

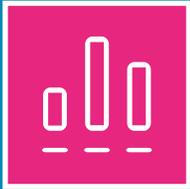


PERSPECTIVES ÉCONOMIQUES

Le bionumérique aujourd'hui et demain

Explorer la transition vers l'ère bionumérique

Le bionumérique aujourd'hui et demain



© Sa Majesté la Reine du
Chef du Canada; 2022.

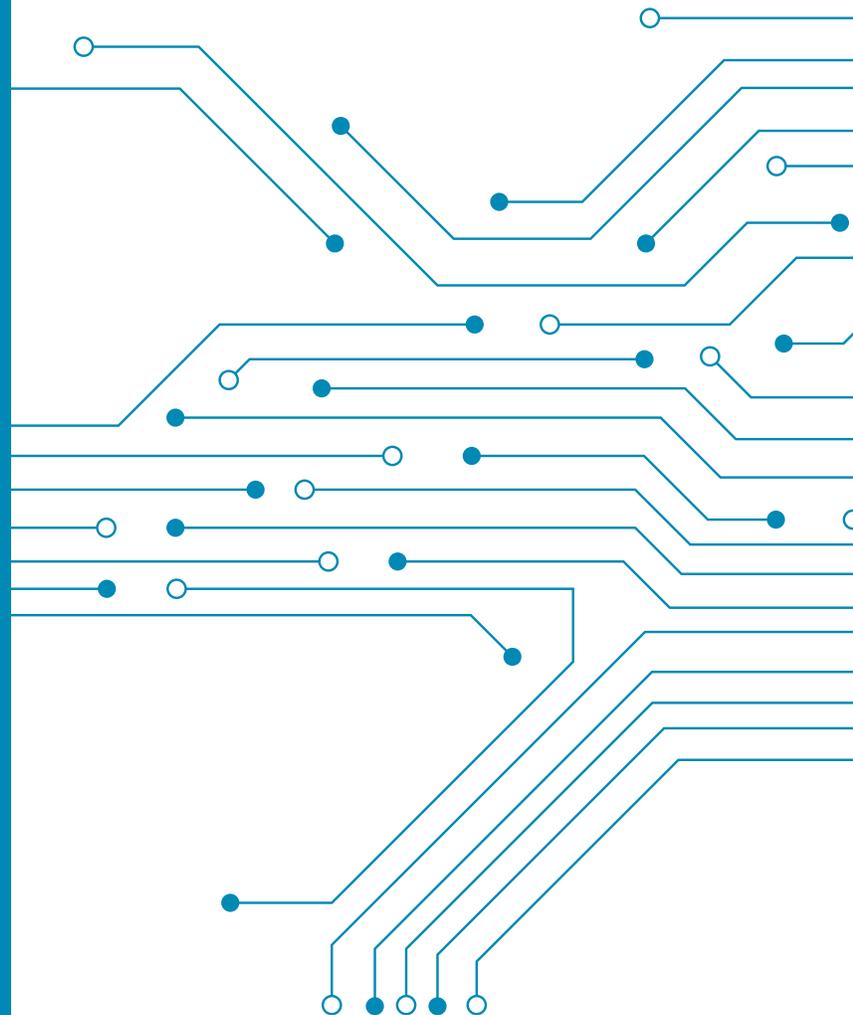
Pour obtenir des renseignements sur les
droits de reproduction : [https://horizons.gc.
ca/fr/contactez-nous/](https://horizons.gc.ca/fr/contactez-nous/)

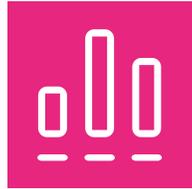
PDF

N° de cat. : PH4-191/2022F-PDF
ISBN : 978-0-660-43163-5

AVERTISSEMENT

Horizons de politiques Canada (Horizons)
est une organisation de prospective stratégique
au sein du gouvernement du Canada qui a le
mandat d'aider le gouvernement à développer
des politiques et des programmes axés sur
l'avenir, qui sont plus solides et plus résilients
face aux changements perturbateurs à l'horizon.
Le contenu de ce document ne représente pas
nécessairement les idées du gouvernement
du Canada, ou des départements et des
organismes participants.

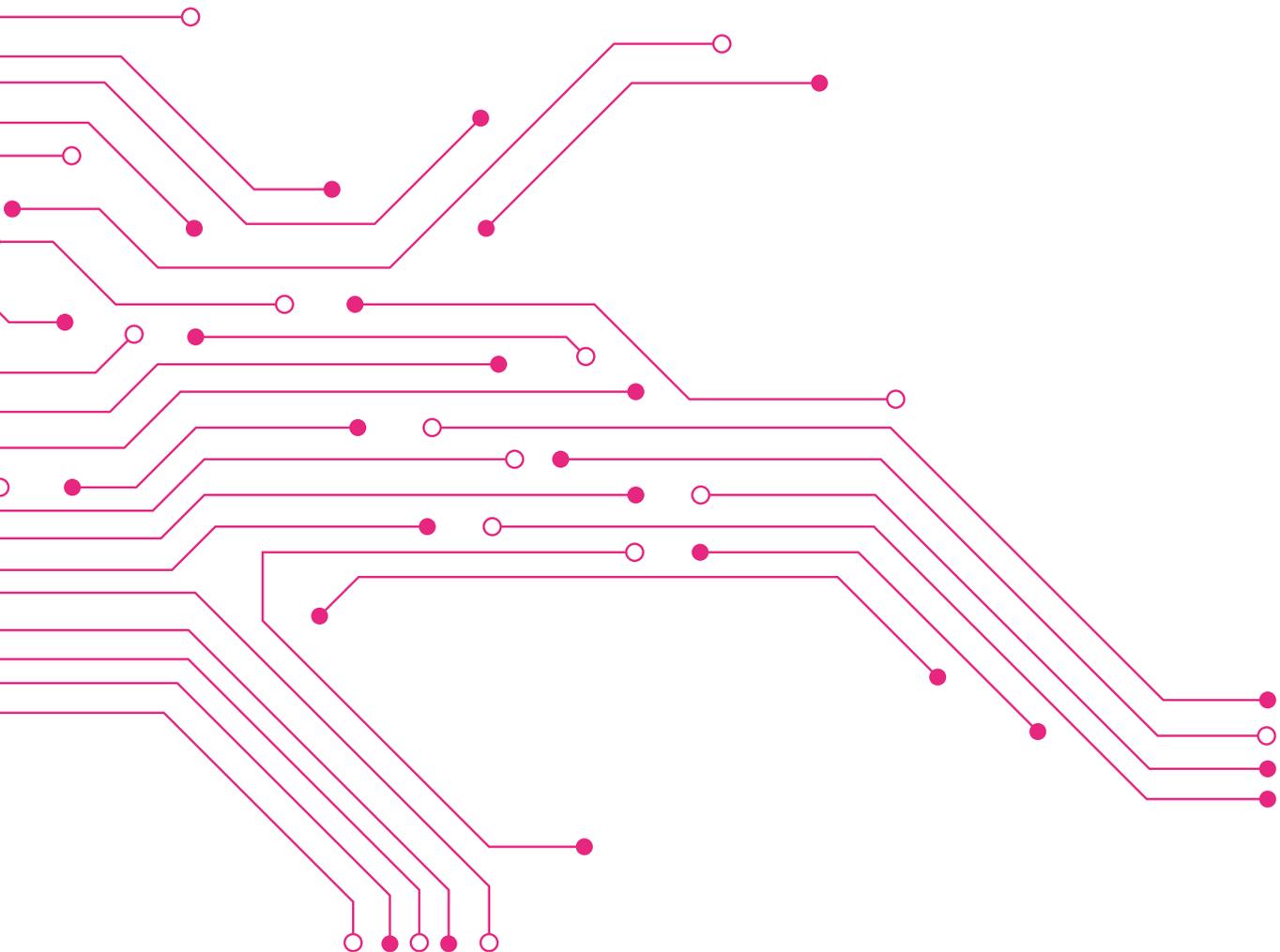




PERSPECTIVES ÉCONOMIQUES

Le bionumérique aujourd'hui et demain

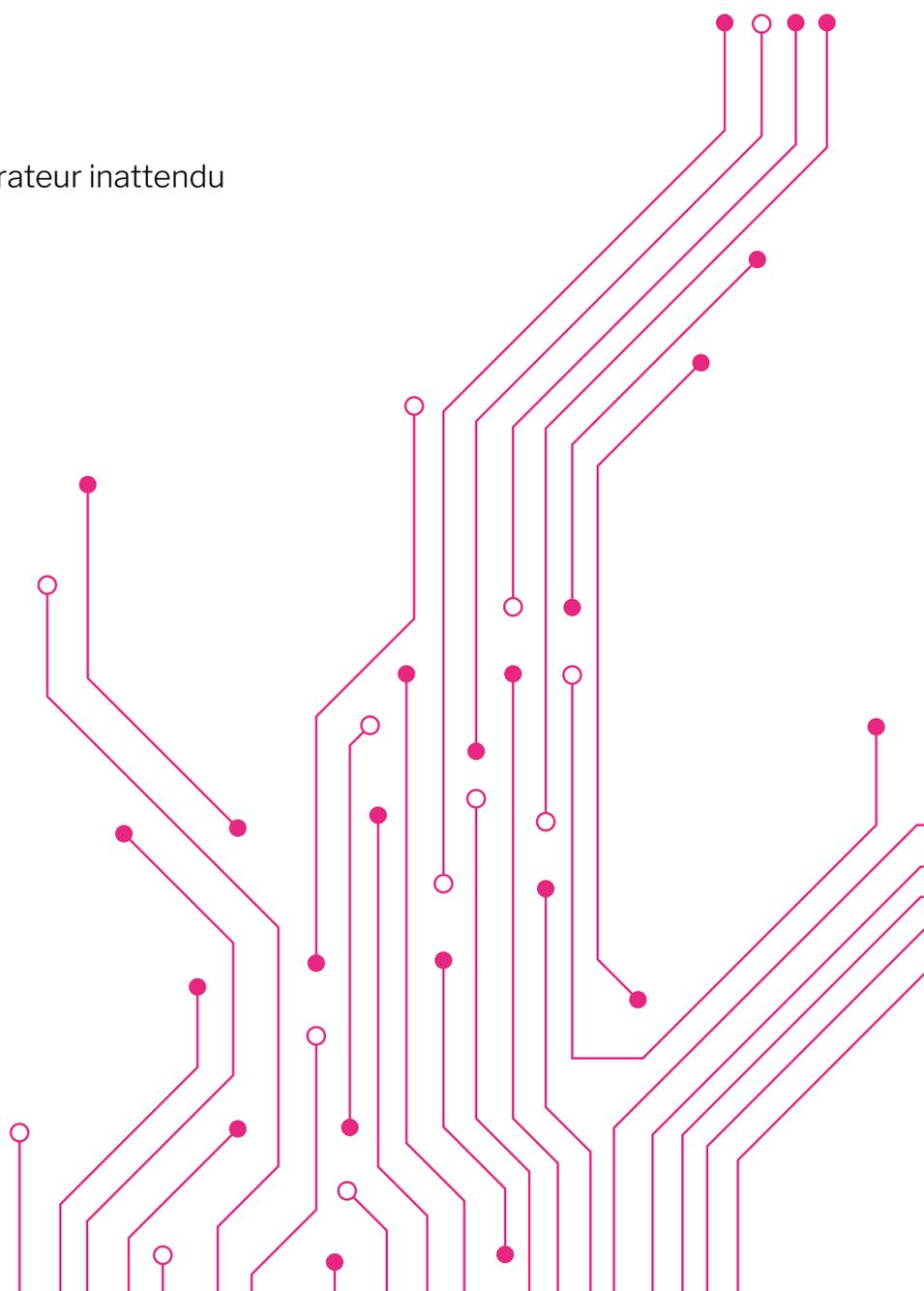
Explorer la transition vers l'ère bionumérique





Tables des matières

04	Avant-propos
06	Résumé
10	Introduction
13	Alimentation
23	Santé
33	Environnement
41	Sécurité
49	Fabrication
56	COVID-19 : un accélérateur inattendu
61	Conclusion
63	Remerciements
64	Références



Avant-propos





La pandémie de COVID-19 s'avère être un puissant moteur de changement. Elle provoque la création d'innovations bionumériques comme la biosurveillance en temps quasi réel de la propagation du virus et de ses mutations, le suivi de la progression de la pandémie à l'aide des téléphones intelligents et le développement de vaccins à base d'acide ribonucléique messenger (ARNm) à une vitesse sans précédent. Les modifications génétiques d'éléments naturels pour atténuer les effets du changement climatique, assainir l'environnement ou préserver la biodiversité pourraient cependant poser question au plan de l'éthique.

En complément de notre premier rapport sur le sujet, *Explorer la convergence bionumérique*, ce rapport présente quelques-uns des changements que nous pourrions observer à mesure que la convergence bionumérique évolue et donne lieu à de nouvelles réalités. Il explore les incidences potentielles de la convergence bionumérique sur les secteurs de la santé, de l'alimentation et de l'agriculture, de l'environnement, de la fabrication et de la sécurité. Ces impacts pourraient avoir des répercussions dans de nombreux secteurs politiques : le commerce international, les soins de santé, le passage à une économie à faible intensité de carbone, la gestion des ressources naturelles, et bien d'autres encore.

Horizons de politiques Canada (Horizons de politiques) ne fournit pas de recommandations ou de conseils en matière de politiques. Guidé par son mandat, l'organisme explore ce qui pourrait se produire dans le futur paysage politique, afin d'aider le gouvernement du Canada à élaborer des politiques et des programmes axés sur l'avenir et à se préparer à d'éventuels changements radicaux et perturbateurs.

Nous espérons que vous trouverez ce rapport instructif et inspirant. En étudiant ce qui pourrait arriver, nous pouvons aider les Canadiens et les décideurs à réfléchir à l'avenir que nous souhaitons et à ceux que nous voulons éviter.

Au nom d'Horizons de politiques Canada, je tiens à remercier ceux qui nous ont généreusement fait don de leur temps et fait part de leurs connaissances et de leurs réflexions.

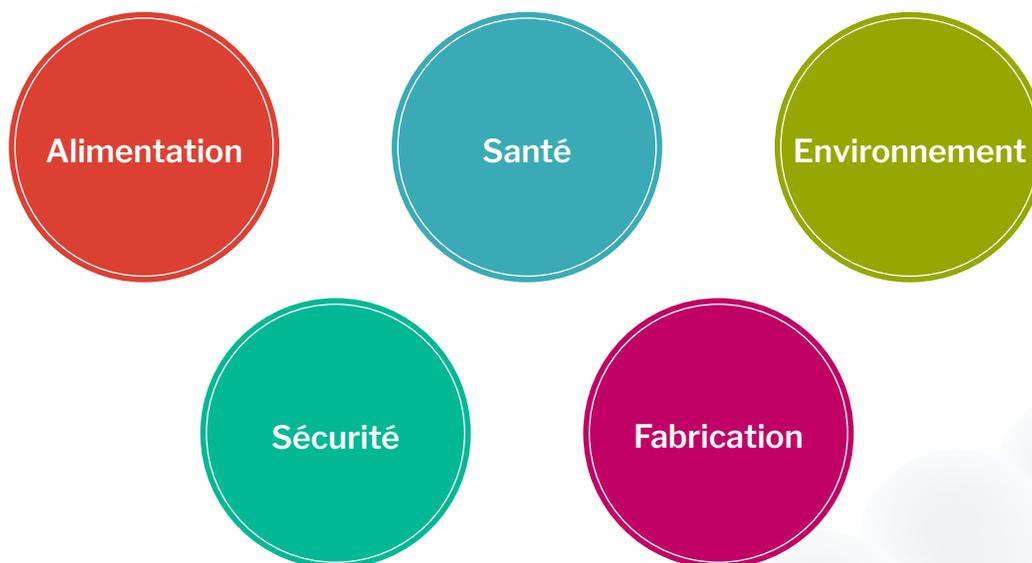
Kristel Van der Elst

Directrice générale,
Horizons de politiques Canada

Résumé

Les systèmes biologiques et numériques se rejoignent en profondeur, créant un nouveau domaine appelé le bionumérique. La technologie numérique et les êtres vivants sont de plus en plus capables de communiquer entre eux. Nous pouvons intégrer la technologie numérique dans des organismes vivants et incorporer des composantes biologiques dans les nouvelles technologies. La convergence de ces deux systèmes pourrait perturber considérablement les sociétés, les écosystèmes, les économies et l'évolution.

Les contours de l'ère bionumérique à venir se précisent. Le présent rapport explore les moteurs de changement et la manière dont la convergence bionumérique pourrait transformer cinq secteurs économiques et domaines de la vie.



Il examine certains des changements que nous pourrions observer dans chaque domaine, les perturbations importantes que nous pourrions connaître à l'avenir, et les considérations d'ordre politique qui pourraient voir le jour. Ce rapport évalue également la manière dont la pandémie de COVID-19 pourrait accélérer la convergence bionumérique.

Alimentation

L'agriculture traditionnelle dépend du territoire, de l'eau et d'un climat approprié. À l'avenir, les aliments pourraient être fabriqués à n'importe quel endroit dans des laboratoires et des fermes verticales, ce qui pourrait fondamentalement transformer le secteur agricole, le commerce international, les migrations ainsi que les relations des gens avec la terre, les animaux et la nourriture.

Santé

La convergence bionumérique pourrait faire progresser rapidement les traitements ciblés et la médecine de précision fondée sur les profils génomiques, ce qui permettrait d'améliorer les soins préventifs et de traiter les maladies avec une grande efficacité. En même temps, la convergence bionumérique donne également lieu à des considérations liées à l'inclusivité et à l'éthique, entre autres.

Environnement

Le changement climatique, la pollution et la perte de biodiversité sont largement reconnus comme des enjeux mondiaux urgents. Les modes de production et de consommation non durables d'aujourd'hui mettent en danger le bien-être socioéconomique à long terme. Les technologies bionumériques pourraient augmenter notre capacité de nous rapprocher du monde naturel et de le surveiller. Elles pourraient aussi étendre notre compréhension des liens qui unissent tous les êtres vivants. La modification génétique du monde naturel comme moyen d'atténuer le changement climatique, d'assainir l'environnement et de préserver la biodiversité peut toutefois soulever des considérations d'ordre éthique. En outre, la dissémination d'organismes modifiés dans des environnements naturels peut avoir des conséquences inconnues.

Sécurité

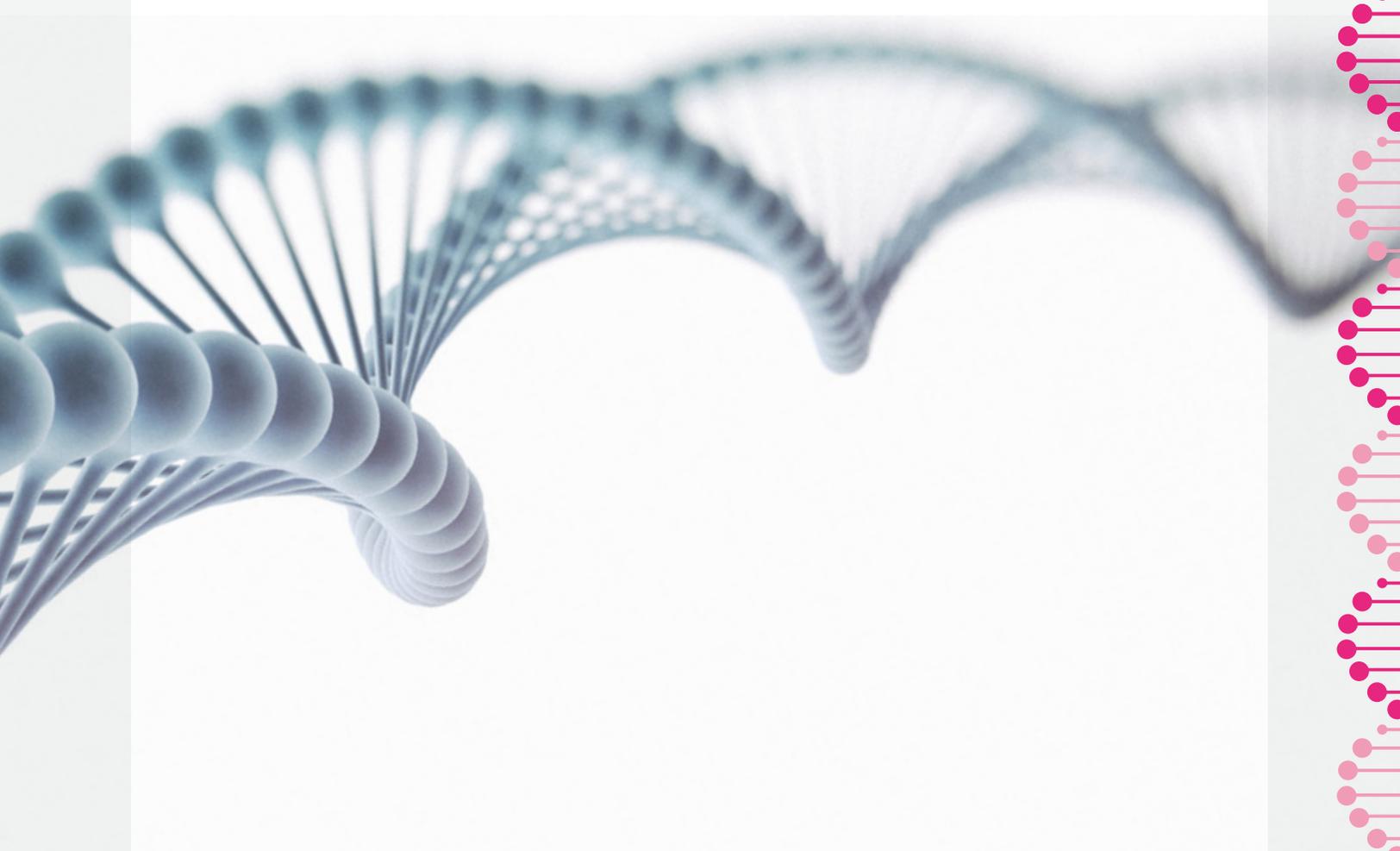
Les innovations et les capacités bionumériques naissantes créent à la fois de nouvelles frontières et des préoccupations potentielles dans le domaine de la sécurité et de la défense. Alors que près de cinq milliards de personnes sont connectées à Internet, la surveillance numérique et la collecte de données ont considérablement augmenté au cours de la dernière décennie. L'essor des données biologiques peut ajouter un nouveau degré de complexité à la sécurisation de données personnelles potentiellement précieuses. L'augmentation du nombre de données accessibles peut également faciliter les enquêtes criminelles et créer une société plus sûre.

