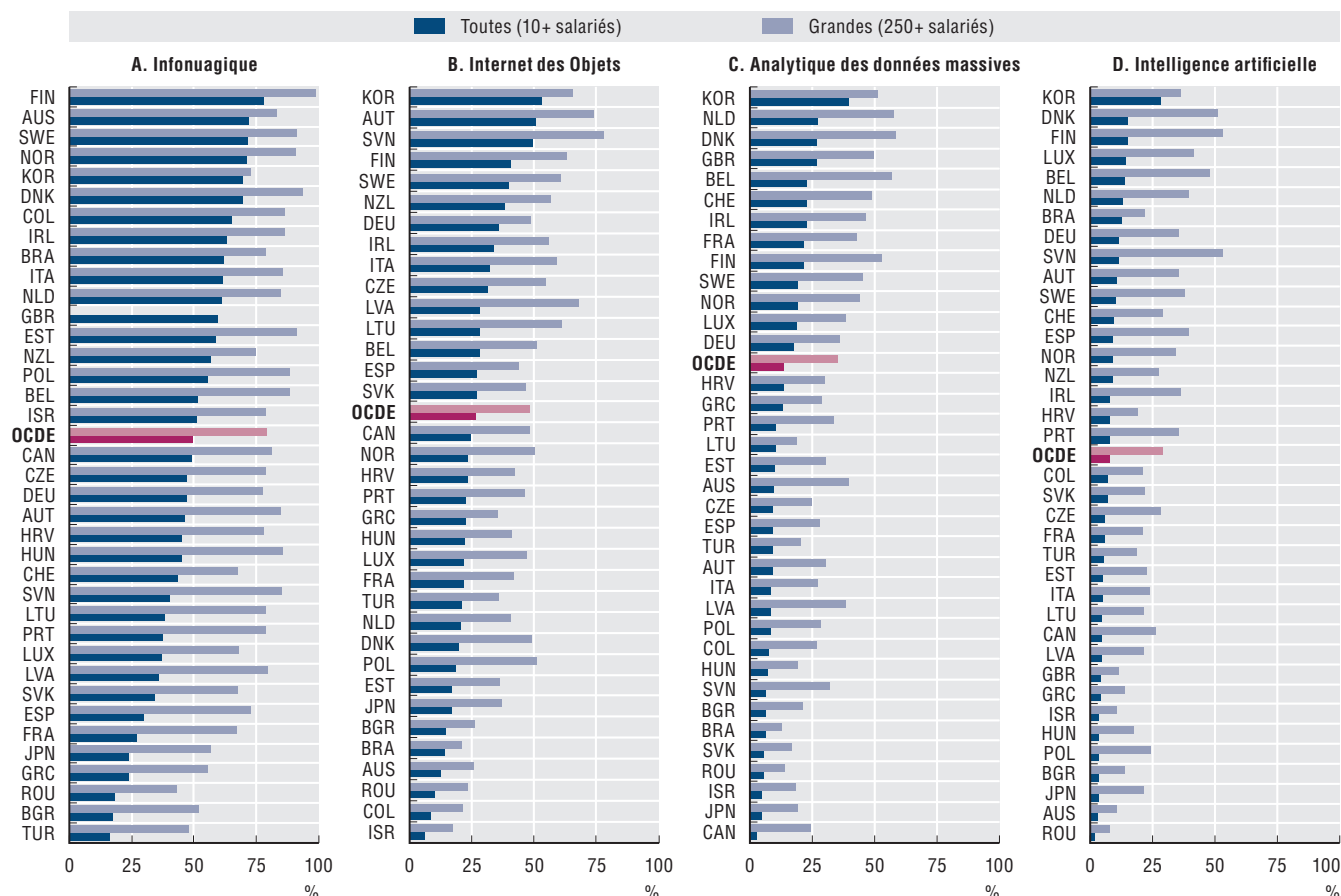
L'adoption de technologies dépendantes des données comme l'analytique des données massives et l'IA reste faible

Si des technologies comme l'infonuagique, l'IdO et les technologies à forte intensité de données ne sont pas nouvelles (leurs premières utilisations remontant dans certains cas à plusieurs décennies¹²), elles n'ont commencé à être exploitées sous leur forme moderne et à grande échelle qu'après 2005. Pour autant, leur adoption varie considérablement : dans la zone OCDE, l'infonuagique est déjà utilisée en moyenne par 49 % des entreprises d'au moins 10 salariés, les taux d'adoption allant de 16 % à 78 % (graphique 3.10). Par ailleurs, en moyenne 27 % des entreprises ont adopté les technologies reposant sur l'IdO, les taux se situant entre 6 % et 53 %.

En revanche, les taux d'adoption de l'analytique des données massives et de l'IA restent faibles. L'analytique des données massives a été adoptée en moyenne en 2022 par 14 % des entreprises comptant au moins 10 salariés, les taux allant de 3 %¹³ à 40 %. L'IA est utilisée par seulement 8 % des entreprises en moyenne en 2023, avec des taux d'adoption qui varient de 2 % à 28 %¹⁴. De plus, si les données du graphique 3.10 ne couvrent pas les États-Unis, celles de l'édition 2018 de l'*Annual Business Survey* du Census Bureau montrent que seuls 2.9 % des entreprises ont recours à l'apprentissage automatique, sous-domaine de l'IA fondé sur les données, et qu'à peine 0.7 % en testent la mise en œuvre (Zolas et al., 2020_[48]).

Graphique 3.10. L'adoption des technologies axées sur les données reste faible

Taux d'adoption de l'infonuagique, des technologies d'IdO, de l'analytique des données massives et de l'intelligence artificielle par les entreprises de 10 salariés ou plus, dans le secteur marchand (à l'exclusion des services financiers), 2023 (observation la plus récente)



Note : Voir la note de fin de chapitre 15.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023^[5]).

StatLink <https://stat.link/79xaup>

L'utilisation de l'infonuagique a progressé depuis 2015 dans presque tous les pays pour lesquels on dispose de données, avec souvent de fortes hausses. En Allemagne, en Australie, en Estonie, aux Pays-Bas et en Suède, les taux d'adoption ont bondi de 30 points ou plus. Dans les pays qui affichaient de faibles taux d'adoption en 2015 (à l'instar de la Bulgarie et de la Roumanie), ils ont souvent augmenté de plus de 5 points en seulement six ans.

Si l'on ne dispose de données pour un nombre suffisant de pays que pour 2021 et 2022, plusieurs éléments portent à croire que le déploiement de l'IdO a également progressé rapidement au cours des dernières années. Dans les pays de l'OCDE, le nombre d'abonnements pour les communications de machine à machine (M2M) sur les réseaux mobiles pour 100 habitants¹⁶ a augmenté de 19.3 % par an en moyenne entre 2010 et 2021 (tableau d'annexe 3.A.4). Le nombre d'abonnements M2M est évalué à partir du nombre de cartes SIM utilisées dans des machines et des appareils (voitures, compteurs intelligents ou électronique grand public) qui ne font pas partie d'abonnements souscrits par des consommateurs.

En revanche, à partir de 2020, le déploiement de l'IdO a été freiné par la pénurie de semi-conducteurs, composants essentiels à la production d'appareils d'IdO. Les données relatives aux cartes SIM M2M montrent que le début de la pénurie mondiale de semi-conducteurs, en 2020, est allée de pair avec un ralentissement momentané de la croissance des abonnements M2M par habitant, qui s'est établie à environ 10.6 % en 2020, un niveau sensiblement inférieur à la moyenne observée au cours de la période 2010-19 (tableau d'annexe 3.A.4).



Ces chiffres concordent avec les projections publiées par IoT Analytics, une entreprise spécialisée dans les études de marché (IoT Analytics, 2020^[50]). Celle-ci estime que le nombre d'appareils connectés dans le cadre de l'IdO (à l'exclusion des PC, ordinateurs portables, téléphones fixes, téléphones mobiles et tablettes, et des appareils unidirectionnels comme ceux basés sur la technologie RFID) est passé de 3.6 milliards en 2015 à 11.3 milliards en 2020, soit un taux de croissance annuel de 26 %, mais qu'avec la pénurie de semi-conducteurs, la progression du déploiement des appareils d'IdO n'a été que de 8 % entre 2020 et 2021.

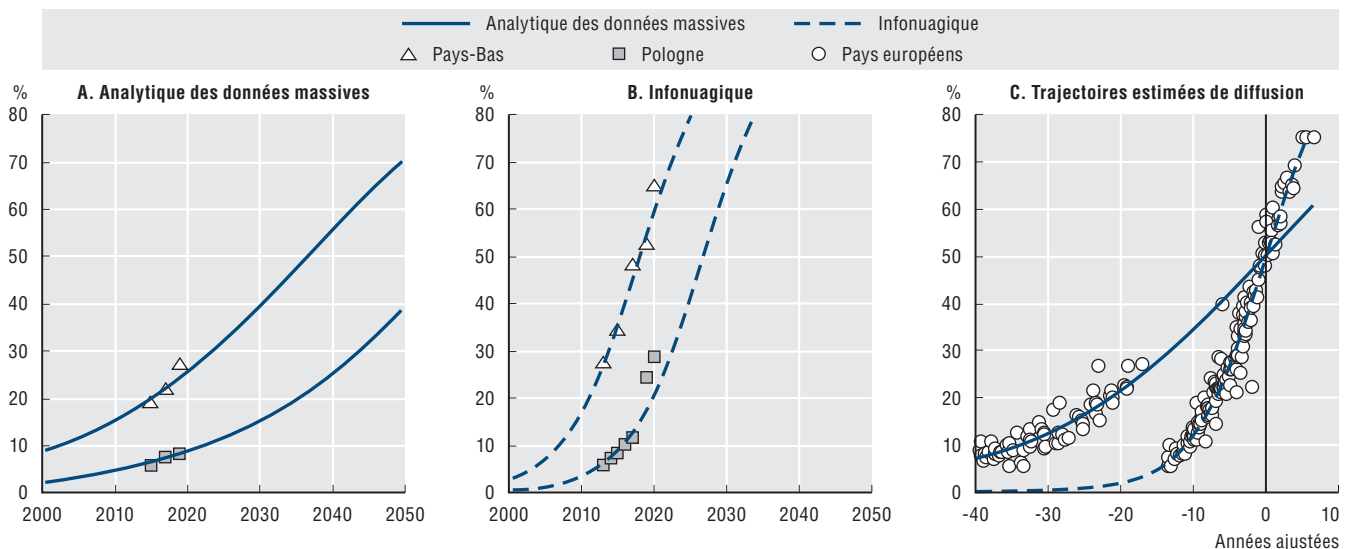
La diffusion de l'infonuagique a été trois fois plus rapide que celle de l'analytique des données massives

Les taux d'adoption de l'analytique des données massives et de l'IA restent certes inférieurs à ceux de l'infonuagique et des technologies d'IdO, mais il convient de garder à l'esprit qu'il s'agit de technologies plus récentes. À quel rythme se diffusent-elles ? Observe-t-on des différences entre les technologies qui expliqueraient pourquoi la croissance de la productivité globale est restée faible ?

Lorsque l'on compare les évolutions dans le temps de technologies à des degrés d'adoption divers, il importe de tenir compte des stades du processus de diffusion. Les taux d'adoption tendent à suivre une trajectoire en S au fil du temps (Griliches, 1957^[51] ; Mansfield, 1961^[52]), ce qui signifie que le rythme de diffusion relatif, ou le taux de croissance de la part des adoptants, est d'abord élevé, mais se rapproche de zéro à mesure que l'adoption tend vers 100 %. Les taux d'adoption en valeur absolue commencent quant à eux par augmenter, puis diminuent. Par conséquent, pour comparer la rapidité à laquelle de nouvelles technologies se diffusent, il convient de tenir compte du *degré* d'adoption. Pour ce faire, on peut utiliser des modèles de croissance logistique qui sont une approximation du schéma décrit plus haut. Le graphique 3.11 illustre des fonctions logistiques ajustées sur les données relatives à l'adoption de l'analytique des données massives et de l'infonuagique, dans respectivement 25 et 26 pays européens de l'OCDE¹⁷. Ces fonctions varient selon les pays en termes de position, mais pas de forme. Autrement dit, on part de l'hypothèse que ces technologies se diffusent au même rythme dans les différents pays pour un niveau d'adoption donné¹⁸.

Graphique 3.11. La diffusion de l'infonuagique a été trois fois plus rapide que celle de l'analytique des données massives

Taux d'adoption de l'analytique des données massives et de l'infonuagique par les entreprises, 2000-50



Notes : Graphique élaboré d'après les colonnes (2) et (6) du tableau d'annexe 3.A.5. Voir également les notes relatives au tableau.

Source : Calculs des auteurs d'après des données d'Eurostat (2022^[53]).

StatLink <https://stat.link/34tkqd>

Prenant l'exemple de deux pays, les deux premières parties montrent que l'adoption des deux technologies est supérieure aux Pays-Bas. Toutefois, en concordance avec un ralentissement du rythme de diffusion relatif, le pourcentage relatif de variation était généralement *supérieur* en Pologne, tant pour l'analytique des données massives que pour l'infonuagique, tandis que la variation en points y était *inférieure*. L'adoption de l'analytique des données massives par les entreprises a augmenté de 8.2 points aux Pays-Bas entre 2015 et 2019, passant de 19 % à 27 %, soit une variation relative de 42.8 %. En Pologne, la hausse relative était encore supérieure, à 43.5 %, alors que la variation en valeur absolue était sensiblement inférieure (2.6 points).

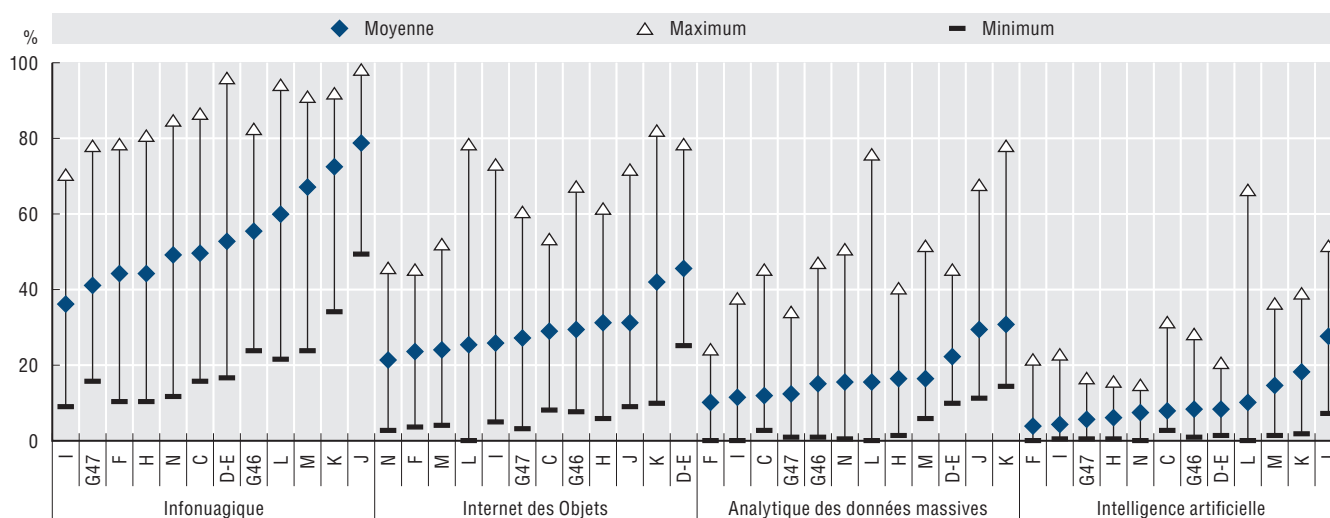
La partie (C) du graphique 3.11 donne à voir l'ensemble des données pour les pays européens corrigées de la variable « année » de sorte que les trajectoires de diffusion propres aux pays soient alignées et se croisent à l'« année corrigée » zéro et au taux d'adoption de 50 %¹⁹. Les années corrigées peuvent être appréhendées comme les années qui se sont écoulées depuis que 50 % des entreprises ont adopté une technologie particulière. Le graphique illustre la grande disparité des rythmes de diffusion entre les deux technologies en Europe. D'après ces estimations, une augmentation des taux d'adoption de 5 % à 50 % prend environ 12 ans en moyenne pour l'infonuagique. La même progression de l'adoption de l'analytique des données massives prend 36 ans. En d'autres termes, l'infonuagique s'est diffusée trois fois plus rapidement que l'analytique des données massives²⁰.

L'adoption de l'IA se concentre dans le secteur des services d'information et de communication

L'adoption généralisée de l'infonuagique dans les pays et les secteurs conditionne sa diffusion rapide. En utilisant la quatrième révision de la Classification internationale type, par industrie, de toutes les branches d'activité économique (CITI), il est possible d'identifier les secteurs ayant les taux d'adoption les plus élevés et les plus bas. Les plus élevés sont généralement observés dans trois principaux secteurs : ceux de l'information et de la communication (Section J), des activités financières et d'assurances (Section K), et des autres activités professionnelles (Section M). Les taux d'adoption les plus faibles se trouvent dans des secteurs tels que celui de l'hébergement et de la restauration (section I) et du commerce de détail (Classe G47) (graphique 3.12)²¹. Néanmoins, même dans ces secteurs, les taux d'adoption atteignent 60 % dans certaines économies, ce qui tend à montrer que l'infonuagique est utile dans des environnements très différents et facile à mettre en œuvre.

Graphique 3.12. L'adoption de l'infonuagique et des technologies d'IdO est homogène dans les différents secteurs

Adoption des technologies numériques par secteur (codes de la CITI), entreprises de dix salariés ou plus dans le secteur marchand, 2023 (ou l'année la plus récente)



Note : Voir la note de fin de chapitre 21.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023_[5]).

StatLink <https://stat.link/zlu174>

L'adoption des technologies d'IdO est bien plus avancée dans le secteur des activités financières et d'assurances (Section K) ainsi que dans celui des services d'utilité publique (Sections D-E), où en moyenne près de la moitié de l'ensemble des entreprises y ont recours (OCDE, 2023_[49]). À cette exception près, leur adoption est très homogène dans les différents secteurs, allant de 21 % en moyenne dans le secteur de l'administration et des activités d'appui administratif (Section N) à 31 % dans celui du transport et de l'entreposage (Section H). Comme on peut s'y attendre, elle est légèrement supérieure à la moyenne dans les secteurs où l'on produit et transporte des objets physiques (transport et entreposage, fabrication, commerce de gros et de détail) et inférieure à la moyenne dans les secteurs des services en col blanc, comme ceux des activités immobilières, et de l'administration et des activités d'appui administratif.

Les données abondent dans les secteurs des services d'information et de communication, des services d'utilité publique et de la finance, qui a une longue tradition d'innovation liée aux technologies fondées sur les données (les évaluations de solvabilité et les robots conseillers en sont des exemples). Les entreprises de ces secteurs affichent donc en moyenne les taux d'adoption de l'analytique des données massives les plus élevés. L'adoption de l'IA reste relativement concentrée



dans le secteur des services d'information et de communication, où en moyenne près de 28 % des entreprises l'utilisent. En dehors de ce secteur, les taux d'adoption sont élevés dans ceux des services en col blanc comme la finance et les activités professionnelles (à respectivement 18 % et 15 %). Inversement, les taux d'adoption sont faibles dans les secteurs de la construction et de l'hébergement et la restauration (tous les deux à 4 %). On observe une variation particulièrement importante dans l'utilisation de l'IA parmi les entreprises du secteur immobilier, avec des taux allant de 0 % à 66 % selon les pays. De façon générale, cette concentration relative de l'IA dans des secteurs spécifiques transparaît également dans d'autres travaux de recherche²².

La taille des entreprises est un déterminant plus important de l'adoption des technologies dépendantes des données et des logiciels que de celle de l'IdO ou de l'infonuagique

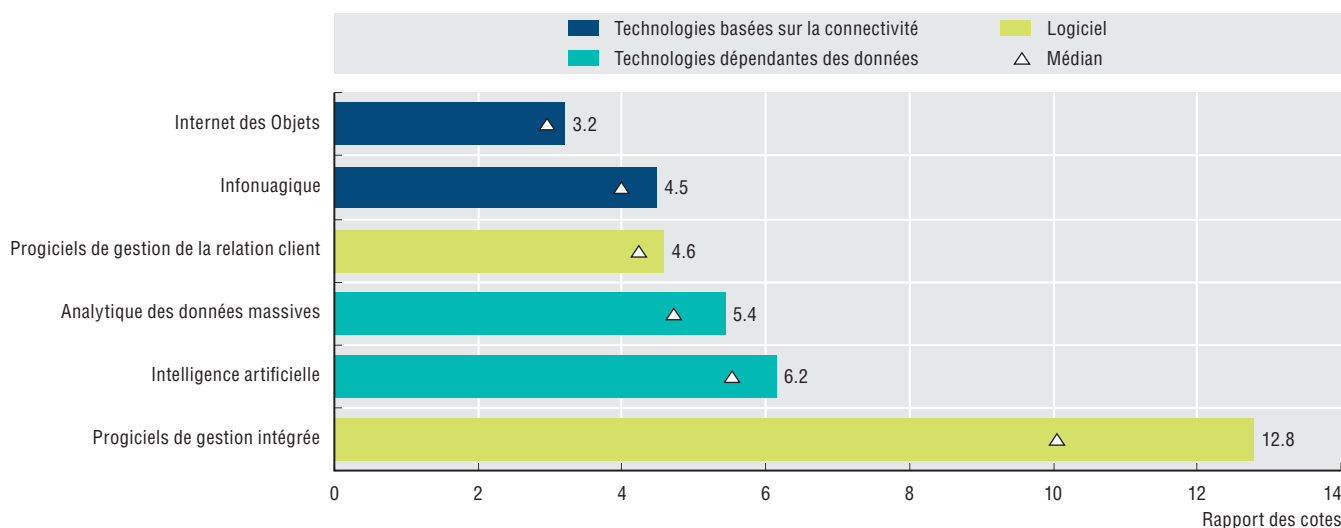
Les entreprises de petite taille, en particulier les jeunes structures, jouent depuis toujours un rôle essentiel dans l'innovation de produit et la croissance de la productivité. Or, pour ce faire, elles doivent avoir accès à des technologies récentes. Existe-t-il des différences entre les petites, les moyennes et les grandes entreprises en termes d'adoption des technologies numériques récentes ?

Dans les pays, les entreprises de plus grande taille tendent à être plus susceptibles d'adopter les nouvelles technologies, dont l'infonuagique, les technologies d'IdO, l'analytique des données massives et l'intelligence artificielle. Ce constat ne permet pas toutefois de déterminer en quoi la taille influe sur leur adoption, l'examen des écarts en valeur absolue ou relative pouvant se révéler trompeur. Au Canada, par exemple, l'écart de taux d'adoption en valeur absolue entre les grandes et les petites entreprises est de 35 points pour l'infonuagique, mais seulement de 23 points pour l'analytique des données massives. En revanche, les grandes entreprises sont 15 fois plus susceptibles d'utiliser l'analytique des données massives que les petites, et seulement 1.7 fois plus dans le cas de l'infonuagique.

Comme pour l'adoption des services en ligne, mieux vaut comparer les rapports de probabilité, qui, si l'on se fonde sur des hypothèses raisonnables sur le processus de diffusion, ne dépendent pas du degré d'adoption²³. Les grandes entreprises sont trois et quatre fois plus susceptibles d'adopter les technologies de l'IdO et l'informatique en nuage, respectivement, que les petites entreprises (graphique 3.13). Toutefois, pour l'analytique des données massives et pour l'IA, les grandes le sont respectivement plus de cinq et six fois plus que les petites²⁴. Les premières sont en outre plus de 12 fois plus susceptibles d'utiliser des progiciels de gestion intégrée que les secondes. Par conséquent, si la taille des entreprises est un déterminant plus important de l'adoption des technologies dépendantes des données que de celle des technologies d'IdO ou de l'infonuagique, elle reste moins importante que dans le cas de solutions logicielles utilisées depuis de nombreuses années.

Graphique 3.13. La taille des entreprises est un déterminant plus important de l'adoption des technologies dépendantes des données et des logiciels que de celle des technologies d'IdO ou de l'infonuagique

Rapports moyens de probabilité d'adoption dans les grandes et les petites entreprises, 2013-23



Note : Les rapports de probabilité sont obtenus en divisant la probabilité que les grandes entreprises (de 250 salariés ou plus) adoptent une technologie spécifique par la probabilité que les petites entreprises (comptant entre 10 et 49 salariés) l'adoptent.

Source : Calculs des auteurs d'après OCDE (2023^[5]) et Eurostat (2024^[95]).

StatLink <https://stat.link/pwxnfc>

La diffusion plus lente des technologies dépendantes des données pourrait être liée à des économies d'échelle, des tensions financières ou un manque d'accès aux données

Les résultats présentés plus haut laissent à penser qu'une caractéristique propre aux actifs incorporels tels que les données et les logiciels les rend moins sujets à une diffusion rapide. Quels facteurs expliquent ces écarts de rythmes de diffusion et d'adoption entre les petites et les grandes entreprises ? Trois facteurs possibles sont examinés ci-après.

Premièrement, la structure de coûts associée à l'utilisation d'une technologie est importante. L'hypothèse a été émise que les entreprises peuvent recourir aux solutions infonuagiques pour réduire les coûts fixes, en transférant les dépenses d'équipement vers des dépenses d'exploitation (OCDE, 2014^[54]). Par conséquent, les coûts liés à l'adoption de l'infonuagique pourraient être comparativement faibles pour les petites et moyennes entreprises et les start-ups, qui rencontrent plus souvent des difficultés d'accès aux financements (Holton et McCann, 2021^[55]).

En revanche, les technologies dépendantes des données et les logiciels se caractérisent par de vastes économies d'échelle, une combinaison de coûts fixes élevés et de coûts par unité supplémentaire faibles (Haskel et Westlake, 2018^[56] ; Shapiro et Varian, 1999^[57]). Les coûts fixes sont élevés par rapport à d'autres technologies puisque l'IA et l'analytique des données nécessitent des investissements complémentaires, notamment pour rassembler les données pertinentes à partir de différents silos et modifier les processus organisationnels (Nolan, 2021^[58]). Dans le même temps, les coûts marginaux tendent à être réduits.

Par exemple, si un détaillant collecte des données auprès de ses magasins pour prévoir la demande, les coûts liés à la production d'une prévision pour un magasin supplémentaire sont très faibles. L'ajout de puissance de calcul et d'espace de stockage de données est peu onéreux – notamment grâce à l'infonuagique – et les grands ensembles de données n'exigent guère de faire appel à plus de scientifiques des données pour les analyser. En réalité, l'ajout de données issues de sites supplémentaires permet souvent d'améliorer les prévisions pour des magasins similaires implantés sur différents sites. Par conséquent, les coûts fixes et l'échelle des activités sont les variables à utiliser pour étudier l'adoption de technologies présentant des coûts marginaux nuls. Les entreprises qui opèrent à plus grande échelle affichent des coûts unitaires plus faibles (ou tirent des avantages plus élevés par rapport aux coûts fixes) et sont donc plus susceptibles d'adopter les technologies. Il convient de souligner que ce raisonnement vaut à la fois pour les logiciels (la technologie) et pour les données (les intrants de l'IA et de l'analytique des données).

Deuxièmement, du fait des coûts fixes élevés, l'accès au financement s'avère particulièrement important ; or, les entreprises jeunes et de petite taille éprouvent généralement davantage de difficultés à obtenir des fonds que les entreprises plus grandes et bien établies (Holton et McCann, 2021^[55]). Sans compter que les actifs incorporels tels que les données et les logiciels (produits en interne) sont souvent difficiles à évaluer, notamment parce que leur valeur est très incertaine et souvent étroitement liée à leur utilisation. Les banques sont donc moins portées à les accepter en garantie (Demmou et Franco, 2021^[59] ; Demmou, Franco et Stefanescu, 2020^[60]). Les tensions financières souvent préjudiciables aux entreprises jeunes et de petite taille tendent par conséquent à être exacerbées lorsqu'il s'agit de financer des technologies numériques fondées sur des actifs incorporels.

Troisièmement, les entreprises de grande envergure pourraient être mieux à même d'accéder aux données, qui proviennent rarement des marchés mais sont un sous-produit de la production économique (Spiekermann, 2019^[64] ; Cosgrove et Kuo, 2020^[63] ; Koutroumpis, Leiponen et Thomas, 2020^[62] ; OCDE, 2022^[61]). Les grandes entreprises tendent à produire plus d'unités et à compter davantage de clients et de fournisseurs, autant d'éléments qui constituent des sources de données potentielles. En d'autres termes, plus une entreprise gagne en échelle, plus elle a accès à des volumes importants de données.

Le manque d'accès à des données externes expliquerait à la fois la lente diffusion et la moindre adoption de technologies dans les petites entreprises. Plusieurs rapports soulignent l'importance de l'accès aux données, en particulier dans le contexte de la concurrence sur les marchés numériques (Furman et al., 2019^[65]). En revanche, peu d'études à ce jour examinent l'impact de l'accès aux données sur l'adoption des technologies numériques ou sur d'autres éléments pertinents. Le rapport publié par Bessen et al. (2022^[66]) fait exception : les auteurs y montrent que lorsqu'une entreprise peut empêcher d'autres acteurs d'utiliser des données auxquelles elle a accès, elle a une plus grande probabilité d'obtenir un financement en capital-risque.

Une large adoption de l'IA pourrait exiger davantage d'expérimentation et de co-invention

Enfin, la large adoption de l'IA pourrait nécessiter davantage d'expérimentation et de co-invention. L'IA a souvent été appréhendée comme une technologie générique (Cockburn, Henderson et Stern, 2018^[67]), expression utilisée pour décrire une nouvelle méthode de production et d'invention suffisamment importante pour avoir un impact global



durable (Jovanovic et Rousseau, 2005^[68]). Pour d'autres technologies génériques comme l'électricité ou l'informatique, un intervalle important s'est écoulé entre la démonstration de leur potentiel et leur adoption à grande échelle. Par exemple, si le potentiel commercial de l'électricité a été démontré aux alentours de 1880, il a fallu attendre quatre décennies avant que l'adoption de la technologie transparaisse dans les statistiques économiques (David, 1989^[69]). De même, l'ENIAC, premier calculateur numérique électronique programmable à usage général, a été construit en 1945. Pourtant, en 1984, soit près de 40 ans plus tard, seul un travailleur sur cinq aux États-Unis utilisait un ordinateur au travail (U.S. Census Bureau et Kominski, 1988^[70]) et les gains de productivité liés à l'informatique n'ont été visibles qu'à partir de la moitié des années 90 (Stiroh, 2002^[71]).

Selon Agrawal, Gans et Goldfarb (2022^[72]), l'exploitation du potentiel d'une technologie générique suppose de passer de son déploiement dans le cadre de solutions ponctuelles – solutions qui sont relativement faciles à mettre en œuvre mais ont des retombées limitées – à des solutions globales exigeant des efforts importants d'expérimentation et de co-invention, ainsi que des changements systémiques. Les solutions ponctuelles qui utilisent l'IA comprennent un éventail beaucoup plus large de tâches dans le secteur financier, de la détection des fraudes à l'évaluation des risques de crédit. L'adoption de l'IA pour ce type de tâches a été relativement aisée puisque les ensembles de données étaient déjà en place et la prévision était au cœur du processus.

Il a fallu des solutions globales pour que les gains de productivité découlant d'autres technologies génériques se concrétisent. En d'autres termes, les entrepreneurs ont dû déterminer quels types de systèmes seraient à même de tirer le meilleur parti de la nouvelle technologie avant de pouvoir la déployer à grande échelle. Or, ce processus exige des efforts notables d'expérimentation et de co-invention, ainsi qu'une évolution des rôles et la formation de la main-d'œuvre. Tous ces aspects sont coûteux, non seulement en termes de financement, mais aussi parce qu'ils se heurtent à une résistance au changement au niveau des opérations existantes. Il est possible que les technologies fondées sur des données – en particulier l'IA – se trouvent à un stade comparable à celui de l'électricité à la fin du 19^e siècle, ou de l'informatique dans les années 70. Leur potentiel a été largement démontré. Cependant, l'introduction de solutions globales susceptibles de favoriser la croissance de la productivité pourrait exiger davantage d'expérimentation et d'innovation (Juhász, Squicciarini et Voigtländer, 2020^[73]).

Il est essentiel de favoriser une adoption et une diffusion équitables des technologies numériques pour combler les fractures numériques et dynamiser la croissance de la productivité

On a montré dans ce chapitre que l'adoption des technologies numériques par les individus se poursuit à un rythme rapide, mais qu'elle s'accompagne également de défis et fait notamment peser des risques sur l'égalité des chances et l'inclusion. Le tableau est plus contrasté au niveau des entreprises, certaines innovations, à l'instar de l'infonuagique et des technologies d'IdO, se diffusant beaucoup plus rapidement que d'autres, à l'image de l'analytique des données massives, en particulier au sein des petites et moyennes entreprises. Si ces conclusions peuvent renvoyer à un large éventail de domaines d'action, cinq d'entre eux ressortent clairement.

Premièrement, les fractures numériques les plus béantes – entre les pays et en leur sein – sont souvent liées à l'éducation et aux compétences. Il est donc nécessaire de concevoir des politiques de l'éducation qui préparent mieux les individus au monde numérique de demain. Les systèmes éducatifs devraient certes les aider à utiliser efficacement les technologies numériques existantes. Toutefois, pour mieux les préparer aux progrès technologiques à venir, ils devraient aussi mettre l'accent sur les compétences métacognitives nécessaires à l'apprentissage tout au long de la vie. Il s'agirait de la capacité d'apprendre à apprendre et de réfléchir efficacement à ses propres connaissances, compétences, attitudes et valeurs) (OCDE, 2018^[74]).

Deuxièmement, l'adoption des services d'administration en ligne est moins avancée que celle d'autres services en ligne comme les services bancaires, ce qui laisse à penser que leur utilisation peut demeurer complexe et que les administrations continuent d'éprouver des difficultés à fournir des services publics qui exploitent le potentiel des technologies numériques (Welby et Tan, 2022^[75]). Les administrations devraient montrer l'exemple en offrant des services en ligne inclusifs, centrés sur l'utilisateur.

Troisièmement, à mesure qu'une pression croissante s'exerce sur les prestataires de services pour qu'ils transfèrent leurs activités en ligne, il est nécessaire d'accompagner ceux qui risquent de se retrouver dépassés. Par exemple, les taux de non-adoption demeurent élevés parmi les personnes âgées, en particulier les femmes et les moins instruits, et pourraient continuer d'augmenter dans les années à venir. Les pouvoirs publics devront trouver un juste équilibre afin tout à la fois d'investir dans leurs compétences et de veiller à maintenir un appui hors ligne suffisant pour leur permettre d'accéder aux services essentiels aussi longtemps que nécessaire.



3. DIFFUSION DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES ET DONNÉES

Quatrièmement, l'adoption des technologies numériques tend à être plus faible dans les entreprises de petite taille ; c'est en particulier le cas pour les technologies associées à des actifs incorporels comme les données et les logiciels. Des politiques judicieuses ciblées viseront à offrir des conditions équitables aux entreprises jeunes et de petite taille en facilitant l'accès à des intrants clés, notamment aux financements.

Enfin, l'adoption des technologies dépendantes des données suppose un accès aux données pertinentes. Les décideurs disposent de deux leviers correspondant à différentes sources de données : favoriser le partage et la réutilisation des données collectées par les entités privées, et élargir l'accès aux données détenues par le secteur public et les possibilités d'utilisation y afférentes. S'agissant des premières, on prête depuis peu une grande attention au concept de portabilité des données, c'est-à-dire à la possibilité pour les utilisateurs de demander qu'un détenteur leur transfère (ou transfère vers une tierce partie) les données les concernant (OCDE, 2021^[76], 2021^[77]).



Annexe 3.A. Tableaux de régression

Tableau d'annexe 3.A.1. Effet des niveaux d'instruction, de compétences TIC et de revenu sur l'adoption des services en ligne

Régressions par les moindres carrés ordinaires (MCO), internautes adultes (âgés de 16 à 74 ans), 2015-19 (observation la plus récente)

Variable dép. : part des internautes adultes menant des activités en ligne	Part de la population adulte diplômée de l'enseignement supérieur		Part de la population adulte disposant de compétences TIC		Log PIB par habitant		Statistiques de régression	
	Estimation	Erreur type	Estimation	Erreur type	Estimation	Erreur type	R-carré	Obs.
Consultation de sites web/interactions avec les sites web d'admin. (12 derniers mois)	0.99**	(0.41)	0.76	(0.59)	-0.02	(0.15)	0.60	22
Recherche d'informations sur des biens et des services	0.47**	(0.20)	0.90***	(0.26)	-0.06	(0.11)	0.51	24
Réseaux sociaux	0.42*	(0.22)	0.12	(0.36)	-0.17*	(0.09)	0.15	27
Éducation en ligne	0.40***	(0.13)	0.01	(0.12)	0.02	(0.03)	0.66	24
Services bancaires en ligne	0.28	(0.28)	1.23***	(0.38)	0.14	(0.13)	0.69	27
Recherche d'emploi ou envoi d'une candidature à un emploi	0.26	(0.17)	0.22	(0.26)	-0.07	(0.06)	0.13	25
Participation à des réseaux professionnels	0.20	(0.16)	0.41**	(0.19)	0.05	(0.04)	0.60	22
Achats en ligne (12 derniers mois)	0.04	(0.18)	1.16***	(0.19)	0.13*	(0.07)	0.82	24
Appels téléphoniques/vidéo	-0.03	(0.18)	-0.33	(0.35)	-0.04	(0.10)	0.18	26
Recherche d'informations médicales	-0.10	(0.26)	0.39	(0.33)	-0.05	(0.11)	0.05	26
Jeux/streaming/téléchargement de contenus	-0.18	(0.49)	-0.15	(0.31)	0.12	(0.11)	0.05	25

Notes : Comment lire ce tableau : une estimation de 0.99 indique qu'une augmentation d'un point de la part de la population adulte diplômée de l'enseignement supérieur va de pair avec une hausse de 0.99 point de la part des internautes adultes utilisant les sites web des administrations. Les erreurs types robustes sont indiquées entre parenthèses. *, ** et *** dénotent un résultat statistiquement significatif aux seuils respectifs de 10 %, 5 % et 1 %. Toutes les régressions incluent une constante. Les variables explicatives sont 1) la part de la population adulte diplômée de l'enseignement supérieur (2015), 2) la part de la population adulte disposant de compétences élémentaires en TIC (2011-18) et 3) le PIB par habitant (2015, mesuré à prix et parités de pouvoir d'achat constants). La part de la population disposant de compétences élémentaires en TIC s'entend de la part des personnes ayant une expérience de l'informatique et n'ayant pas échoué au test de base sur les TIC de l'Enquête sur les compétences des adultes de l'OCDE (OCDE, 2016_[9]). Dans le cas de l'éducation en ligne, une observation du Mexique a été exclue car aberrante. Dans la mesure où la pandémie de COVID-19 a influé sur les taux d'adoption au moins temporairement (voir ci-après), on s'est intéressé ici aux taux d'adoption avant qu'elle ne se déclare.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023_[5], 2016_[9], 2023_[10], 2023_[11]).

Tableau d'annexe 3.A.2. Effet de la pandémie de COVID-19 sur l'adoption des services en ligne

Régressions par MCO avec effets fixes, adultes âgés de 16 à 74 ans, 2016-23

	Internet : 3 derniers mois	Internet : quotidien	Appels vidéo	Informations médicales	Achats en ligne	Banque en ligne	Admin. : toutes interactions	Admin. : obtention d'informations	Admin. : envoi d'informations
Année	1.63*** (0.25)	2.56*** (0.30)	3.70*** (0.35)	1.24*** (0.39)	2.37*** (0.26)	2.67*** (0.34)	1.81*** (0.40)	1.08** (0.44)	2.67*** (0.38)
COVID-19 (=1 en 2020-22)	0.58 (0.61)	0.23 (0.58)	8.58*** (1.39)	1.72* (0.96)	4.36*** (0.61)	0.58 (0.48)	2.10** (0.97)	2.10 (1.47)	0.97 (1.32)
R-carré	0.92	0.92	0.87	0.86	0.97	0.97	0.98	0.96	0.97
Pays	37	36	34	36	35	36	33	31	34
Observations	223	219	200	214	217	215	168	167	174

Notes : Comment lire ce tableau : une estimation de 3.70 sur la variable année (colonne Appels vidéo) indique que l'adoption progresse en moyenne de 3.7 points par an. Une estimation de 8.58 sur la variable COVID-19 signifie que l'adoption a augmenté de 8.6 points supplémentaires en 2020. L'estimation de la variation en 2020 correspond à la somme des deux coefficients, soit 12.3 points. Les erreurs types robustes regroupées au niveau des pays sont indiquées entre parenthèses. *, ** et *** dénotent un résultat statistiquement significatif aux seuils respectifs de 10 %, 5 % et 1 %. Toutes les régressions incluent des effets fixes par pays. Sont couverts les pays de l'OCDE, le Brésil, la Bulgarie, la Croatie et la Roumanie.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023_[5]).

Tableau d'annexe 3.A.3. Effet de la pandémie de COVID-19 sur l'adoption des services en ligne selon le niveau d'instruction

Régressions par MCO avec effets fixes, adultes âgés de 16 à 74 ans, 2016-23

Niveau d'instruction :	Appels téléphoniques/vidéo			Recherche d'infos médicales			Achats en ligne			Interactions avec admin.		
	Faible	Moyen	Élevé	Faible	Moyen	Élevé	Faible	Moyen	Élevé	Faible	Moyen	Élevé
Année	4.85*** (0.46)	5.06*** (0.52)	4.34*** (0.53)	2.14*** (0.33)	1.27** (0.45)	0.59 (0.47)	2.90*** (0.35)	2.99*** (0.31)	2.55*** (0.36)	1.97*** (0.51)	1.72*** (0.48)	1.09** (0.44)
COVID-19 (=1 en 2020-22)	5.75*** (1.52)	6.13*** (1.76)	8.18*** (1.80)	-1.00 (1.42)	0.94 (1.38)	1.84 (1.59)	1.85 (1.15)	4.52*** (1.06)	4.06*** (1.34)	2.10 (1.44)	1.98 (1.43)	2.84** (1.30)
R-carré	0.91	0.86	0.83	0.95	0.91	0.78	0.98	0.96	0.88	0.97	0.98	0.95
Pays/obs.	19/133			19/133			20/140			18/108		

Notes : Comment lire ce tableau : une estimation de 4.85 sur la variable année indique que la part des adultes qui utilisent l'internet pour des appels vidéo progresse en moyenne de 4.85 points par an. Une estimation de 5.75 sur la variable COVID-19 signifie qu'en 2020, l'adoption a augmenté ponctuellement de 5.75 points supplémentaires en moyenne. Les erreurs types robustes regroupées au niveau des pays sont indiquées entre parenthèses. *, ** et *** dénotent un résultat statistiquement significatif aux seuils respectifs de 10 %, 5 % et 1 %. Toutes les régressions incluent un ensemble complet d'effets fixes par pays.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2023_[5]).

Tableau d'annexe 3.A.4. Effet de la pénurie de semi-conducteurs sur les cartes SIM M2M

Régressions par MCO avec effets fixes, 2010-21

	Log abonnements M2M pour 100 habitants			Log abonnements M2M	
	Tous	Hors Islande	Hors Islande	Tous	Hors Islande
Année	0.193*** (0.018)	0.192*** (0.019)		0.198*** (0.018)	0.197*** (0.019)
Pénurie en 2020-21 (=1 en 2020-21)	-0.087 (0.068)	-0.135*** (0.048)	-0.138*** (0.041)	-0.088 (0.069)	-0.136*** (0.048)
Tendances linéaires propres à des pays ?	Oui				
R-carré	0.890	0.907	0.984	0.967	0.969
Pays/observations	34/339	33/328	33/328	34/339	33/328

Notes : Comment lire ce tableau : une estimation de 0.193 sur la variable année indique que le nombre d'abonnements M2M pour 100 habitants a progressé d'environ 19.3 % par an en moyenne. Une estimation de -0.087 sur la variable pénurie traduit une réduction d'environ 8.7 points de ce taux de croissance en 2020. Les erreurs types robustes regroupées au niveau des pays sont indiquées entre parenthèses. *, ** et *** dénotent un résultat statistiquement significatif aux seuils respectifs de 10 %, 5 % et 1 %. Pour plus d'informations sur les données, voir également la note de fin de chapitre 16.

Source : Calculs des auteurs d'après des données de l'OCDE (2022_[78]).

Tableau d'annexe 3.A.5. Diffusion de l'analytique des données massives et de l'infonuagique

Régressions par MCO avec effets fixes, pays européens, 2015-19 et 2013-20

	Analytique des données massives			Infonuagique		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Tous (2015-19)	OCDE (2015-19)	Tous (2015-17)	OCDE (2015-17)	Tous (2013-20)	OCDE (2013-20)
Année	0.061* (0.033)	0.064* (0.035)	0.074 (0.045)	0.068 (0.053)	0.194*** (0.012)	0.196*** (0.010)
R-carré	0.825	0.800	0.918	0.881	0.952	0.958
Pays/obs.	29/82	24/67	29/53	24/43	34/199	25/151

Notes : Comment lire ce tableau : la variable dépendante correspond au taux d'adoption après transformation logit, soit, où correspond au taux d'adoption dans le pays pour l'année. Une estimation de 0.061 indique que l'adoption augmente d'environ 6.1 % si le taux d'adoption est proche de zéro. Le pourcentage d'augmentation est divisé par deux (3.05 %) si le taux d'adoption atteint 50 % et se rapproche de zéro lorsque le taux d'adoption tend vers 100 %. Les erreurs types robustes regroupées au niveau des pays sont indiquées entre parenthèses. *, ** et *** dénotent un résultat statistiquement significatif aux seuils respectifs de 10 %, 5 % et 1 %. Toutes les régressions incluent un ensemble complet d'effets fixes par pays.

Source : Calculs des auteurs d'après des données d'Eurostat (2022_[53]).



Références

- Adrjan, P. et al. (2021), « Will it stay or will it go? Analysing developments in telework during COVID-19 using online job postings data », *OECD Productivity Working Papers*, n° 30, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/aed3816e-en>. [25]
- Agrawal, A., J. Gans et A. Goldfarb (2022), *Power and prediction: The disruptive economics of artificial intelligence*, Harvard Business Review Press, Brighton, MA. [72]
- Akcigit, U. et S. Ates (2021), « Ten facts on declining business dynamism and lessons from endogenous growth theory », *American Economic Journal : Macroeconomics*, Vol. 13/1, pp. 257-298, <http://dx.doi.org/10.1257/mac.20180449>. [46]
- Aksoy, C. et al. (2022), « Working from home around the world », *Document de travail*, n° 30446, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w30446>. [19]
- Andrews, D., C. Criscuolo et P. Gal (2016), « The best versus the rest: The global productivity slowdown, divergence across firms and the role of public policy », *OECD Productivity Working Papers*, n° 5, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/63629cc9-en>. [40]
- Arrieta-Ibarra, I. et al. (2018), « Should we treat data as labor? Moving beyond “Free” », *AEA Papers and Proceedings*, Vol. 108, <http://dx.doi.org/10.1257/pandp.20181003>. [47]
- Atkin, D., A. Schoar et S. Shinde (2023), « Working from home, worker sorting and development », *Document de travail*, n° 31515, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w31515>. [29]
- Barrero, J. (2022), « The work-from-home outlook in 2022 and beyond », *presentation à la réunion 2022 de l’American Economic Association*. [27]
- Barrero, J., N. Bloom et S. Davis (2021), « Why working from home will stick », *Document de travail*, n° 28731, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w28731>. [23]
- Berlingieri, G. et al. (2020), « Laggard firms, technology diffusion and its structural policy determinants », *Documents de travail de l’OCDE sur la politique scientifique, technologique et industrielle*, n° 86, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/281bd7a9-en>. [43]
- Bessen, J. (2022), *The new Goliaths: How corporations use software to dominate industries, kill innovation, and undermine regulation*, Yale University Press, New Haven, CT. [45]
- Bessen, J. et al. (2022), « The role of data for AI startup growth », *Research Policy*, Vol. 51/5, p. 104513, <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2022.104513>. [66]
- Brewster, M. (2022), « Annual retail trade survey shows impact of online shopping on retail sales during COVID-19 pandemic », 27 avril, United States Census Bureau, <https://www.census.gov/library/stories/2022/04/ecommerce-salesurged-during-pandemic.html>. [22]
- Brussevich, M., E. Dabla-Norris et S. Khalid (2020), « Who will bear the brunt of lockdown policies? Evidence from tele-workability measures across countries », *Documents de travail du FMI*, n° WP/20/88, Washington, D.C., <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2020/06/12/Who-will-Bear-the-Brunt-of-Lockdown-Policies-Evidence-from-Tele-workability-Measures-Across-49479>. [30]
- Bundesbank (2022), *Lange Zeitreihen zur Wirtschaftsentwicklung in Deutschland* [Séries temporelles longues sur le développement économique en Allemagne] (base de données), <https://www.bundesbank.de/de/statistiken/indikatorensetze/lange-zeitreihen/lange-zeitreihen-843330> (consulté le 6 février 2023). [91]
- Bürger, T. et A. Grau (2021), *Digital Souverän 2021: Aufbruch in die digitale Post-Coronawelt? [Souveraineté numérique 2021: Départ pour un monde numérique post-Corona?]*, Bertelsmann Stiftung Gütersloh, Allemagne. [36]
- Calvino, F. et al. (2022), « Identifying and characterising AI adopters », *Documents de travail de l’OCDE sur la science, la technologie et l’industrie*, n° 2022/06, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/154981d7-en>. [90]
- Calvino, F., C. Criscuolo et R. Verlhac (2020), « Declining business dynamism: Structural and policy determinants », *Documents de travail de l’OCDE sur la politique scientifique, technologique et industrielle*, n° 94, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/77b92072-en>. [39]
- Calvino, F. et C. Criscuolo (2019), « Business dynamics and digitalisation », *Documents de travail de l’OCDE sur la politique scientifique, technologique et industrielle*, n° 62, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/6e0b011a-en>. [41]
- Cambridge University Press (2022), « Definition of “Data” », *Cambridge Advanced Learner’s Dictionary & Thesaurus*, page web, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/data> (consulté le 4 janvier 2023). [89]

- Cavallo, A., P. Mishra et A. Spilimbergo (2022), « E-commerce during Covid: Stylized facts from 47 economies », *Documents de travail du FMI*, n° 2022/019, Washington, D.C., <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2022/01/28/E-commerce-During-Covid-Stylized-Facts-from-47-Economies-512014>. [4]
- CGI.br (2021), *COVID-19 ICT panel: Web survey on the use of Internet in Brazil during the new coronavirus pandemic*, Comité Gestor da Internet no Brasil [Comité directeur sur l'internet du Brésil], São Paulo, https://cetic.br/media/docs/publicacoes/2/20210426095323/painel_tic_covid19_livro_eletronico.pdf. [88]
- CIMT (2020), « How representative are online job postings? », *Rapport de perspectives de l'IMT*, n° 36, Conseil de l'information sur le marché du travail, Canada, <https://lmic-cimt.ca/publications-all/lmi-insight-report-no-36>. [16]
- Cockburn, I., R. Henderson et S. Stern (2018), « The impact of artificial intelligence on innovation », *Document de travail*, n° 24449, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w24449>. [67]
- Corrado, C. et al. (2021), « New evidence on intangibles, diffusion and productivity », *Documents de travail de l'OCDE sur la science, la technologie et l'industrie*, n° 2021/10, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/de0378f3-en>. [42]
- Cosgrove, A. et J. Kuo (2020), « Why data marketplaces tend to fail », mai, Harbr, <https://www.harbrdata.com/resources/blogs/why-public-data-marketplaces-tend-to-fail> (consulté le 2 février 2022). [63]
- Criscuolo, C. et al. (2021), « The role of telework for productivity during and post-COVID-19: Results from an OECD survey among managers and workers », *OECD Productivity Working Papers*, n° 31, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/7fe47de2-en>. [26]
- Crouzet, N. et J. Eberly (2019), « Understanding weak capital investment: The role of market concentration and intangibles », *Document de travail*, n° 25869, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w25869>. [44]
- David, P. (1989), « Computer and dynamo: The modern productivity paradox in a not-too distant mirror », *The Warwick Economics Research Paper Series*, n° 339, Université Stanford, Département de l'économie, Stanford, CA. [69]
- Défenseur des Droits (2022), *Dématérialisation des services publics : trois ans après, où en est-on ?*, Défenseur des Droits, République Française, <https://www.defenseurdesdroits.fr/sites/default/files/atoms/files/rap-demat-num-en-02.05.22.pdf>. [2]
- Demmou, L. et G. Franco (2021), « Mind the financing gap: Enhancing the contribution of intangible assets to productivity », *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 1684, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/7aefd0d9-en>. [59]
- Demmou, L., G. Franco et I. Stefanescu (2020), « Productivity and finance: The intangible assets channel – a firm-level analysis », *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 1596, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/d13a21b0-en>. [60]
- Dey, M. et al. (2021), « Teleworking and lost work during the pandemic: New evidence from the CPS », *Monthly Labor Review*, n° juillet, <http://dx.doi.org/10.21916/mlr.2021.15>. [3]
- Emanuel, N. et E. Harrington (2023), « Working remotely? Selection, treatment, and the market for remote work », *Federal Reserve Bank of New York Staff Reports*, n° 1061, Federal Reserve Bank de New York, New York, NY. [28]
- Eurostat (2024), *ICT usage in enterprises*, Base de données complète, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/digital-economy-and-society/database/comprehensive-database> (consulté le 17 janvier 2024). [95]
- Eurostat (2022), *ICT usage in enterprises* (base de données), <https://ec.europa.eu/eurostat/web/digital-economy-and-society/data/database> (consulté le 27 janvier 2022). [53]
- Evans, D. (2011), « The Internet of Things: How the next evolution of the Internet is changing everything », *White Paper*, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411_FINAL.pdf. [87]
- Friemel, T. (2016), « The digital divide has grown old: Determinants of a digital divide among seniors », *New Media & Society*, Vol. 18/2, pp. 313-331, <http://dx.doi.org/10.1177/1461444814538648>. [86]
- Furman, J. et al. (2019), *Unlocking Digital Competition*, Digital Competition Expert Panel, Londres, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/785547/unlocking_digital_competition_furman_review_web.pdf. [65]
- Garrote Sanchez, D. et al. (2021), « Who on Earth can work from home? », *The World Bank Research Observer*, Vol. 36/1, pp. 67-100, <http://dx.doi.org/10.1093/wbro/lkab002>. [31]
- Goldin, I. et al. (2021), « Why is productivity slowing down? », *Oxford Martin Working Paper Series on Economic and Technological Change*, n° 2021-6, Oxford Martin School, Oxford. [38]
- Griliches, Z. (1957), « Hybrid corn: An exploration in the economics of technological change », *Econometrica*, Vol. 25/4, pp. 501-522, <http://dx.doi.org/10.2307/1905380>. [51]
- Haskel, J. et S. Westlake (2018), *Capitalism without capital: The rise of the intangible economy*, Princeton University Press, Princeton, NJ. [56]

- Holton, S. et F. McCann (2021), « Sources of the small firm financing premium: Evidence from Euro area banks », *International Journal of Finance & Economics*, Vol. 26/1, pp. 271-289, <http://dx.doi.org/10.1002/ijfe.1789>. [55]
- IoT Analytics (2020), *Total number of device connections (incl. non-IoT)*, IoT Analytics, <https://iot-analytics.com/wp/wp-content/uploads/2020/11/IoT-connections-total-number-of-device-connections-min.png>. [50]
- Istat (2023), *Aspects of daily life: Public use data files* (base de données), <https://www.istat.it/en/archivio/129959#:~:text=%E2%80%9CA%20of%20daily%20life> (consulté le 15 février 2023). [85]
- Jovanovic, B. et P. Rousseau (2005), « General purpose technologies », *Document de travail*, n° 11093, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w11093>. [68]
- Juhász, R., M. Squicciarini et N. Voigtländer (2020), « Technology adoption and productivity growth: Evidence from industrialization in France », *Document de travail*, n° 27503, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w27503>. [73]
- Ker, D., P. Montagnier et V. Spiezia (2021), « Measuring telework in the COVID-19 pandemic », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 314, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/0a76109f-en>. [20]
- Klasen, S. et S. Lange (2012), « Getting progress right : Measuring progress towards the MDGs against historical trends », *document de travail de la Ferdi*, n° P60, Fondation pour les études et recherches sur le développement international (Ferdì), <https://ferdi.fr/en/publications/getting-progress-right-measuring-progress-towards-the-mdgs-against-historical-trends>. [12]
- Kominski, R. (1988), « Computer use in the United States: 1984 », *Current Population Reports Special Studies Series*, n° 155, US Bureau of the Census, Washington, D.C., <https://www.census.gov/history/pdf/computerusage1984.pdf>. [70]
- Koutroumpis, P., A. Leiponen et L. Thomas (2020), « Markets for data », *Industrial and Corporate Change*, Vol. 29/3, <http://dx.doi.org/10.1093/icc/dtaa002>. [62]
- Leonhardt, M. et S. Overå (2021), « Are there differences in video gaming and use of social media among boys and girls? – A mixed methods approach », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 18/11, p. 6085, <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph18116085>. [17]
- Lohr, S. (2012), « How big data became so big », 12 août, *The New York Times*, <https://www.nytimes.com/2012/08/12/business/how-big-data-became-so-big-unboxed.html>. [84]
- Mansfield, E. (1961), « Technical change and the rate of imitation », *Econometrica*, Vol. 29/4, pp. 741-766, <http://dx.doi.org/10.2307/1911817>. [52]
- McClain, C. et al. (2021), « The Internet and the pandemic », 1er septembre, Pew Research Center, <https://www.pewresearch.org/internet/2021/09/01/the-internet-and-the-pandemic>. [36]
- Mincer, J. (1991), « Education and unemployment », *Document de travail*, n° 3838, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w3838>. [15]
- Montagnier, P. et I. Ek (2021), « AI measurement in ICT usage surveys: A review », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 308, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/72cce754-en>. [83]
- Nolan, A. (2021), « Artificial intelligence, its diffusion and uses in manufacturing », *OECD Going Digital Toolkit Notes*, n° 12, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/249e2003-en>. [58]
- OCDE (2023), *Agrégats des comptes nationaux, SCN 2008 (ou SCN 1993) : Produit intérieur brut* (base de données), <https://doi.org/10.1787/data-00001-en> (consulté le 3 mars 2023). [10]
- OCDE (2023), « Emploi par niveau d'études » (indicateur), <http://dx.doi.org/10.1787/26f676c7-en> (consulté le 10 mars 2023). [14]
- OCDE (2023), « ICT access and usage » (bases de données), <https://oe.cd/dx/ict-access-usage> (consulté le 17 janvier 2024). [5]
- OCDE (2023), *Measuring the Internet of Things*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/021333b7-en>. [49]
- OCDE (2023), « Regards sur l'éducation : Niveau de formation et situation au regard de l'emploi », *Statistiques de l'OCDE sur l'éducation* (base de données), <https://doi.org/10.1787/889e8641-en> (consulté le 8 mars 2023). [11]
- OCDE (2022), « Measuring the value of data and data flows », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 345, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/923230a6-en>. [61]
- OCDE (2022), *Portail de l'OCDE sur le haut débit* (base de données), <http://www.oecd.org/sti/broadband/broadband-statistics> (consulté le 20 janvier 2023). [78]
- OCDE (2021), « Data portability, interoperability and digital platform competition », *Document de travail du Comité de la concurrence de l'OCDE*, OCDE, Paris, <https://www.oecd.org/daf/competition/data-portability-interoperability-and-digital-platform-competition-2021.pdf>. [77]
- OCDE (2021), « Mapping data portability initiatives, opportunities and challenges », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 321, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/a6edfab2-en>. [76]

- OCDE (2020), « Effets positifs potentiels du télétravail sur la productivité à l'ère post-COVID-19 : quelles politiques publiques peuvent aider à leur concrétisation ? », *Les réponses de l'OCDE face au coronavirus (COVID-19)*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/a5d52e99-en>. [24]
- OCDE (2020), « Le commerce électronique au temps de la pandémie de COVID-19 », *Les réponses de l'OCDE face au coronavirus (COVID-19)*, 7 octobre, Éditions OCDE, Paris, https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=137_137212-t0ffjgnerdb&title=E-commerce-in-the-time-of-COVID-19. [21]
- OCDE (2020), « Les possibilités de l'apprentissage en ligne pour les adultes : premiers enseignements de la crise du COVID-19 », *Les réponses de l'OCDE face au coronavirus (COVID-19)*, 24 juillet, OCDE, Paris, <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/the-potential-of-onlinelearning-for-adults-early-lessons-from-the-covid-19-crisis-ee040002>. [1]
- OCDE (2020), « Maintenir l'accès à l'internet en temps de crise », *Lutte contre le coronavirus (COVID-19)*, 4 mai, OCDE, Paris, <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/keeping-the-internet-up-and-running-in-times-of-crisis-4017c4c9>. [18]
- OCDE (2018), *Le futur de l'éducation et des compétences : Projet Éducation 2030*, Éditions OCDE, Paris, [https://www.oecd.org/education/2030/E2030%20Position%20Paper%20\(05.04.2018\).pdf](https://www.oecd.org/education/2030/E2030%20Position%20Paper%20(05.04.2018).pdf). [74]
- OCDE (2016), *L'importance des compétences : Nouveaux résultats de l'évaluation des compétences des adultes*, Études de l'OCDE sur les compétences, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264258051-en>. [9]
- OCDE (2014), « Cloud computing: The concept, impacts and the role of government policy », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 240, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jxzf4lcc7f5-en>. [54]
- ONS (2023), *Internet sales as a percentage of total retail sales* (base de données), <https://www.ons.gov.uk/businessindustryandtrade/retailindustry/timeseries/j4mc/drsi> (consulté le 16 février 2023). [32]
- ONU DESA (2022), *World population prospects 2022* (base de données), <https://population.un.org/wpp> (consulté le 20 décembre 2022). [8]
- Oster, E. (2009), « Does increased access increase equality? Gender and child health investments in India », *Journal of Development Economics*, Vol. 89/1, pp. 62-76, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jdeveco.2008.07.003>. [13]
- Perrin, A. et S. Atske (2021), « 7% of Americans don't use the Internet. Who are they? », 2 avril, Pew Research Center, <https://www.pewresearch.org/fact-tank/2021/04/02/7-of-americans-dont-use-the-internet-who-are-they>. [7]
- Shapiro, C. et H. Varian (1999), *Information rules: A strategic guide to the network economy*, Harvard Business Review Press, Brighton, MA. [57]
- Spiekermann, M. (2019), « Data marketplaces: Trends and monetisation of data goods », *Intereconomics*, Vol. 54/4, pp. 208-216, <http://dx.doi.org/10.1007/s10272-019-0826-z>. [64]
- Stephany, F. et al. (2020), « Distancing bonus or downscaling loss? The changing livelihood of US online workers in times of COVID-19 », *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, Vol. 111/3, pp. 561-573, <http://dx.doi.org/10.1111/tesg.12455>. [82]
- Stiroh, K. (2002), « Information technology and the U.S. productivity revival: What do the industry data say? », *American Economic Review*, Vol. 92/5, pp. 1559-1576, <http://dx.doi.org/10.1257/000282802762024638>. [71]
- Stokey, N. (2021), « Technology diffusion », *Review of Economic Dynamics*, Vol. 42, pp. 15-36, <http://dx.doi.org/10.1016/j.red.2020.09.008>. [37]
- Suh, J. et al. (2022), « Disparate impacts on online information access during the Covid-19 pandemic », *Nature Communications*, Vol. 13/1, p. 7094, <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-022-34592-z>. [34]
- UIT (2022), *World Telecommunication/ICT Indicators Database*, <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/publications/wtid.aspx> (consulté le 3 mars 2023). [6]
- Union postale universelle (2022), *Statistique des services postaux 2021* (base de données), <https://www.upu.int/en/Publications/Statistics/Postal-Statistics-2021> (consulté le 13 février 2023). [80]
- US Census Bureau (2023), « E-commerce retail sales as a percent of total sales », ECOMPCTSA (base de données), FRED, Federal Reserve Bank de St. Louis, <https://fred.stlouisfed.org/series/ECOMPCTSA> (consulté le 13 février 2023). [33]
- US Census Bureau (2022), *County business patterns* (base de données), <https://www.census.gov/programs-surveys/cbp/data/datasets.html> (consulté le 17 février 2023). [81]
- Varian, H. (2019), « Artificial intelligence, economics, and industrial organization », dans Agrawal, A., J. Gans et A. Goldfarb (dir. pub.), *The economics of artificial intelligence: An agenda*, University of Chicago Press, Chicago, IL. [79]
- Welby, B. et E. Tan (2022), « Designing and delivering public services in the digital age », *OECD Going Digital Toolkit Notes*, n° 22, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/e056ef99-en>. [75]
- Zolas, N. et al. (2020), « Advanced technologies adoption and use by U.S. firms: Evidence from the annual business survey », *Document de travail*, n° 28290, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://dx.doi.org/10.3386/w28290>. [48]



Notes

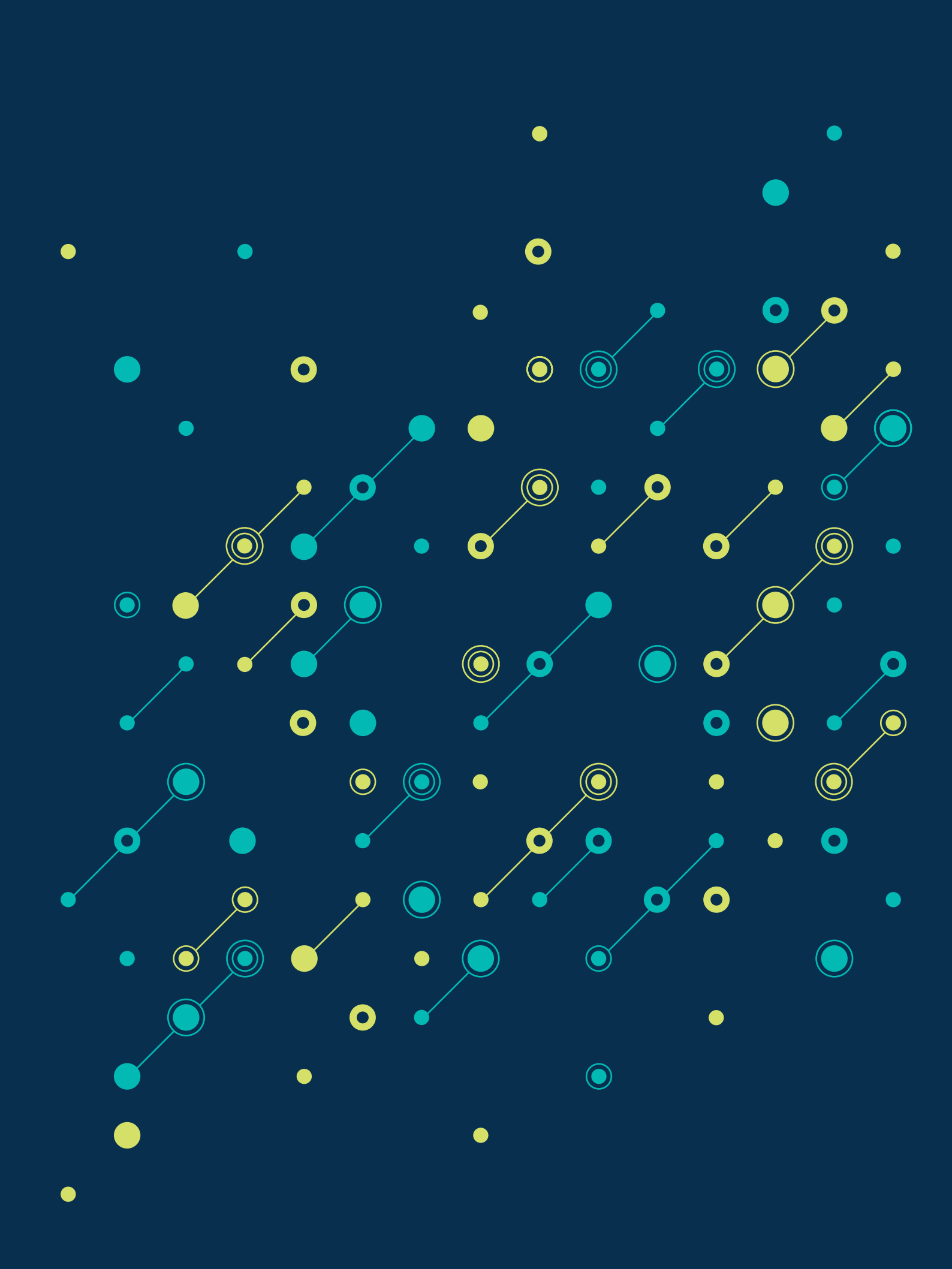
1. Observation des auteurs, d'après les données de l'Union postale universelle (2022_[80]), de la Bundesbank (2022_[91]) et du Census Bureau des États-Unis (2022_[81]) ; les chiffres de population proviennent du Département des affaires économiques et sociales du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies (ONU DESA, 2022_[8]). Les données de l'Union postale universelle (2022_[80]) montrent une baisse du nombre de bureaux de poste permanents par habitant dans la plupart des pays de l'OCDE depuis au moins 2017.
2. Ces estimations reposent en partie sur des imputations et sur l'utilisation de données démographiques du Département des affaires économiques et sociales du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies (ONU DESA, 2022_[8]), consulté le 24 janvier 2024.
3. L'observation la plus récente correspond à 2023, sauf pour le Canada, la Colombie, la Corée, l'Égypte, le Japon, et le Mexique (2022), les États-Unis, l'Islande, et Israël (2021), et le Royaume-Uni (2020). L'observation la plus ancienne correspond à 2005, sauf pour la Bulgarie, la France et la Roumanie (2006), la Croatie et les États-Unis (2007), et le Brésil et la Colombie (2008). On ne dispose pas de données pour 2005-08 pour le Canada, le Costa Rica, l'Égypte et la Suisse. La période de référence correspond aux trois mois précédant l'enquête, sauf pour les données des États-Unis (six mois en 2021, et aucune période de référence en 2007), et de la Colombie et du Japon (12 mois). Les données concernent les classes d'âge 16-74 ans, sauf pour le Costa Rica (18-74 ans) et Israël (20-74 ans). L'observation de l'OCDE repose sur une moyenne simple des données relatives à l'ensemble des pays de l'OCDE pour lesquels elles sont disponibles.
4. Les écarts correspondent à la différence de taux d'adoption entre les hommes et les femmes, les personnes âgées (55-74 ans) et les jeunes (16-24 ans), les individus disposant d'un niveau d'instruction élevé et les moins instruits, et les individus appartenant à des ménages du cinquième quintile de la distribution des revenus et ceux membres de ménages du premier quintile.
5. La période de référence des enquêtes sous-jacentes correspond aux trois derniers mois qui les ont précédées. Pour les États-Unis, la période de référence est de six mois. Les observations concernent 2023 sauf pour le Canada, la Corée, l'Égypte, et le Mexique (2022), les États-Unis, l'Islande, et Israël (2021), et le Royaume-Uni (2020). Les données se rapportent aux classes d'âge 16-74 ans, 16-24 ans et 55-74 ans, sauf pour le Costa Rica (18-74 et 18-24 ans) et Israël (20-74 et 20-24 ans). L'observation de l'OCDE repose sur une moyenne simple des données relatives à l'ensemble des pays de l'OCDE pour lesquels elles sont disponibles.
6. L'observation d'une réduction des fractures numériques selon l'année de naissance a également été décrite ailleurs (Friemel, 2016_[86]).
7. Cette projection repose sur un modèle logistique simple ajusté sur les données regroupées issues des enquêtes *Aspetti della vita quotidiana* (Aspects de la vie quotidienne) d'Istat pour 2015-21 (2023_[85]), qui comprend une tendance temporelle linéaire et des effets fixes pour différentes classes d'âge.
8. L'adoption par les internautes est estimée en divisant le taux d'adoption d'une activité donnée par la part des individus ayant utilisé l'internet au cours de la période considérée (généralement trois mois, ou 12 mois dans le cas des interactions avec les sites web des administrations publiques et des achats en ligne). Les données se rapportent à 2023, sauf pour le Canada, la Corée, l'Égypte et le Mexique (2022), les États-Unis et l'Islande (2021), et le Royaume-Uni (2020). Pour Israël, les données se rapportent à 2021, sauf pour les interactions avec les sites web des administrations publiques (2020). Pour les appels téléphoniques/vidéo et les services bancaires en ligne, la période de référence correspond aux trois mois ayant précédé l'enquête, sauf pour la Corée (12 mois) et les États-Unis (six mois). Pour les interactions en ligne avec les administrations publiques, la période de référence est de 12 mois, sauf pour le Brésil (trois mois). Pour Israël, les données fournies concernent les individus âgés de 20 à 74 ans au lieu de 16 à 74 ans. Pour le Mexique, les données relatives aux appels téléphoniques/vidéo couvrent seulement les « conversations téléphoniques sur l'internet (VoIP) ». Les données relatives aux interactions électroniques avec les administrations publiques couvrent les catégories suivantes : « communiquer avec les administrations », « consulter des informations mises à disposition par les administrations », « télécharger des formulaires officiels », « remplir ou envoyer des formulaires officiels », « effectuer des démarches administratives » et « participer à des consultations publiques » (traductions libres). Pour les États-Unis, les services bancaires en ligne couvrent également les investissements, le règlement des factures en ligne et d'autres services financiers.