Fabrication

La fabrication reposait historiquement sur le travail d'ouvriers d'usine qui transformaient des ressources naturelles initialement extraites des mines, des forêts et des eaux ou cultivées dans des exploitations agricoles. Les différences de coût de la main-d'œuvre et la répartition naturelle des ressources ont eu des implications sur notre vaste réseau de chaînes d'approvisionnement mondiales. La convergence bionumérique pourrait transformer le secteur des ressources naturelles grâce à de nouvelles méthodes de fabrication et d'obtention des matières premières et des carburants, ainsi qu'à de nouvelles techniques de fabrication, ce qui pourrait atténuer la pression sur les ressources naturelles. Une production et une distribution locales des biens et des carburants pourraient soutenir la relocalisation du secteur de la fabrication et transformer le commerce, perturbant ainsi les réseaux commerciaux et les chaînes d'approvisionnement.

La **pandémie de COVID-19** agit comme un moteur du changement qui accélère la transition vers un monde bionumérique. Elle a sensibilisé la population, les gouvernements et l'industrie à la biologie et à ses multiples usages. Elle révèle les risques de la désinformation et la nécessité des connaissances en biologie. Elle place les capacités de biodéfense et l'autosuffisance nationale au premier plan des préoccupations des gouvernements. En outre, elle a obligé les sociétés à réévaluer l'équilibre entre la biosécurité et les libertés individuelles.

Le rythme de la convergence bionumérique dans les années à venir dépendra non seulement des progrès technologiques, mais aussi de l'acceptation sociale, et la pandémie a démontré que des événements inattendus peuvent déclencher des changements rapides dans la sphère de ce qui est largement considéré comme acceptable ou souhaitable. À l'avenir, nous ne verrons peut-être plus les technologies numériques et les systèmes biologiques comme des éléments distincts, mais plutôt comme des éléments qui s'entrelacent, normalisant davantage le monde bionumérique dont les générations futures pourraient hériter.



Introduction

Le présent rapport poursuit le travail de notre document d'orientation intitulé [Explorer la convergence bionumérique](#)¹, qui explorait la façon dont les systèmes biologiques et la technologie numérique convergent d'une manière qui pourrait changer notre façon de vivre, de comprendre et de donner un sens à nos vies et d'évoluer, ainsi que les capacités et les caractéristiques possibles des innovations bionumériques. Nous avons relevé trois voies par lesquelles la convergence bionumérique se concrétise :

1 Intégration physique complète d'entités biologiques et numériques :

Il s'agit de l'intégration de la technologie numérique dans des organismes ou de l'incorporation de composantes biologiques dans des technologies. Parmi les exemples, citons les robots dotés d'un cerveau biologique, les implants numériques chez les êtres humains et les systèmes de contrôle neurologique chez les insectes. Les technologies numériques peuvent améliorer les capacités naturelles des êtres vivants.

2 Évolution conjointe de technologies biologiques et numériques :

Elle se produit lorsque les avancées dans un domaine génèrent des progrès dans un autre, et vice versa. La technologie numérique et le monde naturel s'échafaudent mutuellement, favorisant des percées communes et une évolution conjointe. Parmi les exemples,

citons les nouvelles découvertes sur le fonctionnement du cerveau, qui ont inspiré le développement des réseaux neuronaux, et l'intelligence artificielle (IA), qui a découvert des modèles dans les séquences de gènes, ce qui a permis de mieux comprendre le rôle des gènes.

3 Évolution cognitive des systèmes biologiques et numériques :

Il s'agit de l'évolution de la perspective selon laquelle la convergence du monde naturel et de la technologie numérique devient normalisée. Nous pourrions continuer à considérer ces systèmes comme un seul nouveau domaine intégré. Les progrès réalisés dans notre compréhension des systèmes biologiques et dans la création de nouvelles capacités numériques comme l'IA donnent lieu à une convergence bionumérique conceptuelle.

Dans le présent rapport, nous examinons en détail comment la convergence bionumérique pourrait remodeler cinq domaines : l'alimentation, la santé, l'environnement, la sécurité et la fabrication. Nous examinons les secteurs dans leur forme actuelle, nous étudions les changements que la convergence bionumérique apporte à chaque secteur et ce qui pourrait les transformer à l'avenir. Nous soulignons également les incertitudes critiques et les possibilités futures, ainsi que les considérations d'ordre politique.

Dans le cadre de notre travail sur ce rapport, nous avons vécu la première urgence mondiale de l'ère bionumérique. Dans la dernière partie du rapport, nous nous penchons sur la pandémie de COVID-19 comme accélérateur important de la révolution bionumérique, qui accroît les investissements dans la recherche, sensibilise le public aux menaces biologiques, modifie les perceptions de ce qui est socialement possible et place la santé publique au centre de la gouvernance nationale.

Les contours de l'ère bionumérique à venir se précisent peu à peu, et la transition vers cette ère sera inévitablement perturbatrice. En réfléchissant dès maintenant aux trajectoires possibles de la convergence bionumérique, nous espérons réduire les risques et exploiter les opportunités pour le Canada et le monde entier.



Alimentation

L'agriculture traditionnelle dépend du territoire, de l'eau et d'un climat approprié. À l'avenir, les aliments pourraient être fabriqués à n'importe quel endroit dans des laboratoires et des fermes verticales, ce qui pourrait fondamentalement transformer le secteur agricole, le commerce international, les migrations ainsi que les relations des gens avec la terre, les animaux et la nourriture.

La demande et le [commerce](#)² de denrées alimentaires devraient augmenter avec la [croissance de la population](#)³. De nombreux pays risquent d'être confrontés à des problèmes de sécurité alimentaire provoqués par le changement climatique, alors que les phénomènes météorologiques extrêmes et les maladies pourraient nuire à la production agricole traditionnelle. Les conflits régionaux pourraient également perturber les échanges commerciaux et les modes de production alimentaires à l'échelle internationale. Les systèmes alimentaires ont également des répercussions sur l'environnement, notamment l'utilisation des terres, la déforestation, la pollution de l'eau et les émissions de gaz à effet de serre, tandis que les [chaînes d'approvisionnement](#)⁴ opaques augmentent le risque de [maladies](#)⁵ d'origine alimentaire.

Comment la convergence bionumérique change-t-elle l'alimentation?

Les innovations bionumériques ont le potentiel de modifier la façon dont nous produisons les aliments, d'intégrer de nouveaux types d'aliments sur le marché et de perturber les chaînes d'approvisionnement existantes.

Voici quelques-unes des façons dont le bionumérique change notre façon de produire, de cultiver, de fabriquer et de comprendre la nutrition et l'alimentation.

Aliments produits en laboratoire.

L'agriculture cellulaire permet de créer en laboratoire des bioproduits alternatifs et identiques aux protéines animales,

comme les fruits de mer, la viande et les produits laitiers. Cette technique comprend la culture de cellules animales dans un bioréacteur et leur transformation en tissus adipeux et musculaires. La viande cultivée en laboratoire et les substituts de viande d'origine végétale peuvent également être imprimés en trois dimensions ([impression en 3D](#))⁶.

Le prix des hamburgers de bœuf cultivé en laboratoire a grandement chuté au cours des dernières années et s'approche⁷ de celui des hamburgers traditionnels, en particulier lorsque les cellules de viande sont associées à des protéines végétales. En 2020, le premier restaurant au monde à servir de la [viande produite en laboratoire](#)⁸ a ouvert ses portes à [Tel Aviv](#)⁹, et Kentucky Fried Chicken a annoncé son intention de vendre des [croquettes imprimées en 3D](#)¹⁰. Des entreprises travaillent sur le [saumon](#)¹¹, le [thon](#)¹², les [crevettes](#)¹³, les [produits laitiers](#)¹⁴, les [aliments pour animaux de compagnie](#)¹⁵ et même du [lait maternel humain](#)¹⁶ produits en laboratoire, une alternative potentielle aux préparations pour nourrissons. La mise à l'échelle des bioréacteurs reste le principal [défi](#)¹⁷ technologique et des organisations [chinoises](#)¹⁸ et [israéliennes](#)¹⁹ investissent massivement dans la recherche.

Régimes alimentaires individualisés basés sur le profil génétique.

Les progrès de la [nutrigénomique](#)²⁰, soit l'étude des relations entre les gènes, la nutrition et la santé, pourraient permettre aux gens de faire des choix en matière de santé, de régime alimentaire et de mode de vie en fonction de leur profil génétique.

Des entreprises en démarrage proposent des [conseils diététiques personnalisés](#)²¹ basés sur l'ADN, les informations sur le mode de vie et l'analyse du microbiome intestinal. Un restaurant de Tokyo utilise l'analyse de la salive, de l'urine et des matières fécales des clients pour évaluer leurs besoins nutritionnels et [imprimer en 3D des sushis personnalisés basés sur le biome](#)²². Nestlé²³ investit dans la recherche sur le microbiome et l'IA qui permet de créer des plans de soins personnalisés. Les gens peuvent acheter des [pilules vitaminées adaptées](#)²⁴ à leur génome, et pourront un jour imprimer en 3D ces types de compléments alimentaires à domicile. La [diminution](#)²⁵ du coût du séquençage du génome rendra les régimes alimentaires et les choix de mode de vie personnalisés plus largement accessibles.

Agriculture de précision et numérique.

Une combinaison de technologies pourrait influencer ou modifier le mode de fonctionnement des industries agricoles, ainsi que la manière et le lieu de production des aliments. La

[productivité](#)²⁶ agricole pourrait devenir plus précise grâce à la technologie, qu'il s'agisse de robots inspectant les [plantes individuelles](#)²⁷, repérant les [parasites et les maladies](#)²⁸, ou [rassemblant les animaux de ferme](#)²⁹, ou de [données](#)³⁰ optimisant les apports en engrais, ou encore de la [traçabilité](#)³¹ grâce à la chaîne de blocs. Les fermes verticales dans lesquelles l'IA³² contrôle la lumière et la température peuvent cultiver des centaines de fois plus de denrées alimentaires par acre que l'agriculture traditionnelle, tout en utilisant beaucoup moins d'eau.

Singapour a lancé une [campagne](#)³³ visant à produire 30 % de son approvisionnement alimentaire d'ici à 2030 grâce à des aliments produits en laboratoire et à [l'agriculture verticale](#)³⁴. Des entreprises, [des États-Unis à la Chine](#)³⁵, étudient comment la technologie CRISPR (« Courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement espacées ») pourrait adapter les cultures à des conditions particulières et améliorer leur [résilience](#)³⁶ face aux répercussions du changement climatique.



Qu'est-ce qui pourrait changer dans les systèmes alimentaires à l'avenir?

À mesure que la convergence bionumérique progresse, elle pourrait remodeler les systèmes alimentaires en profondeur.

Possibilité de faire pousser n'importe quoi, n'importe où, n'importe quand.

L'agriculture a toujours été dépendante de la disponibilité des terres, de l'eau ainsi que de conditions climatiques et géographiques particulières. Elle est limitée par les saisons et vulnérable à des variables indépendantes de la volonté de l'agriculteur, qu'il s'agisse des conditions météorologiques, des parasites ou des maladies.

Grâce aux nouvelles innovations bionumériques, ces contraintes pourraient ne plus conditionner la productivité agricole à l'avenir. La [technologie](#)³⁷ de production de viande en laboratoire pourrait être déployée n'importe où, tout comme l'agriculture verticale où l'[IA supervise](#)³⁸ des cultures génétiquement modifiées cultivées dans des environnements contrôlés avec précision.

Recherche de l'autosuffisance par les nations. Le commerce pourrait changer à mesure que les nations cherchent à atteindre l'autosuffisance alimentaire. Les pays importateurs de denrées alimentaires peuvent choisir de produire [davantage d'aliments](#)³⁹ à l'intérieur de

leurs propres frontières, plutôt que de les importer de régions offrant de bonnes conditions de croissance naturelles, afin de réduire leur vulnérabilité aux [différends commerciaux](#)⁴⁰ ou aux ruptures d'approvisionnement.

Comme plus de [75 %](#)⁴¹ des terres agricoles sont utilisées pour l'élevage, les terres à faible rendement pourraient devenir des actifs délaissés et être remplacées par des solutions d'agriculture cellulaire. Nous pourrions de plus en plus produire des aliments à la demande et à proximité des consommateurs, potentiellement dans des bioréacteurs domestiques à petite échelle. Cela pourrait réduire considérablement la demande de transport ou de distribution d'aliments.

Fusion du régime alimentaire avec la santé préventive.

Une meilleure compréhension du génome et du biome humains pourrait transformer la nutrition et avoir des répercussions sur les soins de santé, en donnant aux gens des informations de plus en plus détaillées leur permettant de personnaliser leur régime alimentaire afin d'optimiser leur santé.

L'augmentation du volume des données sur le génome et le biome qui sont recueillies et étudiées pourrait faire progresser notre compréhension du corps humain en tant que système complexe et faciliter la médecine préventive. Une base de données des génomes des consommateurs pourrait devenir un avantage concurrentiel pour certaines entreprises.

Matière à réflexion



Notre lien avec l'environnement. La convergence bionumérique pourrait modifier profondément la relation des gens avec la terre et les animaux. Au fil des siècles, les conditions de l'agriculture ont façonné les lieux d'implantation des populations. Notre capacité croissante de produire des aliments indépendamment des conditions climatiques pourrait modifier la valeur que les gens accordent à la terre, ainsi que les modèles d'urbanisation ou de ruralisation.

La technologie de production alimentaire locale offre aux communautés isolées la possibilité d'être autosuffisantes et de produire des aliments traditionnels selon de nouvelles méthodes. L'aménagement des terres agricoles à d'autres fins pourrait augmenter, tandis que l'élevage de poissons en laboratoire pourrait permettre de rétablir certains stocks de poissons dans les océans. La production de viande en laboratoire à un prix abordable pourrait entraîner un changement d'attitude à l'égard de l'éthique de l'élevage industriel et, plus généralement, de nos relations avec les animaux. Elle pourrait modifier le rôle de la culture et des cérémonies dans la production et la consommation alimentaires, à savoir notre mode de production, de récolte et d'expérience des aliments, ainsi que nos liens avec eux.

Transformation de l'expérience de la nourriture. La convergence bionumérique pourrait transformer notre perception de la nourriture et la façon dont nous nous y associons. Si les aliments cultivés en laboratoire visent actuellement à imiter les aliments qui nous sont familiers, ils ouvrent la voie à la création de produits comestibles d'un genre entièrement novateur, dont le goût, la texture et les nutriments seront nouveaux. Les gens pourraient fabriquer des aliments « programmables » en fonction de leurs goûts et de leurs besoins. Les technologies bionumériques pourraient permettre aux gens de pirater par voie biologique leurs propres papilles gustatives afin de modifier les goûts qu'ils trouvent agréables, de les orienter vers des aliments sains et de créer de nouvelles cultures alimentaires.

Incertitudes critiques et possibilités futures

Divers facteurs pourraient influencer l'ampleur et la nature de l'acceptation ou du rejet des innovations bionumériques. Voici quelques exemples d'incertitudes possibles qui pourraient mener à différents scénarios dans l'avenir.

Acceptation sociétale : Est-ce qu'il y aura un consensus social sur l'adoption de nouvelles technologies?

- Les consommateurs pourraient se tourner de plus en plus vers des aliments [sains](#)⁴², respectueux de l'environnement et produits de manière éthique. Étant donné que les fermes verticales ont besoin de moins de terres, d'eau et de pesticides, et que la viande produite en laboratoire n'entraîne pas d'émissions de méthane, ni de problèmes éthiques ou sanitaires liés à l'élevage industriel, pourrait-on assister à un engouement pour les nouvelles méthodes de production alimentaire?
- Les premières expériences négatives des cultures modifiées par la méthode CRISPR et de la viande de culture pourraient-elles nuire à l'acceptation par le public? La modification génomique des plantes par la méthode CRISPR sera-t-elle plus ou moins [acceptée par le public](#)⁴³ que les cultures d'organismes génétiquement modifiées (« OGM ») des années 1990?
- Comment évaluer les considérations et les valeurs éthiques par rapport aux possibilités économiques du bionumérique?

Écosystème commercial : Comment les acteurs existants pourraient-ils remodeler leurs modèles opérationnels? Comment les secteurs connexes pourraient-ils évoluer, et quels nouveaux acteurs pourraient se manifester?

- Les grandes entreprises agricoles existantes s'adapteront-elles et conserveront-elles leur position, ou de nouveaux entrants issus d'autres secteurs, comme les produits pharmaceutiques et les grandes technologies, les dépasseront-ils?
- Le rôle accru de la technologie pourrait-il permettre aux grandes entreprises technologiques d'occuper une position dominante dans le [secteur agricole](#)⁴⁴? Dans l'affirmative, quelle incidence cela pourrait-il avoir sur les chaînes d'approvisionnement alimentaire et les choix des consommateurs?



Main d'œuvre, expertise et le marché du travail : Y aura-t-il suffisamment de talents pour développer de nouveaux marchés et de nouvelles activités? Où seront les talents du bionumérique?

- Comment les marchés du travail s'adapteront-ils si la numérisation de la production alimentaire rend certains emplois agricoles obsolètes tout en créant une demande de nouvelles compétences?
- Avec quelle facilité les programmes d'enseignement en sciences de l'agriculture et de l'alimentation intégreront-ils les technologies bionumériques telles que l'agriculture verticale, l'IA, la robotique ou les aliments cultivés en laboratoire?

Considérations d'ordre politique

L'essor de la convergence bionumérique pourrait avoir des impacts sur de nombreux domaines politiques. Les points suivants ne sont pas des recommandations politiques, mais plutôt des sujets à envisager, des questions et des idées qui visent à inciter à la réflexion.

Réglementation en matière de sécurité alimentaire et conseils nutritionnels

- De nouveaux types de production, de fabrication et de chaînes d'approvisionnement alimentaires pourraient donner lieu à de nouvelles procédures d'emballage, de stockage, de transport, de refroidissement, de manipulation, de préparation, de

cuisson et d'assainissement. Les acteurs pourraient également utiliser la technologie de la chaîne de blocs pour assurer la traçabilité et rendre la chaîne d'approvisionnement plus transparente. Cette technologie pourrait également aider les consommateurs à accéder aux informations sur les ingrédients.

- De nouvelles catégories d'aliments d'origine végétale et animale pourraient découler de l'utilisation des modes de production bionumériques et des données biologiques pour produire de nouveaux types d'aliments personnalisés, ce qui pourrait avoir une incidence sur ce que nous considérons comme des aliments sains et sur les guides nutritionnels actuels, comme le Guide alimentaire canadien, et entraîner l'apparition de nouvelles valeurs nutritives sur les étiquettes.

Commerce international, souveraineté alimentaire et chaînes d'approvisionnement

- Les technologies alimentaires bionumériques peuvent aider les pays qui dépendent fortement des importations alimentaires à améliorer leur souveraineté alimentaire, ce qui pourrait réduire le commerce des denrées alimentaires à l'échelle mondiale et avoir des répercussions économiques sur les plus grands pays producteurs de produits agricoles. Le potentiel d'exportation et d'importation des produits alimentaires bionumériques pourrait également amener les partenaires commerciaux à repenser l'étiquetage des aliments.

- Les modes de production alimentaire bionumériques pourraient perturber les chaînes d'approvisionnement existantes à l'échelle nationale et mondiale. L'augmentation de la production alimentaire bionumérique locale pourrait également réduire la distribution et le transport des aliments.
- La numérisation et l'automatisation croissantes des processus de production alimentaire et des ingrédients au moyen des innovations bionumériques naissantes, comme les imprimantes alimentaires 3D et les plateformes en ligne, pourraient augmenter considérablement la capacité de production alimentaire personnelle et commerciale. La production alimentaire bionumérique à domicile pourrait nécessiter de nouvelles mesures de sécurité. Les pays dont la croissance repose en partie sur les terres arables et les régions rurales devront peut-être examiner la résilience économique de la production alimentaire traditionnelle face aux nouvelles possibilités de production alimentaire.

Propriété intellectuelle et protection des renseignements personnels

- Les technologies numériques comme l'IA et l'analyse des mégadonnées pourraient augmenter le nombre de brevets pour des [saveurs](#)⁴⁵ et des [recettes](#)⁴⁶ [personnalisées](#)⁴⁷.
- Les banques de données génomiques sécurisées pourraient devenir de plus en plus courantes. Les gens pourraient s'inquiéter des

conséquences sur la protection des renseignements personnels et de la diffusion des données génomiques auprès des acteurs de la chaîne d'approvisionnement alimentaire.

- Les systèmes mondiaux d'indemnisation et de protection peuvent contribuer à prévenir les pratiques de clonage alimentaire bionumérique. Citons, par exemple, le séquençage de l'[appellation d'origine](#)⁴⁸ des produits alimentaires pour la production locale ou la production de bœuf de Kobe en laboratoire.

Empreinte environnementale et aménagement du territoire

- Les terres agricoles peuvent être délaissées et réaffectées à mesure que nous produisons davantage d'aliments dans des installations agricoles verticales ou au moyen de l'agriculture cellulaire.
- Les cultures génétiquement modifiées et l'agriculture numérique (capteurs, robots) pourraient réduire l'utilisation d'engrais, de pesticides et d'herbicides.
- L'empreinte environnementale de la production et de la consommation alimentaires bionumériques naissantes, comme l'agriculture cellulaire, les cultures génétiquement modifiées, l'agriculture verticale et l'agriculture numérique, peut être différente de celle du système alimentaire actuel. De nouvelles innovations pourraient contribuer à la réalisation des objectifs relatifs au changement climatique. Cependant, les transitions peuvent être coûteuses et augmenter la demande d'électricité.





Santé

La convergence bionumérique pourrait faire progresser rapidement les traitements ciblés et la médecine de précision fondée sur les profils génomiques, ce qui permettrait d'améliorer les soins préventifs et de traiter les maladies avec une grande efficacité. En même temps, la convergence bionumérique soulève entre autres des considérations liées à l'inclusivité et à l'éthique.

Les coûts des soins de santé devraient continuer à augmenter au cours des 15 prochaines années en raison de facteurs tels que la croissance démographique, la [la baisse de la fécondité](#)⁴⁹, le vieillissement, les maladies dégénératives et l'[utilisation croissante de médicaments coûteux et nouvellement brevetés](#)⁵⁰. La [pénurie de main-d'œuvre](#)⁵¹ du secteur devrait se poursuivre en raison de l'augmentation de la demande de soins à domicile et de l'épuisement professionnel des travailleurs de la santé, conséquence de la [pandémie de COVID-19](#)⁵². Selon la trajectoire actuelle, les hôpitaux et les systèmes de soins de santé continueront d'être surchargés, le cadre de la santé publique pourrait s'élargir et les innovations naissantes pourraient entrer dans le champ d'application des mandats de santé, exerçant une pression accrue sur les systèmes de santé publique.

Comment la convergence bionumérique change-t-elle la santé?

Les innovations technologiques dans le domaine bionumérique vont continuer à progresser et fusionner. Les paragraphes suivants présentent quelques innovations qui pourraient avoir une incidence sur l'avenir intégré et complexe de la santé humaine.

Organes synthétiques et implants numériques. Des parties du corps et des implants personnalisés pourraient offrir de nouvelles possibilités de transplantation. En 2019, plus de [4 000 Canadiens](#)⁵³ figuraient sur une liste d'attente pour une transplantation d'organe. Les organes

humains peuvent désormais être [imprimés en 3D](#)⁵⁴ ou produits dans des [porcs](#)⁵⁵ génétiquement modifiés. Les organismes de réglementation de l'UE ont [approuvé](#)⁵⁶ le premier cœur entièrement artificiel en 2020. Les [vaisseaux sanguins](#)⁵⁷ artificiels pourraient aider à traiter les maladies cardiovasculaires. La peau artificielle, fabriquée à partir de [composants électroniques](#)⁵⁸ extensibles capables de détecter la chaleur et la pression, pourrait améliorer les prothèses et les greffes de peau. Ces technologies pourraient permettre non seulement aux gens de résoudre des problèmes médicaux, mais aussi d'obtenir des parties du corps personnalisées aux capacités améliorées.

Les implants cérébraux qui [peuvent être rechargés sans fil](#)⁵⁹ pourraient transformer le traitement des maladies neurologiques. Les puces implantées sont déjà utilisées pour surveiller la santé et déverrouiller les téléphones intelligents. Des implants comme le dispositif [Neuralink](#)⁶⁰ pourraient accroître les sens de l'être humain, nous permettant de « [sentir](#) »⁶¹ des membres bioniques, ou d'interagir avec des espaces virtuels selon de nouvelles modalités. Ils pourraient également conduire à de nouveaux traitements pour les maladies mentales comme la [dépression](#)⁶². Les interfaces cerveau-ordinateur nous permettent de communiquer avec des dispositifs compatibles avec l'IA; par exemple, elles peuvent permettre aux aveugles de [percevoir des images](#)⁶³ à travers un œil artificiel. Ces technologies pourraient contribuer à régénérer ou à améliorer le corps humain.

La CRISPRisation des êtres humains. En tant qu'[outil de recherche](#)⁶⁴, la technologie de modification du génome CRISPR nous

aide à comprendre le rôle de l'ADN dans les maladies humaines. Les chercheurs médicaux explorent le potentiel de cette technologie de [lutter contre les virus](#)⁶⁵, de détruire les [cellules cancéreuses](#)⁶⁶, de surmonter les problèmes immunitaires qui entravent la [thérapie génique](#)⁶⁷ et de traiter des maladies comme l'[acné](#)⁶⁸ et la [cécité](#)⁶⁹. La technologie CRISPR nous permet de [désactiver l'expression génique](#)⁷⁰, ce qui empêche effectivement une personne de contracter une maladie à laquelle elle est génétiquement prédisposée, comme la maladie d'Alzheimer. En outre, cette technologie pourrait permettre de désactiver des marqueurs épigénétiques tout en laissant le brin d'ADN intact.

La technologie CRISPR pourrait de plus en plus donner aux gens la possibilité de coder leur propre ADN et celui de leurs enfants. Certains parents pourraient souhaiter donner à leurs enfants une résistance aux maladies, une intelligence accrue et d'autres capacités. Selon un [sondage](#)⁷¹ international, on constate un niveau élevé de soutien à l'utilisation de cette technologie pour prévenir les maladies génétiques rares chez les bébés, mais une opposition à son utilisation pour améliorer l'intelligence d'un bébé. Le soutien ou le rejet de l'édition génique dépend en partie de la nationalité, du sexe, des caractéristiques démographiques, de la religion et de l'éducation. Les modifications génétiques de la progéniture font l'objet de considérations et de débats éthiques à des [niveaux variables](#)⁷². L'utilisation de cette technologie chez l'être humain fait actuellement l'objet d'interdictions internationales généralisées, mais l'Organisation mondiale de la Santé

dispose d'un [comité consultatif](#)⁷³ qui examine les normes mondiales, y compris la surveillance et les considérations d'ordre éthique relatives à l'édition du génome humain.

Suivi de la santé humaine en temps réel. Le marché des technologies de la santé innove activement pour trouver des solutions qui peuvent appuyer les mesures préventives en matière de santé. Les technologies portables qui surveillent la santé physique peuvent de plus en plus suivre et compiler davantage de données de santé en temps réel. L'IA peut suivre les humeurs et la santé mentale⁷⁴ en analysant la voix et les expressions du visage. Des chercheurs mettent au point des trousseaux d'analyse de l'ADN qui se branchent sur les [téléphones intelligents](#)⁷⁵ et pourraient permettre de suivre les maladies.

L'[apprentissage automatique](#)⁷⁶ pourrait traiter les données recueillies automatiquement dans le nuage à partir de capteurs, de moniteurs et d'implants à l'échelle nanométrique dans le corps d'un patient. L'accroissement des connaissances sur le microbiome humain, à savoir les [dizaines de billions](#)⁷⁷ de micro-organismes qui vivent à l'intérieur du corps humain, permet de développer les [traitements](#)⁷⁸, la recherche et les prescriptions relatives au mode de vie.

Qu'est-ce qui pourrait changer dans les systèmes de soins de santé à l'avenir?

À mesure que la convergence bionumérique progresse, elle pourrait remodeler les systèmes de santé en profondeur.

Médecine régénérative. Nous pouvons observer la capacité de faire repousser des membres perdus ou de réparer des organes endommagés chez certains animaux comme les lézards et les amphibiens. Les mêmes voies de signalisation cellulaire que l'on trouve chez les animaux capables de se régénérer sont [également présentes chez l'être humain](#)⁷⁹, et des modifications peuvent entraîner une croissance des tissus plutôt qu'une cicatrisation. La recherche sur les cellules souches est également sur le point de produire des organes entiers, en commençant par de [petits organoïdes](#)⁸⁰ qui peuvent actuellement remplir certaines fonctions des organes plus gros.

Les bases de données d'ADN pourraient devenir une source de revenus et de sécurité sanitaire. Dans les années à venir, il pourrait être possible et relativement simple de recueillir des informations sur l'ADN à l'aide d'un téléphone intelligent. À mesure que les données biologiques deviendront omniprésentes, les questions entourant la collecte, l'utilisation, la conservation et la divulgation des données deviendront cruciales. Les applications, les montres intelligentes et les téléphones recueillent déjà des données biologiques en dehors du secteur traditionnel des soins de santé; l'interaction des commerces et des consommateurs avec les données biomiques ou génomiques constituerait une extension de cette collecte de données. Des [marchés de données génétiques](#)⁸¹ basés sur des [chaînes de blocs](#)⁸² pourraient voir le jour, permettant aux particuliers ou à des fiduciaires de

données désignées de communiquer des informations génomiques à des sociétés, à des chercheurs universitaires et même à des gouvernements en échange d'avantages ou de paiements.

Les bases de données d'ADN pourraient fournir de nouvelles informations sur les liens complexes entre les gènes et les maladies. Les données génomiques pourraient être une source de pouvoir ou d'avantage économique dans les économies futures, la santé et les soins de santé continuant à être de plus en plus prioritaires. Les données biologiques ouvertes ou les mégadonnées recueillies à partir de plateformes provenant de particuliers pourraient favoriser le développement de nouvelles thérapies, mais peuvent également créer des risques liés à la [protection des renseignements personnels](#)⁸³ et à l'obligation de rendre compte. Les possibilités de collaboration et de communication des données en vue d'une plus grande efficacité médicale et de meilleurs soins pourraient se heurter à des problèmes de protection des données individuelles et de confiance dans le système. Les données génomiques pourraient permettre la [détection](#)⁸⁴ des maladies avant leur manifestation, ce qui favoriserait des économies à long terme liées à la prévention dans les systèmes de santé.

L'industrie pharmaceutique pourrait commencer à se [détourner](#)⁸⁵ des substances chimiques comme source de nouveaux médicaments et explorer la [manipulation de l'ADN des organismes](#)

[vivants comme traitement](#)⁸⁶. Les [bases de données d'ADN](#)⁸⁷ pourraient devenir un atout stratégique et un apport pour le développement de nouveaux médicaments et thérapies.

Services de soins de santé à distance.

Les Canadiens pourraient avoir accès à davantage de services de santé à distance. La COVID-19 a fait connaître la télémédecine et les outils de santé numériques auprès du grand public, rendant les patients plus à l'aise avec l'utilisation de la technologie pour gérer leurs besoins de santé. Au cours des 10 à 15 prochaines années, le développement technologique et l'augmentation de la proportion de personnes qui maîtrisent les technologies numériques pourraient accélérer considérablement la prestation de soins de santé à distance.

Des capteurs implantés pourraient surveiller la santé des gens 24 heures sur 24, en envoyant des données dans le nuage pour qu'elles soient analysées en vue d'un diagnostic et de conseils, ainsi que d'autres données, comme celles provenant de capteurs de qualité de l'air dans l'espace de travail, ou l'analyse de la santé mentale basée sur le comportement en ligne.

Les gens prennent le contrôle de leur évolution. La modification des cellules germinales, à savoir l'édition de gènes qui peuvent être transmis à la génération suivante, est actuellement interdite dans la plupart des [pays](#)⁸⁸. Toutefois, cette interdiction pourrait être levée au fil du

temps, à mesure que cette technologie améliore la résistance aux maladies ou les élimine de manière plus sûre, ce qui pourrait améliorer le bien-être et réduire les coûts des soins de santé. En outre, les nouveaux dispositifs et services bionumériques à faible coût pourraient permettre aux gens de faire l'expérience de la modification des cellules germinales [à domicile](#)⁸⁹.

Dans un premier temps, l'utilisation de la technologie CRISPR pour éliminer les prédispositions génétiques aux maladies pourrait être considérée comme une extension de la pratique actuelle du dépistage préimplantatoire dans la fécondation *in vitro*. L'étape suivante pourrait consister à insérer des traits physiques ou psychologiques préférés avec une grande précision, en modifiant les cellules germinales du parent avant la conception plutôt qu'en modifiant l'embryon. Dans certains pays, les gouvernements pourraient chercher à inciter les citoyens à avoir des bébés en meilleure santé; avec le temps, cela pourrait conduire à un changement cognitif, où les gens considèrent la procréation « naturelle » comme une imprudence.

La manière dont nous voulons évoluer en tant qu'espèce et les conséquences qui pourraient en découler pourraient devenir des considérations d'ordre éthique importantes. Est-ce que l'[eugénisme](#)⁹⁰, à savoir le processus d'élimination des gènes non désirés d'une population, pourrait devenir un dilemme moral?



Des choix sains?

Biologie à faire soi-même. La convergence bionumérique pourrait ouvrir de nouvelles possibilités, permettant aux gens de choisir qui ils veulent être en piratant leur propre corps et leur propre esprit⁹¹. La disponibilité et l'abordabilité croissantes des troussees CRISPR, les ressources libres en ligne et les dispositifs abordables ouvrent de nouvelles perspectives de biologie à faire soi-même afin de traiter, de modifier ou d'améliorer les capacités physiques ou mentales.

Cela pourrait constituer une menace majeure pour la santé publique, la biosécurité et la sûreté biologique. Des modifications génétiques imprudentes ou sans expertise pourraient nuire aux expérimentateurs et, s'ils modifient leurs cellules germinales⁹², à leurs futurs enfants. S'il devient possible de sélectionner les traits des enfants et de combiner les apports d'ADN de plusieurs personnes, les motifs et les modèles de sélection traditionnels pour la procréation pourraient changer. Les implants qui activent les centres du plaisir du cerveau pourraient conduire à une nouvelle forme de dépendance. Les gens pourraient choisir de façonner non seulement la santé, mais aussi la personnalité des enfants, afin d'incarner certains systèmes de croyance. Dans l'exploration du mouvement de la biologie à faire soi-même, les considérations d'ordre éthique et les possibilités d'erreurs de procédure pourraient entraîner des conséquences involontaires⁹³.

À plus long terme, les modifications génétiques qui parviennent à améliorer les capacités humaines pourraient déboucher sur des technologies permettant de créer une nouvelle « superclasse » d'êtres humains, ce qui élargirait considérablement les clivages sociétaux, voire les inégalités.

Incertitudes critiques et possibilités futures

Divers facteurs pourraient influencer l'ampleur et la nature de l'acceptation ou du rejet des innovations bionumériques. Voici quelques exemples d'incertitudes possibles qui pourraient mener à différents scénarios d'avenir.

Acceptation sociétale : Est-ce qu'il y aura un consensus social sur l'adoption de nouvelles technologies?

- Dans quelle mesure les gens peuvent-ils s'inquiéter des [répercussions sur la sécurité et la protection des renseignements personnels](#)⁹⁴ de l'accès aux données de santé?
- Dans quelle mesure les [cerveaux produits en laboratoire](#)⁹⁵ et d'autres organismes créés en laboratoire pourraient-ils devenir conscients ou déjà l'être? Quelles incidences éthiques pourraient découler des futures des sciences de la vie, ou même de l'[art](#)⁹⁶, qui font appel à la biologie de synthèse?
- Dans quelle mesure la possibilité de modifier nos propres gènes et nos fonctions cérébrales peut-elle remettre en question notre identité en tant qu'êtres humains?

Écosystème commercial : Comment les acteurs existants pourraient-ils changer, quelle pourrait être l'évolution des secteurs connexes et quels nouveaux acteurs pourraient voir le jour?

- Dans quelle mesure les grandes entreprises technologiques pourraient-elles dominer dans le secteur de la santé et des soins de santé, alors que la logistique d'Amazon et les capacités d'apprentissage automatique de Google deviennent de plus en plus importantes au niveau de la recherche et du développement et des services de soins de santé?
- Des individus pourraient-ils monétiser leurs données ADN sur une plateforme en ligne? Les marchés en ligne d'ADN pourraient-ils faire passer le gain financier tiré du partage des données biologiques des entreprises vers les particuliers?

Déploiement économique : Comment les politiques, les normes et les idéologies peuvent-elles différer dans le monde, et quels conséquences ou avantages ces différences pourraient-elles avoir dans l'industrie et pour le statut socioéconomique?

- L'accès inégal aux nouvelles technologies d'augmentation humaine pourrait-il donner lieu à de nouvelles formes de croissance économique, d'inégalité et de discrimination?
- L'augmentation humaine pourrait-elle contribuer à la productivité et être considérée comme un avantage concurrentiel? Comment les accords internationaux sur le travail et l'emploi répondraient-ils à une éventuelle adoption mondiale inégale de l'augmentation humaine?

Considérations d'ordre politique

L'essor de la convergence bionumérique pourrait influencer de nombreux domaines politiques. Les points suivants ne sont pas des recommandations politiques, mais plutôt des sujets à envisager, des questions et des idées qui visent à inciter à la réflexion.

Rôle de la réglementation

- L'augmentation de l'être humain pour le travail, les études ou le sport pourrait octroyer à certaines personnes des avantages injustes.
- Les résultats d'IA provenant de la boîte noire de l'apprentissage automatique⁹⁷ pourraient s'avérer problématiques dans l'application des technologies thérapeutiques numériques basées sur l'IA qui peuvent apprendre et s'automodifier en permanence. Il peut être difficile de faire confiance aux résultats sans s'assurer de l'absence de parti pris dans un diagnostic.
- Les réseaux de biofondries dans le monde pourraient réduire l'efficacité des réglementations nationales. Les données biologiques, les technologies d'automatisation, les plateformes et les [laboratoires en nuage](#)⁹⁸ pourraient permettre aux organisations de délocaliser plus facilement certaines fonctions de recherche et développement vers des pays dotés ou non de réglementations éthiques.

Participation du secteur public

- Les innovations bionumériques qui ont été développées en réponse à la pandémie de COVID-19, comme la collecte et le suivi des données sanitaires et la bioproduction, y compris les vaccins, les traitements et les chaînes d'approvisionnement, peuvent être applicables à d'autres situations de santé publique.
- Les répercussions multisectorielles des traitements par la technologie CRISPR peuvent nécessiter de nouvelles discussions sur l'éthique et les utilisations possibles dans les soins de santé.

Accès aux nouveaux traitements grâce aux systèmes de santé publique

- Le coût pourrait influencer la vitesse d'apparition de nouveaux modèles de prestation de soins, d'options et de traitements.
- Comme d'autres technologies numériques, les technologies bionumériques peuvent nécessiter une assistance logicielle permanente et régulière pour maintenir leur efficacité. Les gouvernements peuvent être amenés à intervenir si les fournisseurs du secteur privé [retiennent leur soutien](#)⁹⁹.

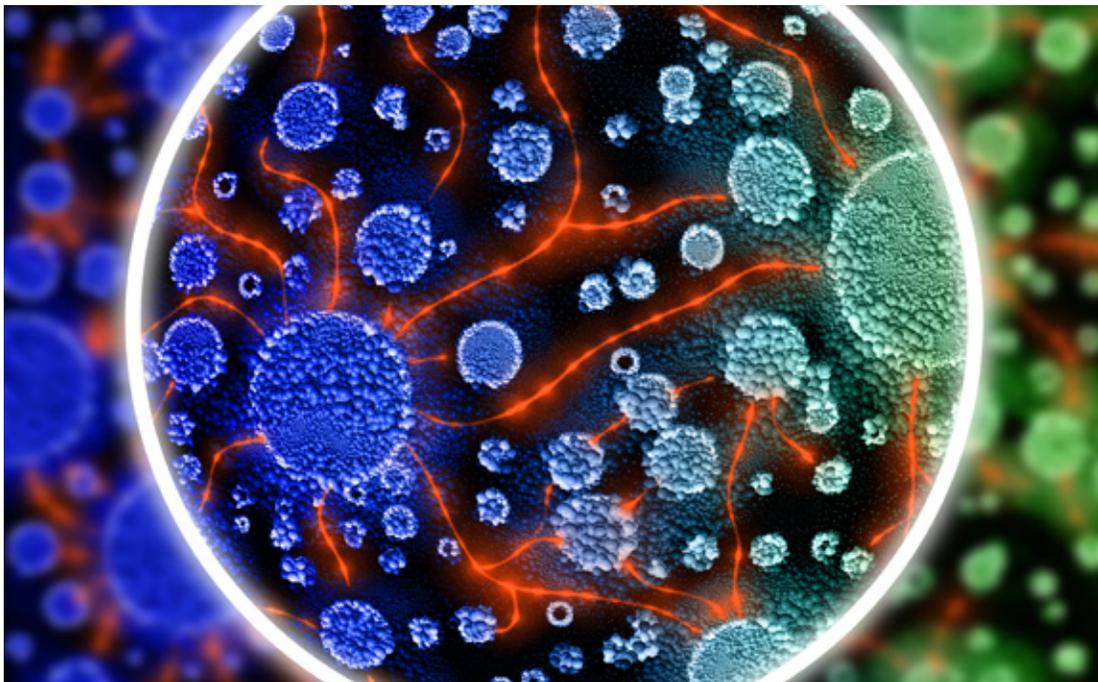
Accès équitable aux soins de santé dans les régions éloignées

- La télémédecine, la biodétection à distance et la bioproduction locale pourraient offrir différentes possibilités de diagnostic et de traitement. Au Canada, ces services médicaux peuvent

bénéficier à des régions éloignées ou rurales. La collecte à distance des données biologiques dans les régions où l'accès à un réseau Internet fiable est limité peut constituer un défi pour l'accessibilité universelle aux soins de santé.