9. La pandémie a également eu des incidences sur les marchés du travail en ligne, les marchés liés aux tâches susceptibles d'être réalisées à distance sur une base horaire ou à la demande, ainsi que les emplois de l'économie locale des « petits boulots » via l'internet (services de livraison ou de covoiturage par le biais d'applications, etc.). Voir par exemple Stephany et al. (2020_[82]) et CGI.br (2021_[88]).
10. Le constat repose sur un ensemble de deux régressions logit, dont on ne fait pas état ici, avec 814 observations à partir de données collectées par Bürger et Grau (2021_[36]). Dans le premier cas, on a effectué une régression de la part des répondants ayant indiqué que « l'internet est plus important aujourd'hui à [leurs] yeux qu'avant la pandémie » sur le genre et l'âge, ainsi que sur des variables binaires reflétant la tranche de revenus et le niveau d'instruction. La deuxième régression prend également en compte les compétences numériques autodéclarées par les répondants. La question sur les compétences est formulée comme suit : « D'une manière générale, quel est, à votre avis, votre niveau de connaissances des technologies numériques et de l'internet – non seulement leurs domaines d'application et les risques qu'ils présentent, mais aussi les possibilités et les avantages qu'ils offrent pour vous-même et pour la société ? » ; les réponses possibles étaient les suivantes : « très mauvais », « assez mauvais », « assez bon » et « très bon » (traductions libres). L'âge et le genre se sont révélés statistiquement significatifs dans les deux cas, les femmes et les jeunes étant plus susceptibles d'indiquer que l'internet était devenu important à leurs yeux. Comme on pouvait s'y attendre, les personnes ayant indiqué disposer de niveaux élevés de compétences numériques étaient sensiblement plus portées à déclarer que l'internet était devenu important à leurs yeux pendant la pandémie. Enfin, si les variables de revenu n'étaient pas statistiquement significatives dans les deux régressions, l'effet du niveau d'éducation semblait pondéré par les compétences numériques, ce qui veut dire que les variables d'éducation n'étaient statistiquement significatives que dans la première régression.
11. Le terme « données » désigne soit « les informations, en particulier les faits ou les chiffres, recueillis pour être examinés, pris en compte et utilisés pour aider à la prise de décisions », soit « les informations au format électronique qui peuvent être stockées et utilisées par un ordinateur » (traduction libre, italique non présent dans l'original) (Cambridge University Press, 2022_[89]). Le terme est utilisé dans ce chapitre dans l'acception de la première définition.
12. L'une des premières applications de l'infonuagique fut l'exploitation partagée, à savoir l'utilisation de ressources informatiques partagée par de nombreux utilisateurs, qui s'est répandue dans les années 60 et 70. En revanche, l'infonuagique moderne a vu le jour avec la création d'Amazon Web Services (en 2002) et le lancement des *Simple Storage Services* (Amazon S3) et *Elastic Compute Cloud* (Amazon EC2), en 2006. De nombreuses applications des technologies basées sur l'IdO sont également apparues il y a des dizaines d'années (la technologie RFID était l'une d'elles) et le premier appareil a été connecté au réseau ARPANET au début des années 80. Toutefois, l'IdO tel que nous le connaissons aujourd'hui est « né » entre 2008 et 2009, quand, pour la première fois, le nombre d'appareils connectés à l'internet a dépassé celui des individus (Evans, 2011_[87]). De même, l'utilisation systématique et stratégique des données dans la production économique a devancé de plusieurs décennies l'ère des données massives. En revanche, les ensembles de données volumineux à haute fréquence utilisés dans le cadre de l'analytique des données massives ne sont disponibles que depuis l'utilisation croissante de l'internet et l'adoption des services en ligne, certains observateurs estimant que la généralisation des données massives remonte à 2012 (Lohr, 2012_[84]). Enfin, l'expression « intelligence artificielle » est apparue dans les années 50. Pour autant, ses applications concrètes, à l'instar de l'apprentissage automatique, ont vu le jour plus récemment (Varian, 2019_[79]).
13. Le faible taux d'adoption de l'analytique des données massives observé au Canada pourrait être dû aux spécificités de l'instrument d'enquête.
14. On ignore toutefois si les personnes ayant participé aux enquêtes sont toujours bien placées pour répondre aux questions sur l'utilisation de l'IA. De fait, les applications de l'IA sont souvent des composantes de systèmes plus vastes, ce qui fait qu'il est plus difficile de les reconnaître. De plus, les tests cognitifs tendent à montrer que les répondants disposant de connaissances limitées dans le domaine de l'IA peuvent éprouver des difficultés à savoir si des technologies d'IA sont utilisées (Montagnier et Ek, 2021_[83]).
15. Si l'adoption s'entend généralement de l'utilisation actuelle, dans le cas du Japon elle désigne l'utilisation au cours de la période triennale 2019-21. Pour l'Australie, les observations se rapportent à l'exercice budgétaire 2021/22 clos au 30 juin 2022. Pour les pays participant au Système statistique européen, la couverture sectorielle comprend l'ensemble des activités de l'économie marchande à l'exception des services financiers (NACE Rév. 2, Sections B à N, sauf la Section K). Pour le Canada, c'est le système nord-américain de nomenclatures des activités économiques (North American Industry Classification System, NAICS) qui est utilisé et non la CITI Rév. 4. Pour la Suisse, les observations se rapportent aux entreprises comptant cinq salariés ou plus. Pour l'infonuagique, les données se rapportent à 2023 à l'exception de la Suisse (2019), de la Colombie et d'Israël (2020), du Brésil,



du Canada, et du Royaume-Uni (2021), de l'Australie, de la Corée et de la Nouvelle-Zélande (2022). Pour l'IdO, les données se rapportent à 2021 à l'exception de l'Australie, de la Corée et de la Nouvelle-Zélande (2022), et de la Colombie et d'Israël (2020). Pour l'analytique des données massives, les données se rapportent à 2022 pour l'Australie et la Corée, à 2021 pour le Brésil, le Canada et le Japon, à 2020 pour la Colombie, Israël, et la Suisse, et à 2019 pour tous les autres pays. Pour l'IA, les données se rapportent à 2023 à l'exception de la Colombie, d'Israël, et du Royaume-Uni (2020), du Brésil, du Canada, du Japon et de la Suisse (2021), et de l'Australie, de la Corée et de la Nouvelle-Zélande (2022).

16. Les données relatives aux cartes SIM M2M sont fournies à l'OCDE par les régulateurs des communications qui les collectent directement auprès des opérateurs de réseau, selon des définitions communes. Les clés matérielles associées aux abonnements données mobiles et tablettes sont exclues. La forte progression des communications M2M en Islande s'explique par la fourniture, par Vodafone Islande, d'abonnements M2M à des entreprises pharmaceutiques internationales pour gérer le transport des vaccins contre le COVID-19.
17. Les données se rapportent aux entreprises de dix salariés ou plus. Eurostat n'a commencé à enquêter sur l'utilisation de l'IA et de l'IdO dans les entreprises qu'en 2020.
18. On part de l'hypothèse que les taux d'adoption atteindront à terme 100 %.
19. L'hypothèse d'un rythme de diffusion commun aux différents pays semble davantage se justifier dans le cas de l'infonuagique que dans celui de l'analytique des données massives. Le modèle logistique simple (qui tient uniquement compte des différences de niveaux des pays) est à l'origine de 95.8 % de la variation des données dans le cas de l'infonuagique, et de 80.2 % dans le cas de l'analytique des données massives (tableau d'annexe 3.A.5). En revanche, sur les 20 pays pour lesquels on dispose de données à la fois pour 2015 et 2019, six ont réellement enregistré une baisse de l'adoption de l'analytique des données massives, ce qui ne peut pas être cohérent avec une trajectoire de diffusion ascendante.
20. Une modification a été apportée, dans le questionnaire d'Eurostat, à la formulation de la question sur l'utilisation de l'analytique des données massives entre les enquêtes de 2018 (où l'on interrogeait les répondants sur l'utilisation de la technologie en 2017) et de 2020 (année de référence 2019). L'utilisation des données pour les seules années 2016 et 2018 n'a pas d'incidence sur l'estimation (voir le tableau d'annexe 3.A.5). Les taux d'adoption et les ratios présentés dans le graphique 3.11 ont été calculés pour la période allant de 2015 à 2019. Les données ultérieures ne sont pas prises en compte, car le périmètre de la définition de « l'analytique des données massives » dans l'enquête Eurostat a été modifié (les données de l'enquête Eurostat de 2023 ne font pas référence à « l'analytique des données massives » mais à « l'analytique des données »).
21. Codes des secteurs de la CITI : C : Activités de fabrication ; D-E : Production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et climatisation, et Distribution d'eau, réseau d'assainissement, gestion des déchets, et activités de remise en état ; F : Construction ; G46 : Commerce de gros (à l'exception des véhicules automobiles et des motocycles) ; G47 : Commerce de détail (à l'exception des véhicules automobiles et des motocycles) ; H : Transport et entreposage ; I : Activités d'hébergement et de restauration ; J : Information et communication ; K : Activités financières et d'assurances ; L : Activités immobilières ; M : Activités professionnelles, scientifiques et techniques ; N : Administration et activités d'appui administratif. Pour les pays Européens utilisant l'enquête communautaire sur les technologies de l'information et de la communication et le commerce électronique d'Eurostat, les données pour l'analytique des données massives se rapportent à 2019. Voir également la note 20.
22. Nolan (2021^[58]), par exemple, observe que l'adoption de l'IA dans le secteur de la fabrication reste faible – y compris dans les économies les plus avancées –, tandis que Calvino et al. (2022^[90]) montrent qu'une part notable des utilisateurs de l'IA évoluent dans les secteurs des services d'information et de communication et des services professionnels.
23. Les rapports de probabilité ne dépendent pas du niveau d'adoption si le processus de diffusion suit un modèle logistique.
24. Les différences de rapports de probabilité d'une technologie à l'autre ont, conjointement, un niveau élevé de signification statistique (valeur $p < 0.001$).



Chapitre 4

La réalité virtuelle, ses possibilités et ses risques

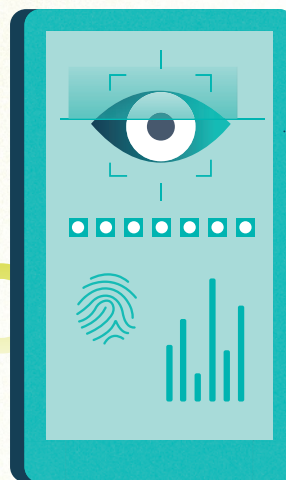
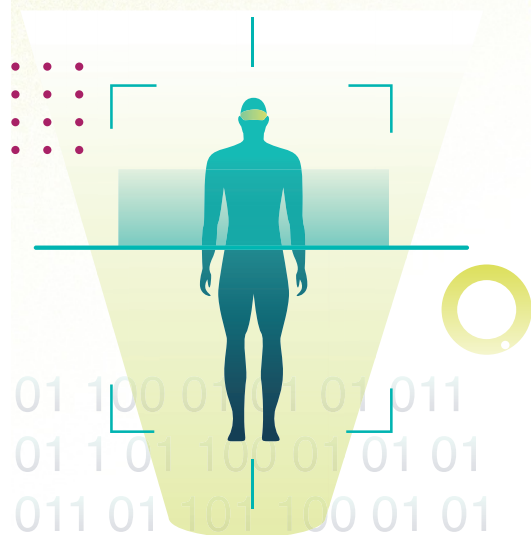
L'essor des technologies tridimensionnelles soulève des questions quant aux possibilités, aux risques et aux incidences des environnements immersifs pour les entreprises, les pouvoirs publics, les individus et la société. Ce chapitre fait la lumière sur les environnements numériques immersifs et sur un médium particulier – la réalité virtuelle – compte tenu de sa capacité avérée à se prêter à un déploiement à grande échelle. On y décrit les technologies et les caractéristiques de la réalité virtuelle, ainsi que les avantages, les possibilités, les inconvénients et les risques qu'elle présente. L'analyse de plusieurs cas concrets d'utilisation permet d'aller au-delà des effets de mode et de l'engouement médiatique qu'elle suscite, pour comprendre véritablement dans quels domaines elle se révèle, ou non, d'une grande utilité. Le chapitre examine par ailleurs le cadre « DICE », qui peut constituer un guide intéressant dans le contexte de l'utilisation de la réalité virtuelle pour des expériences qui seraient, dans le monde physique, dangereuses, impossibles, contre-productives ou onéreuses. Parmi les principaux enjeux stratégiques liés à la réalité virtuelle et aux technologies immersives figurent les défis inhérents à la protection de la vie privée, en particulier ceux associés aux données de suivi, et à la sécurité, notamment dans le cas des enfants et des véhicules mobiles.

La RV ouvre de nouveaux horizons, mais les utilisateurs doivent user de prudence

La santé mentale et la sécurité physique doivent être intégrées aux expériences de RV, en particulier concernant les enfants et dans les véhicules mobiles.

En réalité virtuelle, 20 minutes suffisent pour générer près de 2 millions de points de données uniques sur le langage corporel.

Les données de suivi corporel sous-tendent la réalité virtuelle mais présentent des risques pour la vie privée.



Principaux constats

Les caractéristiques uniques de la réalité virtuelle supposent d'opérer des arbitrages

- Les expériences de réalité virtuelle peuvent être autonomes, sociales ou industrielles.
- La réalité virtuelle consiste en un cycle de suivi, de rendu et d'affichage, processus continu qui se déroule en temps réel. Le suivi du corps, grâce auquel les scènes réagissent naturellement aux mouvements corporels, donne le « sentiment de présence » et distingue la réalité virtuelle des autres environnements immersifs.
- La réalité virtuelle suppose d'opérer des arbitrages liés à un certain nombre de caractéristiques technologiques, dont le niveau de suivi, le champ de vision, le champ de regard, le taux de rafraîchissement, la latence et la qualité de l'image.

La réalité virtuelle se prête particulièrement aux expériences qui seraient, dans le monde réel, dangereuses, impossibles, contre-productives ou onéreuses (DICE)

- L'utilisation de la réalité virtuelle – plutôt que des technologies bidimensionnelles – devrait être privilégiée dans les domaines dans lesquels les travaux de recherche ont montré qu'elle était porteuse de transformations et constituait manifestement la meilleure solution.
- La réalité virtuelle s'applique avant tout aux expériences dites « DICE » (pour *Dangerous, Impossible, Counterproductive, Expensive*), telles que la formation des chirurgiens et des pompiers, la réadaptation médicale (par exemple pour les victimes d'accidents vasculaires cérébraux) et les expériences instinctives et perceptives (par exemple l'exploration spatiale).
- Cinq domaines s'inscrivent parfaitement dans le cadre DICE et ont une capacité avérée à se prêter à un déploiement à grande échelle : l'enseignement de l'empathie ; la réadaptation médicale ; les interventions destinées à améliorer la santé mentale ; la formation en entreprise ; et les jumeaux numériques.

Il est essentiel de tenir compte dès le départ des inconvénients et des risques de la réalité virtuelle

- Les expériences de réalité virtuelle peuvent être incroyables, mais si elles sont suffisamment puissantes pour altérer le bien-être psychologique et l'empathie à l'égard d'autres personnes et d'autres cultures, il est inévitable qu'elles présentent également des inconvénients et des risques.
- Les cinq principaux inconvénients et risques sont liés aux aspects suivants : la protection de la vie privée, notamment pour ce qui est du suivi des mouvements du corps ; le développement cognitif et le comportement des enfants ; le mal des simulateurs ; la distraction au volant ; et l'utilisation excessive et la dépendance.
- Les données de suivi – indispensables à toute expérience de réalité virtuelle – permettent également de créer et de partager des profils d'utilisateur très détaillés, ce qui induit des risques quant à la protection de la vie privée.

La combinaison de cadres d'action existants dans le domaine du numérique et de nouvelles stratégies façonnera un avenir immersif positif

- Dans les pays ayant répondu au questionnaire établi pour l'édition 2024 des *Perspectives de l'économie numérique*, l'action des pouvoirs publics en matière de réalité virtuelle et de technologies immersives est centrée sur la promotion du secteur national de la réalité virtuelle, mais commence à s'étendre à des secteurs spécifiques (tels que celui de l'éducation).
- Certains pays entreprennent de définir des « droits » et des « principes » liés à la réalité virtuelle et aux technologies immersives.
- Dans la mesure où il n'existe aucun moyen d'« exercer son option de retrait » ou de « rester incognito » dans la réalité virtuelle, de nouvelles approches, au-delà des modèles traditionnels fondés sur le consentement, devront être mises en place pour protéger la vie privée.
- Une attention particulière doit être portée à la sécurité mentale et physique dans le cadre de la réalité virtuelle, en particulier pour ce qui concerne les enfants et les véhicules mobiles ; la sécurité par défaut peut jouer un rôle important à cet égard.
- Les entreprises spécialisées dans la réalité virtuelle ont commencé à élaborer des lignes directrices, notamment pour les expériences de réalité virtuelle sociale.



À mesure que les environnements numériques évoluent, passant de formats essentiellement « plats » à des environnements tridimensionnels (3D) qui réagissent aux mouvements du corps des utilisateurs, les questions relatives aux possibilités, aux risques et aux incidences de ces mondes immersifs pour les entreprises, les pouvoirs publics, les individus et la société deviennent de plus en plus pressantes. Les applications proposées dans des environnements immersifs couvrent un large éventail de secteurs, du divertissement à la production manufacturière, en passant par l'éducation, les soins de santé, la construction, les services publics ou la défense (Kim, 2021^[1] ; Marr, 2021^[2]). Bien que les technologies immersives existent depuis de nombreuses années, la façon dont elles se combinent, l'éventail de nouvelles applications et la baisse des coûts créent un sentiment d'urgence chez les décideurs (MIC, 2022^[3]).

Plusieurs termes et expressions décrivent les environnements immersifs : réalité augmentée, réalité mixte, réalité étendue, métavers, Web 3.0, ou encore réalité virtuelle. Avec la réalité augmentée, parfois appelée réalité mixte, les utilisateurs voient et entendent le monde réel, auquel s'ajoute une couche numérique. Google Glass en est l'un des premiers exemples. Cette paire de lunettes laisse passer la lumière du monde extérieur, tandis qu'à travers une petite fenêtre située dans une partie du champ de vision d'un œil, l'utilisateur peut voir des images, du texte ou des vidéos en surimpression sur le monde réel. Dans les systèmes plus perfectionnés, tels que Vision Pro d'Apple, HoloLens de Microsoft ou les casques de Magic Leap, les objets peuvent être rendus de manière stéréoscopique. En d'autres termes, chaque œil reçoit une image provenant du point de vue approprié pour créer de la profondeur, et les objets sont enregistrés spatialement dans une pièce réelle (Miller et al., 2019^[4]). L'utilisation la plus populaire de la réalité augmentée consiste à regarder une vidéo filmée en temps réel par la caméra d'une tablette ou d'un téléphone bidimensionnel (2D) et sur laquelle est superposée une image 2D (comme dans le jeu vidéo Pokémon Go, par exemple) (Lee et al., 2022^[5]).

La réalité étendue est une expression relativement nouvelle utilisée pour désigner les différentes technologies immersives existantes – réalité virtuelle, réalité augmentée et réalité mixte – ainsi que les technologies connexes qui pourraient voir le jour. Le terme « métavers » (parfois appelé Web 3.0) désigne l'architecture globale qui recouvre la réalité étendue, la technologie des chaînes de blocs, ainsi que des mondes virtuels comprenant des biens immobiliers, de la monnaie et des plateformes pour organiser des événements et des activités. Ce terme est large, mal défini et galvaudé. Apparu tout d'abord dans l'univers de la science-fiction, ce concept orienté vers l'avenir a ensuite été adopté par les développeurs de jeux vidéo et le monde universitaire (Ball, 2022^[6]). Il sera amené à évoluer au fur et à mesure du développement et de l'expansion des technologies.

Ce chapitre est centré sur un médium immersif particulier – la réalité virtuelle – car il s'agit du seul environnement immersif à présenter une capacité avérée à se prêter à un déploiement à grande échelle. En 2022, environ 9 millions de casques de réalité virtuelle ont été vendus dans le monde (contre 260 000 casques de réalité augmentée) (Ubrani, 2023^[7]). La quasi-totalité de ces casques ont été commercialisés par des entreprises dont les produits et services liés aux médias sociaux constituent la principale source de revenus (80 % par Meta, 10 % par ByteDance et 10 % par d'autres entreprises). La réalité virtuelle offre une expérience plus proche du réel que médiée, tant sur le plan perceptif que psychologique. Elle suscite un « sentiment de présence », c'est-à-dire la sensation pour l'utilisateur que l'expérience est « réelle » (Sanchez-Vives et Slater, 2005^[8]).

Ce chapitre expose des cas d'utilisation de la réalité virtuelle qui ont déjà démontré leur capacité à se prêter à un déploiement à grande échelle et à générer un retour sur investissement, et laisse de côté les cas récemment surmédialisés (par exemple les investissements immobiliers dans les mondes virtuels payés en crypto-monnaies) (Tangermann, 2023^[9]). On commence par y expliquer ce qu'est la réalité virtuelle ainsi que ses caractéristiques technologiques et autres. On y décrit ensuite les avantages, les possibilités, les inconvénients et les risques qu'elle présente, avant de présenter des cas concrets d'utilisation dans un certain nombre de domaines. Le chapitre se termine par un examen des enjeux stratégiques liés à la réalité virtuelle.

Comprendre la réalité virtuelle

Les expériences de réalité virtuelle autonomes se vivent souvent par l'intermédiaire d'applications¹. Dans la réalité virtuelle autonome, une seule personne « réelle » se trouve dans l'environnement immersif à un moment donné, que ce soit pour détruire des cubes flottants à l'aide de sabres laser ou pour se rendre dans l'archipel de Palau afin de comprendre les effets néfastes du changement climatique sur les récifs coralliens. À cela s'ajoutent d'autres exemples, tels que le jeu vidéo de tir encensé par la critique, *Half Life Alyx*, ou des applications à plus petit budget dans lesquelles l'utilisateur peut faire l'expérience de l'empathie en vivant dans la peau d'un avatar qui n'a pas la même identité que lui. Meta propose des expériences de réalité virtuelle via l'application Meta Quest, tandis que Sony dispose de sa propre plateforme accessible aux plus de 100 millions de propriétaires de consoles PlayStation (à condition qu'ils acquièrent le casque de réalité virtuelle de la marque).

Deuxième catégorie d'expériences, les plateformes de réalité virtuelle sociale permettent aux utilisateurs, par le biais d'avatars, d'interagir entre eux et de créer et vivre ensemble des scènes de réalité virtuelle. Par exemple, dans VRChat, ils peuvent créer un monde 3D personnalisé, incarner un avatar qui peut leur ressembler (ou non) et partager des expériences virtuelles avec d'autres personnes qui portent également un casque. Les utilisateurs peuvent ainsi faire une partie de golf miniature ou participer à un karaoké. Sur ces plateformes, les utilisateurs rencontrent de nouvelles personnes, nouent des relations et bâtissent des communautés. On estime qu'Horizon Worlds, l'application de réalité virtuelle sociale de Meta, comptait au second semestre 2022 environ 200 000 utilisateurs mensuels actifs, interagissant dans le cadre de plus de 10 000 expériences virtuelles distinctes (Horwitz, Rodriguez et Bobrowsky, 2022^[10]).

La troisième catégorie d'expériences a trait à l'utilisation de la réalité virtuelle dans l'industrie, avec des cas d'utilisation interentreprises impliquant des solutions immersives. Par exemple, les technologies de réalité virtuelle peuvent permettre aux fabricants d'aller plus loin que les « jumeaux numériques » – définis au sens large comme une version virtuelle dynamique d'un site ou d'un objet physique (Jones et al., 2020^[11]). Ils peuvent ainsi voir comment un produit potentiel fonctionnerait dans un contexte réaliste, avant de le fabriquer physiquement. Le concept de jumeaux numériques fondés sur la réalité virtuelle est utilisé dans différents domaines, notamment pour la conception d'équipements complexes, pour des environnements très détaillés d'usines et de villes, ainsi que pour la médecine de précision et l'agriculture numérique (Marr, 2021^[2]). On retrouve des cas d'utilisation dans un large éventail de secteurs. Cependant, jusqu'à présent, ils se limitent à des applications à forte valeur et hautement personnalisées (telles que la conception de moteurs à réaction, d'installations industrielles et de centrales électriques) (Marr, 2021^[2]).

La réalité virtuelle repose sur un cycle continu de suivi, de rendu et d'affichage

La réalité virtuelle repose sur un cycle de suivi, de rendu et d'affichage, qui se déroule en continu et en temps réel (Blascovich et Bailenson, 2011^[12]). Le cycle commence par le suivi : des capteurs détectent les mouvements de l'utilisateur et les traduisent en données qui servent à mettre à jour le contenu de la réalité virtuelle. Par le passé, une diversité de capteurs, aussi bien mécaniques que magnétiques, étaient utilisés, mais aujourd'hui le suivi se fait principalement à l'aide de systèmes de vision par ordinateur. Ces systèmes comprennent des caméras intégrées au casque, capables de déterminer avec précision, rapidité (c'est-à-dire avec une faible latence) et à intervalles fréquents (c'est-à-dire avec un taux de rafraîchissement élevé) où regarde l'utilisateur et comment son corps bouge, en filmant en permanence la pièce autour de lui. Les informations de suivi sont essentielles car le système doit savoir où une personne regarde et où son corps se situe pour afficher correctement sa position virtuelle.

Le rendu correspond à la manière dont la réalité virtuelle crée une représentation virtuelle de l'environnement à partir des données de suivi. De la même manière que le système GPS d'une voiture stocke une carte, l'ordinateur sur lequel s'appuie le système de réalité virtuelle stocke un modèle numérique 3D du monde virtuel. Par exemple, il peut stocker des scènes telles qu'un salon et les objets qui s'y trouvent ou un récif corallien et les différents coraux qui le composent. En utilisant les informations de suivi et les données du modèle numérique, l'ordinateur met à jour le point de vue de l'utilisateur en effectuant le rendu du monde en 3D à partir de ce point de vue. Dans une expérience de réalité virtuelle mettant en scène un récif corallien sous-marin, par exemple, si l'utilisateur incline la tête et regarde vers le bas, il peut voir des poissons nager en dessous de lui. De même, dans une expérience de réalité virtuelle se déroulant dans une maison, si l'utilisateur tourne physiquement la tête à 180 degrés, il verra le mur arrière de la pièce virtuelle. Chaque fois que l'utilisateur se déplace physiquement, l'équipement de suivi détecte le mouvement, ce qui amène l'ordinateur à effectuer le rendu du monde en fonction de ce nouveau point de vue.

Dans les systèmes de réalité virtuelle actuellement commercialisés, ce processus se répète environ 100 fois par seconde. Lorsque le système fonctionne correctement, l'utilisateur vit une expérience fluide, comme s'il se déplaçait dans le monde réel. En effectuant un rendu dynamique de chaque scène en fonction de la position de l'utilisateur, la réalité virtuelle permet d'explorer une scène à l'infini. Dans une expérience mettant en scène un récif corallien, l'utilisateur peut trouver un petit coquillage à la périphérie, s'accroupir et regarder derrière. L'expérience diffère donc des films, qui offrent un seul point de vue (celui du réalisateur qui filme depuis un angle particulier montrant le coquillage), ou encore des jeux vidéo, qui laissent aux utilisateurs la liberté d'explorer différents chemins et objets, mais à condition qu'ils soient liés au scénario du jeu.

Enfin, les systèmes de réalité virtuelle affichent l'environnement virtuel en temps réel ; l'utilisateur peut ainsi l'expérimenter comme s'il était physiquement présent. Cet affichage est généralement assuré grâce à un casque de réalité virtuelle qui fournit une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel et un son spatialisé par l'intermédiaire de multiples haut-parleurs synchronisés avec les mouvements de l'utilisateur. Parmi les autres systèmes d'affichage, citons par exemple les ordinateurs portables 3D qui utilisent l'autostéréoscopie lenticulaire pour afficher des modèles 3D, ou les systèmes de projection de type cubes immersifs 3D (*Cave Automatic Virtual Environment*, ou CAVE), dont la surface d'affichage entoure l'utilisateur.



La réalité virtuelle a évolué depuis la publication, en 1965, d'un article d'Ivan Sutherland intitulé « The Ultimate Display », dans lequel le concept de réalité virtuelle était bien expliqué, mais pas la manière de le mettre en œuvre (Sutherland, 1965^[13]). En effet, le potentiel de la réalité virtuelle a radicalement changé au cours des dernières décennies. À l'époque d'I. Sutherland, les casques ne pouvaient pas effectuer le rendu des scènes de manière stéréoscopique ou multicolore. Aujourd'hui, ils peuvent reproduire la façon dont les gens voient et entendent dans le monde réel. Cependant, la qualité des systèmes de réalité virtuelle varie. Un système haut de gamme associé à un casque coûteux, pour afficher les images, et à un (puissant) ordinateur séparé, pour le rendu, offrira une qualité visuelle et sonore nettement supérieure à celle d'un casque de réalité virtuelle autonome meilleur marché qui affiche les images et effectue le rendu simultanément.

Caractéristiques technologiques de la réalité virtuelle

Comme l'ont déjà relevé des universitaires (Cummings et Bailenson, 2016^[14]), il n'existe pas de mise en œuvre type de la réalité virtuelle, qui allie plutôt diverses caractéristiques et technologies. En fonction des objectifs à atteindre, la priorité pourra être donnée à l'une ou l'autre de ces caractéristiques.

Le niveau de suivi renvoie au nombre et aux types de degrés de liberté appliqués au suivi dont l'utilisateur fait l'objet dans la réalité virtuelle. On le règle en ajustant la qualité de la méthode d'entrée. Par exemple, un suivi accru des mouvements naturels simule la façon dont le corps bouge, par opposition à une entrée de contrôleur abstraite comme un bouton ou un manche à balai. Il désigne également le nombre de degrés suivis, tels que la position de la tête, des mains, des pieds et les mouvements du visage.

Le suivi de la tête est sans doute la caractéristique la plus importante de la réalité virtuelle (Lanier, 2017^[15]). Sans lui, la réalité virtuelle n'est qu'un film en 3D. D'après les travaux de recherche, c'est à cette navigation active dans le cadre de scènes qu'elle doit son efficacité unique (Markowitz et al., 2018^[16]). Le suivi des mouvements corporels permet à l'utilisateur de faire bouger ses mains et ses jambes et de se déplacer, et il a été démontré qu'il augmente considérablement le sentiment de présence (Zanbaka et al., 2004^[17]). Certaines applications nécessitent plus de suivi que d'autres. Par exemple, la réalité virtuelle utilisée à des fins de réadaptation après un accident vasculaire cérébral requiert un système perfectionné pour suivre avec précision les mouvements des bras et des jambes (voir la sous-section sur la réadaptation médicale).

Le champ de vision est généralement associé à un sentiment de présence et un engagement dans la réalité virtuelle accrue (Hendrix et Barfield, 1996^[18]). Il donne une idée de la partie de l'environnement qu'une personne peut voir. On l'augmente généralement en modifiant la taille des écrans à proximité des yeux de l'utilisateur. Cette caractéristique est différente du champ de regard, qui correspond à la zone totale visible. Par exemple, le champ de vision typique d'un casque de réalité virtuelle est une fenêtre de la taille d'une grande feuille de papier tenue à bout de bras. En tournant la tête, on peut généralement déplacer cette fenêtre et examiner les objets et les espaces dans toutes les directions (dans ce cas, le champ de regard est alors de 360 degrés).

Toutefois, le champ de regard est fréquemment réduit. Les créateurs de contenu vidéo en réalité virtuelle passent souvent à un contenu à 180 degrés en limitant le champ de regard pour ne pas effectuer le rendu du contenu qui se trouve au-delà du champ de vision initial de l'utilisateur. Certaines applications ne nécessitent pas un grand champ de vision. Par exemple, dans une conversation en tête-à-tête, la personne qui apparaît de l'autre côté d'un bureau n'occupe pas beaucoup d'espace dans le champ visuel de l'utilisateur. En revanche, les scènes conçues pour susciter l'émerveillement, par exemple un alunissage virtuel, tirent un avantage considérable de la présence spatiale accrue qu'apporte un grand champ de vision (Brown, Bailenson et Hancock, 2023^[19]).

Le rendu stéréoscopique consiste à effectuer le rendu d'une scène deux fois de sorte que chaque œil reçoive une image provenant d'une position de caméra virtuelle légèrement différente, comme dans le cas de la vision humaine dans le monde réel. La plupart des concepteurs de réalité virtuelle considèrent que la vision stéréoscopique – c'est-à-dire la perception de la profondeur – est l'une des caractéristiques qui distingue véritablement la réalité virtuelle des autres médiums. Toutefois, la vision stéréoscopique sert avant tout pour les objets proches (situés dans un rayon d'environ six mètres) (Ono et Comerford, 1977^[20]). Elle est essentielle pour certains cas d'utilisation, notamment pour des chirurgiens s'entraînant à utiliser des scalpels et des instruments tranchants sur un corps. En revanche, pour les scènes dont le contenu critique est éloigné – par exemple une démonstration du système solaire à visée pédagogique – la perception de la profondeur n'est pas aussi importante.

Le taux de rafraîchissement (soit le nombre de fois où une scène est rendue chaque seconde) et la latence (le temps nécessaire au rendu d'une image en fonction du mouvement suivi) sont des concepts très différents, mais qui fonctionnent de la même manière pour contribuer à l'impact global de la réalité virtuelle. En général, la capacité d'un système de réalité virtuelle à effectuer rapidement le rendu des objets et des scènes accroît le sentiment de présence,

et cela se voit plus facilement dans un environnement à latence élevée (Waltemate et al., 2016_[21]). Il est important de réduire la latence et d'augmenter le taux de rafraîchissement pour réduire le mal des simulateurs, l'un des principaux inconvénients de la réalité virtuelle (voir la sous-section sur les inconvénients et les risques).

La qualité de l'image dépend de plusieurs caractéristiques technologiques qui contribuent au réalisme, à la fidélité et à la qualité générale des visuels dans la réalité virtuelle. Elle peut être améliorée de différentes façons, notamment en réglant la résolution de l'écran, les taux de scintillement, les types d'éclairage et la qualité du mappage des textures. Améliorer le niveau général de détail augmente également le nombre de polygones, qui fait que les objets ont des parties lisses et ne semblent pas être constitués de blocs.

L'écosystème de la réalité virtuelle est complexe car le port d'un casque qui doit être confortable limite les possibilités technologiques. C'est particulièrement vrai pour la réalité virtuelle autonome qui n'est pas reliée à un ordinateur ou à des caméras externes. Les caractéristiques évoquées plus haut sont nécessairement à somme nulle et les arbitrages sont inévitables.

Le choix du casque a des conséquences. Un casque à haute résolution et à large champ de vision maximisera l'impression visuelle ou l'échelle d'une scène. Toutefois, ces casques affichent généralement une latence élevée. Si les ordinateurs effectuent le rendu de scènes vastes et complexes, ils ne peuvent pas le faire aussi souvent (taux de rafraîchissement plus faible) et cela prend plus de temps (latence plus élevée). Par conséquent, la fidélité visuelle se fait au détriment de la fluidité de l'expérience vécue.

Pour les scènes assorties d'un suivi des mouvements naturels, dans lesquelles les utilisateurs regardent souvent autour d'eux, il convient généralement de privilégier les casques qui maximisent une faible latence et un taux de rafraîchissement élevé, plutôt que la taille et la qualité de l'image (c'est-à-dire le champ de vision et la résolution). Un suivi plus élaboré – par exemple de grands espaces où marcher et un suivi des mains et des pieds pour les auto-avatars – ajoute de la valeur à une scène en termes de sentiment de présence, au détriment de l'échelle et de la facilité d'utilisation. Imaginons 30 élèves qui utilisent la réalité virtuelle dans une salle de classe. Il n'y a pas assez de place pour qu'ils puissent tous se déplacer simultanément avec la réalité virtuelle à l'échelle de la pièce. Les enseignants ont donc tendance à utiliser la réalité virtuelle « 3DOF » (3 degrés de liberté) dont le suivi et le rendu se limitent aux rotations de la tête. Les élèves peuvent alors rester assis sur leur chaise et regarder autour d'eux.

Beaucoup pensent que les limitations matérielles entravent la généralisation de la réalité virtuelle. Pourtant, la plupart des casques de réalité virtuelle coûtent environ deux fois moins cher qu'un smartphone classique. Les chercheurs attribuent plutôt les faibles taux d'adoption au manque de contenu attrayant propre à la réalité virtuelle (par opposition à un écran 2D) (Mado et al., 2022_[22]). Alors que tout le monde peut publier assez rapidement un message sur les médias sociaux ou enregistrer une vidéo, il est difficile de créer une scène de réalité virtuelle réussie. En outre, plus le système matériel est complexe, plus il est difficile pour les utilisateurs de le maîtriser et pour les espaces physiques de prendre en charge plusieurs utilisateurs simultanément.

Le toucher et l'odorat sont complexes à rendre dans la réalité virtuelle

Pour la vision et l'ouïe, le cycle de suivi et de rendu est simple : les objets sont plus grands et plus bruyants lorsque l'on s'en approche. En revanche, le toucher et l'odorat sont plus complexes. La sortie tactile de l'expérience d'un utilisateur dans la réalité virtuelle est généralement rendue par de simples vibrations dans les contrôleurs manuels de l'utilisateur. Lors d'une expérience de réalité virtuelle dans un récif corallien, par exemple, l'utilisateur reçoit une légère vibration dans sa main lorsqu'il la tend dans le monde physique pour « toucher » l'endroit où un morceau de corail est rendu dans l'espace. En ce sens, le toucher dans la réalité virtuelle peut contribuer au réalisme global de l'expérience (Kreimeier et al., 2019_[23]).

Des universitaires ont également étudié le toucher virtuel interpersonnel, qui est rendu possible par la mise en réseau de plusieurs dispositifs haptiques² pour permettre à deux personnes de se toucher (Bailenson et Yee, 2008_[24]). Par exemple, quand deux avatars se touchent la main, chaque contrôleur manuel vibre simultanément pour communiquer une représentation haptique du contact. Des études ont montré que lorsque les personnes peuvent se toucher – par exemple se serrer la main virtuellement – elles s'apprécient davantage que lors d'interactions sociales sans contact (Bailenson et Yee, 2007_[25]).

Le sens de l'odorat est convaincant lorsqu'il est rendu dans la réalité virtuelle. L'un des cas d'utilisation de l'odorat les plus étudiés est la thérapie d'exposition pour les soldats souffrant de troubles de stress post-traumatique (Herz, 2021_[26]) (voir la sous-section sur la réadaptation médicale). Certaines odeurs, comme celle du diesel, peuvent agir comme des déclencheurs d'événements traumatisants. Les thérapeutes utilisent ces déclencheurs pour aider leurs patients à



développer des compétences et des stratégies afin de déconstruire les associations entre ces odeurs et le traumatisme (Mozgai et al., 2021_[27]). Des dispositifs olfactifs portables ont été développés ces dernières années. Ils sont désormais suffisamment légers pour pouvoir être fixés à la base d'un casque.

Avantages et possibilités de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle est le plus souvent associée à l'industrie du divertissement, secteur dans lequel elle rencontre un succès modeste³. Elle offre toutefois un plus grand potentiel à condition d'être développée et utilisée de manière responsable. Cette section présente un cadre, basé sur des décennies de recherches, visant à servir de guide pour déterminer dans quelles situations la réalité virtuelle est à préférer aux technologies 2D. Le cadre « DICE » aide à recenser les expériences qui se prêtent à la réalité virtuelle car elles seraient, dans le monde réel, dangereuses, impossibles, contre-productives ou onéreuses (en anglais, DICE signifie *Dangerous, Impossible, Counterproductive, Expensive*). Former les pompiers, rééduquer les victimes d'accidents vasculaires cérébraux, apprendre l'histoire de l'art dans les musées et vivre de façon instinctive et perceptive l'avenir de la Terre pour comprendre le changement climatique sont autant d'exemples qui s'inscrivent parfaitement dans le cadre DICE. En revanche, un casque de réalité virtuelle ne sera d'aucune utilité pour consulter son courrier électronique, regarder la télévision ou réaliser du travail de bureau. Ces applications fonctionnent bien mieux sur des écrans 2D. En s'abstenant de transposer inutilement ces cas d'utilisation dans la réalité virtuelle, la société s'épargnera certains des défis qui l'accompagnent (voir la sous-section sur les inconvénients et les risques). La recherche devrait plutôt se concentrer sur les domaines dans lesquels la réalité virtuelle est porteuse de transformations et constitue manifestement la meilleure solution.

Cette section est centrée sur cinq domaines qui répondent parfaitement aux critères du cadre DICE : l'enseignement de l'empathie ; l'utilisation de la réalité virtuelle comme outil de réadaptation médicale ; les interventions visant à améliorer la santé mentale ; la formation en entreprise ; et les jumeaux numériques en réalité virtuelle. Ces cas d'utilisation ont été choisis pour deux raisons. D'une part, ils utilisent tous la réalité virtuelle pour résoudre des problèmes difficiles du monde réel, au lieu de se contenter de faire quelque chose de « sympa » avec la technologie. D'autre part, ils ont déjà démontré leur capacité à se prêter à un déploiement à grande échelle. Ces cinq domaines ont tous montré comment la réalité virtuelle peut être utilisée dans un contexte pratique et l'ont mise à la disposition de milliers de personnes dans le monde.

Enseigner l'empathie

Vivre dans la réalité virtuelle une expérience qui est impossible dans le monde réel – occuper un autre corps – est un cas d'utilisation DICE classique. La réalité virtuelle permet de s'approprier le corps d'une autre personne d'un point de vue perceptif. Les tâches de prise de perspective sont plus efficaces pour promouvoir l'empathie, faire adopter de meilleures attitudes et renforcer les comportements prosociaux que les tâches moins immersives, comme visionner une vidéo ou lire une histoire. Par exemple, il a été demandé aux participants à des études d'adopter le point de vue de personnes atteintes de schizophrénie (Kalyanaraman et al., 2010_[28]) et de personnes âgées (Yee et Bailenson, 2006_[29]) par le biais de la réalité virtuelle. Dans le cadre d'autres études, les participants ont été virtuellement transformés en animaux pour comprendre d'où vient la viande de bœuf (Ahn et al., 2016_[30]) ou conduits à abattre des arbres pour mesurer les conséquences de l'absence de recyclage (Ahn, Bailenson et Park, 2014_[31]). La réalité virtuelle a la capacité unique de faire mieux comprendre les groupes marginalisés et d'induire des changements d'attitude et de comportement susceptibles de perdurer plusieurs mois après l'expérience de réalité virtuelle (Herrera et al., 2018_[32]). De telles expériences peuvent favoriser le sentiment d'appartenance et d'identification à un avatar, même si celui-ci ne ressemble pas physiquement à l'utilisateur.

Les études universitaires sur la réalité virtuelle et l'empathie sont de plus en plus connues au sein des entreprises. Sprouts Farmers Market, chaîne de magasins américaine comptant environ 35 000 salariés, a créé une série d'expériences de réalité virtuelle pour illustrer ses valeurs fondamentales, dont certaines sont liées à l'empathie. Un employé peut, par exemple, conseiller une mère anxieuse qui doit acheter des produits alimentaires sans gluten pour son enfant, ou prendre l'initiative de faire livrer une pastèque à un client âgé malade qui se trouve dans l'incapacité de conduire pour récupérer son fruit préféré.

Au lieu d'enseigner des règles sur les comportements empathiques, Sprouts Farmers Market a mis en œuvre un « modèle exemplaire » (Smith et Medin, 2002_[33]). Un tel modèle met l'accent sur des expériences marquantes qui, bien que différentes en apparence, témoignent toutes d'un comportement empathique. Elles fonctionnent en association pour construire naturellement une vision particulière du monde. Une étude a été menée pour tester la compréhension conceptuelle qu'avait un sous-groupe d'environ 300 employés des valeurs fondamentales de l'entreprise. La formation a été dispensée pour la moitié d'entre eux dans la réalité virtuelle et pour l'autre moitié au moyen d'une présentation

PowerPoint (Bailenson, 2020_[34]). Les six concepts ont été parfaitement assimilés par 48 % des employés qui ont suivi la formation dans la réalité virtuelle, et seulement par 3 % de ceux qui ont bénéficié de la présentation PowerPoint.

Le film « Clouds over Sidra » est un autre exemple d'enseignement de l'empathie à grande échelle grâce à la réalité virtuelle. Produit en partie par les Nations Unies, il s'agit d'un film immersif à 360 degrés de 8.5 minutes qui emmène les spectateurs dans un camp de réfugiés de Za'atari, dans le nord de la Jordanie, qui accueillait à l'époque plus de 80 000 Syriens déplacés en raison de la guerre civile. L'utilisateur entend une jeune fille prénommée Sidra décrire le camp et expliquer que sa famille vit dans un petit conteneur d'expédition reconverti. Le film a été salué comme l'un des contenus de réalité virtuelle les plus efficaces jamais réalisés. Selon les Nations Unies, grâce à lui, deux fois plus de personnes ont fait des dons pour venir en aide aux réfugiés syriens (Gaudiosi, 2016_[35]).

Réadaptation médicale

La réadaptation médicale peut coûter cher, et un système de réalité virtuelle à domicile permet souvent de remplacer une visite chez un physiothérapeute, avec à la clé plus de confort et d'efficacité. Il existe déjà des applications de réalité virtuelle à visée thérapeutique pour rééduquer les patients victimes notamment d'un accident vasculaire cérébral, de lésions cérébrales traumatiques ou d'une infirmité motrice cérébrale (Weiss et al., 2021_[36]). La répétition et la pratique sont importantes pour l'apprentissage moteur, une composante de la réadaptation, et les patients ont besoin d'un retour d'information sur l'efficacité de ces répétitions. En outre, ils doivent rester motivés pour effectuer des mouvements qui sont souvent douloureux ou fastidieux.

Dans une première étude, la réalité virtuelle a été utilisée pour restaurer les performances motrices de patients victimes d'un accident vasculaire cérébral (Holden, 2005_[37]). Dans ce système de réalité virtuelle, les patients s'entraînaient à effectuer divers mouvements de bras pour surmonter les déficits induits par l'accident vasculaire cérébral. Ils devaient réaliser des activités conçues pour provoquer certains mouvements, par exemple mettre une enveloppe dans une boîte aux lettres. Des traqueurs capturaient ses mouvements et fournissaient un retour d'information dans la simulation virtuelle pour l'aider à corriger la trajectoire. Ce système a donné de meilleurs résultats que les autres types de réadaptation pour ce qui est de l'expérience du patient et a permis d'améliorer les mouvements dans le monde réel (Holden, 2005_[37]). Une revue systématique récente qui décrit 27 études quantitatives utilisant la réalité virtuelle de manière similaire fait état de résultats positifs constants (Khan, Podlasek et Soma, 2021_[38]).

La transformation de la représentation virtuelle des mouvements physiques est un domaine prometteur pour la réadaptation médicale. Des universitaires ont étudié la quantité d'effort à fournir pour agir virtuellement, en augmentant le gain entre les mouvements des participants dans la vie réelle et ceux de leur avatar dans le monde virtuel (Won et al., 2017_[39]). En d'autres termes, si le patient plie son genou de 20 degrés dans le monde réel, il voit son avatar virtuel plier son genou de 40 degrés dans la réalité virtuelle. L'objectif était d'aider le patient à visualiser ses possibilités, afin de lui permettre de voir le gain de mobilité qu'il pourrait atteindre à terme.

Les psychologues parlent dans ce cas de la « connaissance de ses propres capacités », soit l'idée selon laquelle, pour atteindre un objectif, il est essentiel de croire en sa réalisation. La visualisation positive peut être une aide puissante à la guérison. Cependant, lorsqu'un patient souffre, il peut avoir du mal à passer outre sa douleur pour s'imaginer en bonne forme physique pendant sa thérapie. Pour autant, les premiers résultats cliniques sont prometteurs (Won et al., 2015_[40]), et seule la réalité virtuelle permet de montrer aux patients des mouvements qu'ils n'arrivent pas encore à effectuer.

Au cours des dernières années, la réadaptation par la réalité virtuelle de patients ayant souffert d'accidents vasculaires cérébraux a dépassé les frontières du monde universitaire. Par exemple, les dispositifs médicaux de Penumbra mettent en œuvre à grande échelle un système de suivi du corps entier (le système REAL) utilisé par des milliers de vétérans de guerre à travers les États-Unis pour leur réadaptation (Bailey, 2023_[41]). Ce cas d'utilisation répond parfaitement aux critères du cadre DICE, et les patients tirent des avantages considérables dès quelques courtes séances hebdomadaires.

Santé mentale

Si les comportements négatifs (tels que la cyberintimidation et le harcèlement) sont associés à des risques pour la santé mentale dans les environnements numériques, ils peuvent devenir plus dangereux encore dans les environnements immersifs (Danaher, 2018_[42]) (voir également le Coup de projecteur « La santé mentale dans les environnements numériques »). Du fait de phénomènes comme le sentiment de présence, l'émotion et l'immersion, les utilisateurs peuvent ressentir plus profondément les effets des contenus à charge émotionnelle, notamment ceux des menaces violentes, parce que la réalité virtuelle ne se limite pas à des mots abstraits, mais présente des contenus en trois dimensions (Cummings et Bailenson, 2016_[14] ; Cadet et Chainay, 2020_[43]).

4. LA RÉALITÉ VIRTUELLE, SES POSSIBILITÉS ET SES RISQUES



Il est toutefois également établi que la réalité virtuelle peut jouer un rôle positif dans la santé mentale. Par exemple, des études cliniques menées dans le monde entier se sont intéressées à l'effet de la réalité virtuelle dans des domaines allant de la diminution de l'anxiété au traitement des phobies, en passant par le développement de relations interpersonnelles et la réduction de l'isolement social. Au cours des dernières années, plusieurs études systématiques ont analysé l'état de la recherche dans le domaine de la santé mentale dans la réalité virtuelle (Cieslik et al., 2020^[44] ; Hatta et al., 2022^[45]).

La thérapie d'exposition est l'un des traitements par la réalité virtuelle les plus éprouvés en matière de santé mentale. Elle est définie comme étant un traitement psychologique scientifiquement reconnu, mis au point pour aider les patients à affronter leurs peurs en diminuant l'évitement des objets, des situations ou des activités redoutés par le biais de la désensibilisation (APA, 2023^[46]). Il existe de nombreuses formes de thérapie d'exposition. L'exposition in vivo consiste à interagir directement avec ses peurs dans le monde réel. L'exposition imaginaire implique d'imaginer les objets ou les situations redoutés. Aujourd'hui, l'American Psychological Association mentionne explicitement l'exposition dans la réalité virtuelle comme une forme de cette thérapie scientifiquement validée pour traiter les troubles anxieux.

Rothbaum et al. (1995^[47]) ont été les premiers à établir que la réalité virtuelle constitue un traitement efficace en démontrant que la thérapie d'exposition par la réalité virtuelle peut aider des patients à surmonter leur peur du vide. D'une certaine manière, la réalité virtuelle fonctionne comme la thérapie d'exposition in vivo traditionnelle, car elle induit un sentiment de présence. Pour un patient qui a peur du vide dans le monde réel, se tenir au bord d'un bâtiment virtuel est tout aussi effrayant dans la réalité virtuelle. Cette dernière peut donc être utilisée pour aider à traiter cette phobie.

Dans ce contexte, la réalité virtuelle présente quatre avantages uniques. Premièrement, elle réduit considérablement les coûts. On traite généralement la peur de l'avion en demandant à la personne qui en souffre de se rendre physiquement dans un aéroport, de passer du temps dans une zone d'embarquement et, enfin, de monter à bord d'un avion. Compte tenu des protocoles de sécurité en vigueur dans les aéroports, le patient est souvent contraint d'acheter des billets d'avion dans le cadre de son traitement, ce qui revient cher. Deuxièmement, la réalité virtuelle permet au thérapeute de simuler des événements extrêmement rares, par exemple, de mauvaises conditions météorologiques et des turbulences, par simple pression d'un bouton. Le thérapeute peut ainsi utiliser la réalité virtuelle pour confronter le patient à ses peurs d'une manière qui n'est pas possible lors d'un vol réel. Troisièmement, grâce à la réalité virtuelle, le thérapeute peut réduire l'exposition du patient à des expériences psychologiquement dangereuses ou susceptibles d'aggraver son traumatisme. Si un patient craint de traverser des gorges en voiture, par exemple, le clinicien peut modifier la profondeur des gorges, la vitesse de la voiture ou les conditions météorologiques. Enfin, la réalité virtuelle protège le patient contre tout risque de préjudice physique. Dans la réalité virtuelle, on ne sera pas mordu par une araignée ou heurté par un objet en cas de turbulences pendant un vol.

Depuis la première étude de Rothbaum, de nombreux travaux ont été consacrés au traitement des troubles de stress post-traumatique. En 2002, des universitaires ont utilisé la thérapie par la réalité virtuelle pour traiter un premier intervenant qui avait développé des troubles de stress post-traumatique suite à l'attaque du World Trade Center du 11 septembre (Difede et Hoffman, 2002^[48]). Les thérapies traditionnelles reposant sur des techniques d'imagerie mentale dirigée s'étaient avérées inefficaces dans son cas. Le patient a donc été progressivement exposé à un environnement virtuel dans lequel des avions passaient au-dessus de sa tête et s'écrasaient sur des bâtiments, des explosions se produisaient et des gratte-ciels s'effondraient. À l'issue de son traitement, il a signalé une réduction des symptômes aigus liés aux troubles de stress post-traumatique. Ce cas illustre comment la réalité virtuelle a immergé en toute sécurité un utilisateur dans des simulations d'environnements traumatisants.

Depuis lors, des centaines d'études ont été réalisées dans ce domaine. Une méta-analyse a par exemple cherché à examiner l'efficacité de la réalité virtuelle dans le traitement des troubles de stress post-traumatique. Il en est ressorti que la réalité virtuelle donnait de meilleurs résultats que les essais contrôlés et que les effets positifs obtenus persistaient après la fin du traitement (Wenrui et al., 2019^[49]).

Comme pour les autres cas d'utilisation de la réalité virtuelle présentés dans ce chapitre, les travaux universitaires consacrés aux troubles de stress post-traumatique montrent qu'un déploiement à grande échelle est possible dans le monde entier. En 2007, Rizzo, Rothbaum et Graap (2007^[50]) ont mis au point un système de thérapie d'exposition par la réalité virtuelle pour les vétérans atteints de troubles de stress post-traumatique qui intégrait le retour d'information fourni par des études portant sur les soldats de retour de la guerre d'Irak. Au cours des années suivantes, l'efficacité clinique du traitement a été démontrée. Aujourd'hui le système commercial BRAVEMIND comprend des scénarios d'exposition, y compris dans des villes et des villages modélisés d'après des localités qui existent réellement en Irak et en Afghanistan (Rizzo et al., 2010^[51]). BRAVEMIND est déployé à grande échelle dans des cliniques et hôpitaux pour vétérans à travers les États-Unis.

Formation

Une formation peut être dangereuse, coûteuse et les rares événements qui sont des moments propices à l'apprentissage sont difficiles à reproduire. C'est pourquoi, depuis des décennies, soldats, chirurgiens et astronautes s'entraînent dans la réalité virtuelle (Bailenson, 2018_[52]). En effet, c'est en faisant soi-même les choses et en bénéficiant d'un retour d'information en cas d'erreur que l'on apprend le mieux. La formation à des activités à fort enjeu constitue par conséquent une application naturelle de la réalité virtuelle. Par exemple, les travaux de recherche montrent que la réalité virtuelle renforce la confiance des chirurgiens en formation, améliore leur compréhension de l'anatomie et leur offre un espace à faible risque pour s'entraîner à pratiquer des techniques chirurgicales difficiles (Paro, Hersh et Bulsara, 2022_[53]). Aujourd'hui, des milliers de chirurgiens s'entraînent dans la réalité virtuelle et même sa version grand public les aide à devenir plus compétents et plus efficaces dans leur travail (McKinney et al., 2022_[54]).

Il existe également des études universitaires sur la formation aux interventions chirurgicales, et la littérature est suffisamment étayée pour inclure plusieurs méta-analyses. L'une d'elles, par exemple, compare la formation chirurgicale dans la réalité virtuelle à d'autres techniques (Su et al., 2023_[55]). Les résultats montrent pour la plupart que la formation dans la réalité virtuelle donne des résultats meilleurs (ou équivalents) à ceux des formations en face-à-face, qu'elle permet de réaliser des économies et qu'elle est plus courte que les techniques traditionnelles.

Au cours de la dernière décennie, la réalité virtuelle s'est étendue à la formation en entreprise (Bailenson, 2018_[52]). L'un des modules les plus fréquemment utilisés, dénommé « The Pickup Tower », ressemble à un grand kiosque grâce auquel les clients récupèrent leurs achats réalisés en ligne. Walmart a formé plus d'un million de ses collaborateurs à l'aide de ce module. Les stagiaires reçoivent des instructions pas à pas sur la manière d'utiliser la machine, avec un retour d'information immédiat en cas d'erreur. Avant la mise au point du module de formation par la réalité virtuelle, chaque employé passait une journée entière à se former dans un magasin spécifique. Grâce à la réalité virtuelle, la formation ne dure plus que 15 minutes, et le temps et les frais de déplacement ont été supprimés. Étant donné que tous les collaborateurs de Walmart aux États-Unis doivent se former à The Pickup Tower, la réalité virtuelle a permis à l'enseigne d'économiser plus d'un million de jours de travail, pour le même niveau d'efficacité (Bailenson, 2020_[34]).

Dans le domaine de la formation, les ressources humaines ont également adopté la réalité virtuelle. Une récente étude s'est intéressée aux formations visant à apprendre aux témoins de harcèlement sexuel à intervenir de manière appropriée (Rawski, Foster et Bailenson, 2022_[56]). Elle a démontré que ces formations sont plus efficaces lorsque les scénarios sur lesquelles elles reposent ne sont pas présentés dans des vidéos en 2D, mais dans la réalité virtuelle, car cette dernière permet aux stagiaires de développer les compétences nécessaires dans un environnement plus réaliste.

Depuis que le simulateur de vol a été mis au point en 1929 par Edmund Link, la formation au pilotage s'est avérée être un cas d'utilisation parfait de la réalité virtuelle. La formation répond à tous les critères du modèle DICE et continue d'être la force motrice de la réalité virtuelle en tant que médium, à la fois pour les entreprises et pour les consommateurs. En effet, la formation personnelle est l'un des cas d'utilisation les plus populaires de la réalité virtuelle autonome (Eakin, 2018_[57]). Des employés de Walmart ont ainsi été formés à l'intervention d'urgence en cas de fusillade. La formation s'appuyait sur un jumeau numérique du magasin et permettait aux collaborateurs de répéter des techniques de survie essentielles (comment se cacher, que dire au tireur et quel comportement non verbal adopter). Certains de ces stagiaires étaient en poste lors de la fusillade de 2019 dans un magasin Walmart à El Paso, au Texas. Selon le président-directeur général de Walmart, Doug McMillon, « des vies ont été sauvées et des secondes ont été gagnées » grâce à cette formation (Jenkins, 2019_[58]). Les employés n'étaient pas des utilisateurs quotidiens de la réalité virtuelle, mais l'expérience intense d'une formation dans cet environnement immersif était restée gravée dans leur mémoire.

Jumeaux numériques en réalité virtuelle

Certaines entreprises utilisent la technologie des jumeaux numériques en réalité virtuelle pour économiser du temps et des ressources. Elles utilisent des jumeaux numériques pour modéliser des systèmes complexes, souvent dans les domaines de l'urbanisme, de la conception architecturale, de la fabrication et de la formation (Botín-Sanabria et al., 2022_[59]). Dans une usine qui tourne en continu et dont les employés travaillent par équipes tournantes, une formation classique des nouveaux embauchés nécessiterait l'arrêt des opérations. Grâce aux jumeaux numériques, il est désormais possible de dispenser des formations sans perturber le flux de travail.

Il existe deux types de techniques de construction : la modélisation et la capture. La modélisation consiste à construire un monde virtuel, un élément après l'autre. Par exemple, pour construire une usine, on utilise un logiciel de modélisation 3D ou la photogrammétrie pour créer les machines, les pièces, les employés et les sons environnants. Ces éléments sont ensuite assemblés comme on le ferait pour un diorama.



La capture consiste à utiliser des caméras spéciales pour produire une vidéo sphérique. La capture volumétrique – qui utilise des caméras passives et actives pour générer des nuages de points de scènes – permet de se déplacer dans une scène et rend des modèles réalistes. Toutefois, cette méthode est coûteuse, car elle nécessite des salles dédiées, de la vidéo stéréoscopique et d'autres formes de vidéo capables de capturer une scène « telle quelle ». Par exemple, une vidéo sphérique crée une vue continue à 360 degrés qui est visible en tournant la tête. Bien qu'elle ait une haute résolution et puisse facilement être enregistrée à l'aide d'une seule caméra, elle ne permet qu'un point de vue unique. Par exemple, si une vidéo à 360 degrés était tournée depuis la chaîne de montage d'une usine, le spectateur ne pourrait jamais regarder sous une table voisine. La photogrammétrie, qui déduit la structure 3D en instanciant de multiples images fixes du même objet sous différents angles, est une technique robuste. Cependant, elle ne fonctionne pas bien dans les scènes avec du mouvement, telles qu'un transporteur à courroie sur lequel travaillent de nombreuses personnes.

Le travail effectué par Elizabeth Baron chez Ford Motor Company (Baron, 2009_[60]) offre l'un des meilleurs exemples de jumeaux numériques. Le laboratoire d'Elizabeth Baron a utilisé la réalité virtuelle pour tester la réaction de conducteurs de différents âges face à des prototypes de voitures reproduits à l'aide de jumeaux numériques. Les résultats de ces tests ont permis d'adapter le design des voitures afin qu'il soit plus facile pour les conducteurs plus âgés d'y entrer et d'en sortir. De plus, Ford souhaitait comprendre comment la forme du pare-brise affecte la distraction au volant. Par exemple, quel rôle elle joue dans la façon dont le conducteur réagit aux éléments qui attirent son attention. Grâce à la réalité virtuelle, l'équipe d'Elizabeth Baron a conçu des pare-brises qui réduisent au minimum les distractions et améliorent les performances de conduite. Les essais dans la réalité virtuelle ne produisant pas de dommages physiques réels, Ford a ainsi pu réaliser des expériences qui auraient été autrement impossibles. Par exemple, le constructeur a testé un système de sécurité qui détecte les changements de voie involontaires. Un tel test dans le monde réel présente évidemment des risques pour la sécurité, alors qu'en utilisant un jumeau numérique, les scientifiques ont capturé des comportements de conduite « naturalistes » sans risque.

Inconvénients et risques de la réalité virtuelle

Il est inévitable qu'une expérience de réalité virtuelle suffisamment puissante pour altérer le bien-être psychologique et l'empathie à l'égard d'autres personnes et d'autres cultures présente également des inconvénients et des risques. Cette section passe en revue cinq domaines de préoccupation spécifiquement associés à la réalité virtuelle qui vont au-delà de ceux concernant les environnements numériques 2D : la protection de la vie privée, notamment en ce qui concerne le suivi des mouvements du corps ; le développement cognitif des enfants ; le mal des simulateurs ; la distraction au volant et l'utilisation excessive et dépendance. Ils ont été retenus pour deux raisons. D'une part, des travaux de recherche universitaires leur ont été consacrés afin de guider les décideurs. D'autre part, ils sont propres aux caractéristiques technologiques de la réalité virtuelle examinées plus haut.

Risques liés à la protection de la vie privée

La réalité virtuelle amplifie les risques d'atteinte à la vie privée associés aux dispositifs connectés à l'internet, notamment dans le cadre de l'internet des objets (IdO), et les étend sous de nouvelles formes. Les technologies de réalité virtuelle et leurs applications évoluent rapidement. La collecte sans précédent de données directement liées à l'environnement des utilisateurs et à leur corps crée des risques supplémentaires pour les libertés et les droits fondamentaux des individus. Ce problème est exacerbé par la nécessité d'utiliser des capteurs, tels que des caméras (voir plus haut) dans la réalité virtuelle. En d'autres termes, bloquer les caméras – comme on peut le faire sur un ordinateur portable – est impossible dans la réalité virtuelle.

Les organismes de réglementation de la protection de la vie privée et des données identifient comme l'un des principaux effets négatifs la surveillance constante des interactions des utilisateurs, les atteintes à la vie privée devenant la norme aussi bien pour les utilisateurs directs que pour les spectateurs (Contrôleur européen de la protection des données, 2022_[61]). Autre risque : celui d'un profilage toujours plus approfondi, qui permet de cibler des individus à un niveau de détail croissant. À cela s'ajoute la surveillance sans précédent de données sensibles en temps réel telles que les réactions physiologiques, les émotions et les données biométriques (Kim, 2022_[62]).

Les technologies de réalité virtuelle enregistrent régulièrement des données à caractère personnel concernant la localisation des personnes, leurs liens sociaux, leurs requêtes de recherche et leurs préférences en matière de produits. Une fois combinées, ces données rendent possible une identification précise des utilisateurs. Ces données combinées peuvent déjà être considérées comme sensibles en raison des conclusions qu'elles permettent de tirer sur les personnes (par exemple sur leur état de santé, leurs préférences sexuelles ou leurs croyances religieuses).

Dans la réalité virtuelle, la collecte de données générées par l'environnement ou le langage corporel d'une personne amplifie les risques associés à la création de profils détaillés. Ces données concernent le fonctionnement du corps, y compris la communication verbale. Cependant, elles sont également de nature « émotionnelle » (les données déduites des expressions faciales et des inflexions vocales en sont des exemples).

Des données sur le comportement non verbal, comme la posture de l'utilisateur, son regard, ses gestes, ses expressions faciales et la distance interpersonnelle, sont collectées. Pour afficher correctement une scène, certains des systèmes de réalité virtuelle les plus populaires suivent les mouvements du corps 90 fois par seconde. Les systèmes de réalité virtuelle haut de gamme enregistrent 18 types de mouvements de la tête et des mains. Par conséquent, passer 20 minutes dans un système de réalité virtuelle génère un peu moins de 2 millions d'enregistrements uniques du langage corporel.

Le comportement non verbal est en grande partie automatique et peut être utilisé pour déduire l'identité d'une personne, ses émotions et ses problèmes de santé (Miller et al., 2020^[63]). Si chacun est en mesure de contrôler les images et les textes qu'il publie sur les médias sociaux, rares sont les personnes qui arrivent à réguler systématiquement leur taille ou leurs micromouvements et gestes subtils tels que les regards en coin et les sourires sincères. En ce sens, les données non verbales donnent des indications uniques sur un individu (Ekman et Friesen, 1969^[64]). On peut donc affirmer qu'un fournisseur de services de réalité virtuelle connaît chaque utilisateur plus intimement que l'utilisateur ne se connaît lui-même.

Encadré 4.1. Données de suivi : les gestes sont plus éloquents que les mots

Les volumes de données de suivi augmentent de manière exponentielle à mesure que la réalité virtuelle évolue. Les capteurs de vision par ordinateur des principaux casques autonomes dépendent de caméras situées à l'extérieur du casque, qui filment la pièce dans laquelle se trouvent les utilisateurs et les autres personnes présentes. De nombreuses politiques de protection de la vie privée (Meta, 2023^[65]) applicables à ces casques indiquent clairement que les fabricants de casques peuvent utiliser les images filmées par les caméras, en partie parce que les données de suivi constituent un élément essentiel de la réalité virtuelle.

Depuis plus de dix ans, les universitaires utilisent les données de suivi de la réalité virtuelle à des fins de recherche. Très tôt, Rizzo et ses collègues ont construit une salle de classe virtuelle dans laquelle se trouvaient des élèves, un enseignant qui dispensait un cours et diverses sources de distraction (Rizzo et al., 2004^[66]). Ils ont ainsi observé un plus grand nombre de mouvements de la tête chez les enfants souffrant de troubles du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité que chez ceux qui n'en souffraient pas.

En utilisant un paradigme d'évaluation similaire, Jarrold et ses collègues ont démontré que les élèves atteints de troubles du spectre autistique à haut niveau de fonctionnement regardaient moins souvent les autres participants à une expérience de réalité virtuelle que les autres élèves (Jarrold et al., 2013^[67]). Won et ses collègues ont utilisé les données de suivi d'élèves pendant une leçon dans la réalité virtuelle pour prédire avec précision leur future note (Won, Bailenson et Janssen, 2014^[68]). Le langage corporel des enseignants et des élèves pendant un cours dispensé dans la réalité virtuelle a permis de déterminer avec précision la note des élèves à l'évaluation suivante.

Si l'agrégation et l'anonymisation des données contribuent en général à protéger la vie privée, ces techniques fonctionnent moins bien dans le cas des données de suivi. Miller et ses collègues ont testé les possibilités d'identification des utilisateurs dans des circonstances typiques de visualisation dans la réalité virtuelle, sans tâche d'identification spécifique (Miller et al., 2020^[63]). En d'autres termes, ils ont examiné les données de suivi de personnes effectuant des activités standard dans la réalité virtuelle, telles que le visionnage de vidéos à 360 degrés. Ils ont ensuite supprimé les fichiers de suivi et utilisé des algorithmes d'apprentissage automatique pour identifier des individus dans le groupe. Sur 511 participants, le système a identifié correctement 95 % des utilisateurs après avoir été entraîné sur moins de cinq minutes de données de suivi par personne. Des travaux plus récents montrent que le temps passé dans les expériences de réalité virtuelle et leur fréquence sont des éléments clés de l'identification des utilisateurs (Miller et al., 2023^[69]).

Une étude menée sur plus de 55 000 utilisateurs du jeu « Beat Saber » a révélé que les données de suivi permettent d'identifier individuellement un peu plus de 94 % de ses utilisateurs (Nair et al., 2023^[70]). Dans le cadre de ces travaux, on a également comparé la précision d'identification de diverses technologies biométriques (balayage d'iris, données de mouvement provenant de systèmes de réalité virtuelle et de réalité augmentée, empreintes digitales, lecture du visage et parole). Seul le balayage d'iris a fait mieux que les données de mouvement provenant de systèmes de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour ce qui est de la capacité à identifier personnellement les utilisateurs.



La réalité virtuelle soulève également des interrogations sur la protection des données de santé, notamment biométriques, qui ne sont pas gérées par les canaux traditionnels de prise en charge des patients, comme les hôpitaux et les prestataires de soins de santé. De nouvelles questions se posent quant à savoir si et comment les entités proposant des expériences immersives devraient se voir interdire de créer et/ou de partager les profils comportementaux ou émotionnels des utilisateurs. Devrait-on imposer à ces entités des limites concernant les publicités ciblant les mineurs ou les destinataires vulnérables en raison de leur genre, de leur origine ethnique ou raciale, ou d'un handicap ?

Mal des simulateurs

Dans le monde réel, le cerveau assimile en permanence des informations perceptives. Il s'agit notamment d'images, de sons, d'informations vestibulaires (l'oreille interne vibre d'une manière particulière lorsque l'on marche ou que l'on bouge la tête) et d'informations somatosensorielles (les muscles des pieds ressentent le sol lorsque l'on marche). L'être humain a évolué en s'appuyant sur ces schémas perceptifs précis et immuables pendant des centaines de milliers d'années. Ces informations fonctionnent ensemble d'une manière particulière, et ce n'est qu'au cours des dernières décennies que les technologies immersives ont présenté au cerveau un nouveau défi perceptif.

Le mal des simulateurs survient lorsque le cerveau reçoit ces informations d'une manière qui n'est pas naturelle, souvent décrite comme un « réarrangement sensoriel » ou un « conflit des informations perceptives ». Ce phénomène est étudié depuis les années 1950 et l'apparition des premiers simulateurs de vol (OTAN, 2021^[71]). Compte tenu de l'essor récent des technologies immersives susceptibles de déclencher le mal des simulateurs (réalité virtuelle, IMAX ou les manèges en 4D, par exemple), les études scientifiques dans ce domaine se sont multipliées. Le mal des simulateurs est un sous-ensemble de ce que l'on nomme communément le mal des transports. Par exemple, le mal de mer survient généralement parce que le cerveau reçoit des informations vestibulaires alors que les yeux ne reçoivent pas les changements du flux optique, en particulier lorsque l'on est assis à l'intérieur d'un bateau. Dans la réalité virtuelle, les yeux reçoivent souvent un flux optique, mais il n'y a pas d'informations vestibulaires correspondantes puisque l'utilisateur est assis sur son siège.

Les symptômes du mal des simulateurs sont généralement mesurés à l'aide d'une vingtaine de marqueurs physiologiques et psychologiques, dont la difficulté à se concentrer, les nausées, la vision trouble, la sensation de tête pleine, les étourdissements, les vertiges, une sensation de malaise général, une fatigue oculaire, la transpiration et les éructations. Environ un tiers des utilisateurs de réalité virtuelle présentent certains symptômes, et environ 5 % présentent des symptômes graves (OTAN, 2021^[71]). Les différences individuelles telles que l'âge, le genre et les antécédents médicaux peuvent influencer l'apparition du mal des simulateurs. Ces symptômes sont passagers, mais désagréables. Retirer son casque toutes les 30 minutes, utiliser un bon matériel (c'est-à-dire présentant une faible latence et un taux de rafraîchissement élevé) et privilégier un contenu qui évite le conflit des informations perceptives décrit plus haut sont autant de règles qui permettent de limiter le mal des simulateurs. Certaines personnes, par exemple celles souffrant de nausées sur le siège passager d'une voiture, ne supportent simplement pas la réalité virtuelle, même pendant de courtes durées.

Développement cognitif et comportement des enfants

Les effets d'une exposition à long terme à la réalité virtuelle et à d'autres technologies immersives sur le développement cognitif des enfants sont un sujet de préoccupation important (Allcoat et von Mühlhagen, 2018^[72]). Il convient également de déterminer en quoi la réalité virtuelle diffère des autres médiums et si, et de quelle manière, elle modifie le point de vue et le comportement des enfants.

Bien que les travaux de recherche universitaires dans ce domaine soient limités, la littérature montre généralement que les jeunes enfants vivent plus intensément les expériences de réalité virtuelle que les adultes (Bailey et Bailenson, 2017^[73]). De plus, les effets de la réalité virtuelle tendent à être amplifiés par rapport à ceux des médiums traditionnels tels que la télévision. On sait, par exemple, que les jeunes enfants sont susceptibles d'acquérir de faux souvenirs lorsqu'ils sont exposés à toutes sortes d'éléments, qu'il s'agisse de récits verbaux, d'images mentales ou de photographies modifiées. Dans une étude publiée en 2008, des universitaires ont testé la capacité des enfants d'âge préscolaire et en début d'école primaire à différencier les expériences virtuelles des expériences réelles, à la fois immédiatement et une semaine après l'exposition à une expérience de réalité virtuelle (Segovia et Bailenson, 2008^[74]). Par exemple, après avoir vécu une expérience de réalité virtuelle dans laquelle ils nageaient avec des baleines, beaucoup d'enfants scolarisés en école élémentaire ont formé de « faux souvenirs » et pensaient être physiquement allés à SeaWorld pour voir une orque (alors qu'ils ne l'avaient vue que dans la réalité virtuelle).

Une autre étude a examiné les effets potentiels de la réalité virtuelle sur les réponses comportementales et cognitives des enfants (Bailey et al., 2019^[75]). Les chercheurs ont comparé les effets de l'interaction avec un personnage virtuel sur un écran de télévision et dans la réalité virtuelle. Dans une simulation programmée, 55 enfants âgés de quatre à six ans ont pu interagir avec un personnage virtuel – en l'occurrence Grover, le gentil monstre à fourrure bleue de la série télévisée pour enfants *Sesame Street*. Par rapport à l'expérience non immersive (qui consistait à regarder Grover sur un écran de télévision), les enfants ayant participé à l'expérience de réalité virtuelle ont montré un contrôle inhibiteur sensiblement plus faible. Cela a été mesuré par leur capacité à jouer au jeu « Jacques a dit » avec Grover. Ils étaient également été plus enclins à interagir avec le personnage dans la réalité virtuelle et à lui donner de vrais autocollants. Cette étude laisse à penser que la réalité virtuelle suscite chez les enfants des réactions comportementales différentes de celles qu'ils ont lors d'expériences leur présentant un contenu similaire sur un écran 2D, et qu'il est possible que les enfants traitent différemment le contenu de la réalité virtuelle.

De plus amples études sur les effets de la réalité virtuelle sur les enfants étant nécessaires, il convient d'appeler à modérer l'usage qu'ils en font. Au lieu de parler en heures d'utilisation, comme pour d'autres appareils numériques, il est important de penser ici en minutes. Pour ce qui est du contenu, une règle devrait prévaloir : si les parents ne souhaitent pas que leurs enfants vivent avec le souvenir d'un événement survenu dans le monde réel, ils ne doivent pas les laisser en faire l'expérience dans la réalité virtuelle. Voyager sur la Lune ne pose pas de problème, mais une expérience effrayante restera gravée dans leur mémoire. La sécurité physique est un autre facteur important pour tous, mais surtout pour les enfants. Par définition, la réalité virtuelle masque le monde réel. Il est donc primordial de surveiller les enfants jouant à proximité de meubles aux arêtes vives, d'animaux, d'escaliers, etc. Les études montrent que la majorité des enfants sont ravis de faire l'expérience de la réalité virtuelle, sans qu'aucun accident ou trouble ne soit signalé. Toutefois, dans ces études, les enfants rencontraient le personnage Grover de *Sesame Street*, et faisaient, sous supervision, des sessions de réalité virtuelle qui ne duraient que cinq minutes environ.

Distraction au volant

L'idée de conduire une automobile en portant un casque de réalité virtuelle peut sembler inattendue, mais plusieurs entreprises avancent dans cette direction. Leurs motivations vont du divertissement des passagers, qui souvent lisent un livre ou utilisent d'autres supports pour se distraire, jusqu'à la création d'un « équipement additionnel », similaire à un autoradio, pour les voitures autonomes. Des entreprises invitent même le conducteur à porter un casque de réalité virtuelle.