Recherche et développement, partage des données et protection des renseignements personnels

- Les accords internationaux et la collaboration sur l'avenir des données de santé pourraient donner lieu à des alliances et à des différends.
- La [science à code source ouvert](#)¹⁰⁰ peut remettre en question les cadres de propriété intellectuelle existants liés aux diagnostics, aux thérapies, aux traitements et à la fabrication.
- La valeur des données biologiques pourrait augmenter avec l'utilisation croissante de l'IA dans la découverte de médicaments qui s'appuie sur ces données pour générer des produits.
- On pourrait assister à une mise en œuvre internationale des accords, comme les [systèmes d'accès et de partage des avantages](#)¹⁰¹ dans le cadre de la [Convention sur la diversité biologique](#)¹⁰², par exemple, qui ont une incidence sur l'accès aux ressources génétiques tirées de la biodiversité qui peuvent être utilisées pour développer de nouveaux médicaments et thérapies.
- La nature numérique des données biologiques et la possibilité de les transférer ou d'y accéder facilement au moyen de plateformes en ligne pourraient alimenter les discussions sur la communication, le stockage, l'accès et la confidentialité de ces données.





Environnement

Le changement climatique, la pollution et la perte de biodiversité sont largement reconnus comme des enjeux mondiaux urgents. Les modes de production et de consommation non durables d'aujourd'hui mettent en danger le bien-être socioéconomique à long terme. Les technologies bionumériques pourraient augmenter notre capacité de nous rapprocher du monde naturel et de le surveiller. Elles pourraient aussi étendre notre compréhension des liens qui unissent tous les êtres vivants. La modification génétique du monde naturel comme moyen d'atténuer le changement climatique, d'assainir l'environnement et de préserver la biodiversité peut toutefois soulever des considérations d'ordre éthique. En outre, la dissémination d'organismes modifiés dans des environnements naturels peut avoir des conséquences involontaires.

Peu de pays sont en passe d'atteindre leurs objectifs de réduction des émissions de carbone. Le coût [des phénomènes météorologiques extrêmes](#)¹⁰³ causés par le [changement climatique](#)¹⁰⁴, comme les incendies, les sécheresses, les inondations et les ouragans, pourrait continuer à augmenter. D'autres crises environnementales pourraient également s'intensifier, de la pollution plastique à la perte de biodiversité, en passant par la pollution de l'air, des sols et de l'eau. Malgré une tendance à la [divulcation volontaire d'informations par les entreprises](#)¹⁰⁵ et à l'investissement du secteur privé dans la lutte contre le changement climatique, les politiques publiques restent la clé de la protection de l'environnement.

Comment la convergence bionumérique change-t-elle l'environnement?

Les innovations bionumériques continueront de se développer et à fusionner. Les paragraphes suivants présentent quelques innovations qui pourraient avoir une incidence sur l'avenir des écosystèmes, de la biodiversité et du changement climatique.

Biodiversité hybride. Les gens peuvent modifier les écosystèmes naturels et la biodiversité pour accroître la résilience. L'[édition génique](#)¹⁰⁶ permet de créer de nouvelles formes de biodiversité, des [plantes phosphorescentes](#)¹⁰⁷ aux capteurs nanobioniques qui [surveillent les niveaux d'arsenic](#)¹⁰⁸ dans le sol. Les chercheurs utilisent la technologie de modification du génome CRISPR pour des projets comme l'[amélioration de la résilience des](#)

[écosystèmes forestiers](#)¹⁰⁹ et la réintroduction du [mammouth laineux](#)¹¹⁰ après son extinction.

Les [forçages génétiques](#)¹¹¹ permettent aux gens d'introduire certains traits génétiques à l'échelle d'une population d'animaux ou d'insectes. Cette technique pourrait aider à [lutter contre les espèces envahissantes](#)¹¹², à restaurer les [récifs coralliens](#)¹¹³ ou à prévenir les maladies transmises par les insectes. Par exemple, la Floride a lâché [750 millions de moustiques génétiquement modifiés](#)¹¹⁴ comme solution de remplacement à l'utilisation d'insecticide. Ces interventions ne sont pas sans risque, car il peut être difficile d'arrêter leur propagation une fois que les gènes modifiés sont libérés dans la nature.

Décontamination de l'environnement grâce à la biologie synthétique. Les scientifiques mettent au point des [méduses](#)¹¹⁵ capables de désintoxiquer les océans contaminés, des matériaux intelligents à base de [bactéries et de levures](#)¹¹⁶ capables de détecter les contaminants environnementaux, ainsi que des microbes capables de [détruire](#)¹¹⁷ les polluants présents dans le sol et l'eau, de [récupérer les métaux des terres rares](#)¹¹⁸ sur les terres polluées et de nettoyer les [déversements d'hydrocarbures](#)¹¹⁹.

Le dioxyde de carbone peut être extrait de l'atmosphère par [des mauvaises herbes génétiquement modifiées](#)¹²⁰ et des [algues](#)¹²¹ à croissance rapide, cultivées en biomasse dans des bioréacteurs spécialement conçus, puis récoltées sous forme de carburant, d'engrais, d'huiles et de plastiques.

Internet des êtres vivants. Bien qu'il n'en soit qu'à ses débuts, il est possible de discerner les prémices d'un « Internet des êtres vivants » semblable à l'actuel Internet des Objets (« IdO »). La sensibilité des plantes aux produits chimiques, associée à la technologie, ouvre de nouvelles possibilités. Par exemple, les [épinards peuvent envoyer un courriel pour signaler la présence de mines terrestres](#)¹²². Si ses racines détectent un produit chimique explosif spécifique, la plante émet un signal qui est capté par un capteur, déclenchant l'envoi d'un courriel aux chercheurs.

La technologie de modification du génome CRISPR a été utilisée pour modifier des gènes afin qu'ils puissent stocker des informations binaires, le type d'informations utilisé dans les ordinateurs, sous forme d'ADN, ce qui a permis aux chercheurs de coder la phrase « [bonjour tout le monde](#) » dans une cellule d'*E. coli*¹²³. Microsoft explore le [potentiel futur de stockage de données](#)¹²⁴ dans des systèmes biochimiques; théoriquement, [un gramme d'ADN pourrait contenir 215 000 téraoctets](#)¹²⁵ de données, que les gens pourraient lire à l'aide de [séquenceurs d'ADN portatifs](#)¹²⁶.

Qu'est-ce qui pourrait changer dans l'environnement à l'avenir?

À mesure que la convergence bionumérique progresse, elle pourrait remodeler l'environnement, la biodiversité et les écosystèmes en profondeur.

Modification de l'environnement. Les interventions bionumériques pourraient accroître la valeur des services

écosystémiques. La valeur des [services écosystémiques](#)¹²⁷, à savoir les avantages que nous retirons d'un environnement naturel fonctionnel, de l'eau propre à la protection contre les inondations, est estimée à 1,5 fois le PIB mondial.

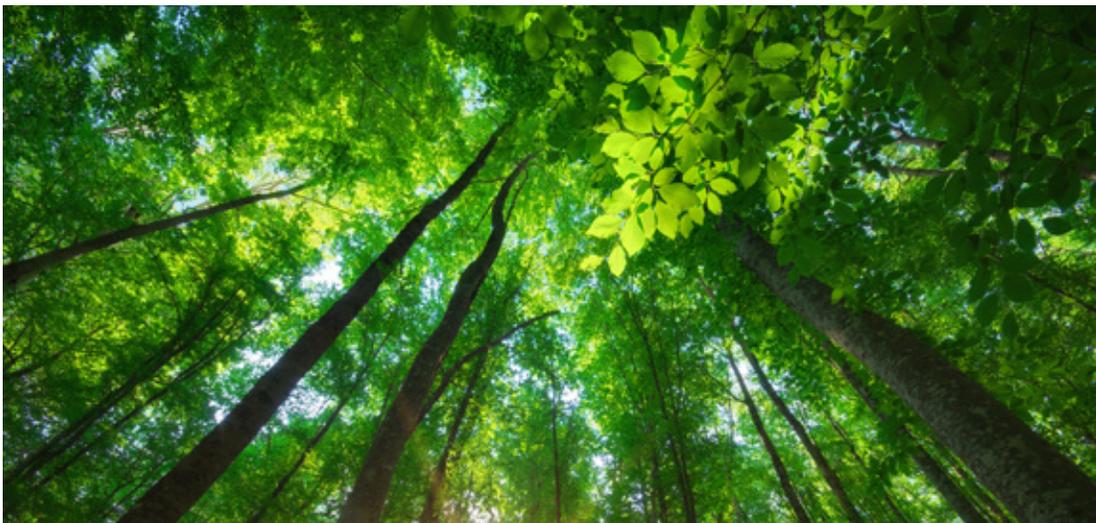
La biodiversité artificielle pourrait apporter une valeur ajoutée encore accrue, qu'il s'agisse de micro-organismes qui [décomposent les polluants plastiques](#)¹²⁸ et le [pétrole](#)¹²⁹, d'[arbres phosphorescents](#)¹³⁰ qui remplacent les lampadaires, de [sols qui absorbent davantage d'eau](#)¹³¹ pour atténuer les inondations, ou d'arbres plus résistants aux feux de forêt. La biodiversité améliorée par la technologie pourrait transformer des écosystèmes actuellement inhabitables pour l'homme et offrir des solutions alternatives à la [géoingénierie](#)¹³² pour lutter contre le changement climatique.

Biocapteurs environnementaux et collecte de données. De meilleures données pourraient transformer la surveillance et la gouvernance environnementales. Les lois sur la protection de l'environnement ont historiquement légalisé les dommages environnementaux causés par l'activité humaine en fixant des plafonds d'émissions polluantes. Les plantes génétiquement modifiées pourraient surveiller l'application des lois antipollution, détecter les polluants et déclencher des alertes auprès des autorités compétentes. Les capteurs bionumériques, les drones, la robotique et le séquençage de fragments d'ADN dans l'environnement¹³³ pourraient aider à surveiller la qualité de l'air, de l'eau et du sol à plus grande échelle et plus en détail, y compris aux sites d'extraction

éloignés. En rejetant des entités vivantes bionumériques intelligentes dans les écosystèmes, on pourrait envoyer en temps réel aux autorités des signaux qui identifient les substances nocives, les microbes ou les polluants. Cette technologie pourrait potentiellement remplacer ou appuyer les normes d'émissions de polluants et conduire à une législation environnementale personnalisée et en temps réel.

En outre, des domaines d'étude émergents comme l'[imageomique](#)¹³⁴, qui utilise l'apprentissage automatique pour extraire les caractéristiques biologiques des images d'organismes vivants capturées par des drones ou téléchargées sur des plateformes comme [eBird](#)¹³⁵ et [iNaturalist](#)¹³⁶, pourraient rapidement améliorer notre compréhension des processus biologiques et détecter les signes précoces d'atteinte à la biodiversité.

L'[ADN environnemental](#)¹³⁷ (ADNe) permet d'identifier les espèces présentes dans une région sans les observer directement, ce qui pourrait permettre de mieux comprendre les impacts sur l'environnement des [projets et politiques](#)¹³⁸ proposés, ainsi que la [surveillance](#)¹³⁹ environnementale des activités humaines en cours. Cette démarche pourrait également déboucher sur de nouvelles façons de déterminer la valeur économique des êtres vivants, illustrant ainsi la valeur des services écosystémiques. En outre, elle pourrait aider à [suivre la façon dont les espèces](#)¹⁴⁰ se déplacent en réponse au changement climatique et faciliter la détection précoce des espèces envahissantes. La collecte d'ADNe sur les marchés de fruits de mer peut améliorer les techniques d'[enquête sur les crimes contre les espèces sauvages](#)¹⁴¹ en permettant de détecter la vente d'espèces de poissons menacées et protégées. L'émergence de l'ADNe pourrait appeler à des réflexions sur la question de savoir qui contrôle ces données et quelles utilisations sont éthiques.





Un vert plus foncé

Redéfinition des concepts de naturel et d'artificiel. L'idée que la nature existe et évolue plus comme un art que comme une science est une hypothèse dominante. Cependant, notre compréhension des mécanismes qui régissent la vie a atteint un point où nous pouvons modifier les instructions biologiques, afin de programmer les organismes pour qu'ils accomplissent des tâches spécifiques. On constate des signes de changement cognitif¹⁴² selon lequel la société accorde de plus en plus de valeur aux entités biologiques. Une philosophie émergente, basée sur les nouveaux développements des robots vivants¹⁴³, veut que les organismes agissent comme le « matériel », et que l'ADN et la communication cellulaire (au moyen de gradients électriques¹⁴⁴) soient le « logiciel » qui dicte sa fonction.

La capacité de remodeler les écosystèmes en éliminant ou en faisant revivre¹⁴⁵ certaines espèces, ou en orientant leur évolution, soulève des questions d'ordre éthique¹⁴⁶ sur les droits des espèces et des écosystèmes, et le risque de conséquences involontaires si notre capacité de remodeler les écosystèmes dépasse notre capacité de les comprendre. Comme les gens essaient toujours de cartographier et de comprendre les subtilités des écosystèmes, notre compréhension peut être limitée et en constante évolution, même avec l'aide de la technologie. Il peut y avoir un risque de nuire à la nature en influençant ou en manipulant les subtilités du monde naturel.

Les perspectives autochtones pourraient permettre de mieux comprendre et de mieux connaître les ramifications potentielles des nouvelles biotechnologies. La réflexion sur les répercussions pour les sept générations à venir et leur prise en compte, comme le suggèrent de nombreux enseignements traditionnels autochtones, pourraient guider les considérations d'ordre éthique liées aux innovations bionumériques.

Incertitudes critiques et possibilités futures

Divers facteurs pourraient influencer l'ampleur et la nature de l'acceptation ou du rejet des innovations bionumériques. Voici quelques exemples d'incertitudes possibles qui pourraient mener à différents scénarios d'avenir.

Acceptation sociétale : Est-ce qu'il y aura un consensus social sur l'adoption de nouvelles technologies?

- Alors que la prochaine génération d'enfants grandit en se familiarisant avec les technologies numériques et biologiques, la conscience publique évoluera-t-elle vers une prise de conscience selon laquelle les êtres humains font partie intégrante de systèmes écologiques plus vastes? Pourrait-on reconnaître plus largement l'importance de sauvegarder les écosystèmes en raison de leur valeur socioéconomique?
- La modification accrue de l'environnement pourrait-elle susciter des réactions négatives? Par qui, et quelle forme pourraient-elles prendre?
- S'il devient [possible](#)¹⁴⁷ de stocker des données de manière rentable dans l'ADN des organismes vivants, certaines plantes pourraient-elles jouer un nouveau rôle commercial dans l'économie numérique?
- Voudrions-nous établir de nouvelles formes de perception et de connexion avec la nature?

- Si les séquenceurs portatifs deviennent accessibles et bon marché, les gens les utiliseront-ils pour évaluer l'état de la biodiversité ou découvrir de nouveaux agents pathogènes?

Écosystème environnemental : Comment l'environnement peut-il être touché et comment peut-il réagir? Faut-il appliquer le principe de précaution?

- Quelle est l'importance des risques de conséquences imprévues? Par exemple, de nouveaux micro-organismes artificiels pourraient perturber la chaîne alimentaire, créer de nouvelles formes de pollution, provoquer de nouvelles allergies ou devenir eux-mêmes une forme de déchet.

Considérations d'ordre politique

L'essor de la convergence bionumérique pourrait influencer de nombreux domaines politiques. Les points suivants ne sont pas des recommandations politiques, mais plutôt des sujets à envisager, des questions et des idées qui visent à inciter à la réflexion.

Développement économique

- Le séquençage environnemental pourrait révéler la causalité entre les activités économiques et leurs répercussions sur la biodiversité et les écosystèmes.
- Le territoire pourrait devenir un outil clé permettant aux entreprises d'atténuer leur empreinte environnementale

grâce à la biodiversité artificielle, en l'utilisant pour compenser les impacts sur l'environnement de l'activité économique.

- Un système d'Internet des êtres vivants pourrait être déployé à grande échelle et être dominé, comme Internet, par un petit nombre d'entreprises influentes.

Propriété intellectuelle

- Les droits de propriété intellectuelle actuels devront peut-être évoluer pour englober les entités de la nature, ce qui soulève la question de savoir s'il faut considérer les nouveaux organismes comme un bien privé ou public.
- Avec l'arrivée de meilleures technologies de séquençage, les gouvernements devront peut-être clarifier à l'échelle internationale les règles relatives à l'accès, à la propriété et au partage des avantages de l'information génétique numérique¹⁴⁸, ainsi que son [statut juridique](#)¹⁴⁹ aux termes de la Convention sur la diversité biologique.

Réglementation environnementale et son application

- De nouveaux cadres réglementaires à différents niveaux peuvent influencer l'introduction de nouveaux organismes génétiquement modifiés. Les règles relatives à la reproduction de nouvelles espèces modifiées pourraient varier.
- La migration des espèces génétiquement modifiées pourrait être difficile à contrôler au-delà des frontières territoriales.
- Les nouveaux capteurs numériques et biocapteurs pourraient servir d'outils pour surveiller la qualité de l'environnement et la perte de biodiversité. La création de canaux de communication à l'aide des technologies numériques entre les organismes vivants et les organismes de réglementation pourrait faciliter l'application des règles.





Sécurité

Les innovations et les capacités bionumériques naissantes créent à la fois de nouvelles frontières et des préoccupations potentielles dans le domaine de la sécurité et de la défense. Comme près de cinq milliards de personnes sont connectées à Internet, la surveillance numérique et la collecte de données ont considérablement augmenté au cours de la dernière décennie. L'essor des données biologiques peut ajouter un nouveau degré de complexité à la sécurisation de données personnelles potentiellement précieuses. L'augmentation du nombre de données accessibles peut également faciliter les enquêtes criminelles et créer une société plus sûre.

Aujourd'hui, l'IdO est déployé dans le monde entier pour la construction des villes intelligentes et permet notamment aux autorités et aux acteurs privés de surveiller les mouvements des citoyens. Ces technologies ont donné lieu à des [problèmes de protection des renseignements personnels et à de nombreuses controverses](#)¹⁵⁰. Si l'on ajoute à cela la baisse rapide du coût du séquençage de l'ADN, une grande quantité de données biologiques pourrait être générée au cours de la prochaine décennie, ce qui faciliterait la biosurveillance à l'avenir. En outre, l'essor des capacités en biologie à faire soi-même et l'accès aux biotechnologies émergentes pourraient faciliter de nouvelles formes de guerre biologique et de bioterrorisme.

Comment la convergence bionumérique change-t-elle la sécurité?

Les innovations bionumériques continueront de se développer et à fusionner. Les paragraphes suivants présentent quelques innovations qui pourraient avoir une incidence sur l'avenir de la sécurité.

Essor des bases de données biologiques.

L'adoption de bases de données biologiques et de données génétiques par des entités privées ou publiques peut présenter des risques pour la protection des renseignements personnels et la défense nationale. En raison de leur nature et du type d'informations qu'elles contiennent, les données biologiques pourraient mener à de nouveaux niveaux de menace. Le consentement, l'accès et l'utilisation malveillante pourraient poser

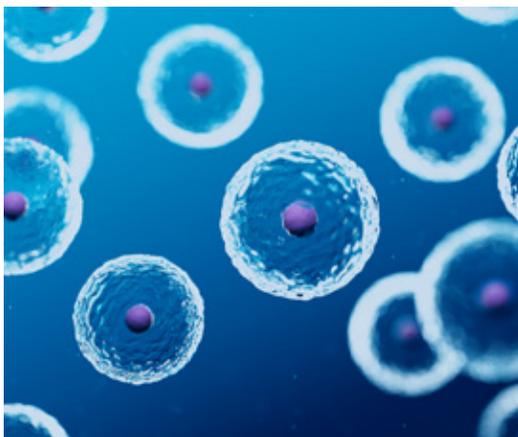
des risques graves pour les particuliers et pour les opérations de sécurité et de défense à gérer. Le coût du séquençage des gènes diminue rapidement : en 2020, une entreprise chinoise a affirmé qu'elle pouvait [séquençer un génome complet pour 100 \\$](#)¹⁵¹. Certains gouvernements ont créé des bases de données d'ADN : les États-Unis ont accumulé [environ 14 millions d'échantillons](#)¹⁵² sur des suspects criminels, parmi lesquels les minorités visibles sont surreprésentées; et la Chine recueille [régulièrement](#)¹⁵³ l'ADN de citoyens de sexe masculin dans le cadre d'opérations de police prédictive. Les chercheurs travaillent sur l'utilisation de l'ADN pour [prédire](#)¹⁵⁴ l'apparence du visage d'une personne, afin que les bases de données d'ADN puissent informer les autorités au moyen de logiciels de reconnaissance faciale.

De nombreuses personnes donnent volontairement leur ADN en échange d'informations sur leur santé ou leur ascendance, ou pour soutenir la recherche médicale, comme dans le cadre de [l'étude de FinnGen](#)¹⁵⁵. Si certaines sociétés proposant des tests génétiques humains disposent de politiques de confidentialité [exhaustives](#)¹⁵⁶, [beaucoup d'autres n'en ont pas](#)¹⁵⁷. Certains juges ont [ordonné](#)¹⁵⁸ à des entreprises de communiquer l'ADN de leurs clients aux forces de l'ordre, et près de la moitié des Américains sont favorables à l'accès par la police aux bases de données d'ADN privées. Les bases de données biologiques peuvent être un outil utile pour la criminalistique. Des affaires non résolues datant de plus de dix ans peuvent être [rouvertes](#)¹⁵⁹, car les données génétiques sont plus abondantes et plus faciles d'accès. En théorie, des acteurs malveillants pourraient être en mesure de

[pirater](#)¹⁶⁰ les [bases de données](#)¹⁶¹ à code source ouvert dans lesquelles les gens téléchargent leur ADN à la recherche de membres de la famille ou pour des études médicales, et d'y identifier des individus.

Les entités internationales échangent des technologies de surveillance à l'étranger sans réglementation similaire à celle du commerce des armes, même si beaucoup considèrent que les effets de la technologie présentent des dangers similaires. Nombreux sont ceux qui demandent que les bases de données d'ADN et les technologies de reconnaissance faciale soient [classées comme des armes](#)¹⁶², afin de réglementer ce commerce mondial et de surveiller leur utilisation par les régimes autoritaires.