Le constructeur automobile BMW et Varjo, fabricant de casques de réalité virtuelle, ont récemment collaboré pour proposer aux conducteurs de porter un casque de réalité virtuelle dans une automobile, de la même façon que les pilotes de chasse se servent de cockpits virtuels. Le conducteur voit ainsi un rendu informatique de son environnement, et non la lumière qui passe à travers un pare-brise en verre. En conséquence, des informations sur la circulation, la température et la vitesse peuvent être projetées dans son champ de vision (XR Today, 2022^[76]).

Faccio et McConnell (2018^[77]) ont étudié l'impact du jeu vidéo de réalité augmentée Pokémon GO, dans lequel les joueurs se promènent dans le monde réel en regardant un flux de caméra en temps réel qui superpose des objets virtuels à la scène. Bien que ce ne soit pas techniquement un casque de réalité virtuelle ou de réalité augmentée, il s'agit néanmoins d'un premier pas important vers l'utilisation de la réalité virtuelle dans les automobiles. Les auteurs montrent que Pokémon GO a été téléchargé 100 millions de fois dans les 148 jours qui ont suivi le lancement du jeu. Ils ont ensuite analysé un peu moins de 12 000 rapports de police concernant des accidents survenus dans une ville pour identifier ceux dus à Pokémon GO, puis établi une projection de l'incidence du jeu à l'échelle nationale. Ils en ont conclu que le fait de jouer à Pokémon GO a été associé à un peu moins de 150 000 accidents de voiture au cours de la période considérée, et à un peu plus de 250 décès (Faccio et McConnell, 2018^[77]). Depuis la fin de l'étude, la popularité de ce jeu de localisation en réalité augmentée est restée stable : plus d'un tiers de l'ensemble des consommateurs réguliers de jeux vidéo aux États-Unis y jouent (Statistica, 2023^[78]).

Utilisation excessive et dépendance

La réalité virtuelle est spéciale parce qu'elle est immersive, réagit aux mouvements naturels du corps et masque le monde physique pour rendre l'illusion encore plus convaincante. Or, ces mêmes caractéristiques font qu'il est difficile de résister aux tentations virtuelles. Dans le roman *Ready Player One*, d'Ernest Cline, le seul refuge d'un monde dystopique est un immense univers virtuel dans lequel les individus se retirent dès qu'ils en ont l'occasion. La réalité virtuelle est décrite dans cette histoire et dans d'autres comme un lieu d'évasion ultime, avec des conséquences inquiétantes pour le monde physique. Compte tenu des schémas d'utilisation des supports contemporains, se retirer dans un monde imaginaire que l'on organiserait soi-même ne semble plus relever de la science-fiction (Steinicke et Bruder, 2014^[79]). Imaginons un monde où les médias sociaux ressembleraient aux plus belles fêtes, et où les jeux d'argent en ligne



ouvriraient les portes de la salle la plus exclusive d'un casino de Monaco. L'accès permanent à la perfection dans le monde virtuel pourrait modifier la façon dont les individus interagissent avec le monde réel.

Les travaux de recherche sur les conséquences pour la santé d'une utilisation prolongée de la réalité virtuelle ne sont pas pour l'heure assez nombreux. Dans le cadre d'une étude, un universitaire a passé 24 heures avec un casque de réalité virtuelle dans des conditions soigneusement contrôlées (Steinicke et Bruder, 2014^[79]). Dans leur article, les auteurs indiquent que « plusieurs fois au cours de l'expérience, le participant ne savait plus s'il se trouvait dans l'environnement virtuel ou dans le monde réel, et mélangeait certains artefacts et événements des deux mondes ». L'une des priorités phares de la recherche devrait être d'étudier les effets physiologiques et psychologiques d'une utilisation prolongée de la réalité virtuelle pendant plusieurs mois (Han et al., 2023^[80]).

Des travaux de recherche expérimentale ont été menés pour quantifier les effets du passage d'un environnement de travail organisé autour du bureau à un environnement basé sur la réalité virtuelle (Biener et al., 2022^[81]). Dans cette étude, les participants ont travaillé soit dans un environnement de bureau traditionnel, soit dans un environnement de réalité virtuelle, huit heures par jour pendant cinq jours d'affilée. Les résultats ont montré que, par rapport à l'environnement de bureau traditionnel, les personnes qui ont travaillé dans un environnement de réalité virtuelle ont jugé la facilité d'utilisation moins bonne et ont été relativement nombreuses à souffrir du mal des simulateurs. En outre, deux participants à l'étude ont dû abandonner l'expérience dès le premier jour en raison d'un inconfort physique, notamment de nausées et de migraines. Toutefois, ceux qui ont poursuivi l'expérience ont un peu mieux noté la facilité d'utilisation au fil de la semaine.

Assurer la gouvernance de la réalité virtuelle

La technologie évolue en général plus rapidement que les cadres réglementaires. La transformation numérique est complexe et présente de multiples facettes. Un cadre d'action sur le numérique complet et coordonné, tel que le Cadre d'action intégré du projet « Vers le numérique » (OCDE, 2020^[82]), s'avère par conséquent essentiel. Un tel cadre permet de s'assurer que les technologies numériques sont, dans l'ensemble, une force positive pour les individus et la société. À mesure que la réalité virtuelle se généralise, les décideurs doivent se demander si elle présente des caractéristiques uniques. Les pouvoirs publics doivent-ils prendre des mesures spécifiques ou les règles existantes qui régissent la transformation numérique (protection de la vie privée, sécurité numérique ou concurrence) sont-elles suffisantes ?

La réalité virtuelle et les autres technologies immersives sont arrivées à une étape charnière : elles sont suffisamment développées pour que les possibilités et les risques qui les accompagnent soient identifiés, mais l'action des pouvoirs publics est encore en mesure de façonner leur évolution future. De nombreux pays prennent conscience de la nécessité d'une action unifiée des pouvoirs publics dans le domaine de la réalité virtuelle et des autres technologies immersives, dont le métavers. Les dirigeants des pays du G7 ont souligné que la gouvernance de la transformation numérique devait refléter des valeurs démocratiques communes (G7, 2023^[83]). Alors qu'il est important d'adopter une approche technologiquement neutre de l'élaboration des politiques du numérique, cette section examine la façon dont les cadres d'action pourraient devoir être adaptés – ou complétés – afin d'ouvrir la voie à un avenir immersif positif.

L'action des pouvoirs publics en matière de réalité virtuelle et de technologies immersives est axée sur la promotion du secteur national

Les initiatives des pouvoirs publics portant sur la réalité virtuelle et les technologies immersives en général sont limitées. Les données qui ressortent des réponses au questionnaire établi pour l'édition 2024 des *Perspectives de l'économie numérique* tendent à montrer que l'action des pouvoirs publics est principalement axée sur le soutien au développement des technologies immersives au niveau national. Par exemple, la stratégie « Digital Luxembourg » comprend un programme de financement de la réalité virtuelle⁴. L'Espagne accorde des subventions pour promouvoir des projets utilisant des technologies immersives⁵, l'Allemagne finance des programmes liés à des technologies immersives⁶ et la Corée dispose d'une stratégie de promotion de l'industrie du métavers⁷. À Singapour, le PIXEL Innovation Hub⁸ met notamment l'accent sur la réalité virtuelle et les technologies immersives, et la Finlande promeut ces technologies par le biais de sa stratégie nationale pour le métavers⁹. Aux États-Unis, la loi *CHIPS and Science Act*, promulguée en 2022, charge le gouvernement fédéral de mener un programme de recherche sur la mesure dans le domaine des technologies des communications, dont la réalité virtuelle et d'autres « technologies immersives » (Gouvernement des États-Unis, 2022^[84]).

La Belgique se distingue en ce qu'elle a pris des mesures dans un secteur particulier : celui de l'éducation. Son plan d'action pour la réalité étendue vise à intégrer cette dernière dans l'enseignement secondaire technique et professionnel. À cette fin, elle promeut la formation à l'utilisation de la réalité étendue et son développement dans l'enseignement. Une coopération avec les universités belges de sciences appliquées est prévue afin d'aider à analyser la nature et l'efficacité

du plan¹⁰. Des projets pilotes menés dans certaines provinces espagnoles dans le cadre d'« InnoVET XR » encourageront la création de nouveaux logiciels et applications destinés à l'enseignement technique et professionnel¹¹. Aux États-Unis, une tendance similaire se fait jour. En décembre 2022, Lisa Blunt, membre de la Chambre des représentants, a présenté le projet de loi *Immersive Technology for the American Workforce Act*. Le texte proposé avait pour but de financer l'utilisation de technologies immersives pour former les travailleurs dans les *community colleges* et d'autres centres éducatifs, mais il n'a pas été adopté par le Congrès (Davalos, 2023^[85]).

Les réponses au questionnaire établi pour l'édition 2024 des *Perspectives de l'économie numérique* montrent également que certains pays adoptent la réalité virtuelle et d'autres technologies immersives en vue d'améliorer leurs services publics. L'Autriche teste une application qui utilise la réalité augmentée pour rationaliser les contrôles douaniers en superposant des informations numériques sur un véhicule. La Türkiye exploite les technologies immersives dans le secteur culturel pour promouvoir les visites virtuelles interactives de sites culturels et stimuler le tourisme. Les États-Unis ont pris des mesures pour intégrer la réalité augmentée afin de faciliter le contrôle des passagers dans les aéroports, l'objectif étant de renforcer la sécurité tout en fluidifiant les contrôles (Deloitte, 2021^[86]). Le gouvernement régional de Corée a quant à lui créé « Metaverse Seoul ». Cette plateforme permet aux citoyens d'accéder à divers services publics, notamment de déposer une plainte et de discuter avec des fonctionnaires par l'intermédiaire d'avatars¹². Enfin, le Luxembourg a lancé « Luxembourg Megaverse » et la Commission européenne finance le développement de « citiverses », des environnements immersifs pour découvrir de façon attrayante les processus d'élaboration des politiques (Hupont Torres et al., 2023^[87]).

L'Espagne encourage activement l'intégration des groupes défavorisés, en particulier des femmes, dans le cadre du financement des initiatives impliquant des technologies immersives¹³. Cette démarche est importante, car les études montrent que les femmes ressentent plus souvent que les hommes un inconfort lorsqu'elles portent un casque de réalité virtuelle (Stanney et al., 2003^[88] ; Munafo, Diedrick et Stoffregen, 2017^[89]) et qu'elles sont moins enclines à en acheter (Kommando Tech, 2022^[90]). L'Australie reconnaît également la nécessité de concevoir du matériel immersif en veillant à promouvoir un accès inclusif (Australian eSafety Commissioner, 2020^[91]). D'autres décideurs manifestent également de l'intérêt pour l'adoption d'une législation spécifique sur les technologies immersives. Par exemple, la Commission européenne a annoncé son intention de proposer une législation « sur les mondes virtuels, notamment le métavers » (Commission européenne, 2022^[92]).

Vers la définition de « droits » ou de « principes » relatifs à la réalité virtuelle et aux technologies immersives

Compte tenu des limites des approches réglementaires lorsqu'il s'agit de traiter les questions soulevées par les expériences de réalité virtuelle (Dick, 2021^[93]), les universitaires et les décideurs s'intéressent à la définition de « droits » ou de « principes » pour la réalité virtuelle et les environnements immersifs. Dans un rapport publié en juillet 2023, le Japon préconise de favoriser une reconnaissance internationale commune du métavers et encourage une utilisation digne de confiance des technologies associées, basée sur les valeurs démocratiques (MIC, 2022^[93]). Les chercheurs jugent par ailleurs crucial de veiller à garantir un accès équitable et l'authenticité dans le contexte de la réalité virtuelle et des expériences immersives.

Si la réalité virtuelle et les environnements immersifs deviennent des lieux de travail, d'apprentissage et d'interaction, ils doivent être accessibles à tous. La capacité du matériel de réalité virtuelle à s'adapter à des personnes et des morphologies diverses devrait être une priorité. Comme indiqué plus haut, de nombreux casques de réalité virtuelle disponibles sur le marché ne sont pas agréables à porter pour les femmes, entraînant inconfort et nausées (Stanney, Fidopiastis et Foster, 2020^[94]). Cela peut expliquer en partie pourquoi la plupart des acheteurs de casques de réalité virtuelle sont des hommes (Kommando Tech, 2022^[90]). Si l'accessibilité de la réalité virtuelle n'est pas améliorée, les fractures numériques pourraient se creuser. Par conséquent, il importe de garantir un accès équitable et effectif aux environnements immersifs, y compris pour les femmes, les personnes handicapées et les minorités culturelles (Dick, 2021^[95] ; Heller, 2022^[96]).

Certains soutiennent aussi que, dans les environnements immersifs, les utilisateurs devraient bénéficier de « droits » garantis (le droit à des expériences « authentiques »). La plupart des adultes sont capables d'identifier les publicités dans les mondes physique et numérique comme étant des messages rémunérés. En revanche, dans la réalité virtuelle et les autres environnements immersifs, les annonceurs peuvent atténuer le contexte en brouillant les lignes entre les expériences authentiques et celles conçues à des fins commerciales, à l'insu des utilisateurs (Rosenberg, 2022^[97]). L'« auto-approbation » possible dans la réalité virtuelle représente une nouvelle et puissante stratégie publicitaire (Ahn et Bailenson, 2011^[98]). Une approche pourrait consister à exiger que les personnes et les artefacts conçus à des fins commerciales soient visuellement et auditivement différents dans les environnements immersifs. Les utilisateurs pourraient ainsi percevoir les expériences modifiées à des fins promotionnelles comme différentes de celles qui sont authentiques.

4. LA RÉALITÉ VIRTUELLE, SES POSSIBILITÉS ET SES RISQUES



La Corée est à l'avant-garde de l'élaboration de principes applicables à la réalité virtuelle et a annoncé en 2022 un ensemble de lignes directrices éthiques non contraignantes pour la mise au point et l'utilisation de services dans le métavers¹⁴. Ces principes éthiques du métavers visent à guider les développeurs et les consommateurs en s'appuyant sur trois valeurs fondamentales : l'identité propre, des expériences sûres et une prospérité durable. Ces valeurs visent à garantir que les individus puissent disposer de l'autonomie nécessaire pour incarner de manière authentique les identités qu'ils ont choisies (identité propre) et profiter des environnements immersifs en toute sécurité (expériences sûres). En outre, ces principes prévoient que chaque individu a le droit de bénéficier des environnements immersifs sans en être intentionnellement exclu, ces droits devant être étendus aux générations futures (prospérité durable).

Pour mettre en œuvre ces valeurs fondamentales, la Corée propose huit principes pratiques : l'authenticité, l'autonomie, la réciprocité, le respect de la vie privée, l'équité, la protection des informations à caractère personnel, l'inclusion et la responsabilité quant à l'avenir. Le principe d'authenticité, par exemple, encourage les utilisateurs à définir avec sincérité leurs identités virtuelles et à agir en y restant fidèles, en ayant à l'esprit l'incidence du moi virtuel sur le moi réel. De même, les développeurs sont invités à permettre aux utilisateurs de se présenter sous un jour aussi proche que possible de leur personnalité réelle.

Les données issues des applications de réalité virtuelle posent de nouveaux défis aux cadres de protection de la vie privée existants

La réalité virtuelle et les environnements immersifs amplifient et étendent les problèmes de protection de la vie privée. Les décideurs et les parties prenantes, y compris les autorités chargées de veiller au respect de la vie privée, cherchent donc à clarifier l'application des réglementations pertinentes en la matière à ces nouvelles réalités. À cette fin, ils s'attachent à identifier des mesures d'atténuation appropriées, notamment des solutions technologiques intégrées aux applications de réalité virtuelle.

Comment les contextes, les activités et les sources de données aident-ils à repérer les algorithmes, les technologies protectrices de la vie privée (OCDE, 2023_[99]) et les mesures propres à protéger la vie privée et en soutiennent-ils l'élaboration ? Comprendre ce qui influence la précision des techniques de désanonymisation peut aider les chercheurs à définir des moyens plus efficaces de limiter les risques pour les utilisateurs finaux. Cette approche peut favoriser le développement de produits de réalité virtuelle intégrant le respect de la vie privée dès la conception, notamment les technologies protectrices de la vie privée telles que les analyses fédérées et les environnements d'exécution fiables¹⁵ (OCDE, 2023_[99]). Un environnement d'exécution de confiance protège les données vis-à-vis des applications tierces en les traitant dans un environnement sécurisé, sur l'appareil.

Aucune politique ne cible les données uniques collectées par les applications de réalité virtuelle ni la manière dont elles sont utilisées ou partagées. Cependant, un nombre croissant de cadres juridiques relatifs à la protection de la vie privée, tels que le Règlement général sur la protection des données de l'Union européenne (Union européenne, 2016_[100]), traitent déjà des données biométriques et s'appliquent donc directement à la réalité virtuelle. Le traitement des données biométriques dans la réalité virtuelle est souvent soumis à des dispositions renforcées (telles que le consentement explicite de l'utilisateur ou l'autorisation légale) en fonction de leur finalité.

Comment ces définitions peuvent-elles rester pertinentes au fil du temps ? Certaines dispositions peuvent se révéler trop spécifiques à mesure que les développements technologiques progressent plus rapidement que la réglementation. Par exemple aux États-Unis, la loi de l'État de l'Illinois *Biometric Information Privacy Act* s'applique aux informations basées sur des lectures de la géométrie de la main ou du visage, de la rétine ou de l'iris, et des empreintes vocales. Cette définition des « identifiants biométriques » ne couvre pas explicitement la collecte de caractéristiques comportementales ou le suivi des yeux, ce qui rend son application aux données de réalité virtuelle incertaine (Berrick et Spivack, 17 novembre 2022_[101]).

En outre, la réalité virtuelle crée pour la législation une dynamique nouvelle dont le socle demeure le consentement. Par exemple, un utilisateur ne peut pas vivre une expérience de réalité virtuelle sans consentir aux conditions générales d'utilisation du système concerné. Le traitement de ces données est indispensable pour garantir une expérience immersive réaliste. Étant donné qu'il n'existe aucun moyen d'« exercer son option de retrait » ou de « rester incognito » dans la réalité virtuelle, de nouvelles approches seront nécessaires pour protéger de manière appropriée la vie privée des utilisateurs.

De plus, il est possible que les utilisateurs ne comprennent pas parfaitement de quelle façon leurs données hautement personnelles peuvent être monétisées. Ils peuvent également ne pas être informés des techniques subliminales ou des décisions automatisées susceptibles de leur causer du tort (Barros Vale et Berrick, 2023_[102]). Cela conduit à s'interroger sur la pertinence d'une législation centrée sur le consentement, qui fait peser sur les individus une charge décisionnelle injuste.



4. LA RÉALITÉ VIRTUELLE, SES POSSIBILITÉS ET SES RISQUES

Autre difficulté, les exigences relatives au consentement s'ajoutent généralement à d'autres exigences de base, telles que la transparence, l'équité, la limitation de la finalité, la minimisation des données ou la limitation du stockage. Certains de ces principes peuvent peser sensiblement sur le développement de la réalité virtuelle et d'autres technologies immersives. En particulier le principe de « minimisation des données » (selon lequel seules les données strictement nécessaires doivent être collectées pour l'objectif visé) intègre le consentement dès la conception des applications de réalité virtuelle et autres technologies immersives.

Les développeurs de réalité virtuelle doivent également réussir le test de la « compatibilité des finalités ». Les données biométriques et de suivi peuvent par exemple être utilisées efficacement à des fins d'authentification (les données de reconnaissance faciale peuvent faciliter l'accès à des sites web protégés par un mot de passe). Cette mesure peut contribuer à protéger les jeunes enfants en détectant automatiquement s'ils utilisent le casque de réalité virtuelle de leurs parents. Elle peut également améliorer les soins de santé et la réadaptation médicale (voir ci-dessus). Dans le même temps, les données biométriques et de suivi peuvent servir à identifier des personnes à des fins qui ne sont pas toujours transparentes (création d'un profil utilisateur pour des publicités ciblées, par exemple) (Miller et al., 2020^[63]).

Le comportement de l'utilisateur capturé par les données de suivi a aussi été associé à des problèmes médicaux (tels que la démence ou le trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité) (Cherniack, 2011^[103]), ce qui soulève des questions quant à la discrimination (par des employeurs potentiels ou des compagnies d'assurance). À mesure que la réalité virtuelle passe du suivi par l'intermédiaire du casque au suivi du corps entier, les données de mouvement permettront de déterminer avec encore plus de précision l'identité de l'utilisateur. Ces risques de « détournement d'usage » soulèvent de nouvelles questions quant à savoir si et comment les entités proposant des expériences immersives devraient se voir interdire de créer et/ou de partager les profils comportementaux ou émotionnels des utilisateurs.

La réalité virtuelle suscite une autre interrogation liée à la protection de la vie privée : comment traiter les données « à caractère personnel » des avatars – un nouveau type d'acteur de cet univers immersif. Dans certaines applications de réalité virtuelle, un utilisateur peut créer plusieurs avatars ou personnalités (dénommés « alts ») ayant des identités différentes. À qui appartiennent ces « données personnelles » ? Comment le vol d'identité d'avatar sera-t-il traité (Madiega, Car et Niestadt, 2022^[104]) ? À première vue, il peut sembler que les avatars participent aux expériences de réalité virtuelle de manière anonyme. Néanmoins, une fois qu'un système de réalité virtuelle a correctement associé le nom d'un utilisateur aux données de suivi, il devient extrêmement difficile de ré-anonymiser cet utilisateur (Bailenson, 2018^[105]).

Définir qui est le responsable du traitement des données et qui est le sous-traitant des données est parfois difficile dans la réalité virtuelle et les environnements immersifs (Madiega, Car et Niestadt, 2022^[104]). Un défi de gouvernance partagé avec l'internet des objets consiste donc à clarifier la chaîne des responsabilités dans la réalité virtuelle entre les différentes parties prenantes, des fabricants d'appareils aux fournisseurs de services de réalité virtuelle, en passant par les développeurs d'applications, les propriétaires des algorithmes sous-jacents et les fournisseurs de réseaux. Quand les données seront-elles produites, collectées et partagées sur la base des choix de ces parties prenantes et à quels moments du fonctionnement du système de réalité virtuelle ? La responsabilité est parfois difficile à prouver, et les responsabilités juridiques et éthiques en cas d'erreur, de piratage ou d'accident sont parfois loin d'être claires. Cette chaîne de responsabilités peut également être brouillée par l'applicabilité d'autres lois, notamment celles liées à la protection des consommateurs, à la non-discrimination, au respect de la vie privée, à la protection des données et aux recours judiciaires efficaces.

La sécurité mentale et physique dans la réalité virtuelle doit être appréhendée avec la plus grande attention

Si ce chapitre décrit les effets positifs de la réalité virtuelle sur la santé mentale, les comportements indésirables dans les environnements numériques (tels que la cyberintimidation, le harcèlement, l'utilisation excessive et la dépendance) entraînent également des risques pour la santé mentale. Ces risques peuvent se révéler encore plus dangereux dans les environnements immersifs (Danaher, 2018^[42]) (voir également le Coup de projecteur « La santé mentale dans les environnements numériques »). Les phénomènes comme le sentiment de présence, l'émotion et l'immersion amènent les utilisateurs à ressentir plus profondément les effets des contenus à charge émotionnelle, y compris ceux des menaces violentes, car ces contenus ne sont pas abstraits, mais entraînent une réaction instinctive. Les applications de réalité virtuelle devraient intégrer dès la conception des fonctions de sécurité qui permettent aux utilisateurs de se protéger contre les acteurs malveillants. Par exemple, dans Horizon Worlds et Horizon Venues, la fonctionnalité de « limite personnelle » de Meta empêche les avatars de s'approcher à moins d'un mètre les uns des autres (Tabahriti, 2022^[106]).



Outre les risques pour la santé mentale, il importe également de prêter attention aux dommages physiques que peuvent causer la réalité virtuelle et les environnements immersifs. Les décideurs pourraient vouloir donner la priorité à la réglementation de l'utilisation de la réalité virtuelle dans les voitures et autres véhicules mobiles. Le jeu Pokémon GO (voir plus haut) et le nombre important de décès dus à l'utilisation de smartphones en conduisant ont mis en évidence les problèmes de sécurité liés aux véhicules en mouvement. En 2021, la distraction au volant a causé 3 522 décès aux États-Unis et de nombreux États américains ont adopté des lois interdisant l'envoi de SMS et l'utilisation d'un téléphone portable au volant (US DOT, 2022_[107]). Il n'est pas certain que les avantages que les conducteurs pourraient retirer du port d'un casque de réalité virtuelle ou de réalité augmentée, qui bloque ou entrave leur capacité à voir le « monde réel », l'emportent sur les risques associés.

Les principes de sécurité dès la conception sont également importants dans la réalité virtuelle et les autres expériences immersives, notamment le contrôle parental, la vérification de l'âge et la modération de contenu (OCDE, À paraître_[108]). Certaines applications immersives intègrent un contrôle humain et automatisé des images, des règles et un filtrage automatisés du dialogue en ligne, des restrictions propres au dialogue en ligne, un signalement de la communauté et des contrôles utilisateur et parental¹⁶.

De plus amples études sur les effets de la réalité virtuelle sur les enfants sont nécessaires, mais en attendant leurs résultats, la modération doit prévaloir. Vivre une expérience effrayante dans la réalité virtuelle peut marquer un enfant. Au lieu de parler en heures d'utilisation, comme pour d'autres appareils numériques, il est important de penser ici en termes de minutes. La sécurité physique est un autre facteur particulièrement important pour les enfants. Dans la mesure où la réalité virtuelle bloque le monde réel, ils doivent toujours être surveillés lorsqu'ils l'utilisent.

Les entreprises spécialisées dans la réalité virtuelle s'impliquent dans l'autorégulation

En l'absence de politiques publiques globales, les entreprises spécialisées dans la réalité virtuelle ont élaboré leurs propres lignes directrices. Valve, l'une des plus grandes plateformes d'achat de jeux et d'expériences de réalité virtuelle, a adopté une approche minimaliste de la modération de contenu autonome. Elle autorise toute personne à mettre en ligne du contenu sur son magasin Steam, excepté si ce contenu est identifié comme étant « illégal » ou du « trolling » (perturbations volontaires visant à semer le trouble) (Steam, 2018_[109]). En avril 2023, le magasin Steam proposait au téléchargement plus de 4 500 applications de réalité virtuelle.

Meta détenant une part considérable du marché des casques de réalité virtuelle (80 % en 2022), son exemple est particulièrement significatif. Son code de conduite (Meta, 2022_[110]) condamne la sexualisation des mineurs, la cyberintimidation, le harcèlement, les comportements haineux, l'apologie de la violence, la traite des êtres humains, le soutien au terrorisme, aux organisations fondées sur la haine et aux groupes criminels, la promotion ou la coordination d'actes suicidaires et le partage d'images intimes d'autrui sans le consentement de l'intéressé. C'est aux créateurs de réalité virtuelle et aux développeurs d'applications qu'il incombe en premier lieu de veiller au respect de ces règles.

L'importance de l'autorégulation diffère selon que les utilisateurs vivent une expérience de réalité virtuelle autonome ou sociale. Le code de conduite de Meta s'applique à la réalité virtuelle autonome ; la régulation du contenu dans son application sociale, Horizon Worlds, est plus stricte. En cas de non-respect de son code de conduite, Meta suspend temporairement ou définitivement les comptes en infraction, principalement sur la base d'une modération humaine du contenu (Meta, 2022_[110]). Dans certains cas, des guides communautaires, qui sont des personnes payées pour porter un casque, maintiennent l'ordre et bannissent les utilisateurs malveillants. Dans d'autres cas, les membres de la communauté signalent les comportements perturbateurs directement à la plateforme ou éliminent les joueurs par vote.

VRChat, société spécialisée dès l'origine dans la réalité virtuelle (par opposition aux écrans 2D), offre un autre exemple de modération sociale de la réalité virtuelle. Toutefois, elle n'a pas tenté de réadapter les normes héritées des médias sociaux. Dès sa création, VRChat s'est attachée à permettre aux acteurs d'une scène d'expulser les personnes malveillantes du monde virtuel par un vote de la communauté. Il s'agit toutefois d'un processus lourd qui nécessite à la fois la détermination de l'intention malveillante et le consensus de plusieurs parties à l'environnement. Dans la pratique, il est difficile d'expulser une personne malveillante par un vote de la communauté (Freeman et al., 2022_[111]). Pour compliquer encore plus la situation, les plateformes sociales de réalité virtuelle actuelles regorgent d'enfants mineurs qui contournent la limite d'âge minimum imposée (Nix, 2023_[112]).

Références

- Ahn, S. et J. Bailenson (2011), « Self-endorsing versus other-endorsing in virtual environments », *Journal of Advertising*, vol. 40/2, pp. 93-106, <https://doi.org/10.2753/JOA0091-3367400207>. [98]
- Ahn, S., J. Bailenson et D. Park (2014), « Short- and long-term effects of embodied experiences in immersive virtual environments on environmental locus of control and behavior », *Computers in Human Behavior*, vol. 39, pp. 235-245, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.07.025>. [31]
- Ahn, S. et al. (2016), « Experiencing nature: Embodying animals in immersive virtual environments increases inclusion of nature in self and involvement with nature », *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 21/6, pp. 399-419, <https://doi.org/10.1111/jcc4.12173>. [30]
- Allcoat, D. et A. von Mühlén (2018), « Learning in virtual reality: Effects on performance, emotion and engagement », *Research in Learning Technology*, vol. 26, <https://doi.org/10.25304/rlt.v26.2140>. [72]
- APA (2023), « What is exposure therapy? », *PTSD Clinical Practice Guideline*, American Psychological Association, Washington, D.C., <https://www.apa.org/ptsd-guideline/patients-and-families/exposure-therapy.pdf>. [46]
- Australian eSafety Commissioner (2020), « Immersive technologies – Tech trends position statement », page web, <https://www.esafety.gov.au/industry/tech-trends-and-challenges/immersive-tech> (consulté le 2 novembre 2023). [91]
- Bailenson, J. (2020), « Is VR the future of corporate training? », 18 septembre, *Harvard Business Review*, <https://hbr.org/2020/09/is-vr-the-future-of-corporate-training#:~:text=Technology%20and%20Transformation&text=According%20to%20internal%20data%20collected,person%20to%20just%2030%20minutes>. [34]
- Bailenson, J. (2018), *Experience on demand: What virtual reality is, how it works, and what it can do*, W. W. Norton & Company Publisher, New York, NY. [52]
- Bailenson, J. (2018), « Protecting nonverbal data tracked in virtual reality », *JAMA Pediatrics*, vol. 172/10, pp. 905-906, <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2018.1909>. [105]
- Bailenson, J. et N. Yee (2008), « Virtual interpersonal touch: Haptic interaction and copresence in collaborative virtual environments », *Multimedia Tools and Applications*, vol. 37, pp. 5-14, <https://doi.org/10.1007/s11042-007-0171-2>. [24]
- Bailenson, J. et N. Yee (2007), « Virtual interpersonal touch and digital chameleons », *Journal of Nonverbal Behavior*, vol. 31, pp. 225-242, <https://doi.org/10.1007/s10919-007-0034-6>. [25]
- Bailey, A. (2023), « VA expands virtual reality for veteran rehabilitation », 3 avril, *VA News*, <https://news.va.gov/117227/va-expands-virtual-reality-rehabilitation>. [41]
- Bailey, J. et J. Bailenson (2017), *Immersive virtual reality and the developing child*, Academic Press Publishers, Londres, Royaume-Uni, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809481-5.00009-2>. [73]
- Bailey, J. et al. (2019), « Virtual reality's effect on children's inhibitory control, social compliance, and sharing », *Journal of Applied Developmental Psychology*, vol. 63/101052, <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2019.101052>. [75]
- Ball, M. (2022), *The Metaverse: And How It Will Revolutionize Everything*, Liveright Publishing, New York, NY. [6]
- Baron, E. (2009), « Successes and challenges on using VR in product design and engineering », *IEEE Virtual Reality Conference 2009 Proceedings*, Lafayette, LA, <https://doi.org/10.1109/VR.2009.4810987>. [60]
- Barros Vale, S. et D. Berrick (2023), « Reality check: How is the EU ensuring data protection in XR technologies? », *The Digital Constitutional*, 25 janvier, <https://digi-con.org/reality-check-how-is-the-eu-ensuring-data-protection-in-xr-technologies>. [102]
- Berrick, D. et J. Spivack (17 novembre 2022), « Understanding extended reality technology & data flows: Privacy and data protection risks and mitigation strategies », *Future of Privacy Forum blog*, <https://fpf.org/blog/understanding-extended-reality-technology-data-flows-privacy-and-data-protection-risks-and-mitigation-strategies>. [101]
- Bezmalinovic, T. (2023), « Meta Quest had more than 6 million monthly active users, a report claims », 14 avril, *Mixed News*, <https://mixed-news.com/en/meta-quest-monthly-active-users-report>. [118]
- Biener, V. et al. (2022), « Quantifying the effects of working in VR for a week », *arXiv*, n° 2206.0319, <https://arxiv.org/abs/2206.03189>. [81]
- Blascovich, J. et J. Bailenson (2011), *Infinite reality – Avatars, eternal life, new worlds, and the dawn of the virtual revolution*, William Morrow Publishers, New York, NY. [12]
- Botín-Sanabria, D. et al. (2022), « Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review », *Remote Sensing*, vol. 14/6, p. 1335, <https://doi.org/10.3390/rs14061335>. [59]

4. LA RÉALITÉ VIRTUELLE, SES POSSIBILITÉS ET SES RISQUES

Références et Notes

- Brown, J., J. Bailenson et J. Hancock (2023), « Misinformation in virtual reality », *Journal of Online Safety and Trust*, vol. 1/5, <https://doi.org/10.54501/jots.v1i5.120>. [19]
- Cadet, L. et H. Chainay (2020), « Memory of virtual experiences: Role of immersion, emotion and sense of presence », *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 144, p.102506, <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2020.102506>. [43]
- Cherniack, E. (2011), « Not just fun and games: Applications of virtual reality in the identification and rehabilitation of cognitive disorders of the elderly », *Disability and Rehabilitation Assistive Technology*, vol. 6/4, <https://doi.org/10.3109/17483107.2010.542570>. [103]
- Cieślak, B. et al. (2020), « Virtual reality in psychiatric disorders: A systematic review of reviews », *Complementary Therapies in Medicine*, vol. 52, p.102480, <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2020.102480>. [44]
- Commission européenne (2022), État de l'Union 2022 — Lettre d'intention de la présidente von der Leyen, Commission européenne, Bruxelles, https://state-of-the-union.ec.europa.eu/document/download/dd2991b1-d4e9-4e50-9884-d0d7883ac72f_fr?filename=SOTEU_2022_Letter_of_Intent_FR_0.pdf. [92]
- Contrôleur européen de la protection des données (2022), « Metaverse », page web, https://edps.europa.eu/press-publications/publications/techsonar/metaverse_en (consulté le 2 novembre 2023). [61]
- Cummings, J. et J. Bailenson (2016), « How immersive is enough? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence », *Media Psychology*, vol. 19/2, pp. 272-309, <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>. [14]
- Danaher, J. (2018), « The law and ethics of virtual sexual assault », dans *Research Handbook on the Law of Virtual and Augmented Reality*, Elgaronline, <https://doi.org/10.4337/9781786438591.00021>. [42]
- Davalos, J. (2023), « Meta touts Metaverse's potential for job training and education », 16 mai, Bloomberg News, <https://www.bnnbloomberg.ca/meta-touts-metaverse-s-potential-for-job-training-and-education-1.1921064>. [85]
- Deloitte (2021), *Augmented government: Transforming government services through augmented reality*, Deloitte, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/public-sector/us-fed-augmented-government.pdf>. [86]
- Dick, E. (2021), *Balancing user privacy and innovation in augmented and virtual reality*, 4 mars, Information Technology & Innovation Foundation, Washington, D.C., <https://itif.org/publications/2021/03/04/balancing-user-privacy-and-innovation-augmented-and-virtual-reality>. [93]
- Dick, E. (2021), *Principles and policies to unlock the potential of AR/VR for equity and inclusion*, 1 juin, Information Technology and Innovation Foundation, Washington, D.C., <https://itif.org/publications/2021/06/01/principles-and-policies-unlock-potential-arvr-equity-and-inclusion>. [95]
- Difede, J. et H. Hoffman (2002), « Virtual reality exposure therapy for World Trade Center post-traumatic stress disorder: A case report », *Cyberpsychology & Behavior*, vol. 5, pp. 529-535, <https://doi.org/10.1089/109493102321018169>. [48]
- Eakin, M. (2018), « Fat, tired, and insecure: Supernatural VR makes working out more accessible than ever », 18 mai, Wired, <https://www.wired.com/story/supernatural-virtual-reality-exercise-gyms>. [57]
- Ekman, P. et W. Friesen (1969), « Nonverbal leakage and clues to deception », *Psychiatry*, vol. 32/1, pp. 88-106, <https://www.paulekman.com/wp-content/uploads/2013/07/Nonverbal-Leakage-And-Clues-To-Deception.pdf>. [64]
- ESA (2023), « U.S. consumer video game spending totaled \$56.6 billion in 2022 », 17 janvier, communiqué de presse, Entertainment Software Association, Washington, D.C., <https://www.theesa.com/news/u-s-consumer-video-game-spending-totaled-56-6-billion-in-2022>. [119]
- Faccio, M. et J. McConnell (2018), « Death by Pokémon GO: The economic and human cost of using apps while driving », Document de travail, No. 24308, National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA, <http://www.nber.org/papers/w24308>. [77]
- Freeman, G. et al. (2022), « Disturbing the peace: Experiencing and mitigating emerging harassment in social virtual reality », *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, vol. 6/CSCW1, n° 85, pp 1-30, <http://dx.doi.org/10.1145/3512932>. [111]
- G7 (2023), *Déclaration des Chefs d'État et de Gouvernement du Sommet du G7 à Hiroshima*, 20 mai, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/05/20/g7-global-covid-19-summit-commitments>. [83]
- Gaudiosi, J. (2016), « UN uses virtual reality to raise awareness and money », 18 avril, Fortune, <https://fortune.com/2016/04/18/un-uses-virtual-reality-to-raise-awareness-and-money>. [35]
- Gouvernement des États-Unis (2022), « Creating helpful incentives to produce semiconductors (CHIPS) and Science Act », 29 juillet, communiqué de presse, US Senate Committee on Commerce, Science & Transportation, Washington, D.C., <https://www.commerce.senate.gov/2022/8/view-the-chips-legislation>. [84]
- Han, E. et al. (2023), « People, places, and time: A large-scale, longitudinal study of transformed avatars and environmental context in group interaction in the metaverse », *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 28/2, <https://doi.org/10.1093/jcmc/zmac031>. [80]
- Hatta, M. et al. (2022), « Virtual reality (VR) technology for treatment of mental health problems during COVID-19: A systematic review », *International Journal Environmental Research and Public Health*, vol. 19/9, p. 5839, <https://doi.org/10.3390/ijerph19095389>. [45]

- Heller, B. (2022), « VR Is failing the very people it could benefit most », 19 mai, The Information, <https://pacscenter.stanford.edu/wp-content/uploads/2022/08/VR-Is-Failing-the-Very-People-It-Could-Benefit-Most-%E2%80%94-The-Information.pdf>. [96]
- Hendrix, C. et W. Barfield (1996), « Presence within virtual environments as a function of visual display parameters », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 5/3, pp. 274-299, <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.3.274>. [18]
- Herrera, F. et al. (2018), « Building long-term empathy: A large-scale comparison of traditional and virtual reality perspective-taking », *PLoS ONE*, vol. 13/10, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204494>. [32]
- Herz, R. (2021), « Olfactory virtual reality: A new frontier in the treatment and prevention of posttraumatic stress disorder », *Brain Science*, vol. 11/8, p. 1070, <https://doi.org/10.3390/brainsci11081070>. [26]
- Holden, M. (2005), « Virtual environments for motor rehabilitation: Review », *CyberPsychology & Behavior*, vol. 8/3, <https://doi.org/10.1089/cpb.2005.8.187>. [37]
- Horwitz, J., S. Rodriguez et M. Bobrowsky (2022), « Company documents show Meta's flagship metaverse falling short », 15 octobre, Wall Street Journal, <https://www.wsj.com/articles/meta-metaverse-horizon-worlds-zuckerberg-facebook-internal-documents-11665778961>. [10]
- Hupont Torres, I. et al. (2023), « Next generation virtual worlds: Societal, technological, economic and policy challenges for the EU », *Publications des Nations Unies*, <https://doi.org/10.2760/51579>, JRC133757. [87]
- Jarrold, W. et al. (2013), « Social attention in a virtual public speaking task in higher functioning children with autism », *Autism Research*, vol. 6/5, <https://doi.org/10.1002/aur.1302>. [67]
- Jenkins, A. (2019), « Walmart CEO: VR training helped save lives in El Paso shooting », 20 août, Fortune, <https://fortune.com/2019/08/20/walmart-ceo-vr-training-helped-save-lives-in-el-paso-shooting>. [58]
- Jones, D. et al. (2020), « Characterising the digital twin: A systematic literature review », *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 29/A, pp. 36-52, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>. [11]
- Kalyanaraman, S. et al. (2010), « The virtual doppelganger: Effects of a virtual reality simulator on perceptions of schizophrenia », *The Journal of Nervous and Mental Disease*, vol. 198/6, pp. 437-443, <https://doi.org/10.1097/NMD.0b013e3181e07d66>. [28]
- Khan, A., A. Podlasek et F. Soma (2021), « Virtual reality in post-stroke neurorehabilitation – A systematic review and meta-analysis », *Topics in Stroke Rehabilitation*, vol. 30/1, pp. 53-72, <https://doi.org/10.1080/10749357.2021.1990468>. [38]
- Kim, J. (2021), « Seoul to offer metaverse-based administrative services by 2026 », 3 novembre, Aju Korea Daily, <https://www.ajudaily.com/view/20211103163157615>. [1]
- Kim, Y. (2022), « Virtual reality data and its privacy regulatory challenges: A call to move beyond text-based informed consent », *California Law Review*, vol. 110, <https://www.californialawreview.org/print/virtual-reality-data-and-its-privacy-regulatory-challenges-a-call-to-move-beyond-text-based-informed-consent>. [62]
- Kommando Tech (2022), « 30 virtual reality statistics for 2024 », 12 septembre, Kommando Tech, <https://kommandotech.com/statistics/virtual-reality-statistics>. [90]
- Kreimeier, J. et al. (2019), « Evaluation of different types of haptic feedback influencing the task-based presence and performance in virtual reality », *PETRA '19: Proceedings of the 12th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 5-7 juin, Rhodes, Grèce, pp. 289-298, <https://doi.org/10.1145/3316782.3321536>. [23]
- Lanier, J. (2017), *Dawn of the New Everything: Encounters With Reality and Virtual Reality*, Henry Holt & Company Publishers, New York, NY. [15]
- Lee, J. et al. (2022), « Users' perspectives on ethical issues related to playing location-based augmented reality games: A case study of Pokémon GO », *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 39/15, pp. 348-362, <http://dx.doi.org/10.1080/10447318.2021.2012378>. [5]
- Madiega, T., P. Car et M. Niestadt (2022), « Metaverse: Opportunities, risks and policy implications », 24 juin, Think Tank du Parlement européen, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/fr/document/EPRS_BRI\(2022\)733557](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/fr/document/EPRS_BRI(2022)733557). [104]
- Mado, M. et al. (2022), « Accessibility of educational virtual reality for children during the COVID-19 pandemic », *Technology, Mind and Behavior*, vol. 3/1, <https://tmb.apaopen.org/pub/g9jmbwyl/release/2>. [22]
- Markowitz, D. et al. (2018), « Immersive virtual reality field trips facilitate learning about climate change », *Frontiers in Psychology*, vol. 9, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02364>. [16]
- Marr, B. (2021), *Extended reality in practice: 100+ amazing ways virtual, augmented and mixed reality are changing business and society*, Wiley Publishers, Hoboken, NJ. [2]
- McKinney, B. et al. (2022), « Virtual reality training in unicompartmental knee arthroplasty: A randomized, blinded trial », *Journal of Surgical Education*, vol. 79/6, pp. 1526-1535, <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2022.06.008>. [54]
- Meta (2023), « Supplemental Meta Platforms Technologies Privacy Policy », page web, <https://www.meta.com/fr/en/legal/quest/privacy-policy> (consulté le 26 octobre 2023). [65]

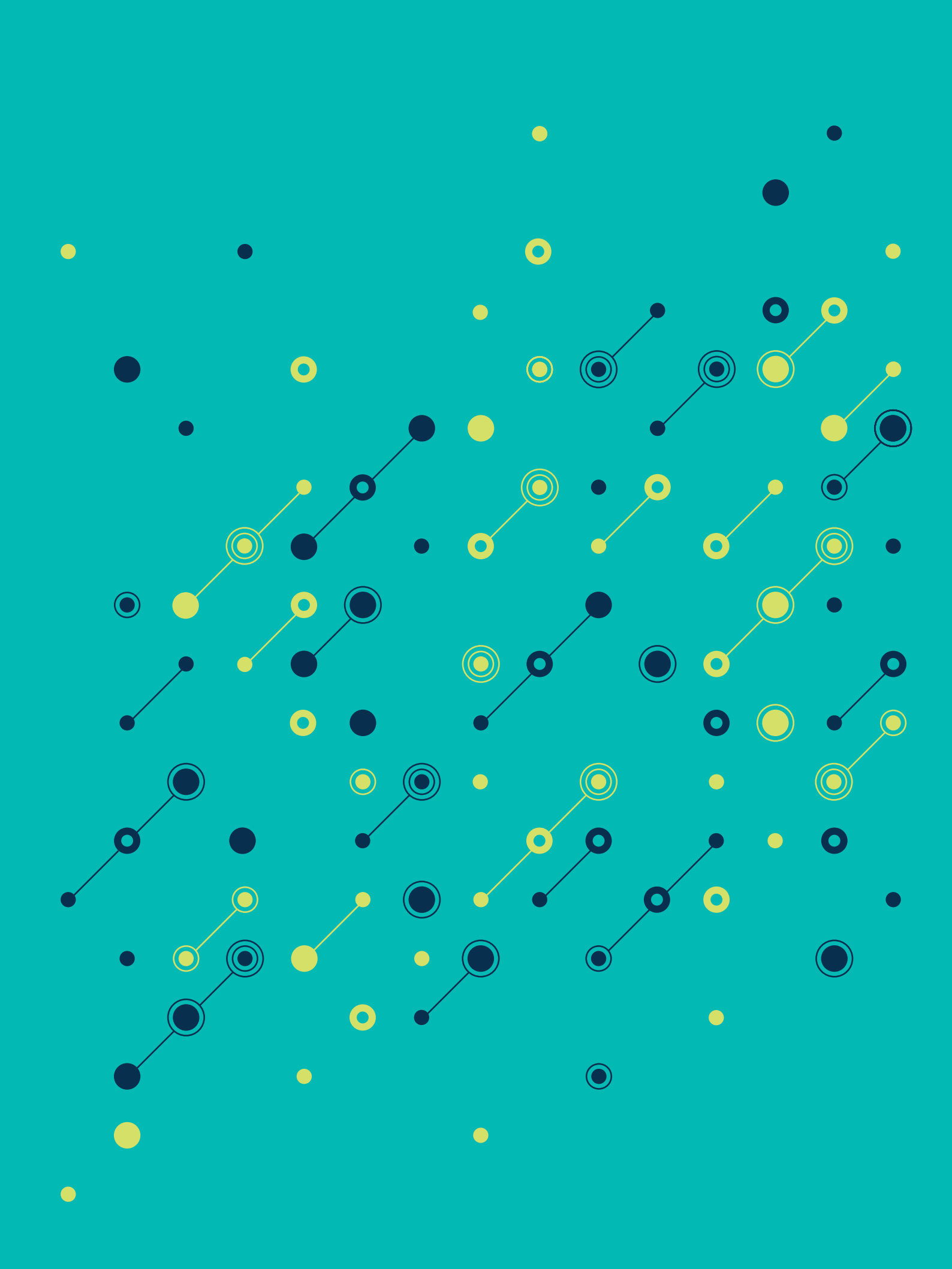
- Meta (2022), « Code de conduite pour les expériences virtuelles », page web, <https://www.meta.com/fr-fr/help/quest/articles/accounts/privacy-information-and-settings/code-of-conduct-for-virtual-experiences/> (consulté le 26 octobre 2023). [110]
- MIC (2022), « Study group on the utilization of metaverse towards Web3 era », 13 juillet, communiqué de presse, Ministère japonais des Affaires intérieures et des Communications, https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/eng/pressrelease/2022/7/13_04.html. [3]
- Miller, M. et al. (2023), « A large-scale study of personal identifiability of virtual reality motion over time », arXiv, n° 2303.01430, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.01430>. [69]
- Miller, M. et al. (2020), « Personal identifiability of user tracking data during observation of 360-degree VR video », *Scientific Reports*, vol. 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74486-y>. [63]
- Miller, M. et al. (2019), « Social interaction in augmented reality », *PLoS ONE*, vol. 14/5, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216290>. [4]
- Mozgai, S. et al. (2021), « Building BRAVEMIND Vietnam: User-centered design for virtual reality exposure therapy », 2021 *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 15-17 novembre, Taichung, Taipei chinois, pp. 247-250, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9644318>. [27]
- Munafo, J., M. Diedrick et T. Stoffregen (2017), « The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects », *Experimental Brain Research*, vol. 235/3, <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4846-7>. [89]
- Nair, V. et al. (2023), « Unique identification of 50,000+ virtual reality users from head & hand motion data », arXiv, n° 2302.08927, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.08927>. [70]
- Nix, N. (2023), « Meta doesn't want to police the metaverse. Kids are paying the price », 8 mars, *the Washington Post*, <https://www.washingtonpost.com/technology>. [112]
- OCDE (À paraître), « Towards digital safety by design for children », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/20716826>. [108]
- OCDE (2023), « Emerging privacy-enhancing technologies : Current regulatory and policy approaches », Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/bf121be4-en>. [99]
- OCDE (2020), « Going Digital integrated policy framework », Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/dc930adc-en>. [82]
- Ono, H. et T. Comerford (1977), *Stereoscopic depth constancy*, Wiley Publisher, Hoboken, NJ, https://www.researchgate.net/publication/284788933_Stereoscopic_Depth_Constancy. [20]
- OTAN (2021), *Guidelines for mitigating cybersickness*, Organisation du Traité de l'Atlantique Nord, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1183673.pdf>. [71]
- Paro, M., D. Hersh et K. Bulsara (2022), « History of virtual reality and augmented reality in neurosurgical training », *World Neurosurgery*, vol. 167, pp. 36-43, <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2022.08.042>. [53]
- Rawski, S., J. Foster et J. Bailenson (2022), « Sexual harassment bystander training effectiveness: Experimentally comparing 2D video to VR practice », *Academy of Management Annual Meeting Proceedings*, <https://doi.org/10.5465/AMBPP.2022.139>. [56]
- Rizzo, A. et al. (2004), « Diagnosing attention disorders in a virtual classroom », *Informatique*, vol. 37/6, <https://doi.org/10.1109/MC.2004.23>. [66]
- Rizzo, A. et al. (2010), « Development and early evaluation of the virtual Iraq/Afghanistan exposure therapy system for combat-related PTSD », *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1208/1, <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05755.x>. [51]
- Rizzo, A., B. Rothbaum et K. Graap (2007), *Virtual reality applications for combat-related posttraumatic stress disorder*, Routledge Publishers, Londres, Royaume-Uni. [50]
- Rosenberg, L. (2022), « The case for demanding "immersive rights" in the metaverse », 19 septembre, *The Future*, <https://bigthink.com/the-future/immersive-rights-metaverse>. [97]
- Rothbaum, B. et al. (1995), « Effectiveness of computer-generated (virtual reality) graded exposure in the treatment of acrophobia », *The American Journal of Psychiatry*, vol. 152/4, pp. 626-628, <https://doi.org/10.1176/ajp.152.4.626>. [47]
- Sanchez-Vives, M. et M. Slater (2005), « From presence to consciousness through virtual reality », *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 6, pp. 332-339, <https://doi.org/10.1038/nrn1651>. [8]
- Segovia, K. et J. Bailenson (2008), « Virtually true: Children's acquisition of false memories in virtual reality », *Media Psychology*, vol. 12/4, pp. 371-393, <https://doi.org/10.1080/15213260903287267>. [74]
- Smith, E. et D. Medin (2002), « The exemplar view », dans *Foundations of Cognitive Psychology : Core Readings*, The MIT Press, Cambridge, MA, <https://doi.org/10.7551/mitpress/3080.003.0019>. [33]
- Stanney, K., C. Fidopiastis et L. Foster (2020), « Virtual reality is sexist: But it does not have to be », *Frontiers in Robotics and AI*, n° 7, <http://dx.doi.org/10.3389/frobt.2020.00004>. [94]

- Stanney, K. et al. (2003), « What to expect from immersive virtual environment exposure: Influences of gender, body mass index, and past experience », *Human Factors*, vol. 45/3, pp. 504-520, <https://doi.org/10.1518/hfes.45.3.504.27254>. [88]
- Statista (2023), « Share of gamers in the United States who play Pokémon GO as of October 2022, by age group », Statista, <https://www.statista.com/statistics/589197/pokemon-go-players-us-age/#:~:text=As%20of%20October%202022%2C%2039,were%20current%20Pok%C3%A9mon%20GO%20players.> [78]
- Steam (2018), « Who gets to be on the Steam store? », 6 juin, Steam, <https://steamcommunity.com/games/593110/announcements/detail/1666776116200553082>. [109]
- Steinicke, F. et G. Bruder (2014), « A self-experimentation report about long-term use of fully-immersive technology », *ACM Symposium on Spatial User Interaction Proceedings*, 4-5 octobre, Honolulu, HI, pp. 66-69, <https://doi.org/10.1145/2659766.2659767>. [79]
- Su, S. et al. (2023), « The effectiveness of virtual reality, augmented reality, and mixed reality training in total hip arthroplasty: A systematic review and meta-analysis », *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, vol. 18, <https://doi.org/10.1186/s13018-023-03604-z>. [55]
- Sutherland, I. (1965), « The ultimate display », *Proceedings of IFIP Congress*, pp. 506-508. [13]
- Tabahriti, S. (2022), « Meta is putting a stop to virtual groping in its metaverse by creating 4-foot safety bubbles around avatars », 5 février, Business Insider, <https://www.businessinsider.com/meta-metaverse-virtual-groping-personal-boundary-safety-bubble-horizons-venues-2022-2?r=US&IR=T>. [106]
- Tangermann, V. (2023), « Virtual metaverse real estate is completely in the toilet », 4 août, Futurism, <https://futurism.com/the-byte/virtual-metaverse-real-estate-trouble>. [9]
- Ubrani, J. (2023), « Global shipments of AR/VR headsets decline sharply in 2022 following the prior year's strong results, according to IDC », 8 mars, communiqué de presse, IDC, <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS50467723>. [7]
- Union européenne (2016), *Règlement (UE) 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la Protection des Personnes Physiques à l'Égard du Traitement des Données à Caractère Personnel et à la Libre Circulation de ces Données*, Union européenne, Bruxelles, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A02016R0679-20160504&qid=1532348683434>. [100]
- US DOT (2022), « Distracted driving », page web, <https://www.nhtsa.gov/risky-driving/distracted-driving> (consulté le 15 octobre 2023). [107]
- Waltemate, T. et al. (2016), « The impact of latency on perceptual judgments and motor performance in closed-loop », *VRST '16: Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology*, 2-4 novembre, Munich, Allemagne, pp. 27-35, <https://doi.org/10.1145/2993369.2993381>. [21]
- Weiss, T. et al. (2021), « Reality, from virtual to augmented », dans *Digital Health*, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818914-6.00018-1>. [36]
- Wenrui, D. et al. (2019), « The efficacy of virtual reality exposure therapy for PTSD symptoms: A systematic review and meta-analysis », *Journal of Affective Disorders*, vol. 257/1, <https://doi.org/10.1016/j.jad.2019.07.086>. [49]
- Won, A., J. Bailenson et J. Janssen (2014), « Automatic detection of nonverbal behavior predicts learning in dyadic interactions », *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 5/2, <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2014.2329304>. [68]
- Won, A. et al. (2017), « Immersive virtual reality for pediatric pain », *Children*, vol. 47/7, p. 52, <https://doi.org/10.3390/children4070052>. [39]
- Won, A. et al. (2015), « Two virtual reality pilot studies for the treatment of pediatric CRPS », *Pain Medicine*, vol. 16/5, pp. 1644-1647, <https://doi.org/10.1111/pme.12755>. [40]
- XR Today (2022), « BMW unveils mixed reality driving experience », 8 novembre, XR Today, <https://www.xrtoday.com/mixed-reality/bmw-unveils-mixed-reality-driving-experience>. [76]
- Yee, N. et J. Bailenson (2006), « Walk a mile in digital shoes: The impact of embodied perspective-taking on the reduction of negative stereotyping in immersive virtual environments », *Presence Teleoperators and Virtual Environments*. [29]
- Zanbaka, C. et al. (2004), « Effects of travel technique on cognition in virtual environments », *IEEE Virtual Reality Conference 2004 Proceedings*, 27-31 mars, Chicago, IL, pp. 149-286, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1310068>. [17]



Notes

1. Le magasin Steam est un vendeur d'applications de réalité virtuelle très populaire.
2. Les dispositifs haptiques simulent l'expérience du toucher par des vibrations ou des mouvements.
3. Même si certains rencontrent un grand succès, les jeux vidéo en réalité virtuelle génèrent beaucoup moins de revenus que les jeux vidéo en 2D. En 2022, les dépenses totales consacrées aux jeux vidéo ont atteint 56.6 milliards USD aux États-Unis (ESA, 2023_[119]). Par comparaison, Beat Saber, le jeu vidéo en réalité virtuelle le plus vendu cette année-là, avait généré 255 millions USD en octobre 2022 (Bezmalinovic, 2023_[118]).
4. Pour plus d'informations, voir : <https://digital-skills-jobs.europa.eu/en/actions/national-initiatives/national-strategies/luxembourg-digital-luxembourg-initiative#:~:text=Digital%20Luxembourg%20is%20an%20ongoing,within%20the%20national%20tech%20sphere>.
5. Pour plus d'informations, voir : <https://spainaudiovisualhub.mineco.gob.es/en/actualidad/publicada-convocatoria-metaverso-web3>, www.red.es/es/actualidad/noticias/la-incubadora-de-empresas-del-sector-tecnologico-sobre-realidad-virtual-y-et et www.boe.es/boe/dias/2021/12/22/pdfs/BOE-A-2021-21192.pdf.
6. Pour plus d'informations, voir : <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/EN/Articles/DG/mFund-overview.html>.
7. Pour plus d'informations, voir : www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=238&pageIndex=2&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3181303&searchOpt=ALL&searchTxt=%EB%A9%94%ED%83%80%EB%B2%84%EC%8A%A4.
8. Pour plus d'informations, voir : <https://pixel.imda.gov.sg>.
9. Pour plus d'informations, voir : www.businessfinland.fi/en/whats-new/blogs/2022/what-is-the-metaverse--humanitys-digital-future.
10. Pour plus d'informations, voir : www.vlaanderen.be/kenniscentrum-digisprong/nieuws/ga-jij-binnenkort-aan-de-slag-met-xr-in-je-school.
11. Pour plus d'informations, voir : <https://onderwijs.vlaanderen.be/nl/onderwijspersoneel/van-basis-tot-volwassenenonderwijs/lespraktijk/extended-reality-in-de-klas>.
12. Pour plus d'informations, voir : www.seoul.go.kr/news/news_report.do#view/378498.
13. Pour plus d'informations, voir : <https://spainaudiovisualhub.mineco.gob.es/en/actualidad/publicada-convocatoria-metaverso-web3>.
14. Cet ensemble de principes est le fruit du travail d'un groupe de recherche chargé d'étudier la sensibilisation, les expériences et les préoccupations du public à l'égard du métavers dans le cadre d'une enquête menée à l'échelle nationale auprès de 2 626 personnes âgées de 20 à 69 ans. Parmi les questions soulevées par l'enquête figurent les comportements antisociaux et contraires à l'éthique, la fracture numérique, les atteintes à la vie privée et aux informations personnelles, ainsi que les restrictions potentielles liées aux activités créatives. Pour de plus amples informations sur les principes éthiques du métavers coréens, voir : www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=238&pageIndex=1&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3182405&searchOpt=ALL&searchTxt=%EB%A9%94%ED%83%80%EB%B2%84%EC%8A%A4.
15. Vision Pro d'Apple en est un exemple. Apple affirme que les données fédérées Optic ID restent cryptées, ne quittent jamais l'appareil de l'utilisateur et sont uniquement accessibles à l'environnement d'exécution de confiance de l'appareil (le processeur Secure Enclave). En outre, le traitement, au niveau du système, des données provenant des caméras et des capteurs évite que chaque application accède à l'environnement de l'utilisateur, tout en permettant les expériences spatiales.
16. Les fonctions de sécurité de la plateforme Roblox en sont un exemple. Pour plus d'informations, voir : <https://en.help.roblox.com/hc/fr/articles/203313120-Fonctionnalit%C3%A9s-de-s%C3%A9curit%C3%A9-chat-confidentialit%C3%A9-et-filtrage>.



Coup de projecteur

La santé mentale et les environnements numériques

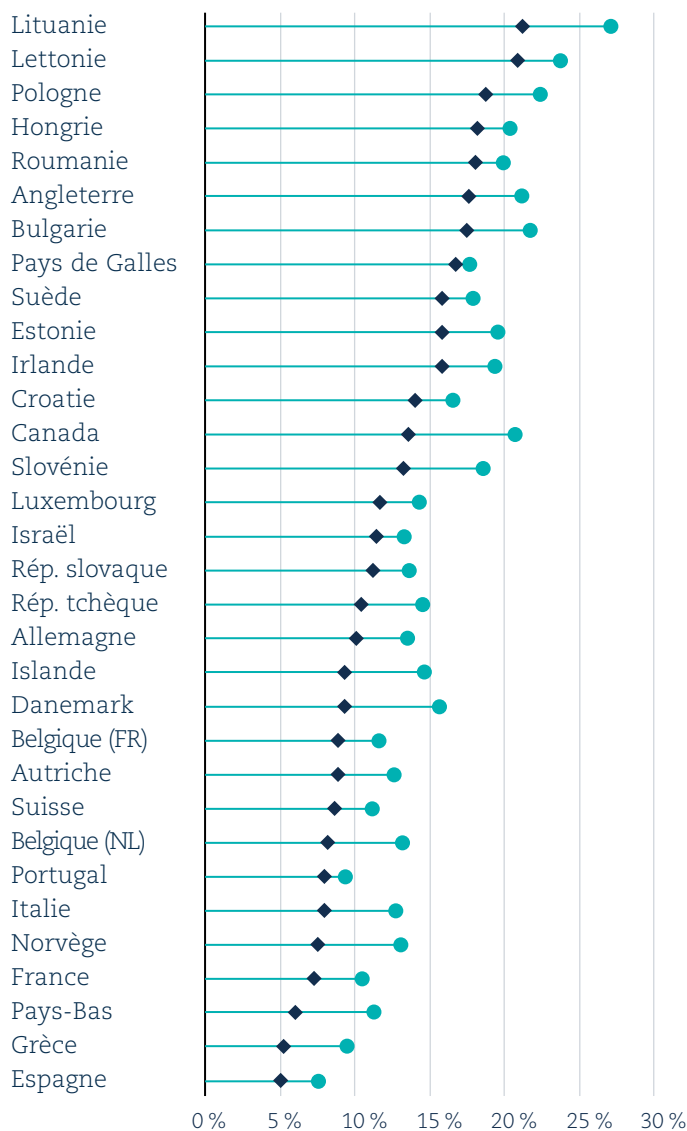
Les technologies numériques ont radicalement modifié nos modes de vie et de communication, avec des avantages et de nouvelles possibilités, mais aussi de nouveaux risques, notamment pour la santé mentale. Ce Coup de projecteur s'ouvre sur une description des caractéristiques des environnements numériques qui aident à expliquer en quoi les modalités d'interaction et de communication sont différentes en ligne, à savoir : l'anonymat, la désincarnation et la désinhibition. Il se poursuit avec un examen des comportements négatifs associés à des problèmes de santé mentale, en particulier le cyberharcèlement, l'utilisation excessive ou problématique de l'internet (UPI) et l'utilisation problématique des médias sociaux (UPMS), puis elle propose un aperçu de la façon dont les technologies immersives peuvent amplifier ces effets. Il montre que les comportements négatifs dans les environnements numériques sont en hausse et qu'ils affectent de manière disproportionnée les filles. Ce Coup de projecteur se conclut sur l'ébauche d'un nouveau programme d'action qui permettrait de tirer le meilleur des environnements numériques et immersifs tout en réduisant autant que possible leurs risques pour la santé mentale.

Les comportements négatifs en ligne augmentent et touchent davantage les filles

Le nombre de jeunes victimes de cyberharcèlement progresse.

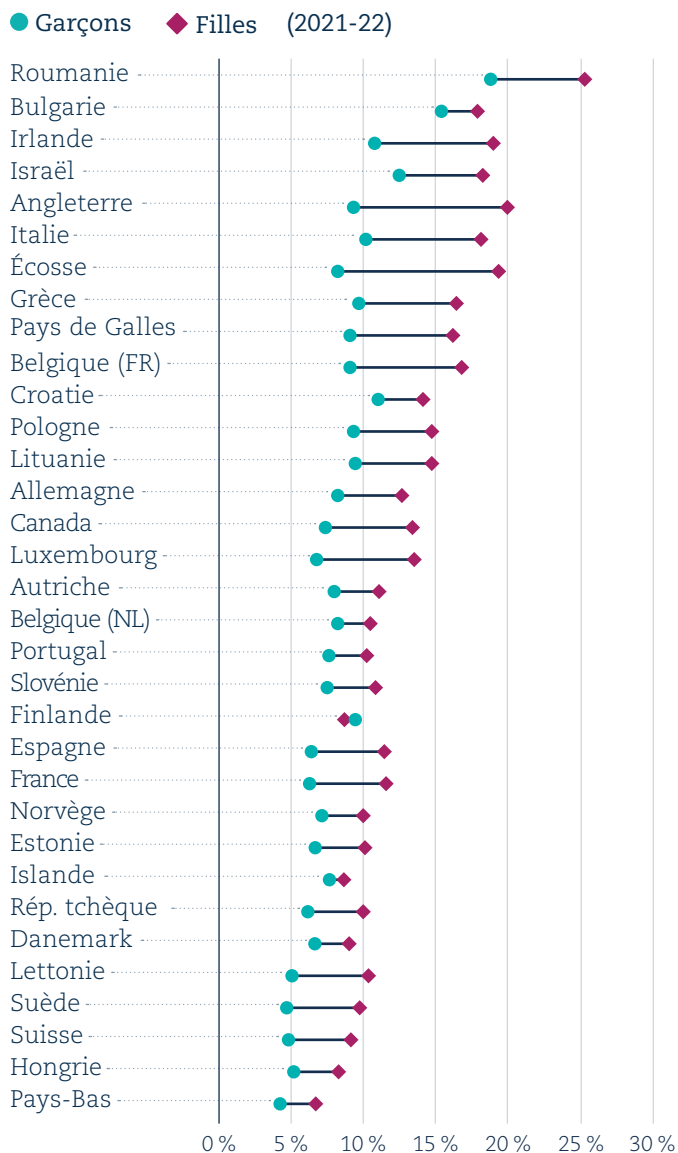
(jeunes de 11 à 15 ans)

◆ 2017-18 ● 2021-22



Les filles font plus souvent un usage problématique des médias sociaux que les garçons.

(jeunes de 11 à 15 ans)



Dans 37 pays et régions, la part de jeunes faisant état d'une utilisation problématique des médias sociaux a augmenté de

49 %

entre 2017 | | 2022

Source : OCDE, d'après l'enquête HBSC de l'OMS.



Avec le recours accru aux technologies numériques, les comportements et modes de communication évoluent. Les progrès de l'intelligence artificielle (IA), de l'analytique des données massives et des technologies immersives, couplés à la pandémie de COVID-19, ont accéléré la transformation numérique mondiale. Si cet environnement numérique en mutation nous offre des avantages notables et la possibilité de vivre des vies saines, productives et épanouissantes, il est aussi à l'origine de nouveaux risques et de dangers éventuels pour la santé mentale (Büchi, 2021^[1]).

Bien qu'il ne soit pas facile de démêler les causes des effets, des questions importantes se posent concernant les risques des environnements numériques et immersifs pour la santé mentale. De l'avis des autorités de santé publique et de la communauté d'action internationale, la victimisation en ligne et le cyberharcèlement, en particulier chez les jeunes, sont deux risques majeurs (OCDE, 2021^[2]). Récemment, le directeur de l'Autorité de santé publique des États-Unis et l'Association américaine de psychologie ont tiré la sonnette d'alarme au sujet des risques des médias sociaux pour la santé mentale, et notamment le cyberharcèlement et l'UPMS (APA, 2023^[3] ; OSG, 2023^[4]).

Le présent Coup de projecteur s'ouvre sur une description des caractéristiques des environnements numériques qui aident à expliquer les modalités d'interaction et de communication en ligne. Il se poursuit avec un examen de certains des comportements négatifs associés à des problèmes de santé mentale, en particulier le cyberharcèlement, l'UPI et l'UPMS. Il dresse un panorama des spécificités des environnements immersifs et de la façon dont ils peuvent avoir un impact sur la santé mentale, puis analyse les données disponibles sur la prévalence du cyberharcèlement et de l'UPMS. Pour conclure, il propose un nouveau programme d'action qui permettrait de tirer le meilleur des environnements numériques tout en réduisant autant que possible leurs risques pour la santé mentale.

L'anonymat, la désincarnation et la désinhibition expliquent pourquoi on communique et on interagit différemment en ligne

Les environnements numériques offrent de nouveaux moyens de communiquer et d'interagir, et permettent de nouer des relations et de vivre des expériences qui seraient impossibles hors ligne. Mais les normes sociales et les contraintes physiques ne sont pas les mêmes dans le monde virtuel et dans le monde réel. Trois caractéristiques aident à expliquer en quoi les modalités de communication et d'interaction en ligne sont différentes : l'anonymat, la désincarnation, et la désinhibition (Whitty et Young, 2017^[5]) (Suler, 2004^[6]). Ces aspects des environnements numériques peuvent procurer un sentiment de bien-être et renforcer la santé mentale, mais ils peuvent aussi donner lieu à des comportements négatifs tels que le cyberharcèlement, l'utilisation intensive de l'internet et l'utilisation problématique des médias sociaux (UPMS), qui sont associés à des problèmes de santé mentale.

L'anonymat est un trait commun de nombreuses activités et interactions en ligne. Il peut avoir un impact positif sur la santé mentale en octroyant un espace de liberté et de sécurité où l'on peut exprimer son opinion et explorer différentes facettes de son identité sans avoir à craindre les jugements ou les critiques. Dans le même ordre d'idée, il a été montré que donner la possibilité à des personnes de choisir les aspects d'elles-mêmes dont elles souhaitent préserver l'anonymat peut en aider certaines à partager des sentiments intimes qu'elles n'auraient pas exprimés sans cela et à nouer des contacts avec d'autres ayant des émotions ou un vécu similaires, ce qui conduit à une augmentation du soutien social perçu (Holtz et Kanthawala, 2020^[7] ; Naslung et al., 2016^[8]). Cela peut aussi être un moyen pour les personnes marginalisées de bénéficier d'un soutien social et émotionnel tout en restant relativement anonymes (Hawkins et Haimson, 2018^[9] ; Ybarra et al., 2015^[10]).

Cependant, l'anonymat comporte des risques. S'estimer non identifiable dans les environnements numériques peut conduire à se sentir libre de toute responsabilité ou obligation de rendre compte de ses actes, d'où une propension à l'impulsivité, la hâte et la négligence (Terry et Cain, 2016^[11]). Le fait que beaucoup de ces environnements reposent sur des interactions anonymes peut aussi nourrir un sentiment de désinvestissement moral (Kowalski et al., 2014^[12]). L'anonymat peut ainsi favoriser des comportements agressifs, comme le cyberharcèlement (Wachs, Wright et Vazsonyi, 2019^[13]) ou le trollage, c'est-à-dire la provocation délibérée d'autres personnes en ligne afin de déclencher une réaction forte (Australian eSafety Commission, 2023^[14]). Ces comportements sont susceptibles de mener au conflit, à la détresse émotionnelle ou à la colère.

La désincarnation est une autre caractéristique importante des environnements numériques. Elle permet de se créer des identités et de vivre des expériences en dehors de toute contrainte d'apparence physique, d'âge, d'activité, de localisation géographique, d'origine ethnique – ou d'autres facteurs ayant une influence sur les interactions en face à face. La « désincarnation du soi » – à savoir la faculté de se créer une identité en ligne qui ne dépende pas de caractéristiques physiques (Bessière, Seay et Kiesler, 2007^[15]) – permet de jouer avec des identités différentes dans les environnements



numériques. Ceci, à son tour, suscite des préoccupations concernant le risque de dissociation de l'identité (Whitty et Young, 2017^[5]). Une question connexe touche à la création de normes de beauté irréalistes et à leurs impacts sur la santé mentale. La possibilité de construire des corps hyperréalistes dans le monde virtuel grâce à des avatars et des filtres a été associée à l'insatisfaction et à la distorsion de l'image corporelle, qui contribuent à affaiblir l'estime de soi (Park et Ogle, 2021^[16]).

La troisième caractéristique distinctive des environnements numériques est la désinhibition, c'est-à-dire un manque de retenue dans les interactions sociales. Si la désinhibition peut inciter à la bienveillance et à la générosité, elle est souvent liée à des actes d'agression psychologique, comme le fait de tenir des propos hostiles ou désobligeants, ou de porter atteinte à la réputation d'autrui (Lapidot-Lefler et Barak, 2012^[17]). Le sentiment d'anonymat peut contribuer à la désinhibition car il peut permettre de s'affranchir des normes et des règles sociales traditionnelles. La désinhibition peut aussi être exacerbée par le fait que les contacts visuels et la visibilité personnelle sont réduits dans les environnements numériques (Whitty et Young, 2017^[5]) et par la perception que, dans ces univers, on a moins à rendre compte de ses comportements. La désinhibition en ligne est souvent associée à des problèmes de cyberharcèlement, de trolage et de cybertraque (*cyberstalking*). Des études ont montré que, dans les environnements numériques, les personnes se sentent moins empêchées de s'exprimer et d'agir d'une façon qu'elles ne se permettraient pas en face à face (Wang et al., 2022^[18] ; Wachs et Wright, 2019^[19] ; Wachs et Wright, 2018^[20]).

Le cyberharcèlement, l'utilisation problématique de l'internet et l'utilisation problématique des médias sociaux sont associés à des problèmes de santé mentale

Depuis les premiers jours de l'internet, les parents, les médecins et les scientifiques s'inquiètent des effets psychologiques des communications médiées par ordinateur et des risques possibles de ces communications pour la santé mentale (Kiesler, Siegel et McGuire, 1984^[21]). De l'avis des autorités de santé publique et de la communauté d'action internationale, la victimation en ligne et le cyberharcèlement, en particulier chez les jeunes, sont deux risques majeurs (OCDE, 2021^[22]). Même s'il n'en existe aucune définition unique qui soit systématiquement employée dans les travaux publiés, le cyberharcèlement est généralement associé à trois caractéristiques principales : un comportement agressif intentionnel et répété ; un rapport de force asymétrique entre l'agresseur et la victime ; l'utilisation des médias en ligne. Les premières études avançaient qu'il s'agissait simplement de harcèlement dans un environnement numérique. Depuis, des recherches ont montré que certaines caractéristiques se manifestent de manière différente dans le monde numérique. La répétition, par exemple, prend une autre signification car les actes de cyberharcèlement peuvent avoir une très large diffusion. Ainsi, même si l'agresseur ne cyberharcele plus, l'effet exponentiel du partage crée un sentiment de répétition pour la victime (Gottschalk, 2022^[23]) (Campbell et Bauman, 2018^[24]).