Course entre les menaces biologiques et la biodéfense. À l'instar d'Internet, la convergence bionumérique donne lieu à une lutte nouvelle et permanente entre l'attaque et la défense. Les États-Unis ont classé l'édition génomique comme une [arme de destruction massive](#)¹⁶³ potentielle et le FBI dispose d'un département de criminalité biologique. Les nouvelles technologies peuvent [indiquer quand une personne tombe malade](#)¹⁶⁴, et [permettre](#)



[une détection précoce](#)¹⁶⁵ du virus ou de la bactérie qu'elle peut avoir. L'armée américaine envisage d'équiper ses soldats de biocapteurs [portables](#)¹⁶⁶ pour détecter les menaces biologiques. S'il peut être difficile de faire la distinction entre les agents pathogènes naturels et les agents artificiels, [la technologie s'améliore](#)¹⁶⁷.

Il est de plus en plus facile pour les particuliers de séquencer et de synthétiser de l'ADN. Les trousseaux d'édition génomique [sont vendues au détail en ligne](#)¹⁶⁸ pour un prix aussi bas que 169 \$ US. Le mouvement de biologie à faire soi-même vise notamment à rendre l'insuline et d'autres [médicaments plus abordables](#)¹⁶⁹. Cependant, la biologie à faire soi-même augmente également le risque de rejeter délibérément ou accidentellement des [agents pathogènes fabriqués soi-même](#)¹⁷⁰. La Californie est devenue le premier État américain à [adopter une loi](#)¹⁷¹ visant expressément à restreindre l'utilisation de la technologie de modification du génome CRISPR, mais les réglementations diffèrent d'un endroit à l'autre.

Qu'est-ce qui pourrait changer dans la sécurité à l'avenir?

À mesure que la convergence bionumérique progresse, elle pourrait remodeler les systèmes de sécurité et de défense en profondeur.

Menaces biologiques modernes. La militarisation de la biotechnologie pourrait entraîner une augmentation des menaces pour la société. Si seules les organisations disposant de ressources et de compétences importantes peuvent espérer développer une arme nucléaire,

il est de plus en plus possible pour des particuliers ou de petits groupes de mettre au point des armes biologiques potentiellement dévastatrices, comme une version du virus Ebola modifiée pour se propager plus facilement. Il est plus difficile d'anticiper le potentiel d'échelle et de dommages collatéraux des nouvelles armes biologiques par rapport aux armes plus traditionnelles.

Des acteurs mal intentionnés ayant un plan à long terme pourraient investir dans des entreprises en démarrage dans le domaine de la biotechnologie ou les infiltrer, tandis que les [cyberattaques ciblant les instituts de recherche biologique](#)¹⁷² pourraient permettre l'accès à des connaissances qui peuvent être militarisées en utilisant des technologies et des matériaux facilement disponibles. Les chercheurs en vaccins, par exemple, créent régulièrement des virus synthétiques pour tester des stratégies. La reproduction récente du [virus de la variole équine](#)¹⁷³, qui avait disparu, a fait craindre que le virus puisse être synthétisée et militarisée. De même, la recherche sur les neurotoxines comme la [tétrodotoxine](#)¹⁷⁴, produite par le poisson-globe, pourrait contribuer au développement d'armes biologiques.



Les groupes terroristes et les États voyous pourraient également cibler l'approvisionnement alimentaire d'un pays à l'aide d'armes biologiques : l'[agroterrorisme](#)¹⁷⁵ peut faire appel à des agents pathogènes qui touchent les cultures ou les [forêts](#)¹⁷⁶.

Essor de la biosurveillance. Les menaces biologiques nécessitent de nouvelles façons de concevoir la surveillance et le contrôle des frontières. À la suite de l'augmentation considérable du commerce international, nous pourrions être amenés à mettre en œuvre des systèmes de biodétection intelligents pour surveiller et avertir en temps utile de la présence de nouveaux virus, bactéries ou autres agents pathogènes génétiquement modifiés. Une nouvelle technologie de biodétection pourrait être déployée aux frontières pour tenter de les protéger contre les menaces biologiques. Les techniques et les matières premières de biologie de synthèse sont à double usage, ce qui soulève des questions sur la réglementation du commerce international de ressources telles que les cultures de levure et les souches d'algues. Les biomatériaux bruts peuvent nécessiter de nouveaux types de surveillance et de suivi aux frontières, car leurs produits finaux peuvent varier.

Les menaces biologiques peuvent influencer les priorités de la défense nationale étant donné le renforcement de la biosécurité. Cependant, les menaces biologiques touchent de nombreux domaines de politiques, notamment l'environnement, la santé, la sécurité nationale et le contrôle des frontières.

Crises d'identité



Éthique du séquençage de l'ADN. Les données génomiques pourraient avoir de lourdes conséquences sur la compétitivité économique et sur les questions d'identité, d'équité et de discrimination. Il devient financièrement possible pour les entreprises de créer des bases de données d'ADN de leurs clients et de mettre en place des modèles commerciaux dans lesquels les consommateurs échangent leurs données génétiques contre des services gratuits. Les entreprises suivent actuellement les données numériques pour créer des profils de consommateurs, ou même des profils électoraux¹⁷⁷. Le suivi des profils de données biologiques pourrait en être une extension. Grâce aux progrès de l'analyse génomique, les entreprises pourraient accéder à un bioprofil de votre identité¹⁷⁸ et en acquérir une compréhension plus large. En outre, les données génomiques pourraient devenir une nouvelle forme d'authentification numérique.

La sécurité et la surveillance pourraient s'intégrer aux pratiques d'équité et aux domaines éthiques. La communication de l'identité génétique pourrait créer de nouveaux défis en matière d'équité, si l'accès à l'éducation ou aux possibilités d'emploi dépendait du fait que les tests d'ADN laissent entendre ou non une aptitude à une carrière donnée. De même, l'accès aux soins de santé, aux assurances ou aux possibilités d'immigration pourrait dépendre des résultats des tests d'ADN et des risques de maladies dont le traitement est coûteux. Les mouvements ethnonationalistes pourraient promouvoir une discrimination fondée sur l'ADN ou créer des communautés enracinées dans une ascendance commune, ce qui entraînerait des divergences géopolitiques, des troubles sociaux ou de nouveaux types d'inégalités et de discriminations.

À mesure que l'ADN gagne en importance, un marché noir de fausses preuves ADN¹⁷⁹ pourrait voir le jour. Les gens pourraient protéger leur identité en utilisant les technologies CRISPR pour modifier leur ADN. Un plus grand nombre d'institutions pourraient utiliser les données biologiques comme moyen d'autorisation, ce qui pourrait ouvrir une nouvelle voie à l'usurpation d'identité.

Incertitudes critiques et possibilités futures

Divers facteurs pourraient influencer l'ampleur et la nature de l'acceptation ou du rejet des innovations bionumériques. Voici quelques exemples d'incertitudes possibles qui pourraient mener à différents scénarios d'avenir.

Acceptation sociétale : Est-ce qu'il y aura un consensus social sur l'adoption de nouvelles technologies?

- Leur utilisation potentielle dans les armes biologiques pourrait-elle monter l'opinion publique contre les usages potentiellement bénéfiques de la biologie de synthèse et des technologies d'édition génique?
- Les attitudes à l'égard de la justice et de la [police prédictive](#)¹⁸⁰ pourraient-elles changer s'il devenait possible d'[utiliser le profilage génétique](#)¹⁸¹ pour prédire le comportement criminel futur avec un haut degré de confiance à partir de l'ADN d'une personne?
- Les préoccupations relatives aux risques biologiques peuvent-elles inciter davantage de gens à s'installer dans des régions isolées ou à chercher à rendre leurs propriétés plus [sûres contre les menaces biologiques](#)¹⁸²?
- Comment des [attitudes culturelles différentes](#)¹⁸³ peuvent-elles façonner les réponses aux menaces biologiques dans différents pays?

Écosystème commercial : Quelle pourrait être la forme des entreprises dans cet espace, comment les secteurs connexes pourraient-ils évoluer, quels nouveaux acteurs pourraient voir le jour, et comment pourraient-ils évoluer dans le temps?

- La nature des menaces biologiques pourrait-elle nécessiter l'élaboration de [normes internationales](#)¹⁸⁴, ou les pays élaboreront-ils leurs propres paramètres et règlements en matière de saisie, de stockage et de communication des données biologiques?
- Les grandes entreprises pourraient-elles monopoliser la biologie de synthèse, les petites entités n'ayant pas forcément les ressources nécessaires pour satisfaire aux exigences de biosécurité pour les activités à haut risque?
- Comment les entreprises, les organisations et les gouvernements peuvent-ils parvenir à un équilibre approprié entre l'innovation et la réglementation, les [interdictions](#)¹⁸⁵ et les moratoires?
- Comment les organisations de bioinnovation pourraient-elles faire face à un risque accru d'[espionnage industriel](#)¹⁸⁶ et de [cyberattaques](#)¹⁸⁷?

État de préparation du marché du travail :

Y aura-t-il [suffisamment de talents](#)¹⁸⁸ pour développer de nouveaux marchés et de nouvelles activités? Où seront les talents du bionumérique?

- Pourrions-nous voir les ministères de la défense et les entreprises de sécurité employer un nombre croissant d'experts en « risques biologiques »?

Déploiement économique : Comment les politiques peuvent-elles s'adapter et garder une longueur d'avance sur les transitions?

- Quels sont les nouveaux protocoles et règlements nécessaires pour sécuriser les échanges de données biologiques?
- Quels règlements et normes en matière de sécurité, comme les permis délivrés par le gouvernement, pourraient être requis pour mener des activités de biologie à faire soi-même?

Considérations d'ordre politique

L'essor de la convergence bionumérique pourrait influencer de nombreux domaines politiques. Les points suivants ne sont pas des recommandations politiques, mais plutôt des sujets à envisager, des questions et des idées qui visent à inciter à la réflexion.

Sûreté et menaces biologiques

- Des acteurs malveillants pourraient tirer les leçons des échecs de détection, d'atténuation et de réponse à la [pandémie de COVID-19](#)¹⁸⁹, et des effets socioéconomiques sous-jacents, augmentant ainsi la probabilité de futures attaques menées avec des armes biologiques.
- Les composants numériques des dispositifs portables ou implantés pourraient être piratés, ce qui entraînerait des dommages biologiques pour l'utilisateur.
- La science à code source ouvert et la communication des données de recherche à l'échelle internationale

pourraient conduire à une surveillance et à une authentification internationales.

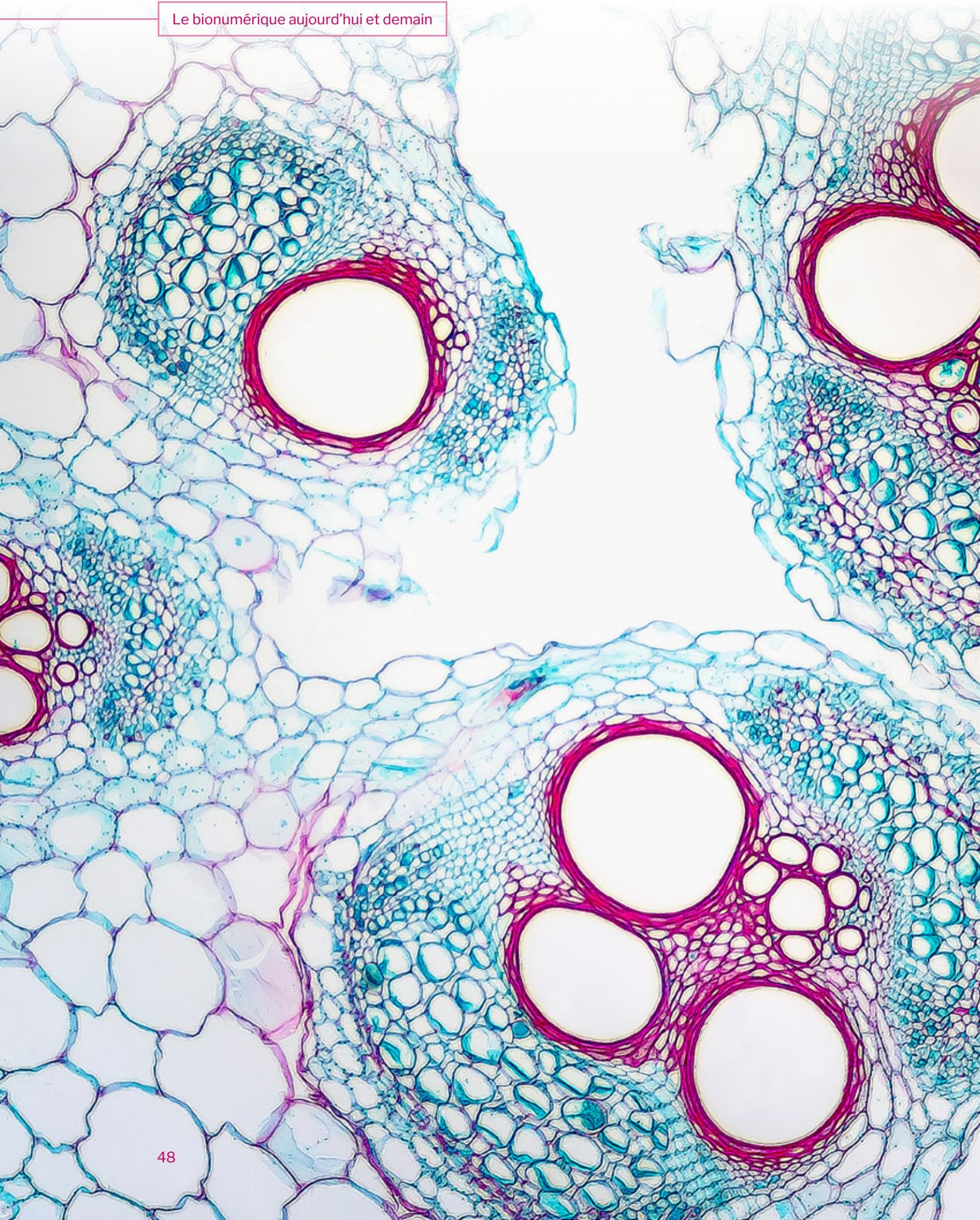
- La convergence bionumérique pourrait permettre aux particuliers de développer des menaces biologiques à faible coût.
- Certains pays pourraient investir dans la création de nouvelles infrastructures ou reconfigurer leurs infrastructures existantes pour prévenir ou atténuer les menaces biologiques potentielles.

Sécurité nationale

- La désinformation et les fausses nouvelles concernant les technologies bionumériques émergentes pourraient contribuer à modifier les attitudes et les comportements sociaux, et devenir par la suite un problème de sécurité nationale.
- Au vu de l'essor des laboratoires de biologie à faire soi-même à bas prix et l'accès plus facile à des technologies comme la synthèse de l'ADN, les services d'urgence de première ligne tels que la police, les pompiers et les ambulanciers pourraient avoir besoin d'une formation pour détecter les laboratoires, les organismes présentant un danger biologique et, potentiellement, l'augmentation humaine.
- L'augmentation de l'être humain pourrait être à la hausse, ce qui pourrait amener certains pays à développer des capacités de détection de l'augmentation ainsi que des règlements.

Forces armées et défense

- Des solutions défensives et offensives nationales et mondiales aux menaces biologiques potentielles pourraient être déployées.



Fabrication

La fabrication reposait historiquement sur le travail d'ouvriers d'usine qui transformaient des ressources naturelles initialement extraites des mines, des forêts et des eaux ou cultivées dans des exploitations agricoles. Les différences de coût de la main-d'œuvre et la répartition naturelle des ressources ont influencé le développement de notre vaste réseau de chaînes d'approvisionnement mondiales. La convergence bionumérique pourrait transformer le secteur des ressources naturelles grâce à de nouvelles méthodes de fabrication et d'obtention des matières premières et des carburants, ainsi qu'à de nouvelles techniques de fabrication, ce qui pourrait atténuer la pression sur les ressources naturelles. Une production et une distribution plus localisées des biens et des carburants pourraient relocaliser le secteur de la fabrication et transformer le commerce, perturbant ainsi les réseaux commerciaux et les chaînes d'approvisionnement.

Tout au long de l'ère industrielle, les accords commerciaux internationaux et la délocalisation des activités de fabrication ont donné naissance à des [chaînes d'approvisionnement complexes](#)¹⁹⁰. La demande de produits physiques devrait augmenter dans les années à venir, car la population mondiale s'accroît et le niveau de vie continue de s'élever. Le commerce international devrait également augmenter. Les [technologies numériques](#)¹⁹¹ comme l'IA, la robotique, l'infonuagique, l'impression 3D et la réalité mixte transforment déjà le secteur de la fabrication. Bien que le coût de la main-d'œuvre influence les décisions relatives au lieu de production, la [prochaine économie numérique](#)¹⁹² devrait révolutionner les chaînes de valeur mondiales. Elle pourrait également accélérer la transition vers une biofabrication basée sur le génie génétique.

Comment la convergence bionumérique change-t-elle la fabrication?

Les innovations techniques bionumériques continueront à mûrir et à se combiner. Les paragraphes suivants présentent quelques innovations qui pourraient avoir une incidence sur l'avenir intégré et complexe de la fabrication.

Atteinte de l'échelle industrielle par les bio-usines intelligentes. La biologie de synthèse a toujours été une activité à forte intensité de main-d'œuvre, comportant de nombreuses tâches manuelles et répétitives, mais cela commence à changer. Des organisations privées et des instituts de recherche construisent des installations de bioproduction intelligentes qui peuvent atteindre l'échelle industrielle.

Les assistants de laboratoire robotisés peuvent réaliser des expériences [1 000 fois plus rapidement](#)¹⁹³ que les êtres humains, ce qui permet aux chercheurs de se concentrer sur la conception et la création d'organismes génétiquement modifiés. Les données générées par les essais de nouveaux organismes entraînent et optimisent l'[apprentissage automatique](#)¹⁹⁴ pour prédire le comportement des systèmes biologiques et fournir des recommandations, ce qui pourrait considérablement accélérer le développement de la [bio-ingénierie](#)¹⁹⁵. Les coûts diminuent à mesure que les [marchés d'ADN en ligne](#)¹⁹⁶ facilitent les comparaisons de prix entre les producteurs d'ADN de synthèse.

Matériaux biologiques de synthèse.

Les matériaux biologiques de synthèse perturbent les méthodes de fabrication actuelles. Parmi les biomatériaux innovants, citons un tissu [ressemblant à de la soie](#)¹⁹⁷ produit par des microbes génétiquement modifiés; du [cuir biologique](#)¹⁹⁸ et du bois imprimés en 3D; des [briques biodégradables fabriquées à partir de champignons](#)¹⁹⁹; des bactéries mélangées à du [béton](#)²⁰⁰ pour s'autorégénérer et éviter les fissures; des bactéries capables de produire de l'[hydrogène](#)²⁰¹ comme combustible à la demande; des « [robots souples](#) »²⁰² capables de déplacer des marchandises sous l'eau; et un [gel imprimé en 3D](#)²⁰³ qui change de couleur en réponse à la lumière et peut être utilisé comme camouflage. Des machines vivantes conçues par l'IA et fabriquées à partir de [cellules de peau et de muscles de grenouilles](#)²⁰⁴ pour s'adapter à un nouveau plan corporel peuvent se déplacer de manière autonome et effectuer des tâches « programmées ».

De nouveaux concepts et innovations facilitent l'intégration physique de la biologie et du numérique, et favorisent le changement cognitif auquel nous assistons. La technologie et la nature s'intègrent peut-être plus facilement que nous ne le pensons. En outre, la technologie pourrait être plus intuitive et la nature plus prescriptive qu'on ne l'avait imaginé.

Ces matériaux pourraient offrir des substituts à presque toutes les matières premières utilisées pour produire des biens, du plastique au bois, en passant par les métaux, les produits chimiques et même les fibres végétales comme le coton.

Bioénergie produite à partir d'organismes génétiquement modifiés. Malgré les investissements considérables réalisés au cours de la dernière décennie, le biocarburant d'algues reste coûteux, mais les chercheurs font appel à l'IA²⁰⁵ pour modifier génétiquement des algues capables de produire de l'énergie à moindre coût, en remplacement potentiel des combustibles fossiles. Des bactéries génétiquement modifiées peuvent produire de l'hydrogène dans des cellules biosolaires en utilisant uniquement la lumière du soleil et l'eau.

Qu'est-ce qui pourrait changer dans la fabrication à l'avenir?

À mesure que la convergence bionumérique progresse vers la maturité, elle pourrait remodeler la fabrication, les chaînes d'approvisionnement, les modes de production et le comportement des consommateurs en profondeur.

Ressources naturelles d'origine biologique. Les micro-organismes génétiquement modifiés pourraient réduire la demande de ressources naturelles. Nous n'aurons peut-être plus besoin des matières premières traditionnelles pour fabriquer des biens. Le secteur de l'industrie primaire, notamment l'exploitation minière, l'agriculture et la foresterie, pourrait être confronté à la [concurrence](#)²⁰⁶ d'une gamme de biomatériaux fonctionnels et rentables. Soutenues par des laboratoires en nuage, la fabrication additive, des logiciels de conception assistée par ordinateur et l'automatisation, [les biofondries pourraient fournir des services locaux de génie génétique](#)²⁰⁷ (bioproduction en tant que service) et des biomatériaux bruts respectueux des règlements locaux aux fabricants souhaitant réduire les coûts de leur chaîne d'approvisionnement et de leur infrastructure de production.