Le cyberharcèlement est lié à une plus faible satisfaction à l'égard de la vie et à plusieurs problèmes de santé mentale, parmi lesquels la dépression et la détresse psychologique (Giumetti et Kowalski, 2022^[25]) (Brailovskaia, Teismann et Margraf, 2018^[26]) (Hamm et al., 2015^[27]). Notamment, des recherches indiquent que le cyberharcèlement pourrait être davantage associé à des problèmes de santé mentale que le harcèlement en face à face (Baier et al., 2019^[28]). Selon des études récentes, la violence sur soi en environnement numérique, y compris le cyberharcèlement sur soi, augmente significativement la probabilité de pensées suicidaires et de tentatives de suicide. Les adolescents ou adolescentes qui ont recours au cyberharcèlement sur soi anonyme sont quinze fois plus susceptibles de commettre une tentative de suicide (Patchin, Hinduja et Meldrum, 2023^[29]).

Le principal outil de mesure du cyberharcèlement est l'auto-évaluation (Chun et al., 2020^[30]). Cependant, d'autres sources de données, comme les plaintes des victimes, sont dorénavant accessibles et utiles pour comprendre la prévalence et l'impact du phénomène¹. Certaines enquêtes demandent aux personnes d'indiquer si ou combien de fois elles ont fait l'expérience d'une situation de cyberharcèlement au cours d'une période donnée (par exemple, au cours des deux derniers mois). Les résultats de ces enquêtes sont faciles à appréhender, mais ce type de mesure a des limitations. Par exemple, ils présument que les personnes interrogées comprennent pleinement les composantes du cyberharcèlement ainsi que les biais (tendances dans les réponses, notamment biais d'acquiescement et biais de désirabilité sociale).

D'autres enquêtes demandent aux personnes d'indiquer si ou combien de fois elles ont été concernées par des comportements particuliers associés au cyberharcèlement. Ces enquêtes font l'hypothèse qu'une personne pourrait être réticente à révéler si ou combien de fois elle a fait l'expérience du cyberharcèlement car elle ne veut pas s'identifier à un agresseur ou à une victime, mais pourrait indiquer qu'elle est concernée par des comportements particuliers associés au cyberharcèlement (Ybarra et al., 2012^[31]).

L'UPI fait aussi l'objet d'une attention croissante. En l'absence d'une définition communément admise, la plupart des définitions du terme mettent en avant des difficultés touchant au fonctionnement au quotidien, aux relations



interpersonnelles et au bien-être émotionnel à cause de l'utilisation de l'internet (Aboujaoude et Starcevic, 2015^[32]) ; (Aboujaoude, 2010^[33]) ; (Spada, 2014^[34]). La notion d'UPI est souvent mise en correspondance avec un éventail de termes tels que la cyberdépendance, l'utilisation excessive de l'internet, et l'utilisation compulsive de l'internet. Selon de nombreuses études, l'UPI est associée à de l'hostilité et des troubles de santé mentale tels que la dépression, l'anxiété, le trouble déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) et les troubles obsessionnels compulsifs chez les adultes et chez les jeunes (Masi et al., 2021^[35]) (Nguyen et al., 2022^[36]) (Carli et al., 2013^[37]).

Les mesures auxquelles on a habituellement recours pour évaluer l'UPI sont fondées sur des questionnaires d'autodéclaration qui couvrent des aspects comme la perte de contrôle, les symptômes de manque, le fait de négliger d'autres activités, des conflits dans ses relations interpersonnelles, et un manque de sommeil en lien avec l'utilisation de l'internet. Chacune de ces mesures comporte différents critères et valeurs de seuil en fonction desquels on détermine si une personne fait ou non une utilisation problématique de l'internet (Aboujaoude et Starcevic, 2015^[32]) ; Laconi, Rodgers et Chabrol, 2014^[38]). Toutefois, dans la pratique, il est souvent difficile d'établir une distinction nette entre l'UPI et les troubles sous-jacents (par exemple, l'anxiété).

La communication en ligne via les médias sociaux étant désormais centrale dans la vie des personnes adultes et adolescentes, certains chercheurs ont également proposé des mesures de UPMS. Comme les définitions de l'UPI sont larges et recouvrent toutes les utilisations possibles de l'internet, y compris les jeux et les médias sociaux, les mesures de l'UPMS correspondent avec celles de l'UPI. De ce fait, on a recours au même ensemble de critères diagnostiques et aux mêmes questionnaires d'autodéclaration pour mesurer l'UPI et l'UPMS. On identifie une personne comme faisant une utilisation problématique des médias sociaux lorsqu'elle déclare des sentiments tels que la préoccupation, le besoin d'évasion, la tromperie, le déplacement et des conflits à cause de l'utilisation des médias sociaux (Van Den Eijnden, Lemmens et Valkenburg, 2016^[39]).

L'UPMS est systématiquement corrélée à des déficits de l'attention, des problèmes de sommeil, et des sentiments d'exclusion chez les jeunes (Boer et al., 2020^[40]) ; Van Rooij et al., 2018^[41]) ; Dekkers et van Hoorn, 2022^[42]). Selon certaines recherches, elle est également associée à des troubles graves de la santé mentale, parmi lesquels la dépression, l'anxiété et le stress (Shannon et al., 2022^[43]) (Malaeb et al., 2021^[44]) ; Raudsepp et Kais, 2019^[45]). Une étude suggère que la « peur de rater quelque chose » (ou syndrome FOMO pour *Fear Of Missing Out*), c'est-à-dire le fait pour une personne de « s'inquiéter que d'autres vivent des expériences gratifiantes dont elle n'est pas partie prenante », est l'un des facteurs qui induit l'UPMS (Fioravanti et al., 2021^[46]).

Les technologies immersives offrent de nouvelles possibilités pour la santé mentale mais peuvent aussi exacerber les risques

Les technologies immersives ont des caractéristiques particulières qui donnent la possibilité de vivre des expériences hyperréalistes, avec la sensation de se trouver dans un autre environnement, sans limite de distance, de temps ou d'échelle. Par exemple, la « présence » – la sensation de communiquer sans médiation dans les réalités virtuelles – est spécifique des environnements numériques immersifs. En d'autres termes, quand on fait l'expérience de la présence, on a l'impression non plus de se trouver dans un environnement artificiellement construit, mais de faire partie intégrante du monde physique (Tjostheim et Waterworth, 2022^[47]). Un autre trait spécifique est le sentiment d'incarnation, c'est-à-dire que des expériences vécues avec des avatars ou des corps virtuels peuvent être ressenties comme de véritables expériences corporelles. Ces caractéristiques propres des technologies immersives offrent de nouvelles possibilités pour la santé mentale (voir chapitre 4 sur la réalité virtuelle) mais peuvent aussi exacerber les risques.

Les expériences hyperréalistes rendues possibles par les technologies immersives ouvrent de nouvelles perspectives prometteuses pour la santé mentale. Des interventions de santé faisant appel à la réalité virtuelle se sont révélées de bons traitements de soutien contre l'anxiété, les phobies et d'autres troubles psychiatriques (Segawa et al., 2020^[49]) ; Rus-Calafell et al., 2018^[50]) ; Hatta et al., 2022^[51]) ; Cieslik et al., 2020^[52])². Par exemple, il a été montré que la thérapie d'exposition, qui donne la possibilité à des personnes de s'exposer à leurs peurs dans un environnement sûr, est un traitement efficace pour surmonter des problèmes de santé mentale (Carl et al., 2019^[53]). Les technologies immersives permettent également d'évaluer en temps réel des indicateurs physiologiques tels que le rythme cardiaque, la réponse cutanée et le mouvement des yeux : en les mettant en relation avec les caractéristiques de l'environnement virtuel, on peut renforcer l'efficacité des interventions de santé (Bell et al., 2020^[54]).

Comme les expériences vécues dans les environnements immersifs sont hyperréalistes, les sensations psychologiques et physiques qu'elles produisent peuvent nourrir des émotions plus intenses, ce qui contribue à renforcer les effets des comportements négatifs en environnement numérique (Heller, 2020^[55]). Dans les environnements immersifs, comme



dans les autres univers numériques, les personnes peuvent communiquer et interagir, donc être confrontées à beaucoup de problèmes analogues tels que le harcèlement, l'intimidation et d'autres comportements négatifs. Mais le fait qu'elles y interagissent au travers d'avatars peut aussi conduire à de nouvelles formes de harcèlement telles que « le harcèlement incarné », c'est-à-dire le harcèlement susceptible de se produire quand quelqu'un fait l'expérience d'un sentiment d'incarnation dans une réalité virtuelle sociale (Freeman et al., 2022^[56]).

Les recherches consacrées aux comportements négatifs en environnement immersif sont encore à leur prémices. Pour autant, une étude a déjà montré que des embrassades ou des caresses entre avatars sans le consentement des personnes concernées sont perçues comme du harcèlement en environnement immersif mais comme un comportement positif dans l'environnement du jeu en ligne traditionnel (Freeman et al., 2022^[56]). Une autre étude conclut que les utilisateurs et utilisatrices d'une application populaire de réalité virtuelle sociale sont exposés à des comportements négatifs tels que le cyberharcèlement toutes les sept minutes (Center for Countering Digital Hate, 2021^[57]).

L'une des inquiétudes qui ressort des premiers travaux publiés dans le domaine touche au fait que l'hostilité sexiste, raciste, ethnique, religieuse ou homophobe est courante et que l'intégration de l'intelligence artificielle générative et des technologies immersives accélérera la création de contenus donc augmentera les possibilités d'expériences à même de favoriser des comportements négatifs (Lorenz, Perset et Berryhill, 2023^[60] ; DataHub YouTube channel, 20 juillet 2023^[59]). D'après une étude, près de la moitié des femmes qui utilisent la réalité virtuelle (49 %) déclarent avoir subi au moins un incident de harcèlement sexuel, tandis que 28 % des hommes déclarent avoir subi des commentaires racistes ou homophobes (Outlaw, 2018^[60]).

Les données suggèrent que les comportements négatifs dans les environnements numériques sont en hausse et qu'ils touchent de manière disproportionnée les filles

Les liens entre les comportements négatifs dans les environnements numériques et la santé mentale préoccupent de plus en plus, compte tenu des nombreuses études qui mettent en avant la prévalence de ces comportements dans les différents pays et régions (OCDE, 2021^[61] ; Inchley et al., 2020^[62] ; Smahel et al., 2020^[63] ; Livingstone, 2013^[64]) (Hamm et al., 2015^[27]). Bien que l'on dispose de peu de données comparables au niveau international sur les comportements négatifs dans les environnements numériques, des éléments indiquent que certains groupes démographiques font une expérience différente de l'internet et des médias sociaux³. Dans ce Coup de projecteur, nous analysons des données récentes tirées de l'enquête sur les comportements des enfants d'âge scolaire en matière de santé (HBSC, *Health Behaviour in School-aged Children : WHO Collaborative Cross-National Study*),⁴ qui est actuellement l'étude transnationale la plus exhaustive avec des indicateurs sur le cyberharcèlement et l'UPMS chez les jeunes⁵.

Les données de l'enquête HBSC couvrent 44 pays et régions, dont 28 pays de l'OCDE en 2021-22⁶. Elles montrent une augmentation de la prévalence de l'UPMS et du cyberharcèlement entre 2017 et 2022. En moyenne, les taux de l'UPMS ont augmenté de 49 %, la victimisation (26 %) et le cyberharcèlement (25 %) augmentant également.⁸ Les données montrent également des variations significatives dans la prévalence du cyberharcèlement et de l'UPMS entre les pays et les régions. En 2021-22, la prévalence des victimes de cyberharcèlement chez les garçons n'était que de 6 % en Espagne, alors qu'elle atteignait 32 % en Lituanie. De même, la prévalence de l'UPMS variait de 4 % chez les garçons aux Pays-Bas à 25 % chez les filles en Roumanie (Inchley et al., 2023^[98]).

Le cyberharcèlement est de plus en plus répandu dans les pays, les filles présentant des taux plus élevés que les garçons

Les risques en ligne et hors ligne sont interdépendants. Les comportements négatifs hors ligne, tels que les agressions, l'intimidation et le harcèlement, semblent se poursuivre dans les environnements numériques. Les données de l'enquête HBSC de 2017-2018 pour les jeunes de 11, 13 et 15 ans montrent que les pays où les taux de harcèlement en face à face sont les plus élevés, comme en Lituanie, en Lettonie et en Türkiye, sont aussi ceux où les taux de cyberharcèlement sont relativement élevés. Dans la plupart des pays et régions, les taux de victimisation du harcèlement en face à face sont plus élevés que ceux du cyberharcèlement, et les garçons sont en moyenne légèrement plus victimes de harcèlement en face à face que les filles.

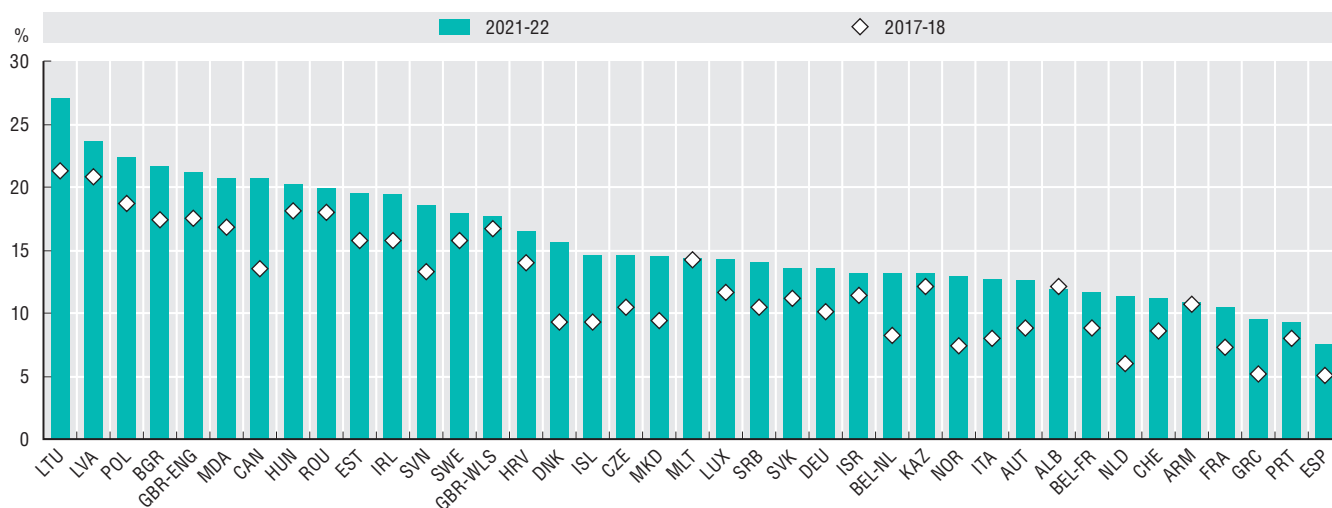
Les données suggèrent qu'en moyenne, dans les pays et régions analysés, le cyberharcèlement est de plus en plus répandu (graphique 2.S.1) et les filles sont plus cyberharcelées que les garçons. Le pourcentage de filles qui déclarent avoir été victimes de cyberharcèlement au moins une fois au cours des deux derniers mois est significativement plus



élevé que le pourcentage de garçons dans plus de la moitié des pays et régions analysés en 2021-22. Dans les pays de l'OCDE où les filles sont davantage cyberharcélées que les garçons, l'écart entre les filles et les garçons cyberharcelés va de près de 1 point de pourcentage en Norvège à un peu plus de 6 points de pourcentage en France.

Graphique 2.S.1. Les taux de cyberharcèlement ont augmenté dans presque tous les pays

Part des jeunes (11, 13 et 15 ans) déclarant avoir été victimes de cyberharcèlement au moins une fois au cours des derniers mois, 2017-18 et 2021-22



Note : Codes régionaux : BEL-FR : Belgique (francophone) ; BEL-NL : Belgique (néerlandophone) ; GBR-ENG : Angleterre ; GBR-SCT : Écosse ; GBR-WLS : Pays de Galles.

Source : Calculs des auteurs d'après les données de l'enquête transnationale collaborative de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sur les comportements des enfants d'âge scolaire en matière de santé (HBSC), 2017-18 et 2021-22.

StatLink <https://stat.link/og19h6>

Les garçons sont plus susceptibles que les filles de cyberharceler. En moyenne, 14 % des garçons âgés de 11, 13 et 15 ans interrogés en 2021-22 ont déclaré avoir cyberharcélé quelqu'un au moins une fois au cours des derniers mois⁸, contre seulement 9 % des filles. De plus, dans presque tous les pays et régions analysés, le pourcentage des garçons qui déclarent avoir cyberharcélé est plus élevé que celui des filles.

Les centres nationaux de sécurité qui reçoivent les plaintes pour cyberharcèlement pourraient constituer une source complémentaire de données sur le cyberharcèlement. En Australie, par exemple, les données de 2021-22 montrent qu'il y a davantage de plaintes pour cyberharcèlement où la victime est une fille (63.1 %) que de plaintes où la victime est un garçon (31.8 %) (eSafety Commissioner et ACMA, 2022^[65]).

Les filles sont plus susceptibles que les garçons d'être des utilisatrices problématiques des médias sociaux et l'écart se creuse

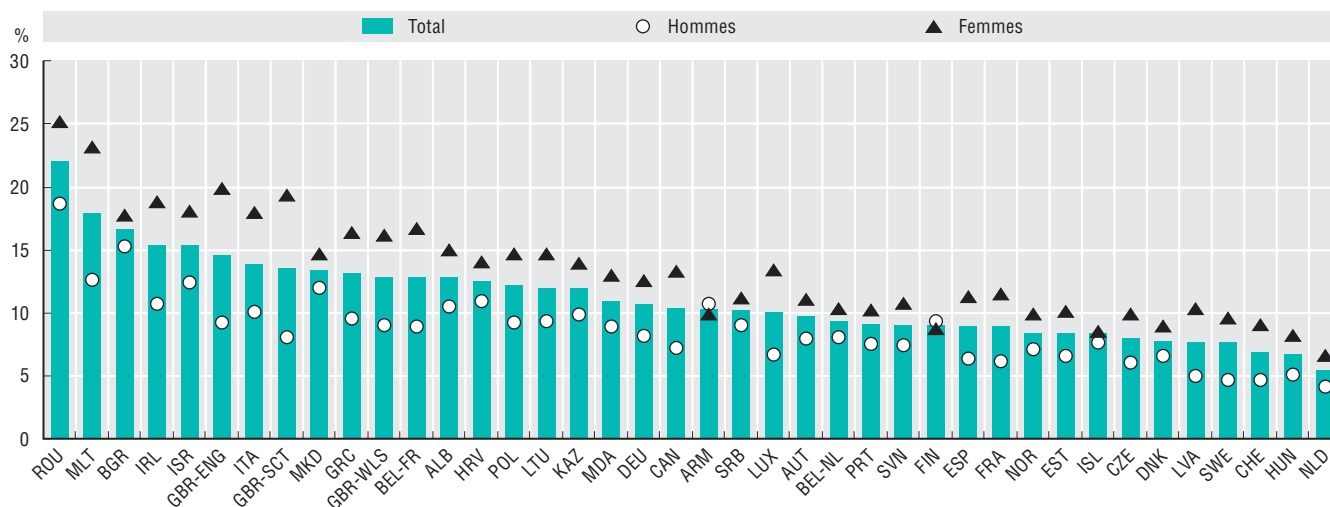
Les filles ont plus tendance que les garçons à communiquer de manière intensive avec des amis et d'autres via les messageries instantanées, les réseaux sociaux, les messageries électroniques et d'autres formes de communication en ligne (Inchley et al., 2020^[57]).⁹ Elles sont aussi plus susceptibles de faire une utilisation problématique des médias sociaux.¹⁰ En 2021-22, le pourcentage de filles identifiées comme faisant une utilisation problématique des médias sociaux est significativement plus élevé que le pourcentage de garçons dans pratiquement 80% des pays et régions analysés (graphique 2.S.2) et l'écart entre les sexes se creuse. En 2017-18, l'écart en moyenne entre les filles et les garçons identifiés comme UPMS s'élevait à 1.5 points de pourcentage, et en 2021-22, cet écart s'est élargi à 5 points de pourcentage. Parmi les pays de l'OCDE analysés en 2021-22, l'Irlande affichait le taux global d'UPMS le plus élevé, avec une différence notable entre les sexes.

L'âge peut aussi avoir un impact sur la façon dont les filles et les garçons font l'expérience des médias sociaux. Les filles sont plus susceptibles de faire une utilisation problématique des médias sociaux à l'adolescence. La prévalence de l'UPMS chez les filles passe de 5 % à l'âge de 11 ans à 10 % à l'âge de 15 ans tandis que, chez les garçons, le pourcentage global reste relativement constant (6 % et 7 %, respectivement) (Inchley et al., 2020^[62]).



Graphique 2.S.2. Les filles sont plus souvent des utilisatrices problématiques des médias sociaux que les garçons

Part des jeunes (11, 13 et 15 ans) identifiés dans la catégorie UPMS, 2021-22



Notes : UPMS = Utilisation problématique des médias sociaux. L'UPMS a été évaluée à l'aide de l'échelle des troubles liés aux médias sociaux (Van Den Eijnden, Lemmens et Valkenburg, 2016^[39]). Codes régionaux : BEL-FR : Belgique (francophone) ; BEL-NL : Belgique (néerlandophone) ; GBR-ENG : Angleterre ; GBR-SCT : Écosse ; GBR-WLS : Pays de Galles.

Source : Calculs des auteurs d'après les données de l'enquête transnationale collaborative de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sur les comportements des enfants d'âge scolaire en matière de santé (HBSC), 2021-22.

StatLink <https://stat.link/32efpt>

Une utilisation modérée des technologies numériques tend à être bénéfique, mais leur « surutilisation » peut être préjudiciable

Le temps passé en ligne a augmenté, en particulier chez les jeunes, ce qui suscite des préoccupations concernant la santé mentale et le bien-être (Bell, Bishop et Przybylski, 2015^[66] ; Twigg, Duncan et Weich, 2020^[67]). Au sein de la population âgée de 11, 13 et à 15 ans, une personne sur trois fait une utilisation intensive de la communication en ligne¹¹, c'est-à-dire communique en ligne avec des amis ou d'autres personnes par messagerie instantanée, sur les sites des médias sociaux ou par courriel pendant toute la journée sans interruption ou presque (Inchley et al., 2020^[62]). Les premières théories indiquaient une exposition aux technologies directement proportionnelle au préjudice, ce qu'on a appelé l'« hypothèse du déplacement » (Neuman, 1988^[68]). Ce point de vue est désormais jugé simpliste compte tenu des nombreux avantages de la communication en ligne pour la santé mentale et le bien-être. Par exemple, elle offre des opportunités de création de communautés positives autour d'identités et d'intérêts similaires ou encore, pour les personnes marginalisées en particulier, la possibilité d'obtenir un soutien socio-émotionnel de la part des pairs (Kardefelt-Winther, 2017^[69] ; Ito et al., 2020^[70] ; Charmaraman, Hernandez et Hodes, 2022^[71]).

Plus récemment, c'est l'« hypothèse de Boucle d'or » (*Goldilocks hypothesis*) (Przybylski et Weinstein, 2017^[72]), selon laquelle il existe une association curviligne entre l'utilisation des technologies numériques, la santé mentale et le bien-être, qui tend davantage à être soutenue (OCDE, 2018^[73]). En vertu de cette hypothèse, une utilisation modérée des technologies numériques serait bénéfique tandis qu'une « surutilisation » peut être préjudiciable.

La relation entre l'exposition permanente aux technologies numériques, la santé mentale et le bien-être est complexe et bidirectionnelle. À ce jour, la plupart des données sont corrélationnelles. Des examens des études existantes ont montré un ensemble contradictoire d'associations positives, négatives et nulles (Odgers et Jensen, 2020^[74] ; Alonzo et al., 2021^[75] ; Seabrook, Kern et Rickard, 2016^[76] ; Orben, 2020^[77])¹². En moyenne, dans les pays de l'OCDE, 45 % des élèves ont déclaré se sentir nerveux ou anxieux lorsqu'ils n'avaient pas leurs appareils numériques à proximité. Ces élèves étaient également plus susceptibles de déclarer une plus faible satisfaction à l'égard de la vie. (OCDE, 2023^[87]). Des données récentes provenant du Canada indiquent que l'utilisation accrue des téléphones intelligents est liée à une moins bonne santé mentale (Asselin, Bilodeau et Khalid, 2024^[82]), et que la fréquence d'utilisation des médias sociaux est positivement associée aux symptômes des troubles de l'alimentation ainsi qu'aux tendances suicidaires (Kerr et Kingsbury, 2023^[83]).



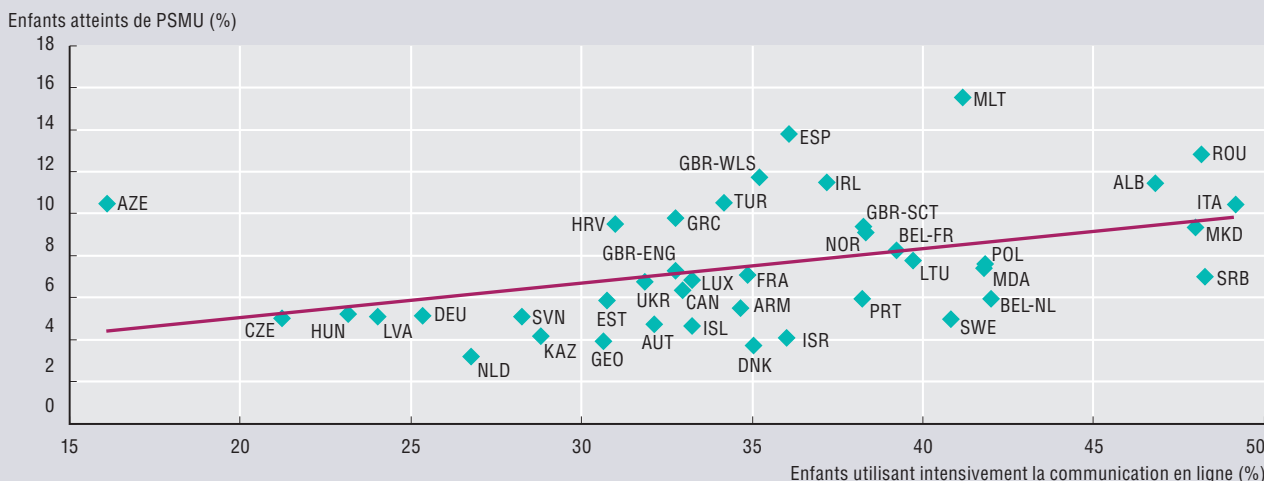
L'utilisation des technologies numériques n'est en soi ni dommageable ni bénéfique : leurs impacts sur la santé mentale et le bien-être tendent à dépendre de nombreux facteurs. Ces facteurs incluent le temps passé en ligne, le contenu consommé, les vulnérabilités préexistantes de la personne, et le contexte culturel et socio-économique (APA, 2023^[3] ; OSG, 2023^[4] ; Prinstein, Nesi et Telzer, 2020^[79] ; Büchi, 2021^[1] ; Hollis, Livingstone et Sonuga-Barke, 2020^[80] ; Valkenburg et al., 2022^[81]). Cette relation complexe et hétérogène est illustrée ci-après (encadré 2.S.1). La grande variabilité de la prévalence de l'UPMS d'un pays à l'autre, pour un même niveau d'intensité de communication, suggère que d'autres facteurs que le temps passé en ligne entrent en jeu.

Encadré 2.S.1. Le temps passé en ligne est-il associé à des comportements problématiques ?

Selon des données de l'enquête HBSC de 2017-18, les jeunes qui font une utilisation intensive de la communication en ligne sont plus susceptibles de faire une UPMS, ce qui est cohérent avec « l'hypothèse de Boucle d'or », même si l'on ne sait pas clairement déterminer si l'utilisation intensive de la communication en ligne est une cause ou une conséquence de l'UPMS. Parmi les jeunes utilisant les médias en ligne de manière intensive, 11 % sont classés dans la catégorie de l'UPMS tandis que, parmi les jeunes les utilisant moins fréquemment, la prévalence de l'UPMS se situe à environ 5 % (Inchley et al., 2020^[62]). Dans les pays où les taux moyens d'UPMS sont plus élevés, comme l'Espagne, on mesure également des pourcentages plus élevés de jeunes qui font une utilisation intensive de la communication en ligne (graphique 2.S.3).

Graphique 2.S.3. Une mauvaise santé mentale est associée à une utilisation intensive des communications en ligne

Part des jeunes (de 11, 13 et à 15 ans) identifiés UPMS en fonction de la part des jeunes qui font une utilisation intensive de la communication en ligne



Notes : UPMS = Utilisation problématique des médias sociaux. Codes régionaux : BEL-FR : Belgique (francophone) ; BEL-NL : Belgique (néerlandophone) ; GBR-ENG : Angleterre ; GBR-SCT : Écosse ; GBR-WLS : Pays de Galles. La droite de régression a été obtenue selon la méthode des moindres carrés ordinaires. Le coefficient de corrélation entre la part des jeunes identifiés UPMS et la part des jeunes qui font une utilisation intensive de la communication en ligne est égal à 0.16 (valeur $p < 0.001$, 222 865 observations). La valeur de R^2 est 0.7.

Source : Calculs des auteurs d'après les données de l'enquête transnationale collaborative de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sur les comportements des enfants d'âge scolaire en matière de santé (HBSC), 2017-18.

StatLink <https://stat.link/zcxfgma>

Ces résultats indiquent que le retour d'expérience des pays où la prévalence de l'UPMS est faible pourrait apporter des éclairages utiles, et confirmer la nécessité de collecter, sur l'utilisation des technologies numériques, des données longitudinales, plus granulaires, et fondées sur d'autres critères que le temps passé (par exemple, type d'activité et de contenu) (Kardefelt-Winther, 2017^[69]). Comme le soulignent plusieurs auteurs, il est important, pour améliorer la compréhension que l'on a de la problématique, de prendre en compte les variations qui peuvent exister autour des relations moyennes et de se tourner vers des approches permettant de gérer l'hétérogénéité (Valkenburg et al., 2022^[81] ; Valkenburg, Meier et Beyens, 2022^[86] ; Parry et al., 2022^[88]).



Vers un programme d'action en faveur de la santé mentale à l'ère du numérique

À l'heure où la population passe toujours plus de temps en ligne, et où les environnements numériques deviennent plus immersifs et « réels », les responsables de l'action publique doivent chercher à remédier aux risques des technologies numériques pour la santé mentale. Il est important de soutenir les groupes qui pourraient être proportionnellement plus touchés par les comportements négatifs en environnement numérique, par exemple les filles. Bien que cette question soit encore relativement nouvelle – et, pour cette raison, les pouvoirs publics manquent sans doute encore d'initiatives formalisées de prévention et de prise en charge des problèmes de santé mentale à l'ère du numérique –, il est indispensable d'élaborer des programmes d'action en faveur de la santé mentale. Dans cette perspective, plusieurs axes semblent prometteurs.

Sensibiliser au problème des comportements négatifs dans les environnements numériques et promouvoir l'éducation aux médias

Des politiques publiques axées sur la sensibilisation et l'éducation aux médias (littératie médiatique) sont indispensables pour prévenir et traiter les problèmes de cyberharcèlement (Gottschalk, 2022^[23]) et, de façon plus générale, protéger les enfants dans les environnements numériques (OCDE, 2021^[22]). Les victimes doivent savoir que ce qu'on leur fait subir est quelque chose de mal et qu'elles peuvent, en toute sécurité, se faire connaître et dénoncer les auteurs de cyberharcèlement et d'autres formes d'agression en ligne. Des campagnes de sensibilisation peuvent aider les victimes et les tiers (membres de la famille, du cercle amical et du corps enseignant) à reconnaître les comportements négatifs, à signaler les actes de cyberharcèlement et à élaborer des stratégies proactives d'adaptation telles que le fait de bloquer les contacts non souhaités (McDaid, Hewlett et Park, 2017^[84]). L'éducation aux médias joue également une fonction importante dans la lutte contre l'utilisation problématique de l'internet et l'utilisation problématique des médias sociaux (OSG, 2023^[4]). Il faut avoir des compétences en littératie médiatique pour comprendre comment naviguer en toute sécurité sur l'internet et dans des environnements numériques immersifs.

Promouvoir la sécurité par défaut (dès la conception)

Les pouvoirs publics peuvent favoriser la sécurité par défaut pour les jeunes en encourageant le développement et l'utilisation de technologies qui protègent la vie privée, la sécurité et la sûreté et qui limitent, sur la base du critère de l'âge, la mise en contact avec des contenus inappropriés et l'accès à de tels contenus (OCDE, 2022^[85]). Pour prévenir et gérer les risques associés à des comportements négatifs dans les environnements numériques, les entreprises s'attachent de plus en plus à intégrer des dispositifs de protection des utilisateurs dans leurs produits et services. Il peut s'agir de mécanismes qui bloquent l'accès à des plateformes numériques au-delà d'un intervalle de temps excessif, et de systèmes de filtrage fondés sur l'IA qui signalent les messages négatifs. Les technologies immersives peuvent faciliter la mise au point de mécanismes d'atténuation en empêchant le harcèlement de se produire. Par exemple, certaines plateformes permettent aux personnes utilisatrices de créer des barrières invisibles autour d'elles afin d'empêcher quiconque de franchir leur « frontière personnelle ». Des entreprises leur donnent aussi la possibilité de limiter le contenu visionnable en ligne grâce à des outils de contrôle parental. Il est important que les entreprises analysent avec soin l'impact de la conception et du fonctionnement de leurs services (les systèmes algorithmiques, en particulier), et qu'elles appliquent un principe général de transparence concernant les mesures qu'elles prennent. Les initiatives publiques en faveur du développement de technologies de conception par défaut peuvent aussi aider de façon décisive à protéger la santé mentale dans les écosystèmes numériques en incitant à réduire les comportements abusifs et à y remédier.

Identifier les spécificités des environnements immersifs qui présentent des risques pour la santé mentale

Plus les environnements immersifs se généralisent à la maison, à l'école et au travail, plus les responsables de l'action publique doivent anticiper les avantages et dangers possibles de ces technologies pour la santé mentale. Une attention particulière doit être portée aux nouveaux débats sur le besoin éventuel d'adapter les règles, réglementations et stratégies, ou d'en élaborer de nouvelles, pour traiter la question des comportements négatifs dans les environnements immersifs et les risques pour la santé mentale associés. Les politiques publiques devraient tenir compte du fait que l'enjeu du harcèlement dans les environnements numériques n'est pas le même pour les garçons et les filles, et veiller en priorité à donner aux groupes vulnérables tels que les enfants, qui sont plus susceptibles de subir l'influence des expériences immersives, les compétences requises pour y faire face et s'adapter. L'essor des technologies immersives ouvre une fenêtre d'opportunité pour façonner des réglementations qui favorisent des expériences en ligne positives et saines. En effet, la commercialisation de ces technologies étant encore à ses débuts, il est possible d'agir de manière proactive et constructive. Un dialogue entre les pouvoirs publics et les acteurs privés peut aider à définir dès que possible les règles de protection des utilisateurs, tout en aidant le secteur à bâtir la confiance dans les environnements immersifs.



Améliorer la base factuelle sur la santé mentale et les environnements numériques

Les équipes de recherche et les responsables de l'élaboration des politiques doivent relever un autre défi : disposer d'une base factuelle robuste, qui permettent des comparaisons entre les pays, sur la santé mentale et les environnements numériques. L'élaboration de définitions normalisées est une étape importante sur cette voie. Beaucoup de scientifiques ont souligné, à cet égard, l'absence actuelle de consensus autour des définitions et des critères de mesure de phénomènes tels que le cyberharcèlement, l'UPI et l'UPMS (Laconi, Rodgers et Chabrol, 2014_[38]) (Chun et al., 2020_[30]) (Shannon et al., 2022_[43]), et les problèmes de santé mentale associés. Par exemple, connaître la prévalence du cyberharcèlement et de l'UPMS en fonction du genre, de l'âge et de la zone géographique peut aider les responsables de l'action publique à mieux concevoir et appliquer des politiques et des programmes adaptés, tels que l'intégration de mesures de prévention du cyberharcèlement et de l'UPMS dans les systèmes éducatifs et d'autres domaines pertinents.

Nouer des partenariats avec des parties prenantes diverses afin de prévenir et traiter les comportements négatifs dans les environnements numériques

Il est essentiel de faire de la collaboration sur la santé mentale en général une priorité (McDaid, Hewlett et Park, 2017_[84] ; OCDE, (2023)_[87], 2022_[99]) et sur la santé mentale dans les environnements numériques en particulier. Apporter des réponses aux problèmes de santé mentale associés aux comportements négatifs dans les environnements numériques nécessite des partenariats entre les pouvoirs publics, les entreprises et les organisations non gouvernementales. En échangeant des informations sur les programmes et les politiques qui ont (ou n'ont pas) permis de lutter contre les comportements négatifs dans les environnements numériques, les responsables de l'action publique peuvent adapter leur action pour soutenir au mieux la protection de la santé mentale dans les environnements numériques. Partager des informations sur l'efficacité des programmes et des politiques peut aider à étayer l'élaboration de mesures bien ciblées et à renforcer la volonté publique d'investir dans la promotion de la santé mentale et la prévention des problèmes connexes. Des approches innovantes dans ce domaine ont déjà été mises en œuvre par l'Union européenne et l'Australie, qui disposent désormais d'organes nationaux et infranationaux chargés de coordonner les initiatives de lutte contre les comportements négatifs en environnement numérique associés à des risques pour la santé mentale¹³.