Comme leur [empreinte carbone est probablement plus faible](#)²⁰⁸, les biosubstituts pourraient soutenir les efforts visant à atténuer le changement climatique. Une baisse spectaculaire des recettes des États producteurs de pétrole pourrait également avoir des répercussions géoéconomiques et géopolitiques.

Fabrication distribuée grâce aux biofondries. Des installations de biofabrication réparties à travers le monde pourraient répondre aux besoins locaux en produits de base. Combinées à la bio-impression 3D, les biofondries pourraient accélérer la transition des fabricants d'un modèle interentreprises

traditionnel vers un modèle entreprise-consommateur en fournissant aux populations locales des produits de niche comme des biomatériaux, des aliments et des [médicaments personnalisés pour les maladies rares](#)²⁰⁹. Dans les régions éloignées, les biofondries pourraient produire une série de biens dont l'importation est actuellement coûteuse, ce qui réduirait le coût de la vie et pourrait aider les communautés éloignées à devenir plus autosuffisantes.

Si les produits sont de plus en plus fabriqués et transformés localement, le besoin d'infrastructures physiques étendues comme les réseaux électriques, les oléoducs et gazoducs, les ports et les chemins de fer peut diminuer, et le besoin d'installations de fermentation peut augmenter. Cela pourrait alléger la pression sur les terres et permettre aux biens et services d'être plus accessibles pour les communautés isolées. Ce phénomène pourrait également conduire à l'émergence de nouvelles infrastructures locales pour le transport de la biomasse, comme une [canalisation de bière](#)²¹⁰.

Diminution du coût de la bio-ingénierie.

Un équipement de recherche plus abordable pourrait conduire à une augmentation de l'innovation dans les biosubstituts. La baisse du coût du séquençage des gènes, de la synthèse de l'ADN et de l'automatisation pourrait permettre une augmentation de la recherche sur la bioproduction en source ouverte à faire soi-même. Les entrepreneurs individuels pourraient explorer un nombre sans précédent de nouvelles possibilités pour les biens et

services, de la santé à la construction, en passant par les infrastructures, les matériaux et le mobilier.

Ces nouveaux biosubstituts pourraient obliger les organismes de réglementation à revoir une série de règlements liés à la santé et à la sécurité, à la protection de l'environnement, à la propriété intellectuelle, à l'atténuation du changement climatique et au bien-être social, tout en visant à promouvoir la croissance économique. La grande capacité de personnalisation de la bio-ingénierie pourrait amener les producteurs à adapter leurs produits pour tenir compte des disparités entre les règlements des différents pays.





Récupération, régénération, recyclage

Économie circulaire et développement durable. Pendant des décennies, la production et la consommation²¹¹ qui ont stimulé la croissance économique à l'échelle mondiale ont augmenté l'empreinte environnementale des matériaux et entraîné l'épuisement des ressources naturelles. De l'extraction des ressources à leur élimination, l'économie linéaire « extraire-produire-jeter » qui a dominé notre modèle de développement a menacé la capacité de la Terre à régénérer les ressources renouvelables. Pour atteindre les objectifs de développement durable²¹², un concept a vu le jour, qui préconise le passage à une économie circulaire²¹³, en séparant l'activité économique de la consommation des ressources limitées et en concevant des produits fabriqués à partir de matières premières renouvelables tout en respectant leur cycle de régénération.

Un système de production bionumérique pourrait réduire la demande humaine en capital naturel en optimisant l'utilisation de la biomasse et en développant des solutions de rechange génétiquement modifiées aux ressources non renouvelables comme les combustibles fossiles et de nombreux minéraux.

Et si le bioemballage intégrant des semences pouvait se transformer facilement en plantes? Ou si les nouveaux matériaux en champignon²¹⁴ pour le secteur de la construction se développaient rapidement tout en capturant le carbone? Et si les biomatériaux étaient dotés de capacités spécifiques de biodétection, comme la détection de la détérioration des aliments, de la pollution de l'air, de l'eau et du sol dans les zones urbaines? La consommation de bioproduits pourrait conduire à la régénération des écosystèmes et de la biodiversité tout au long de leur cycle de vie, de la production à la fin de leur vie utile.

Incertitudes critiques et possibilités futures

Divers facteurs pourraient influencer l'ampleur et la nature de l'acceptation ou du rejet des innovations bionumériques. Voici quelques exemples d'incertitudes possibles qui pourraient mener à différents scénarios d'avenir.

Acceptation sociétale : Est-ce qu'il y aura un consensus social sur l'adoption de nouvelles technologies?

- Les préférences des consommateurs et le mouvement économique en faveur de biens à faible teneur en carbone accéléreront-ils le passage aux biomatériaux? Dans quelle mesure le public pourrait-il accepter facilement les nouveaux produits génétiquement modifiés? Des clivages pourraient-ils voir le jour selon les différences générationnelles, culturelles, géographiques ou religieuses?

Écosystème commercial : Comment les acteurs existants pourraient-ils changer, quelle pourrait être l'évolution des secteurs connexes et quels nouveaux acteurs pourraient voir le jour?

- La bioproduction sera-t-elle développée par des multinationales ou par des entreprises en démarrage?
- Comment la biofabrication pourrait-elle redéfinir les chaînes d'approvisionnement dans différentes industries?

État de préparation du marché du travail :

Y aura-t-il suffisamment de talents pour développer de nouveaux marchés et de nouvelles activités? Où seront les talents du bionumérique?

- Y aura-t-il des investissements ciblant une collaboration multidisciplinaire entre les ingénieurs, les scientifiques du numérique (comme l'IA, la robotique, la connectivité) et les biologistes?

Déploiement économique : À quelle vitesse les politiques pourraient-elles évoluer et s'adapter pour permettre les transitions?

- Quel est le risque de pollution des écosystèmes par les nouveaux biomatériaux? Quel type de déchets les biofondries produisant de nouveaux matériaux peuvent-elles générer? Seront-ils plus faciles à manipuler que les déchets chimiques, industriels (emballage, bois, acier) ou nucléaires?
- Comment les règles du commerce interprovincial et international pourraient-elles empêcher ou permettre la circulation transfrontalière des biomatériaux?

Considérations d'ordre politique

L'essor de la convergence bionumérique pourrait influencer de nombreux domaines politiques. Les points suivants ne sont pas des recommandations politiques, mais plutôt des sujets à envisager, des questions et des idées qui visent à inciter à la réflexion.

Systèmes d'innovation

- Les biofondries pourraient encourager l'esprit d'entreprise et l'innovation à l'échelle locale.
- Les règles de propriété intellectuelle relatives aux nouveaux biomatériaux et aux micro-organismes modifiés pourraient soit encourager, soit ralentir la recherche et le développement, et l'innovation.
- Les grandes entreprises et les acteurs du commerce électronique peuvent stimuler la bioconsommation à l'échelle mondiale en adoptant des biosubstituts et des matériaux à faible teneur en carbone comme les bioplastiques ou les emballages comestibles.

Développement économique

- Les gouvernements fédéraux, provinciaux et municipaux pourraient avoir des positions différentes sur la biofabrication, étant donné ses retombées sur divers secteurs de l'économie comme l'agriculture, la transformation des aliments, la construction, le pétrole et le gaz, la pétrochimie, la foresterie, la pêche, les produits pharmaceutiques, l'exploitation minière et le transport.
- La valeur des matériaux traditionnels et des ressources naturelles pourrait rapidement diminuer lorsqu'un bioproduit de remplacement est commercialisé.

Collaboration internationale

- Les biofondries pourraient permettre de nouveaux partenariats et une nouvelle collaboration internationale en recherche et développement, et rompre les alliances commerciales traditionnelles entre pays et régions.
- Des normes internationales sur la recherche et la production de biomatériaux pourraient voir le jour.

Réglementation et commerce

- Les biomatériaux émergents et les micro-organismes génétiquement modifiés pourraient entraîner un nouvel étiquetage des produits de consommation et des matériaux de construction.
- Les règlements environnementaux relatifs à la gestion des déchets, aux substances toxiques et au transport devront peut-être être revus pour évaluer les nouveaux biomatériaux issus de la biologie de synthèse, de l'ingénierie tissulaire ou de la bio-impression 3D. Ils pourraient également influencer les activités d'importation et d'exportation.
- Les gouvernements peuvent se pencher sur les questions d'ordre éthique entourant l'utilisation et la gestion des organismes génétiquement modifiés.



COVID-19 : un accélérateur inattendu

La pandémie de COVID-19 agit comme un moteur du changement qui accélère la transition vers un monde bionumérique. Elle a sensibilisé la population, les gouvernements et l'industrie à la biologie et à ses multiples usages. Elle révèle les risques de la désinformation et la nécessité des connaissances en biologie. Elle place les capacités de biodéfense et l'autosuffisance nationale au premier plan des préoccupations des gouvernements. En outre, elle a obligé les sociétés à réévaluer l'équilibre entre la biosécurité et les libertés individuelles.

Le rythme de la convergence bionumérique dans les années à venir dépendra non seulement des progrès technologiques, mais aussi de l'acceptation sociale, et la pandémie a montré que des événements inattendus peuvent déclencher des changements rapides dans la sphère de ce qui est largement considéré comme acceptable ou souhaitable. À l'avenir, nous ne verrons peut-être plus les technologies numériques et les systèmes biologiques comme des éléments distincts, mais plutôt comme des éléments qui s'entrelacent, normalisant davantage le monde bionumérique dont les générations futures pourraient hériter.

Tout au long de la pandémie COVID-19, nous avons vécu la première expérience bionumérique à l'échelle mondiale. Nous sommes confrontés à l'évolution profonde des innovations bionumériques tout en assistant à la naissance d'un nouveau domaine. Les technologies bionumériques abordées dans le présent rapport existent aujourd'hui et continueront d'évoluer. La mesure dans laquelle elles transformeront nos vies à l'avenir dépend en partie de la rapidité avec laquelle elles deviendront plus performantes et abordables, ainsi que normalisées et intégrées dans la société. En d'autres termes, la transformation est fonction de la possibilité technologique et de l'acceptation sociale.

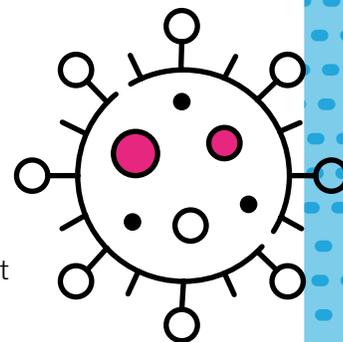
Souvent, l'acceptation sociale est progressive, car les nouvelles générations grandissent en ayant des attitudes et des expériences différentes. Parfois, certains événements peuvent déclencher des changements rapides et inattendus dans ce qui est largement considéré comme normal. La modification des procédures de sécurité dans les aéroports après le 11 septembre est un exemple de changement de protocole de sécurité et de voyage à la suite d'un événement marquant. La pandémie de COVID-19 a entraîné de nombreux changements rapides en raison des circonstances auxquelles nous sommes confrontés, de la [transformation numérique](#)²¹⁵ des entreprises à la multiplication des [réunions vidéo](#)²¹⁶, des [achats en ligne](#)²¹⁷, des [applications de livraison de denrées alimentaires](#)²¹⁸, de la [télémédecine](#)²¹⁹, et de la [surveillance](#)²²⁰. Des progrès ont été réalisés dans le [déploiement des vaccins à ARNm](#)²²¹, le [séquençage en temps réel](#)²²² et la [coopération mondiale](#)²²³, qui ont conduit à la production rapide de vaccins en raison des pressions exercées sur le secteur des biotechnologies.

La COVID-19 est peut-être le point de départ d'une nouvelle ère de menaces biologiques dans laquelle le changement rapide devient plus normal. Il est [peu probable que cette pandémie ne se produise qu'une fois par siècle](#)²²⁴, car de nombreux facteurs comme le changement climatique et la croissance démographique pourraient contribuer à l'apparition de virus zoonotiques plus nombreux, voire plus graves, à l'avenir. Le risque mondial de menaces biologiques pourrait augmenter et les experts pourraient intensifier leurs efforts pour comprendre les variables qui conduisent à l'apparition des pandémies.

Que peut signifier la COVID-19 pour la convergence bionumérique?

Essor des connaissances biologiques

La population, les gouvernements, les [scientifiques](#)²²⁵ et l'industrie parlent de la biologie comme jamais auparavant. De la valeur de R aux mutations de la protéine Spike, des concepts qui étaient très spécialisés au début de 2020 font désormais partie des conversations courantes. Cet essor des connaissances biologiques pourrait faciliter la discussion, l'explication et la compréhension des technologies bionumériques émergentes comme celles qui sont étudiées dans le présent rapport. De même, l'augmentation des connaissances biologiques a contribué aux conversations sur l'environnement et aux initiatives sur le changement climatique, qui ont également augmenté en même temps que la pandémie.



Augmentation de l'attention et du financement accordés aux technologies bionumériques

La COVID-19 a accéléré l'intérêt pour la recherche sur diverses innovations biologiques et bionumériques et les investissements dans ce domaine, des vaccins à ARNm et des méthodes d'immunisation de substitution comme les [vaporisateurs nasaux](#)²²⁶, à la biosurveillance, aux capteurs, aux [thérapies géniques](#)²²⁷ et à une meilleure compréhension du [microbiome](#)²²⁸, des [facteurs de stress toxiques](#)²²⁹ et du système immunitaire humain. La COVID-19 a accéléré l'utilisation d'innovations bionumériques comme la télémédecine et les applications de santé, et pourrait susciter à l'avenir des discussions sur la biosurveillance ou les biocapteurs environnementaux.

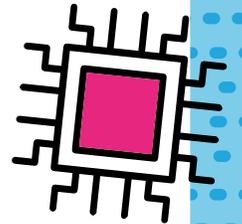
Santé et biodéfense, une question transversale pour les institutions publiques

Les gens ont pris conscience des effets puissants et profonds des micro-organismes. La santé publique est devenue un élément central de tous les aspects du gouvernement, de l'économie à l'environnement. La préparation aux pandémies est désormais considérée par certains comme une question de [sécurité nationale](#)²³⁰, étant donné qu'il est généralement admis que ce n'est qu'une question de temps avant qu'une autre menace biologique importante n'apparaisse.

Nouvelle ère de risques de désinformation

La COVID-19 illustre la façon dont les [théories du complot](#)²³¹ peuvent gagner en popularité alors que les scientifiques s'empressent de comprendre la nature d'une nouvelle menace. Parmi les exemples, citons les théories néfastes selon lesquelles la COVID-19 est [causée par la 5G](#)²³² et les vaccins contiennent des [micropuces contrôlées par Bill Gates](#)²³³ ou encore les faux remèdes et conseils de santé comme s'injecter de l'eau de Javel.

Les gens doivent déchiffrer des quantités massives d'informations et donner un sens au monde par l'intermédiaire de nouveaux canaux d'information. « La désinformation virale et les théories du complot polluent notre environnement informationnel. Elles déterminent la façon dont un nombre croissant de Canadiens interprètent le monde, ce qui influence leurs décisions sociales, [économiques et politiques](#)²³⁴. » La création de sens détermine ce que les gens pensent savoir et comment ils prennent leurs décisions. La désinformation comporte des risques de contrecoup qui pourraient ralentir ou accélérer l'adoption des innovations bionumériques. La façon dont nous donnons du sens aux innovations bionumériques émergentes influencera le déroulement de l'ère bionumérique.



À la recherche de l'autosuffisance nationale

Les premières semaines de la pandémie ont montré comment les contrats commerciaux peuvent se rompre dans une situation d'urgence mondiale, les gouvernements nationaux [étant intervenus](#)²³⁵ pour empêcher les exportations d'équipements de protection individuelle (EPI), de fournitures médicales et de [céréales](#)²³⁶. La pandémie a également touché de nombreuses chaînes d'approvisionnement, notamment celle des semi-conducteurs et de la [viande](#)²³⁷. Par conséquent, les gouvernements pourraient développer des capacités nationales, afin de fabriquer des fournitures de première nécessité dans des secteurs essentiels. En réponse à la pandémie de COVID-19, Singapour a [mis de l'avant](#)²³⁸ son [objectif adopté en 2019](#)²³⁹ de produire 30 % de ses propres denrées alimentaires d'ici à 2030 en utilisant l'agriculture cellulaire et l'agriculture verticale. En 2021, le Canada a proposé un [investissement de 2,2 milliards de dollars](#)²⁴⁰ dans le secteur de la biofabrication et des sciences de la vie, afin de renforcer les capacités de production de vaccins et les innovations en soins de santé. Nous constatons un intérêt similaire pour l'innovation dans le domaine des soins de santé et de la bioproduction dans le monde entier, la [France](#)²⁴¹ étant l'un des nombreux pays qui investissent massivement dans ce domaine en pleine expansion.

Participation du public à l'industrie pharmaceutique

Les pays qui ont investi dans le développement et l'infrastructure de fabrication du vaccin contre la COVID-19 ont bénéficié d'un [accès plus rapide](#)²⁴² aux vaccins que ceux qui ont adopté une approche plus transactionnelle de l'approvisionnement, et les disparités dans l'accès rapide ont vite conduit à des menaces d'interdiction d'exportation. Certains pays pourraient étudier la possibilité d'une bioinfrastructure stratégique et d'une capacité de biofabrication afin de mieux se préparer aux futures urgences liées aux menaces biologiques et à la sécurité nationale.

Cela pourrait remettre en question le rôle dominant accepté de l'entreprise privée dans le développement et la fabrication de produits pharmaceutiques, comme en témoigne l'encouragement récent de la [participation publique](#)²⁴³ dans la biofabrication et la production pharmaceutique.

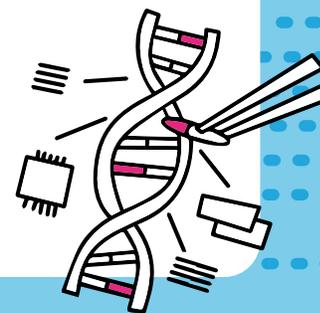
Les gouvernements peuvent particulièrement apprécier la capacité nationale à changer rapidement de cap et à fabriquer tout nouveau vaccin, traitement ou test de diagnostic face à une nouvelle menace.

La distribution internationale de vaccins et les contrats de sécurisation des approvisionnements ont mis en lumière l'[inégalité](#)²⁴⁴ dans l'accès à la prévention et aux traitements. La nature des menaces biologiques mondiales peut nécessiter de nouvelles stratégies pour permettre une distribution plus équitable des traitements.

Équilibre changeant entre protection des renseignements personnels, droit à la santé, sûreté biologique et biodéfense

Le dépistage et l'isolement sont apparus très tôt comme des stratégies clés pour les pays qui ont réussi à maîtriser la pandémie. Certains pays, comme la [Corée du Sud](#)²⁴⁵, l'ont fait de manière particulièrement efficace et [ont compromis la protection des renseignements personnels](#)²⁴⁶ dans une mesure actuellement inacceptable dans la culture occidentale, même si cela pourrait changer en cas de menace suffisamment grave. Bien que les préoccupations éthiques soient encore nombreuses, on a de plus en plus le sentiment que l'[acceptation](#)²⁴⁷ des outils de biosurveillance augmente, alors que nous faisons face à une pandémie mondiale. Il est intéressant de noter que certaines îles et régions éloignées, comme la [Nouvelle-Zélande](#)²⁴⁸ et l'[Île-du-Prince-Édouard](#)²⁴⁹, ont mis en place des protocoles stricts pour contrôler l'entrée et répondre rapidement aux menaces, et ont été saluées et reconnues pour leur efficacité à atténuer la pandémie.

De nombreux gouvernements et scientifiques pourraient vouloir [améliorer](#)²⁵⁰ leur capacité de [prédire et détecter](#)²⁵¹ le prochain virus pandémique malgré les [incertitudes](#)²⁵². Les technologies de diagnostic nécessitant des données biologiques personnelles se développent rapidement. Les chercheurs travaillent sur des dispositifs de diagnostic portables qui font appel à l'édition génomique pour détecter n'importe quel agent pathogène, en traitant des centaines de tests en 15 minutes; et sur des capteurs injectés [sous la peau](#)²⁵³ pour détecter une infection qui peut être contagieuse, mais pas encore symptomatique. Les [passeports vaccinaux](#)²⁵⁴ COVID-19 pourraient annoncer un monde dans lequel de nombreuses activités ne sont accessibles que si l'on est prêt à divulguer son état de santé actuel. L'accès et la disponibilité des services de soins de santé ont été mis à rude épreuve par la pandémie, ce qui a conduit les pays à envisager des mesures difficiles comme l'[obligation de vacciner](#)²⁵⁵ et la [contribution aux soins de santé](#)²⁵⁶, ou le [refus des services de soins de santé](#)²⁵⁷ aux personnes non vaccinées. On pourrait débattre de



la question de savoir si les soins de santé sont un droit ou un privilège. Certains [pays](#)²⁵⁸ ont déployé des [systèmes](#)²⁵⁹ de surveillance des eaux usées afin de mieux comprendre comment la COVID-19 se propage dans une communauté.

Changements systémiques dans la science et la technologie pendant la pandémie de COVID-19

La COVID-19 a apporté des changements spectaculaires à certains aspects de la conduite des activités scientifiques. On ne sait pas encore si ces changements s'ancreront ou s'estomperont tant que la menace de la pandémie reste inconnue.

- Les processus d'essai clinique et d'approbation des nouveaux vaccins à ARNm ont été [accélérés](#)²⁶⁰ à un degré sans précédent.
- Les entreprises spécialisées dans la biologie de synthèse et les biofonderies ont démontré leur capacité à faire évoluer rapidement leur capacité de production vers les [matières premières](#)²⁶¹ pour de nouveaux tests et vaccins.
- Des scientifiques du monde entier [ont partagé des données](#)²⁶² sur le séquençage du génome de la COVID-19 et des nouveaux variants.
- Les revues universitaires [ont donné la priorité](#)²⁶³ à la rapidité de publication par rapport à la rigueur du processus d'examen par les pairs.
- Des plateformes comme [Crowdfight](#)²⁶⁴ ont vu le jour, permettant aux scientifiques d'échanger des idées et de bénéficier de l'aide de bénévoles.
- Les gens ont fourni volontairement leurs données pour permettre la conduite d'activités scientifiques en temps réel, comme grâce à l'application britannique [de suivi des symptômes Zoe](#)²⁶⁵.

Conclusion

Nous sommes à l'aube de l'ère de la convergence bionumérique. À l'heure actuelle, nous utilisons la technologie en biologie, mais la biologie en elle-même est aussi une forme de technologie; elle est programmable, codable et modifiable. L'avenir de la biologie en tant que technologie pourrait inclure des composants numériques programmables. Les technologies numériques et les systèmes biologiques s'associent et fusionnent d'une manière qui pourrait bouleverser en profondeur nos hypothèses sur la société, sur l'économie et sur le corps humain.

Cinq secteurs sont appelés à se transformer avec l'avènement de la convergence bionumérique : l'alimentation, la santé, l'environnement, la sécurité et la fabrication.

Au-delà de la transformation que nous pourrions observer dans ces secteurs, l'exploration des incidences de la convergence bionumérique sur des secteurs particuliers pourrait révéler des possibilités, des défis et des dilemmes plus systémiques auxquels la société sera confrontée.

La convergence bionumérique ouvre de nouvelles perspectives sur l'incidence des entités biologiques sur les économies, sur les liens interdépendants entre le monde naturel et les secteurs, sur l'évolution de la technologie et la manière dont elle permet de nouvelles innovations biologiques, sur ce qui constitue un lieu idéal pour l'implantation humaine, sur nos responsabilités éthiques vis-à-vis du monde naturel, ainsi que sur d'autres défis et possibilités susceptibles de se présenter au cours de notre évolution en tant qu'espèce.

La convergence bionumérique impose également de nouveaux défis et dilemmes : comment coordonner les approches réglementaires internationales afin d'éviter que les pays ne se lancent dans des expériences dont les conséquences potentielles pourraient se répercuter au-delà des frontières? Quelles pourraient être les répercussions économiques sur les différentes industries, et quel effet cela pourrait-il avoir sur la compétitivité des pays? Quelles incidences les nouvelles possibilités d'augmentation humaine peuvent-elles avoir sur l'équité et la discrimination? Dans quelle mesure devons-nous donner la priorité à la préservation des modes de vie traditionnels? Nous approchons peut-être d'une nouvelle ère dans laquelle les cadres de gouvernance et de réglementation incluent et ciblent les innovations bionumériques.

En réfléchissant à la transition, en évaluant largement les risques possibles et en tirant parti des possibilités, on pourrait assurer un meilleur avenir au Canada et au monde.



Remerciements

Horizons de politiques se situe à l'avant-garde d'un domaine de la prospective appelé la « convergence bionumérique ». Ce rapport examine cinq secteurs où des perturbations possibles peuvent se produire et explore comment ces systèmes peuvent changer en raison de la convergence bionumérique. Avec l'émergence de ce nouveau domaine, nous continuerons d'examiner les futurs plausibles de la convergence bionumérique et les questions de politiques qui pourraient se poser.

Équipe du projet d'exploration de la convergence bionumérique

Katherine Antal, analyste principale en prospective

Marcus Ballinger, gestionnaire

Steffen Christensen, analyste principal en prospective

Pierre-Olivier DesMarchais, analyste principal en prospective

Avalyne Diotte, analyste en prospective

Evan Larmand, analyste en prospective

Kristel Van der Elst, directrice générale

Communications

Maryam Alam, conseillère en communication

Laura Gauvreau, gestionnaire

Géraldine Green, traductrice

Alain Piquette, graphiste

Nadia Zwierzchowska, rédactrice

Margareta Drzeniek, rédactrice (externe)

Andrew Wright, rédacteur (externe)

Nous tenons à remercier nos collègues Imran Arshad, Fannie Bigras Lafrance, Alexis Conrad, Louis-Philippe Gascon, Tammy Lemieux, Nelly Leonidis, Pascale Louis et Khadyjatou Toukourou pour leur soutien dans ce projet.

Nous tenons à remercier toutes les organisations et personnes qui ont contribué à notre réflexion dans le cadre de ce rapport.

Nous sommes impatients de collaborer avec des partenaires et des parties prenantes sur l'étude de la convergence bionumérique.

Références

- 1 Horizons de politiques Canada. « Explorer la convergence bionumérique ». (2020). <https://horizons.gc.ca/fr/2020/02/11/explorer-la-convergence-bionumerique/>
- 2 Susan Reidy. « FAO forecasts buoyant global food trade despite challenges ». World grain (2021) <https://www.world-grain.com/articles/15420-fao-forecasts-buoyant-global-food-trade-despite-challenges>
- 3 Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. « The future of food and agriculture: Alternative pathways to 2050 ». ONU (2018). <https://www.fao.org/3/CA1553EN/ca1553en.pdf>
- 4 Clint Rainey. « Meet Plant-Ag, the \$9 billion startup that will let you trace your food from field to plate ». Fast Company (2021) <https://www.fastcompany.com/90614017/plant-ag-9-billion-startup-food-traceability-field-to-plate-transparency-karim-giscombe>
- 5 « Burden of Foodborne Illness: Findings ». Centers for Disease Control and Prevention, consulté le 30 janvier 2022, <https://www.cdc.gov/foodborneburden/2011-foodborne-estimates.html>
- 6 Lana Bandoim. « World's First 3D Bioprinted And Cultivated Ribeye Steak Is Revealed ». Forbes (2021), <https://www.forbes.com/sites/lanabandoim/2021/02/12/worlds-first-3d-bioprinted-and-cultivated-ribeye-steak-is-revealed/?sh=645bdf74781>
- 7 Niall Firth. « Your first lab-grown burger is coming soon – and it'll be blended ». MIT Technology Review (2020), <https://www.technologyreview.com/2020/12/18/1013241/first-lab-cultured-cultivated-meat-blended-plants/>
- 8 Liam Pritchett. « The World's First Lab-Grown Meat Restaurant Opens in Israel ». Livekindly (2020), <https://www.livekindly.co/first-lab-grown-meat-restaurant/#:~:text=In%20a%20world%2Dfirst%2C%20Israel,from%20cells%20in%20a%20bioreactor>
- 9 Anna Starostinetskaya. « Qatar is poised to become the second country in the world to allow sale of lab-grown meat ». VegNews (2021), <https://vegnews.com/2021/9/qatar-lab-grown-meat-sale>
- 10 Courtney Linder. « KFC is 3D-Printing Chicken Nuggets. Would You Eat Them? ». Popular Mechanics (2020), <https://www.popularmechanics.com/home/food-drink/a33380821/kfc-3d-bio-printed-chicken-nuggets/>
- 11 Derek Beres. « Beyond Meat: Are you ready for lab-grown salmon? ». Big Think (2020), <https://bigthink.com/the-present/lab-grown-fish/#rebellitem3>
- 12 Li Allen. « Lab-Grown Tuna: Freaky Or Revolutionary? Either Way, It's Here. » Forbes (2020), <https://www.forbes.com/sites/allenelizabeth/2020/04/10/lab-grown-tuna-freaky-or-revolutionary-either-way-its-here/?sh=413ec19f14d0>

- 13 Simon Willis. « Can a country with no livestock become a meat producer? Singapore is going to try ». *Fortune* (2021), <https://fortune.com/2021/05/29/singapore-fake-meat-plant-based-protein-cultured-meat-eat-just-food-security/>
- 14 Larissa Zimberoff. « Forget Synthetic Meat, Lab Grown Dairy Is Here ». *Bloomberg* (2019), <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-07-11/forget-cultured-meats-lab-grown-dairy-is-attracting-investors?sref=Pq44sqaq>
- 15 Shelby Vittek. « We Won't Be the Only Ones Eating Lab-Grown Meat – Our Pets Will Too ». *Smithsonian* (2021), <https://www.smithsonianmag.com/innovation/we-wont-be-only-ones-eating-lab-grown-meat-our-pets-will-too-180977559/>
- 16 Josh Peters, « Inside BIOMILQ: A Cell Ag Company Growing Breastmilk From Isolated Human Mammary Cells ». *New Harvest* (2021), <https://new-harvest.org/biomilq-announces-cultured-breastmilk/>
- 17 Joe Fassler. « Lab-grown meat is supposed to be inevitable. The science tells a different story ». *The Counter* (2021), <https://thecounter.org/lab-grown-cultivated-meat-cost-at-scale/>
- 18 Aryn Baker. « China's New 5-Year Plan is a Blueprint for the Future of Meat ». *Time* (2022), <https://time.com/6143109/china-future-of-cultivated-meat/>; Sue Surkes. « China makes massive investment in Israeli lab meat technology ». *The Times of Israel* (2017), <https://www.timesofisrael.com/china-makes-massive-investment-in-israeli-lab-meat-technology/>
- 19 Vanessa Bates Ramirez. « New Cultured Meat Factory Will Churn Out 5,000 Bioreactor Burgers a Day ». *Singularity Hub* (2021), <https://singularityhub.com/2021/07/02/a-cultured-meat-factory-in-israel-will-churn-out-5000-bioreactor-burgers-a-day/>
- 20 Pritesh Vyas *et al.* « Nutrigenomics: Advances, Opportunities and Challenges in Understanding the Nutrient-Gene Interactions ». *Current Nutrition & Food Science*, 2017, 13, 1-12, https://www.researchgate.net/publication/322695594_Nutrigenomics_Advances_Opportunities_and_Challenges_in_Understanding_the_Nutrient-Gene_Interactions
- 21 Kristin Kirkpatrick. « Do DNA-based diets work? » *Today* (2020), <https://www.today.com/health/do-personalized-diets-work-t183387>
- 22 Günseli Yalcinkaya. « Sushi Singularity makes a bespoke dinner based on your bodily fluids ». *Deezen* (2019), <https://www.deezen.com/2019/04/02/sushi-singularity-3d-printed-sushi-customised/>
- 23 Danielle Masterson. « Nestlé Health Science acquires personalized medicine platform ». *Nutraingredients* (2020), <https://www.nutraingredients-usa.com/Article/2020/01/08/Nestle-Health-Science-acquires-personalized-medicine-platform#>
- 24 Futurism. « Now You Can Create Customized Vitamins Based on Your Own DNA ». (2020), <https://futurism.com/custom-dna-vitamin-routine>
- 25 Katie Jennings. « How Human Genome Sequencing Went From \$1 Billion A Pop To Under \$1,000 ». *Forbes* (2020), <https://www.forbes.com/sites/katiejennings/2020/10/28/how-human-genome-sequencing-went-from-1-billion-a-pop-to-under-1000/?sh=176624428cea>
- 26 Kristin Houser. « New CRISPR tech could help us create superior crops of the future ». *Free Think* (2021), <https://www.freethink.com/technology/new-crispr-technology>

- 27 BBC, « Google reveals Mineral crop-inspecting robots ». (2020), <https://www.bbc.com/news/technology-54538849#:~:text=Google's%20parent%20company%2C%20Alphabet%2C%20has,over%20plants%20without%20disturbing%20them>
- 28 Sergio Cubero *et al.* « RobHortic: A Field Robot to Detect Pests and Diseases in Horticultural Crops by Proximal Sensing ». *Agriculture* 10 (7) 276, 2020, <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/7/276/htm>
- 29 Victor Tangermann. « Watch a robot dog herd sheep on a New Zealand farm ». *Futurism* (2020), <https://futurism.com/the-byte/robot-dog-herd-sheep-new-zealand>
- 30 C. Williams. « Farm to Data Table: John Deere and Data in Precision Agriculture ». *Digital Initiative* (2019), <https://digital.hbs.edu/platform-digit/submission/farm-to-data-table-john-deere-and-data-in-precision-agriculture/>; John Deere. « Precision AG – The Digital Ecosystem Explained ». *YouTube* (2020), <https://www.youtube.com/watch?v=npLSJh6X63g>
- 31 Marla Keene. « How Technology is Changing Traceability and Safety ». *Food Industry Executive* (2021), <https://foodindustryexecutive.com/2021/01/how-technology-is-changing-traceability-and-safety/>
- 32 Peter Grad. « AI-controlled vertical farms promise revolution in food production ». *TechXplore* (2020), <https://techxplore.com/news/2020-12-ai-controlled-vertical-farms-revolution-food.html>
- 33 Agency for Science, Technology and Research. « From Lab to Table: Towards Singapore's 30 by 30 Food Security Goal ». (2020), <https://www.a-star.edu.sg/News/a-star-news/news/features/from-lab-to-table-towards-singapore-s-30-by-30-food-security-goal>
- 34 Clarisa Diaz. « Three ways Singapore is designing urban farms to create food security. » *Quartz* (2021), <https://qz.com/1985399/3-ways-singapore-is-creating-food-security-with-urban-farms/>
- 35 Jon Cohen. « To feed its 1.4 billion, China bets big on genome editing of crops ». *Science* (2019), <https://www.science.org/content/article/feed-its-14-billion-china-bets-big-genome-editing-crops>
- 36 Science Daily. « Hotter, drier, CRISPR: editing for climate change ». (2021), <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/03/210301112331.htm>
- 37 Agnieszka de Sousa. « Nestle Eyes Lab-Grown Meat Market to Tap Future Growth ». *Bloomberg* (2021), <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-12/nestle-eyes-lab-grown-meat-market-to-tap-future-growth?sref=Pq44sqaq>; Anna Starostinetskaya. « Nestlé is First Major Food Company to get Behind Lab-Grown Meat. Is That a Good Thing? ». *VegNews* (2021), <https://vegnews.com/2021/7/nestle-lab-grown-meat>
- 38 Peter Grad. « AI-controlled vertical farms promise revolution in food production ». *TechXplore* (2020), <https://techxplore.com/news/2020-12-ai-controlled-vertical-farms-revolution-food.html>
- 39 Rethink X. « Rethinking Food and Agriculture ». <https://www.rethinkx.com/food-and-agriculture#food-and-agriculture-download>
- 40 Carmen M. Reinhart et Rob Subbaraman. « How can we prevent a COVID-19 food crisis? » *Forum économique mondial* (2020), <https://www.weforum.org/agenda/2020/05/preventing-a-covid-19-food-crisis/>

- 41 Hannah Ritchie. « Half of the world's habitable land is used for agriculture ». Our World in Data (2019), <https://ourworldindata.org/global-land-for-agriculture>
- 42 Phil Lempert. « Food Trends Forecast 2021: Being Healthy In A Post COVID-19 World ». *Forbes* (2020), <https://www.forbes.com/sites/phillemper/2020/10/19/food-trends-2021-staying-healthy-in-a-post-covid-19-world/?sh=6bacb853485b>
- 43 Aaron M. Shew *et al.*, « CRISPR versus GMOs: Public acceptance and valuation ». *19 Global Food Security* 71 (2018), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211912418300877>
- 44 Tekla S. Perry. « Where Are the AI Jobs? Look to a Farm or a Forest ». *IEEE Spectrum* (2021), <https://spectrum.ieee.org/ai-jobs-farm-forest>
- 45 Annabel Slater. « AI and The Future of Flavour ». *Food unfolded* (2021), <https://www.foodunfolded.com/article/ai-and-the-future-of-flavour>; Patrick Kulp. « Sony's New Recipe AI Aims to Find Cutting-Edge Flavor Combinations ». *ADWEEK* (2021), <https://www.adweek.com/brand-marketing/sonys-new-recipe-ai-aims-to-find-cutting-edge-flavor-combinations/>
- 46 Mikael Davidsson. « Using machine learning to generate recipes that actually work ». *Towards data science* (2021), <https://towardsdatascience.com/using-machine-learning-to-generate-recipes-that-actually-works-b2331c85ab72>
- 47 Flora Southey. « Firmenich creates world's first flavour by artificial intelligence ». *Food Navigator* (2020), <https://www.foodnavigator.com/Article/2020/10/05/Firmenich-creates-world-s-first-flavour-by-artificial-intelligence#:~:text=In%20an%20industry%20first%2C%20the,in%20plant%2Dbased%20meat%20alternatives>
- 48 Wikipédia. « Appellation d'origine », https://fr.wikipedia.org/wiki/Appellation_d%27origine
- 49 Shanna H. Swan. « Reproductive Problems in Both Men and Women Are Rising at an Alarming Rate ». *Scientific American* (2021), <https://www.scientificamerican.com/article/reproductive-problems-in-both-men-and-women-are-rising-at-an-alarming-rate/>
- 50 Santé Canada. « Une ordonnance pour le Canada : l'assurance-médicaments pour tous ». (2019) https://www.canada.ca/fr/sante-canada/organisation/a-propos-sante-canada/mobilisation-publique/organismes-consultatifs-externes/mise-en-oeuvre-regime-assurance-medicaments/rapport-final.html#_2.5
- 51 OMS. « Personnels de santé ». https://www.who.int/fr/health-topics/health-workforce#tab=tab_1
- 52 Science Table COVID-19 Advisory for Ontario. « Burnout in Hospital-based Healthcare Workers during COVID-19 ». (2021), <https://covid19-sciencetable.ca/sciencebrief/burnout-in-hospital-based-healthcare-workers-during-covid-19/>
- 53 Institut canadien d'information sur la santé. « Foire aux questions sur le Registre canadien des insuffisances et des transplantations d'organes ». <https://www.cihi.ca/fr/faq/foire-aux-questions-sur-le-registre-canadien-des-insuffisances-et-des-transplantations-dorganes>
- 54 Lucas Carolo. « 3D Printed Organs: The Most Promising Projects in 2021 ». *ALL3DP* (2021), https://all3dp.com/2/most-promising-3d-printed-organs-for-transplant/?utm_source=push

- 55 Emily Mullin. « The First Pig-to-Human Organ Transplants Could Happen This Year ». *Future Human* (2021), <https://futurehuman.medium.com/the-first-pig-to-human-organ-transplants-could-happen-this-year-a538ad0c5536>
- 56 Albertina Torsoli. « European Regulators Approve Sales of First Artificial Heart ». Bloomberg (2020), https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-24/france-s-carmat-soars-as-artificial-heart-hopes-become-reality?fbclid=IwAR1JJ1VInJaTZI1albOoJxJM_sPJ2Rux_7erBSTO6P5DTbTa2_71G4c3QgQ&sref=Pq44sqaq
- 57 Science Daily. « Flexible and biodegradable electronic blood vessels ». (2020), <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/10/201001113634.htm>
- 58 SciTechDaily. « New Electronic Skin Can React to Pain Like Human Skin – For Better Prosthetics and Smarter Robots ». (2020), <https://scitechdaily.com/new-electronic-skin-can-react-to-pain-like-human-skin-for-better-prosthetics-and-smarter-robots/>
- 59 Chris Young. « Wirelessly Rechargeable Soft Brain Implant Could Cure Brain diseases ». *Interesting Engineering* (2021), <https://interestingengineering.com/wireless-rechargeable-soft-brain-implant-could-cure-brain-diseases>
- 60 Isobel Asher Hamilton. « Elon Musk's AI brain chip company Neuralink is doing its first live tech demo on Friday. Here's what we know so far about the wild science behind it ». *Insider* (2020), <https://www.businessinsider.com/we-spoke-to-2-neuroscientists-about-how-exciting-elon-musks-neuralink-really-is-2019-9>
- 61 Daniel Oberhaus. « A Brain Implant Restored This Man's Motion and Sense of Touch ». *Wired* (2020), <https://www.wired.com/story/a-brain-implant-restored-this-mans-motion-and-sense-of-touch/>
- 62 Clive Cookson. « Electrical brain implants: a new way to treat depression? ». *Financial Times* (2021), <https://www.ft.com/content/b255322b-eb91-4898-aa79-e29d51794b73>
- 63 Michael S. Beauchamp et al. « Dynamic Stimulation of Visual Cortex Produces Form Vision in Sighted and Blind Humans ». *181 Cell* 4, 774, 2020, [https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(20\)30496-7?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0092867420304967%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(20)30496-7?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0092867420304967%3Fshowall%3Dtrue)
- 64 Mazhar Adli. « The CRISPR tool kit for genome editing and beyond ». *Nature* (2018), <https://www.nature.com/articles/s41467-018-04252-2>
- 65 Steven Levy. « Could CRISPR be Humanity's Next Virus Killer? ». *Wired* (2020), <https://www.wired.com/story/could-crispr-be-the-next-virus-killer/>
- 66 Medical Xpress. « Revolutionary CRISPR-based genome editing system treatment destroys cancer cells ». (2020), https://medicalxpress.com/news/2020-11-revolutionary-crispr-based-genome-treatment-cancer.amp?__twitter_impression=true&fbclid=IwAR09I5LafBLz7iYRxbnp-AnR4Vhb4-rtn7XS5gaMT1Ecf0QmU3rTAyb2zhg
- 67 Samira Kiani. « CRISPR can help combat the troubling immune response against gene therapy ». *The Conversation* (2020), https://theconversation.com/crispr-can-help-combat-the-troubling-immune-response-against-gene-therapy-145367?utm_medium=Social&utm_source=Facebook&fbclid=IwAR1sXhHzzqJ-i5nriJlaketDF2rU9RCrOjv_nr09IyIZRqtnlYZYTeDHNfg#Echobox=1599174768