Références

- Aboujaoude, E. (2010), « Problematic internet use: An overview », *World Psychiatry*, vol. 9/2, pp. 85-90, <https://doi.org/10.1002/j.2051-5545.2010.tb00278.x>. [33]
- Aboujaoude, E. et V. Starcevic (2015), *Mental health in the digital age: Grave dangers, great promise*, Oxford University Press. [32]
- Alhajji, M., S. Bass et T. Dai (2019), « Cyberbullying, mental health, and violence in adolescents and associations with sex and race: Data from the 2015 Youth Risk Behavior Survey », *Global Pediatric Health*, vol. 6, <https://doi.org/10.1177/2333794X19868887>. [96]
- Alonzo, R. et al. (2021), « Interplay between social media use, sleep quality, and mental health in youth: A systematic review », *Sleep Medicine Reviews*, vol. 56, <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2020.101414>. [75]
- APA (2023), « Health advisory on social media use in adolescence », mai, American Psychological Association, Washington, D.C., <https://www.apa.org/topics/social-media-internet/health-advisory-adolescent-social-media-use.pdf>. [3]
- Asselin, G., H. Bilodeau et A. Khalid (2024), *Digital well-being: the relationship between technology use, mental health and interpersonal relationships*, Statistique Canada, Ottawa, <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/22-20-0001/222000012024001-eng.htm>. [82]
- Australian eSafety Commission (2023), « Trolling », page web, <https://www.esafety.gov.au/young-people/trolling> (consulté le 17 novembre 2023). [14]
- Baier, D. et al. (2019), « Consequences of bullying on adolescents' mental health in Germany: Comparing face-to-face bullying and cyberbullying », *Journal of Child and Family Studies*, vol. 28/9, pp. 2347-2357, <https://doi.org/10.1007/s10826-018-1181-6>. [28]
- Bailey, J. et al. (2019), « Virtual reality's effect on children's inhibitory control, social compliance, and sharing », *Journal of Applied Developmental Psychology*, vol. 64, <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2019.101052>. [95]
- Baumgartner, T. et al. (2008), « Feeling present in arousing virtual reality worlds: Prefrontal brain regions differentially orchestrate presence experience in adults and children », *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 2/AUG, <https://doi.org/10.3389/neuro.09.008.2008>. [94]
- Bell, I. et al. (2020), « Virtual reality as a clinical tool in mental health research and practice », *Dialogues in Clinical Neuroscience*, vol. 22/2, pp. 169-177, <https://doi.org/10.31887/DCNS.2020.22.2/LVALMAGGIA>. [54]
- Bell, V., D. Bishop et A. Przybylski (2015), « The debate over digital technology and young people », *BMJ*, vol. 351, <https://doi.org/10.1136/bmj.h3064>. [66]
- Bessière, K., A. Seay et S. Kiesler (2007), « The ideal elf: Identity exploration in world of warcraft », *Cyberpsychology and Behavior*, vol. 10/4, <https://doi.org/10.1089/cpb.2007.9994>. [15]
- Boer, M. et al. (2022), « The complex association between social media use intensity and adolescent wellbeing: A longitudinal investigation of five factors that may affect the association », *Computers in Human Behavior*, vol. 128, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.107084>. [93]
- Boer, M. et al. (2020), « Attention deficit hyperactivity disorder – Symptoms, social media use intensity, and social media use problems in adolescents: Investigating directionality », *Child Development*, vol. 91/4, pp. e853-e865, <https://doi.org/10.1111/cdev.13334>. [40]
- Brailovskaia, J., T. Teismann et J. Margraf (2018), « Cyberbullying, positive mental health and suicide ideation/behavior », *Psychiatry Research*, vol. 267, pp. 240-242, <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2018.05.074>. [26]
- Büchi, M. (2021), « Digital well-being theory and research », *New Media and Society*, <https://doi.org/10.1177/14614448211056851>. [1]
- Campbell, M. et S. Bauman (2018), « Cyberbullying: Definition, consequences, prevalence », in *Reducing Cyberbullying in Schools: International Evidence-Based Best Practices*, Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811423-0.00001-8>. [24]
- Carl, E. et al. (2019), « Virtual reality exposure therapy for anxiety and related disorders: A meta-analysis of randomized controlled trials », *Journal of Anxiety Disorders*, vol. 61, pp. 27-36, <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2018.08.003>. [53]
- Carli, V. et al. (2013), « The association between pathological Internet use and comorbid psychopathology: A systematic review », *Psychopathology*, vol. 46/1, pp. 1-13, <https://doi.org/10.1159/000337971>. [37]
- Center for Countering Digital Hate (2021), « Facebook's Metaverse », page web, <https://counterhate.com/research/facebook-metaverse> (consulté le 16 novembre 2023). [57]
- Charmaraman, L. et al. (2022), « Examining early adolescent positive and negative social technology behaviors and well-being during the COVID-19 pandemic », *Technology, Mind, and Behavior*, vol. 3/1, <https://doi.org/10.1037/tmb0000062>. [92]



- Charmaraman, L., J. Hernandez et R. Hodes (2022), « Marginalized and understudied populations using digital media », in *Handbook of Adolescent Digital Media Use and Mental Health*, Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/9781108976237.011>. [71]
- Chun, J. et al. (2020), « An international systematic review of cyberbullying measurements », *Computers in Human Behavior*, vol. 113, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106485>. [30]
- Cieślak, B. et al. (2020), « Virtual reality in psychiatric disorders: A systematic review of reviews », *Complementary Therapies in Medicine*, vol. 52, <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2020.102480>. [52]
- Coyne, S. et al. (2020), « Does time spent using social media impact mental health?: An eight year longitudinal study », *Computers in Human Behavior*, vol. 104, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.106160>. [91]
- DataHub chaîne YouTube (20 juillet 2023), « Let's make virtual worlds more liveable – Ideas to prevent metaverse harms », webinar by Shannon Pierson, https://www.youtube.com/watch?v=-9gMWIYVSRE&ab_channel=DataGovHub. [59]
- Dekkers, T. et J. van Hoorn (2022), « Understanding problematic social media use in adolescents with attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD): A narrative review and clinical recommendations », *Brain Sciences*, vol. 12/12, p. 1625, <https://doi.org/10.3390/brainsci12121625>. [42]
- eSafety Commissioner et ACMA (2022), *eSafety Commissioner Annual Report 2021-22*, eSafety Commissioner et Australian Communications and Media Authority, <https://www.esafety.gov.au/sites/default/files/2022-10/ACMA%20and%20eSafety%20annual%20report%202021-22.pdf>. [65]
- Fioravanti, G. et al. (2021), « Fear of missing out and social networking sites use and abuse: A meta-analysis », *Computers in Human Behavior*, vol. 122, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106839>. [46]
- Freeman, G. et al. (2022), « Disturbing the peace: Experiencing and mitigating emerging harassment in social virtual reality », *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, vol. 6/CSCW1, pp. 1-30, <https://doi.org/10.1145/3512932>. [56]
- Giumetti, G. et R. Kowalski (2022), « Cyberbullying via social media and well-being », *Current Opinion in Psychology*, vol. 45, p. 101314, <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2022.101314>. [25]
- Gottschalk, F. (2022), « Cyberbullying: An overview of research and policy in OECD countries », *Documents de travail de l'OCDE sur l'éducation*, n° 270, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/ff60b492b-en>. [23]
- Hamm, M. et al. (2015), « Prevalence and effect of cyberbullying on children and young people », *JAMA Pediatrics*, vol. 169/8, pp. 770-777, <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2015.0944>. [27]
- Hatta, M. et al. (2022), « Virtual reality (VR) technology for treatment of mental health problems during COVID-19: A systematic review », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19/9, p. 5389, <https://doi.org/10.3390/ijerph19095389>. [51]
- Hawkins, B. et O. Haimson (2018), *Building an online community of care: Tumblr use by transgender individuals*, ACM International Conference Proceeding Series, Association for Computing Machinery, 14-15 mai, Heilbronn, Allemagne, pp. 75-77, <https://doi.org/10.1145/3196839.3196853>. [9]
- Heller, B. (2020), « Reimagining reality: Human rights and immersive technology », *Carr Center Discussion Paper Series*, Carr Center, Harvard University, Cambridge, MA, <https://carrcenter.hks.harvard.edu/publications/reimagining-reality-human-rights-and-immersive-technology>. [55]
- Hollis, C., S. Livingstone et E. Sonuga-Barke (2020), « Editorial: The role of digital technology in children and young people's mental health – a triple-edged sword? », *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol. 61/8, pp. 837-841, <https://doi.org/10.1111/jcpp.13302>. [80]
- Holtz, B. et S. Kanthawala (2020), « #T1DLooksLikeMe: Exploring self-disclosure, social support, and Type 1 diabetes on Instagram », *Frontiers in Communication*, vol. 5, <https://doi.org/10.3389/fcomm.2020.510278>. [7]
- Inchley, C. et al. (2023), *Health Behaviour in School-aged Children (HBSC) study protocol: Background, methodology and mandatory items for the 2021/22 survey*, MRC/CSO Social and Public Health Sciences Unit, University of Glasgow, Glasgow, United Kingdom, www.hbsc.org. [98]
- Inchley, J. et al. (2020), *Spotlight on adolescent health and well-being: Findings from 2017/2018 Health Behaviour in School-aged Children (HBSC) survey in Europe and Canada*, <https://iris.who.int/handle/10665/332104>. [62]
- Ito, C. et al. (2020), *Social media and youth wellbeing: What we know and where we could go*, Connected Learning Alliance, <https://clalliance.org/wp-content/uploads/2020/06/Social-Media-and-Youth-Wellbeing-Report.pdf>. [70]
- Kardefelt-Winther, D. (2017), « How does the time children spend using digital technology impact their mental well-being, social relationships and physical activity? An evidence-focused literature review », *Innocenti Discussion Paper*, n° 2017-02, UNICEF Office of Research-Innocenti, <https://www.unicef-irc.org/publications/925-how-does-the-time-children-spend-using-digital-technology-impact-their-mental-well.html>. [69]
- Kerr, S. et M. Kingsbury (2023), *Online digital media use and adolescent mental health*, Statistics Canada, <https://www.doi.org/10.25318/82-003-x202300200002-eng>. [83]



- Kiesler, S., J. Siegel et T. McGuire (1984), « Social psychological aspects of computer-mediated communication », *American Psychologist*, vol. 39/10, p. 1123, <https://doi.org/10.1037/0003-066X.39.10.1123>. [21]
- Kowalski, R. et al. (2014), « Bullying in the digital age: A critical review and meta-analysis of cyberbullying research among youth », *Psychological Bulletin*, vol. 140/4, pp. 1073-1137, <https://doi.org/10.1037/a0035618>. [12]
- Laconi, S., R. Rodgers et H. Chabrol (2014), « The measurement of Internet addiction: A critical review of existing scales and their psychometric properties », *Computers in Human Behavior*, vol. 41, pp. 190-202, <https://doi.org/10.1016/J.CHB.2014.09.026>. [38]
- Lapidot-Lefler, N. et A. Barak (2012), « Effects of anonymity, invisibility, and lack of eye-contact on toxic online disinhibition », *Computers in Human Behavior*, vol. 28/2, pp. 434-443, <https://doi.org/10.1016/J.CHB.2011.10.014>. [17]
- Livingstone, S. (2013), « Online risk, harm and vulnerability: Reflections on the evidence base for child Internet safety policy », *Zer: Revista de estudios de comunicación*, vol. 18/35, pp. 13-28, <http://eprints.lse.ac.uk/id/eprint/62278>. [64]
- Lorenz, P., K. Perset et J. Berryhill (2023), « Initial policy considerations for generative artificial intelligence », *Documents de travail de l'OCDE sur l'intelligence artificielle*, n° 1, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/fae2d1e6-en>. [60]
- Malaeb, D. et al. (2021), « Problematic social media use and mental health (depression, anxiety, and insomnia) among Lebanese adults: Any mediating effect of stress? », *Perspectives in Psychiatric Care*, vol. 57/2, pp. 539-549, <https://doi.org/10.1111/ppc.12576>. [44]
- Masi, G. et al. (2021), « Internet addiction disorder in referred adolescents: A clinical study on comorbidity », *Addiction Research and Theory*, vol. 29/3, pp. 205-211, <https://doi.org/10.1080/16066359.2020.1772242>. [35]
- McDaid, D., E. Hewlett et A. Park (2017), « Understanding effective approaches to promoting mental health and preventing mental illness », *Documents de travail de l'OCDE sur la santé*, n° 97, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/bc364fb2-en>. [84]
- Naslung, J. et al. (2016), « The future of mental health care: Peer-to-peer support and social media », *Epidemiology and Psychiatric Sciences*, vol. 25/2, pp. 113-122, <https://doi.org/10.1017/S2045796015001067>. [8]
- Neuman, S. (1988), « The displacement effect: Assessing the relation between television viewing and reading performance », *Reading Research Quarterly*, vol. 23/4, <https://doi.org/10.2307/747641>. [68]
- Nguyen, C. et al. (2022), « Relationships of excessive Internet use with depression, anxiety, and sleep quality among high school students in northern Vietnam », *Journal of Pediatric Nursing*, vol. 62, pp. e91-e97, <https://doi.org/10.1016/j.pedn.2021.07.019>. [36]
- OCDE (2023), *PISA 2022 Results (Volume II): Learning During – and From – Disruption*, PISA, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/a97db61c-en>. [78]
- OCDE (2023), *Ready for the next crisis? Investing in health system resilience*, Études de l'OCDE sur les politiques de santé, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/1e53cf80-en>. [87]
- OCDE (2022), *Companion document to the OECD Recommendation on Children in the Digital Environment*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/a2ebec7c-en>. [85]
- OCDE (2022), *Recommandation du Conseil sur une politique intégrée de la santé mentale, des compétences et de l'emploi*, OECD/LEGAL 0420, https://legalinstruments.oecd.org/public/doc/334/334_fr.pdf. [99]
- OCDE (2021), *Beyond academic learning: First results from the Survey of Social and Emotional Skills*, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/92a11084-en>. [61]
- OCDE (2021), « Children in the digital environment : Revised typology of risks », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 302, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9b8f222e-en>. [2]
- OCDE (2021), « Recommandation du Conseil sur les enfants dans l'environnement numérique », *OECD/LEGAL/0389*, <https://legalinstruments.oecd.org/fr/instruments/OECD-LEGAL-0389>. [22]
- OCDE (2018), *Children & young people's mental health in the digital age: Shaping the future*, OCDE, Paris, <https://www.oecd.org/els/health-systems/Children-and-Young-People-Mental-Health-in-the-Digital-Age.pdf>. [73]
- Ogden, C. et M. Jensen (2020), « Adolescent mental health in the digital age: Facts, fears, and future directions », *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, Vol. 61/3, pp. 336-348, <https://doi.org/10.1111/jcpp.13190>. [74]
- Orben, A. (2020), « Teenagers, screens and social media: A narrative review of reviews and key studies », *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, vol. 55, pp. 407-414, <https://doi.org/10.1007/s00127-019-01825-4>. [77]
- OSG (2023), « Social media and youth mental health: The U.S. Surgeon General's Advisory », *Office of the Surgeon General*, <https://www.hhs.gov/sites/default/files/sg-youth-mental-health-social-media-advisory.pdf>. [4]
- Outlaw, J. (8 mai 2018), « Harassment in Social VR: Stories from Survey Respondents », *Medium blog*, <https://jessica-outlaw.medium.com/harassment-in-social-vr-stories-from-survey-respondents-59c9cde7ac02>. [60]
- Park, J. et J. Ogle (2021), « How virtual avatar experience interplays with self-concepts: The use of anthropometric 3D body models in the visual stimulation process », *Fashion and Textiles*, vol. 8/28, <https://doi.org/10.1186/s40691-021-00257-6>. [16]



- Parry, D. et al. (2022), « Social media and well-being: A methodological perspective », *Current Opinion in Psychology*, vol. 45, [88]
<https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2021.11.005>.
- Patchin, J., S. Hinduja et R. Meldrum (2023), « Digital self-harm and suicidality among adolescents », *Child and Adolescent Mental Health*, vol. 28/1, pp. 52-59, <https://doi.org/10.1111/camh.12574>. [29]
- Prinstein, M., J. Nesi et E. Telzer (2020), « Commentary: An updated agenda for the study of digital media use and adolescent development – future directions following Odgers & Jensen (2020) », *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, vol. 61/3, pp. 349-352, <https://doi.org/10.1111/jcpp.13219>. [79]
- Przybylski, A. et N. Weinstein (2017), « A large-scale test of the Goldilocks hypothesis: Quantifying the relations between digital screen use and the mental well-being of adolescents », *Psychological Science*, vol. 28/2, pp. 204-215, <https://doi.org/10.1177/0956797616678438>. [72]
- Ra, C. et al. (2018), « Association of digital media use with subsequent symptoms of attention-deficit/hyperactivity disorder among adolescents », *Journal of the American Medical Association*, vol. 320/3, pp. 255-263, <https://doi.org/10.1001/jama.2018.8931>. [90]
- Raudsepp, L. et K. Kais (2019), « Longitudinal associations between problematic social media use and depressive symptoms in adolescent girls », *Preventive Medicine Reports*, vol. 15, <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2019.100925>. [45]
- Rice, E. et al. (2015), « Cyberbullying perpetration and victimization among middle-school students », *American Journal of Public Health*, vol. 105/3, pp. e66-e72, <https://doi.org/10.2105/AJPH.2014.302393>. [89]
- Riehm, K. et al. (2019), « Associations between time spent using social media and internalizing and externalizing problems among US youth », *JAMA Psychiatry*, vol. 76/12, pp. 1266-1273, <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2019.2325>. [100]
- Rus-Calafell, M. et al. (2018), « Virtual reality in the assessment and treatment of psychosis: A systematic review of its utility, acceptability and effectiveness », *Psychological Medicine*, vol. 48/3, pp. 362-391, <https://doi.org/10.1017/S0033291717001945>. [50]
- Seabrook, E., M. Kern et N. Rickard (2016), « Social networking sites, depression, and anxiety: A systematic review », *JMIR Mental Health*, vol. 3/4, p. e50, <https://doi.org/10.2196/mental.5842>. [76]
- Segawa, T. et al. (2020), « Virtual reality (VR) in assessment and treatment of addictive disorders: A systematic review », *Frontiers in Neuroscience*, vol. 13, p. 1409, <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.01409>. [49]
- Shannon, H. et al. (2022), « Problematic social media use in adolescents and young adults: Systematic review and meta-analysis », *JMIR Mental Health*, vol. 9/4, p. 33450, <https://doi.org/10.2196/33450>. [43]
- Smahel, D. et al. (2020), *EU Kids Online 2020: Survey Results from 19 Countries*, EU Kids Online, The London School of Economics and Political Science, <https://doi.org/10.21953/lse.47fdeqj01of0>. [63]
- Spada, M. (2014), « An overview of problematic Internet use », *Addictive Behaviors*, vol. 1, p. 39, <https://doi.org/10.1016/j.addbeh.2013.09.007>. [34]
- Suler, J. (2004), « The online disinhibition effect », *CyberPsychology & Behavior*, vol. 7/3, pp. 321-326, <https://doi.org/10.1089/1094931041291295>. [6]
- Terry, C. et J. Cain (2016), « The emerging issue of digital empathy », *American Journal of Pharmaceutical Education*, vol. 80/4, pp. 1-4, <https://doi.org/10.5688/AJPE80458>. [11]
- Tjostheim, I. et J. Waterworth (2022), « Feeling present in virtual environments », in *The Psychosocial Reality of Digital Travel*, Palgrave Macmillan, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-030-91272-7_3. [47]
- Twigg, L., C. Duncan et S. Weich (2020), « Is social media use associated with children's well-being? Results from the UK Household Longitudinal Study », *Journal of Adolescence*, vol. 80, pp. 73-83, <https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2020.02.002>. [67]
- Valkenburg, P., A. Meier et I. Beyens (2022), « Social media use and its impact on adolescent mental health: An umbrella review of the evidence », *Current Opinion in Psychology*, vol. 44, pp. 58-68, <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2021.08.017>. [86]
- Valkenburg, P. et al. (2022), « Advancing our understanding of the associations between social media use and well-being », *Current Opinion in Psychology*, vol. 47, p. 101357, <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2022.101357>. [81]
- Van Den Eijnden, R., J. Lemmens et P. Valkenburg (2016), « The social media disorder scale: validity and psychometric properties », *Computers in Human Behavior*, vol. 61, pp. 478-487, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.03.038>. [39]
- Van Rooij, A. et al. (2018), « Fear of missing out as a predictor of problematic social media use and phubbing behavior among Flemish adolescents », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15/10, <https://doi.org/10.3390/ijerph15102319>. [41]
- Wachs, S. et M. Wright (2019), « The moderation of online disinhibition and sex on the relationship between online hate victimization and perpetration », *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, vol. 22/5, pp. 300-306, <https://doi.org/10.1089/cyber.2018.0551>. [19]



- Wachs, S. et M. Wright (2018), « Associations between bystanders and perpetrators of online hate: The moderating role of toxic online disinhibition », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15/9, <https://doi.org/10.3390/ijerph15092030>. [20]
- Wachs, S., M. Wright et A. Vazsonyi (2019), « Understanding the overlap between cyberbullying and cyberhate perpetration: Moderating effects of toxic online disinhibition », *Criminal Behaviour and Mental Health*, vol. 29/3, pp. 179-188, <https://doi.org/10.1002/cbm.2116>. [13]
- Wang, X. et al. (2022), « Parental phubbing and adolescents' cyberbullying perpetration: A moderated mediation model of moral disengagement and online disinhibition », *Journal of Interpersonal Violence*, vol. 37/7-8, <https://doi.org/10.1177/0886260520961877>. [18]
- Whitty, M. et G. Young (2017), *Cyberpsychology: The Study of Individuals, Society and Digital Technologies*, John Wiley & Sons Ltd. [5]
- Ybarra, M. et al. (2015), « Online social support as a buffer against online and offline peer and sexual victimization among U.S. LGBT and non-LGBT youth », *Child Abuse and Neglect*, vol. 39, pp. 123-136, <https://doi.org/10.1016/j.chiabu.2014.08.006>. [10]
- Ybarra, M. et al. (2012), « Defining and measuring cyberbullying within the larger context of bullying victimization », *Journal of Adolescent Health*, vol. 51/1, pp. 53-58, <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2011.12.031>. [31]

Notes

1. La Commissaire australienne à la cybersécurité et le Centre allemand pour un internet plus sûr (en particulier jugendschutz.net) publient régulièrement des statistiques sur les plaintes pour cyberharcèlement dans leurs rapports annuels. De plus amples informations sont disponibles aux adresses : www.esafety.gov.au/about-us/corporate-documents/annual-reports et www.jugendschutz.net/ueber-uns/jahresbericht.
2. Il est important de noter que les éléments probants dont on dispose sont encore insuffisants pour soutenir l'idée d'un remplacement des traitements traditionnels par la réalité virtuelle (Cieślik et al., 2020_[52]).
3. Des études menées aux États-Unis sur de petits échantillons de données concluent que les filles et les adolescentes lesbiennes, gays, bisexuelles, trans ou en questionnement (LGBTQ) sont plus souvent victimes de cyberharcèlement (Rice et al., 2015_[89]) (Alhajji, Bass et Dai, 2019_[96]).
4. L'Enquête HBSC est une étude transnationale menée en collaboration par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) depuis plus de 30 ans, qui vise à collecter des données sur la santé, le bien-être, l'environnement social et les comportements de santé des jeunes de 11 à 15 ans.
5. Dans l'enquête HBSC, l'indicateur de perpétration du cyberharcèlement est mesuré au travers de la question suivante : « Au cours des deux derniers mois, combien de fois avez-vous pris part à du cyberharcèlement (par exemple, envoyé des messages instantanés, des courriels ou des textos malveillants ; posté des messages sur le mur ; créé un site web destiné à moquer quelqu'un ; publié en ligne des photos non flatteuses ou inappropriées sans autorisation ou partagé ces contenus avec d'autres) ? » Les réponses possibles sont : jamais ; 1 ou 2 fois ; 2 à 3 fois par mois ; une fois par semaine ; plusieurs fois par semaine. L'indicateur de victimation du cyberharcèlement est mesuré au travers de la question suivante : « Au cours des deux derniers mois, combien de fois avez-vous été victime de cyberharcèlement (par exemple, quelqu'un a envoyé des messages instantanés, des courriels ou des textos malveillants à votre sujet ; posté des messages sur le mur ; créé un site web destiné à vous moquer ; publié en ligne sans autorisation des photos de vous non flatteuses ou inappropriées ou partagé ces contenus avec d'autres) ? » Les réponses possibles sont : jamais ; 1 ou 2 fois ; 2 à 3 fois par mois ; une fois par semaine ; plusieurs fois par semaine. L'indicateur de l'UPMS est mesuré au moyen de l'échelle des troubles liés aux médias sociaux. Cette échelle comprend neuf items : 1) préoccupation (« ... vous est-il régulièrement arrivé de ne pas pouvoir penser à autre chose que le moment où vous pourriez à nouveau utiliser les médias sociaux ? ») ; 2) tolérance (« ... vous est-il régulièrement arrivé d'éprouver de l'insatisfaction car vous vouliez passer plus de temps sur les médias sociaux ? ») ; 3) manque (« ... vous est-il souvent arrivé de ressentir du mal-être quand vous ne pouviez pas utiliser les médias sociaux ? ») ; 4) persistance (« ... avez-vous tenté de passer moins de temps sur les médias sociaux, sans y parvenir ? ») ; 5) déplacement (« ... vous est-il régulièrement arrivé de négliger d'autres activités (loisirs, sports, etc.) parce que vous vouliez utiliser les médias sociaux ? ») ; 6) problème (« ... vous est-il régulièrement arrivé de vous disputer avec d'autres à cause de votre utilisation des médias sociaux ? ») ; 7) tromperie (« ... vous est-il régulièrement arrivé de mentir à vos parents ou vos amis au sujet du temps que vous passez sur



les médias sociaux ? ») ; 8) fuite (« ... vous est-il régulièrement arrivé d'utiliser les médias sociaux pour échapper à des émotions négatives ? ») ; 9) conflit (« ... avez-vous eu de graves conflits avec vos parents, frère(s) ou sœur(s) à cause de votre utilisation des médias sociaux ? »). Les personnes sont classées dans la catégorie UPMS si elles ont répondu oui à six ou plus des items de l'échelle. (Toutes les traductions de cette note sont libres.)

6. De plus amples informations sur les régions et pays participants sont consultables à l'adresse : www.uib.no/en/hbscdata/94931/participating-regions-survey-years.
7. L'UPMS est analysée en Albanie, en Allemagne, en Angleterre, en Arménie, en Autriche, en Belgique (flamande), en Belgique (française), au Canada, en Croatie, au Danemark, en Écosse, en Espagne, en Estonie, en France, en Grèce, en Hongrie, en Irlande, en Islande, en Israël, en Italie, au Kazakhstan, en Lettonie, en Lituanie, au Luxembourg, en Macédoine du Nord, à Malte, à Moldava, en Norvège, au Pays-Bas, au Pays de Galles, en Pologne, au Portugal, en Roumanie, en Serbie, en Slovaquie, en Suède et en Suisse.
8. La victimisation et la perpétration de cyberharcèlement sont analysées en Albanie, en Allemagne, en Angleterre, en Arménie, en Autriche, en Belgique (flamande), en Belgique (française), en Bulgarie, au Canada, en Croatie, au Danemark, en Espagne, en Estonie, en France, en Grèce, en Hongrie, en Irlande, en Islande, en Israël, en Italie, au Kazakhstan, en Lettonie, en Lituanie, au Luxembourg, en Macédoine du Nord, à Malte, à Moldova, en Norvège, aux Pays-Bas, au Pays de Galles, en Pologne, au Portugal, en République slovaque, en République tchèque, en Roumanie, en Serbie, en Slovaquie, en Suède et en Suisse.
9. En cohérence avec l'approche suivie dans le rapport international de l'OMS (Inchley et al., 2020^[62]), les personnes identifiées comme faisant une utilisation intensive de la communication en ligne sont celles qui ont déclaré avoir des contacts en ligne avec des amis ou d'autres personnes pendant toute la journée sans interruption ou presque, dans l'enquête HBSC de 2017-18. Le terme « communication en ligne » recouvre « l'envoi ou la réception de textes, d'émoticônes, de photos, de vidéos ou de messages audio par messagerie instantanée (WhatsApp, par exemple), sur les sites des médias sociaux (Facebook, par exemple) ou par courriel (sur ordinateur fixe, ordinateur portable, tablette ou smartphone) ». De plus amples informations sur l'enquête sont consultables à l'adresse <https://hbsc.org>.
10. En cohérence avec l'approche suivie dans le rapport international de l'OMS (Inchley et al., 2020^[62]), les personnes identifiées comme faisant une utilisation problématique des médias sociaux sont celles qui ont répondu « oui » à six items ou plus de l'échelle des troubles liés aux médias sociaux. Pour de plus amples informations sur l'échelle des troubles liés aux médias sociaux, voir la note 7.
11. Les personnes identifiées comme faisant une utilisation intensive de la communication en ligne sont celles qui ont déclaré avoir des contacts en ligne avec des amis ou d'autres personnes pendant toute la journée sans interruption ou presque, dans l'enquête HBSC de 2017-18 et 2021-22. Voir la note 9.
12. Des études portant sur des échantillons de taille plus réduite aux Pays-Bas et aux États-Unis trouvent des associations positives (mais faibles) ou nulles entre une utilisation intensive des médias sociaux et des problèmes de santé mentale (Boer et al., 2022^[93]) (Coyne et al., 2020^[91]) (Charmaraman et al., 2022^[92]) (Ra et al., 2018^[90]) (Riehm et al., 2019^[88]). Une autre étude conduite au Royaume-Uni indique qu'une utilisation fréquente des plateformes de médias sociaux est corrélée à de faibles niveaux de satisfaction à l'égard de la vie, en particulier chez les filles (Twigg, Duncan et Weich, 2020^[67]).
13. De plus amples informations sur les centres de l'Australie et de l'Union européenne sont consultables aux adresses <https://www.esafety.gov.au> et <https://digital-strategy.ec.europa.eu/fr/policies/safer-internet-centres>.

Liste des Graphiques

Chapitre 1 PERSPECTIVES DE CROISSANCE DU SECTEUR DES TIC	
1.1. Répartition du bruit d'échantillonnage avant et après correction.....	22
1.2. Séries chronologiques brute et nettoyée des SVI pour dix catégories Google Trends aux Pays-Bas, 2004-23.....	23
1.3. Le modèle de prévision immédiate est performant.....	25
1.4. Le secteur des TIC résiste face aux vents contraires de l'économie.....	26
1.5. Le secteur des TIC fait preuve d'un dynamisme remarquable.....	31
1.6. Les taux de croissance des TIC varient considérablement entre les pays.....	31
1.7. Six points de pourcentage séparent les pays leaders des moins performants dans le secteur des TIC.....	32
1.8. Les taux de croissance du secteur des TIC convergent entre les pays.....	32
1.9. La croissance du secteur des TIC est forte dans tous les pays.....	33
Chapitre 2 L'AVENIR DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	
2.1. Exemples de facteurs interdépendants susceptibles de façonner la gouvernance de l'IA dans les décennies à venir.....	42
2.2. Plus de la moitié des ensembles de données d'entraînement d'IA sont en anglais ...	47
2.3. Le nombre d'incidents et de dangers liés à l'IA générative mentionnés dans les médias de bonne réputation a augmenté de façon exponentielle depuis 2022.....	52
2.4. La Chine, l'Union européenne et les États-Unis publient le plus de travaux de recherche sur l'IA, suivis de l'Inde où la progression est notable.....	56
2.5. La part de la Chine dans le total des publications sur l'IA « à fort impact », en augmentation régulière depuis 2000, a dépassé celles des États-Unis et de l'Union européenne en 2019.....	57
2.6. L'investissement en capital-risque dans les start-ups de l'IA générative est en plein essor depuis 2022, tandis que l'investissement en capital-risque dans tous les secteurs, et dans les start-ups de l'IA en particulier, baisse depuis 2021.....	59
2.7. Les économies avancées se font concurrence pour attirer les talents de l'IA.....	60
Coup de projecteur LES RÉSEAUX SANS FIL DE PROCHAINE GÉNÉRATION ET L'ÉCOSYSTÈME DE LA CONNECTIVITÉ	
1.S.1. Vers la 6G : calendrier possible.....	78
1.S.2. Les facteurs imbriqués qui façonneront sans doute la 6G au cours de la prochaine décennie.....	80
1.S.3. Vers l'intégration verticale : convergence des réseaux terrestres et des réseaux non terrestres.....	85
Chapitre 3 DIFFUSION DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES ET DONNÉES	
3.1. L'adoption de l'internet a progressé.....	99
3.2. Les disparités d'utilisation de l'internet sont marquées selon les classes d'âge, le niveau d'instruction et le quintile de revenu.....	99
3.3. Les disparités d'utilisation de l'internet se réduisent, mais restent notables parmi la population âgée.....	100
3.4. L'adoption des services bancaires et des services d'administration en ligne varie selon les pays.....	101
3.5. Il existe une corrélation entre, d'une part, les activités en ligne telles que le recours aux services bancaires et les achats sur l'internet, et d'autre part, l'éducation formelle et les compétences TIC.....	102
3.6. Les internautes les plus jeunes et les plus instruits mènent un éventail plus large d'activités en ligne.....	103
3.7. L'adoption des services en ligne a progressé pendant la pandémie.....	104
3.8. L'essor initial du commerce électronique pendant la pandémie de COVID-19 s'est en grande partie dissipé.....	106

3.9. La pandémie de COVID-19 s'est souvent accompagnée d'un ralentissement de la convergence des taux d'adoption des services en ligne	107
3.10. L'adoption des technologies axées sur les données reste faible	109
3.11. La diffusion de l'infonuagique a été trois fois plus rapide que celle de l'analytique des données massives	110
3.12. L'adoption de l'infonuagique et des technologies d'IdO est homogène dans les différents secteurs	111
3.13. La taille des entreprises est un déterminant plus important de l'adoption des technologies dépendantes des données et des logiciels que de celle des technologies d'IdO ou de l'infonuagique	112
Coup de projecteur LA SANTÉ MENTALE ET LES ENVIRONNEMENTS NUMÉRIQUES	
2.S.1. Les taux de cyberharcèlement ont augmenté dans presque tous les pays	161
2.S.2. Les filles sont plus souvent des utilisatrices problématiques des médias sociaux que les garçons	162
2.S.3. Une mauvaise santé mentale est associée à une utilisation intensive des communications en ligne	163

Liste des Tableaux

Chapitre 1 PERSPECTIVES DE CROISSANCE DU SECTEUR DES TIC	
1.1. Mise en correspondance indicative des catégories Google Trends liées au secteur des TIC	21
Chapitre 3 DIFFUSION DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES ET DONNÉES	
3.A.1. Effet des niveaux d'instruction, de compétences TIC et de revenu sur l'adoption des services en ligne	116
3.A.2. Effet de la pandémie de COVID-19 sur l'adoption des services en ligne	116
3.A.3. Effet de la pandémie de COVID-19 sur l'adoption des services en ligne selon le niveau d'instruction	117
3.A.4. Effet de la pénurie de semi-conducteurs sur les cartes SIM M2M	117
3.A.5. Diffusion de l'analytique des données massives et de l'infonuagique	117

Liste des Encadrés

Chapitre 1 PERSPECTIVES DE CROISSANCE DU SECTEUR DES TIC	
1.1. SCN et économie numérique	18
Chapitre 2 L'AVENIR DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	
2.1. L'ABC de l'IA	43
2.2. Des systèmes d'IA à usage de plus en plus général	45
Coup de projecteur LES RÉSEAUX SANS FIL DE PROCHAINE GÉNÉRATION ET L'ÉCOSYSTÈME DE LA CONNECTIVITÉ	
1.S.1. Les avions électriques à décollage et atterrissage verticaux utilisés comme taxis volants, moyens de transports de demain	86
Chapitre 4 LA RÉALITÉ VIRTUELLE, SES POSSIBILITÉS ET SES RISQUES	
4.1. Données de suivi : les gestes sont plus éloquents que les mots	139
Coup de projecteur LA SANTÉ MENTALE ET LES ENVIRONNEMENTS NUMÉRIQUES	
2.S.1. Le temps passé en ligne est-il associé à des comportements problématiques ? ...	163

Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2024 (Volume 1)

CAP SUR LA FRONTIÈRE TECHNOLOGIQUE

Les *Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2024 (Volume 1) : Cap sur la frontière technologique* apportent de nouveaux éclairages sur les technologies phares qui sous-tendent l'écosystème de technologies numériques ainsi que leurs impacts. Dans ce premier volume, les auteurs se sont appuyés sur des données massives et des techniques d'apprentissage automatique pour produire de nouvelles estimations du taux de croissance du secteur des technologies de l'information et des communications (TIC), qui est au cœur de l'écosystème. Ils se sont ensuite tournés vers la frontière technologique, s'intéressant à l'avenir de l'intelligence artificielle (IA) et aux moyens de la façonner de manière à en faire une force positive. Ce *Volume 1* propose également une analyse de l'adoption des technologies numériques par les individus, les entreprises et les administrations et donne à voir l'ampleur et la portée des fractures numériques et les solutions pour favoriser l'égalité des chances et l'inclusion. Pour ce faire, on se penche sur l'impérieuse nécessité que les réseaux sans fil de nouvelle génération fournissent une connectivité illimitée, en tout lieu. Au-delà de l'engouement suscité par les technologies immersives, on examine la capacité avérée de la réalité virtuelle à se prêter à un déploiement à grande échelle, avant d'en exposer les possibilités et les risques. Enfin, on donne un coup de projecteur à la question de la santé mentale dans les environnements numériques, en particulier ceux présentant les risques les plus élevés.



PAPERBACK ISBN 978-92-64-75948-0
PDF ISBN 978-92-64-86583-9



9 789264 759480