- 68 John Cumbers. « Could CRISPR Eradicate Acne? ». *Forbes* (2021), <https://www.forbes.com/sites/johncumbers/2021/01/11/could-crispr-eradicate-acne/?sh=4fb8352d1f10>
- 69 Heidi Ledford. « CRISPR treatment inserted directly ». *Nature* (2020), <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00655-8>
- 70 Eva Frederick. « An on-off switch for gene editing ». Whitehead Institute (2021), <https://wi.mit.edu/news/switch-gene-editing>
- 71 Cary Funk *et al.* « Biotechnology Research Viewed With Caution Globally, but Most Support Gene Editing for Babies To Treat Disease ». Pew Research Center (2020), https://www.pewresearch.org/science/2020/12/10/biotechnology-research-viewed-with-caution-globally-but-most-support-gene-editing-for-babies-to-treat-disease/?fbclid=IwAR3yWJvEUKntu52PkIQVNsFpQx_vjHO5-Qtmjp5PnD3uYFVYmpKIXV2dial
- 72 Emily Mullin. « Men Are Twice as Likely to Support Genetically Engineered Babies Than Women ». *Future Human* (2020), <https://futurehuman.medium.com/men-are-twice-as-likely-to-support-genetically-engineered-babies-than-women-7a7f3507ef5>
- 73 OMS. « Emerging technologies ». <https://www.who.int/teams/health-ethics-governance/emerging-technologies/expert-advisory-committee-on-developing-global-standards-for-governance-and-oversight-of-human-genome-editing>
- 74 Amy Guttman. « How Covid Has Sped Up The Future In Healthcare ». *Forbes* (2021), <https://www.forbes.com/sites/amyguttman/2021/03/24/how-covid-has-sped-up-the-future-in-healthcare/?sh=b1360312ad35>
- 75 Edd Gent. « This New Smartphone-based DNA Test Could Help Track Disease in Real Time ». *SingularityHub* (2020), <https://singularityhub.com/2020/04/27/this-new-smartphone-based-dna-test-could-help-track-disease-in-real-time/>
- 76 Abdullahi Umar Ibrahim *et al.* « Futuristic CRISPR-based biosensing in the cloud and internet of things era: an overview ». *Multimedia Tools and Applications* (2020), <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-020-09010-5>
- 77 Futurism. « These Advanced Probiotics Are Designed to Promote GI Health ». (2020), <https://futurism.com/seed-advanced-probiotics>
- 78 James Kingsland. « Gut bacteria can help rebuild the immune system ». *MedicalNewsToday* (2020), <https://www.medicalnewstoday.com/articles/gut-bacteria-can-help-rebuild-the-immune-system>
- 79 SciTechDaily. « Breakthrough Understanding of Limb and Organ Regeneration – Closer to the Development of Regenerative Medicine Therapies ». (2022), <https://scitechdaily.com/breakthrough-understanding-of-limb-and-organ-regeneration-closer-to-the-development-of-regenerative-medicine-therapies/>
- 80 Technology Networks. « New Type of Kidney Organoid Developed ». (2021), <https://www.technologynetworks.com/tn/news/new-type-of-kidney-organoid-developed-349823>

- 81 Eman Ahmed et Mahsa Shabani. « DNA Data Marketplace: An Analysis of the Ethical Concerns Regarding the Participation of the Individuals ». 10 *Front Genet* 1107, 2019, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6844291/>
- 82 Helen Albert. « How Blockchain Companies Are Helping Us Protect Our Genomic Data ». Labiotech (2021), <https://www.labiotech.eu/in-depth/blockchain-control-genomic-data/>
- 83 Camilo La Cruz. « Who owns your DNA? You should, according to this biodata bill of rights ». Fast Company (2020), <https://www.fastcompany.com/90460304/who-owns-your-dna-you-should-according-to-this-biodata-bill-of-rights>
- 84 Andrew Joseph. « Sequencing whole genomes helps diagnose far more rare diseases, study shows ». Stat (2021), <https://www.statnews.com/2021/11/10/sequencing-whole-genomes-helps-diagnose-more-rare-diseases/>
- 85 Gareth Macdonald. « COVID-19 driven CDMO investments to benefit wider sector ». BioProcess International (2022), <https://bioprocessintl.com/bioprocess-insider/global-markets/covid-19-driven-cdmo-investments-to-benefit-wider-sector/>
- 86 Troy Segal. « Biotech vs. Pharmaceuticals: What's the Difference? ». Investopedia (2021), <https://www.investopedia.com/ask/answers/033115/what-difference-between-biotechnology-company-and-pharmaceutical-company.asp#citation-18>
- 87 Kristen V Brown. « All Those 23andMe Spit Tests Were Part of a Bigger Plan ». *Bloomberg Businessweek* (2021), <https://www.bloomberg.com/news/features/2021-11-04/23andme-to-use-dna-tests-to-make-cancer-drugs?sref=Pq44sqaq>
- 88 Françoise Baylis and al. « Human Germline and Heritable Genome Editing: The Global Policy Landscape. » *The CRISPR Journal*. Oct 2020. 365-377. <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/crispr.2020.0082>
- 89 Hashem Al-Ghali. « CRISPR gene-editing at home ». Youtube (2019), <https://www.youtube.com/watch?v=0OTQtIHRPWc>
- 90 Wikipédia. « Eugénisme », <https://fr.wikipedia.org/wiki/Eug%C3%A9nisme>
- 91 Elizabeth Fernandez. « Yes, People Can Edit The Genome In Their Garage. Can They Be Regulated? ». *Forbes* (2019), <https://www.forbes.com/sites/fernandezelizabeth/2019/09/19/yes-people-can-edit-the-genome-in-their-garage-can-they-be-regulated/?sh=292f7a60768b>; Izabelle Kaminska. « Bioterror: the dangers of garage scientists manipulating DNA ». *Financial Times* (2021), <https://www.ft.com/content/9ac7ffc0-1468-4dc7-88dd-1370ead42371>
- 92 Antonio Regalado. « The DIY designer baby project funded with Bitcoin. » *MIT Technology Review* (2019), <https://www.technologyreview.com/2019/02/01/239624/the-transhumanist-diy-designer-baby-funded-with-bitcoin/>
- 93 Science Daily, « Study encourages cautious approach to CRISPR therapeutics ». (2021), <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/11/211111080332.htm>
- 94 Martin Tisne. « Collective data rights can stop big tech from obliterating privacy ». *MIT Technology Review* (2021), <https://www.technologyreview.com/2021/05/25/1025297/collective-data-rights-big-tech-privacy/>

- 95 Sara Reardon. « Can lab-grown brains become conscious? ». *Nature* (2020), <https://www.nature.com/articles/d41586-020-02986-y>
- 96 Nora S. Vaage. « What Ethics for Bioart? ». 1 *NanoEthics* 2016, <https://www.springerprofessional.de/en/what-ethics-for-bioart/7781664>
- 97 Think Automation, « The AI black box problem ». <https://www.thinkautomation.com/bots-and-ai/the-ai-black-box-problem/>; Ben Dickson. « The dangers of trusting black-box machine learning ». TechTalks (2020), <https://bdtechtalks.com/2020/07/27/black-box-ai-models/>
- 98 Tekla S. Perry. « Scientists Can Work From Home When the Lab is in the Cloud ». IEEE Spectrum (2020), <https://spectrum.ieee.org/scientists-work-from-home-lab-cloud>
- 99 Futurism. « Bionic Eye Patients Are Going Blind Again After Manufacturer Decides They're Obsolete ». 2022, <https://futurism.com/neoscope/bionic-eye-implants-expire>; IEEE. « Their Bionic Eyes Are Now Obsolete And Unsupported ». 2022, <https://spectrum.ieee.org/bionic-eye-obsolete>
- 100 Nature. « License CRISPR patents for free to share gene editing globally ». 2021, <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02420-x>
- 101 Sylvain Aubry *et al.*, « Bringing access and benefit sharing into the digital age ». 4:1 *Plants, People, Planet* (2021), <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp3.10186>
- 102 Convention sur la diversité biologique. « Digital Sequence Information on Genetic Resources ». 2021, <https://www.cbd.int/dsi-gr/>
- 103 Adam B. Smith. « 2010-2019: A Landmark decade of U.S. billion-dollar weather and climate disasters ». Climate.gov (2020), <https://www.climate.gov/news-features/blogs/beyond-data/2010-2019-landmark-decade-us-billion-dollar-weather-and-climate>
- 104 World Weather Attribution. « Western North American extreme heat virtually impossible without human-caused climate change ». 2021, <https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/>
- 105 Tim Human. « Investors target 1,320 companies over disclosure of environmental risks ». Corporate Secretary (2021), <https://www.corporatesecretary.com/articles/esg/32619/investors-target-1320-companies-over-disclosure-environmental-risks>
- 106 Brittany Enzmann. « Gene Drives Explained: How to Solve Problems with CRISPR ». Synthego, <https://www.synthego.com/blog/gene-drive-crispr>
- 107 Amy Woodyatt. « Scientists create glow-in-the-dark plants ». CNN (2020), <https://edition.cnn.com/2020/04/27/world/glowing-plants-intl-scli-scn/index.html>
- 108 Science Daily. « Researchers develop plant anobionic sensor to monitor arsenic levels in soil ». 2020, <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/12/201202114513.htm>
- 109 MaryAnn Labant. « CRISPR Targets Climate Change » *Genetic Engineering & Biotechnology News* (2020), <https://www.genengnews.com/insights/crispr-targets-climate-change/>

- 110 Revive & Restore, Woolly Mammoth Revival, <https://reviverestore.org/projects/woolly-mammoth/>
- 111 Brittany Enzmann. « Gene Drives Explained: How to Solve Problems with CRISPR ». Synthego <https://www.synthego.com/blog/gene-drive-crispr>
- 112 Genetic Biocontrol. « Genetic Biocontrol of Invasive Rodents ». <https://www.geneticbiocontrol.org/>; John L. Teem *et al.* « Genetic Biocontrol for Invasive Species ». *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (2020), <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.00452/full>
- 113 Marte Rusten. « Restoring ecosystems through synthetic biology » DNV, <https://www.dnv.com/to2030/technology/restoring-ecosystems-through-synthetic-biology.html>
- 114 Sandee LaMotte. « 750 million genetically engineered mosquitoes approved for release in Florida Keys ». CTV News (2020), <https://www.ctvnews.ca/sci-tech/750-million-genetically-engineered-mosquitoes-approved-for-release-in-florida-keys-1.5071851>
- 115 Nicholas Kachel. « How synthetic jellyfish could be used to clean up toxic marine spills ». CSIROscope (2019), <https://blog.csiro.au/how-synthetic-jellyfish-could-be-used-to-clean-up-toxic-marine-spills/>
- 116 Anne Trafton. « Inspired by Kombucha tea, engineers create living materials » MIT News (2021), <https://news.mit.edu/2021/living-materials-kombucha-0111#:~:text=To%20demonstrate%20the%20potential%20of.found%20as%20an%20environmental%20pollutant.&text=You%20just%20need%20sugar%2C%20you.of%20Syn%2DSCOBY%20mother.%E2%80%9D>
- 117 John Cumbers. « Bill Gates – Backed Ginkgo Bioworks Has A New \$40 Million Spinout Using Synthetic Biology To Clean Wastewater ». *Forbes* (2020), <https://www.forbes.com/sites/johncumbers/2020/10/28/bill-gates-backed-ginkgo-bioworks-has-a-new-40-million-spin-out-using-synthetic-biology-to-clean-wastewater/?sh=2f48f4251463>
- 118 Mirage. « Lab 3D-prints microbes to enhance biomaterials ». Mirage News (2021), <https://www.miragenews.com/lab-3d-prints-microbes-to-enhance-509388/>
- 119 University of Texas at Austin. « Genetic potential of oil-eating bacteria from the BP oil spill decoded ». Science Daily (2016), <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/05/160509115556.htm>
- 120 Adam Piore. « Carbon-Sucking Bionic Weeds Are New Front in Climate Change War ». *Bloomberg Businessweek* (2020), <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-09-25/climate-change-biologists-develop-carbon-sucking-bionic-plants?sref=Pq44sqag>
- 121 Kara Carlson. « Startup Hypergiant's new weapon against climate change: Algae-growing cubes ». *The Dallas Morning News* (2019), <https://www.dallasnews.com/business/entrepreneurs/2019/09/18/startup-hypergiant-s-new-weapon-against-climate-change-algae-growing-cubes/>
- 122 Marthe de Ferrer. « Scientists have taught spinach to send emails and it could warn us about climate change ». EuroNews (2021), <https://www.euronews.com/green/2021/02/01/scientists-have-taught-spinach-to-send-emails-and-it-could-warn-us-about-climate-change>

- 123 Loyal Liverpool. « CRISPR gene editing used to store data in DNA inside living cells ». *New Scientist* (2021), <https://www.newscientist.com/article/2264383-crispr-gene-editing-used-to-store-data-in-dna-inside-living-cells/>
- 124 Microsoft. « DNA Storage ». Consulté le 14 avril 2022. <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/dna-storage/>
- 125 ETH Zurich. « Storing data in everyday objects ». *Science Daily* (2019), <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/12/191209110529.htm>
- 126 Emily Waltz. « Portable DNA Sequencer MinION Helps Build the Internet of Living Things ». *IEEE Spectrum* (2016), <https://spectrum.ieee.org/portable-dna-sequencer-minion-help-build-the-internet-of-living-things>
- 127 OCDE, « Financer la biodiversité, agir pour l'économie et les entreprises ». OCDE (2019), <https://www.oecd.org/environment/resources/biodiversity/Rapport-G7-financer-la-biodiversite-agir-pour-l'economie-et%20les-entreprises.pdf>
- 128 Helen Santoro. « These tiny microbes are munching away at plastic waste in the ocean ». *Science* (2019), <https://www.science.org/content/article/these-tiny-microbes-are-munching-away-plastic-waste-ocean>
- 129 Maeve Campbell. « Mysterious bacteria found in the Arctic can break down oil and diesel ». *EuroNews* (2021), <https://www.euronews.com/green/2021/08/16/mysterious-bacteria-found-in-the-arctic-can-break-down-oil-and-diesel>
- 130 London Institute of Medical Sciences. « Sustainable light achieved in living plants ». *Phys.org* (2020), <https://phys.org/news/2020-04-sustainable.html>
- 131 Rutgers University. « Climate change may cut soil's ability to absorb water ». *Science Daily* (2019), <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/09/190911151204.htm>
- 132 Daisy Dunne. « Geoengineering carries large risks for the natural world, studies show ». *Carbon Brief* (2018), <https://www.carbonbrief.org/geoengineering-carries-large-risks-for-natural-world-studies-show>
- 133 Chloe V. Robinson et Mehrdad Hajibabaei. « Healthy rivers: Communities use DNA tool to keep tabs on freshwater quality ». *The Conversation* (2021), <https://theconversation.com/healthy-rivers-communities-use-dna-tool-to-keep-tabs-on-freshwater-quality-152477>
- 134 Jennifer Garbmeier. « New \$15 million NSF grant launches Ohio State Imageomics Institute ». *Ohio State News* (2021), <https://news.osu.edu/new-15-million-nsf-grant-launches-ohio-state-imageomics-institute/>
- 135 eBird. Consulté le 14 avril 2022. <https://ebird.org/home>
- 136 iNaturalist. Consulté le 14 avril 2022. <https://www.inaturalist.org/>
- 137 Hélène Morion et Anna Papadopoulou. « How we can detect pretty much anything. » *TEDEd* (2021), https://www.youtube.com/watch?v=bdwU_ZPk1cY

- 138 Jason Rhys Parry. « Decision Trees ». *Real Life Mag* (2020), <https://reallifemag.com/decision-trees/>
- 139 Association canadienne de normalisation. « Environmental DNA Standardization Needs for Fish and Wildlife Population Assessments and Monitoring ». 2019, <https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-Group-Research-Environmental-DNA.pdf>
- 140 Génome Canada, « BIOSCAN-Canada ». Consulté le 14 avril 2022. <https://www.genomecanada.ca/fr/bioscan-canada>
- 141 Rene Ebersole. « How eDNA is revolutionizing the tracking of elusive species. It may soon be used to fight wildfire trafficking ». *Washington Post* (2021), https://www.washingtonpost.com/science/edna-finding-endangered-species/2021/04/30/43734ef8-872e-11eb-8a8b-5cf82c3dffe4_story.html
- 142 Christina Agapakis. « What Happens when biology becomes technology ». Ted (2020), https://www.ted.com/talks/christina_agapakis_what_happens_when_biology_becomes_technology
- 143 Christina Agapakis. « Is DNA Hardware or Software? ». Grow (2020), <https://www.growbyginkgo.com/2020/06/29/is-dna-hardware-or-software/>
- 144 Michael Levin. « The electrical blueprints that orchestrate life ». Ted (2020), https://www.ted.com/talks/michael_levin_the_electrical_blueprints_that_orchestrate_life#t-1163181
- 145 Stephanie Hunter. « Could CRISPR be Used to Revive Extinct Species ». *Azo Life Sciences* (2020), <https://www.azolifesciences.com/article/Could-CRISPR-be-Used-to-Revive-Extinct-Species.aspx>
- 146 Jennifer Kahn. « The Gene Drive Dilemma: We Can Alter Entire Species, but Should We? ». *The New York Times* (2020), <https://www.nytimes.com/2020/01/08/magazine/gene-drive-mosquitoes.html>
- 147 Seth L. Shipman et al. « CRISPR-Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria ». *Nature* (2017), https://www.nature.com/articles/nature23017.epdf?sharing_token=OTEVrbQd-jpBg63iAoGACdRgNOjAjWel9jnR3ZoTv0NB3FKKhpOY5Sp-F2_6qiaWaHEu3x2e9x1GKDWP58vIh311XmSIHiFHRC-ldYoYQz95ayAIDF1OIfNGBQr7Fbb_Y_2aJyNB7-NltatNqbJjDBI8oBJ9OCbRJEXtEtrWSSzOC_xznqSnEszgiplyN4Zu18Vq_8WlUOUaF7B2847A%3D%3D&tracking_referrer=spectrum.ieee.org
- 148 Convention sur la diversité biologique. « Digital Sequence Information On Genetic Resources ». (2021), <https://www.cbd.int/dsi-gr/>
- 149 Sylvain Aubry. « The Future of Digital Sequence Information for Plant Genetic Resources for Food and Agriculture ». *Frontiers in Plant Science* (2019), <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.01046/full>
- 150 Lindsey Van Ness. « DNA Databases Are Boon to Police But Menace to Privacy, Critics Say ». PEW (2020), <https://www.pewtrusts.org/en/research-and-analysis/blogs/stateline/2020/02/20/dna-databases-are-boon-to-police-but-menace-to-privacy-critics-say>
- 151 Antonio Regalado. « China's BGI says it can sequence a genome for just \$100 ». *MIT Technology Review* (2020), <https://www.technologyreview.com/2020/02/26/905658/china-bgi-100-dollar-genome/>

- 152 Thor Benson. « DNA Databases in the U.S. and China Are Tools of Racial Oppression ». IEEE Spectrum (2020), <https://spectrum.ieee.org/dna-databases-in-china-and-the-us-are-tools-of-racial-oppression>
- 153 James Leibold. « Genomic surveillance: inside China's DNA dragnet ». ASPI (2020), <https://www.aspistrategist.org.au/genomic-surveillance-inside-chinas-dna-dragnet/>
- 154 Sui-Lee Wee et Paul Mozur. « China Uses DNA to Map Faces, With Help From the West ». *The New York Times* (2021), <https://www.nytimes.com/2019/12/03/business/china-dna-uyghurs-xinjiang.html>
- 155 Pfizer. « How Finland's Unique Genetic Heritage Is Being Used to Study the Links Between Genes and Diseases ». <https://www.pfizer.com/health-tomorrow/how-finland%E2%80%99s-unique-genetic-heritage-being-used-study-links-between-genes-and>
- 156 Brishette Mendoza et Amadou Diallo. « The Best DNA Testing Kit ». *The New York Times* (2021), <https://www.nytimes.com/wirecutter/reviews/best-dna-test/>
- 157 Eric Ravenscraft. « How to Protect Your DNA Data Before and After Taking an at-Home Test ». *The New York Times* (2019), <https://www.nytimes.com/2019/06/12/smarter-living/how-to-protect-your-dna-data.html>
- 158 Kashmir Hill et Heather Murphy. « Your DNA Profile is Private? A Florida Judge Said Otherwise ». *The New York Times* (2019), <https://www.nytimes.com/2019/11/05/business/dna-database-search-warrant.html>
- 159 Zac Ntim. « 14 years after a sexual assault in Tampa, a man has been charged with rape because he entered his own DNA into a genealogy database ». Insider (2021), <https://www.insider.com/tampa-bay-police-use-genealogy-testing-database-solve-rape-case-2021-6>
- 160 Andy Fell. « Genetic Hacking is a risk of online genealogy ». Futurity (2019), <https://www.futurity.org/genetic-hacking-dna-tests-privacy-2191472-2/>
- 161 Tomohiro Takano. « Open-Source DNA Database: What they are and How to Use Them ». Genome Link (2019), <https://blog.genomelink.io/posts/open-source-dna-databases>
- 162 Sharon Weinberger. « Inside the massive (and unregulated) world of surveillance tech ». Ted (2020), https://www.ted.com/talks/sharon_weinberger_inside_the_massive_and_unregulated_world_of_surveillance_tech#t-124359
- 163 Antonio Regalado. « On Patrol with America's Top Bioterror Cop » MIT Technology Review (2016), <https://www.technologyreview.com/2016/10/20/107397/on-patrol-with-americas-top-bioterror-cop/>
- 164 Rachel Kraus. « Injecting this sensor under your skin could prevent future pandemics ». Mashable (2020), <https://mashable.com/article/under-the-skin-sensor-flu-pandemic-coronavirus?europa=true>
- 165 Emily Waltz. « DARPA Seeks Pathogen Detectors That Use CRISPR to Run 1,000 Tests at Once ». IEEE Spectrum (2019), <https://spectrum.ieee.org/darpa-wants-scifi-pathogen-detectors>

- 166 Dylan Malyasov. « U.S. Army discloses development of biosensors for future warfighter ». Defense Blog (2019), <https://defence-blog.com/u-s-army-discloses-development-of-biosensors-for-future-warfighter/>
- 167 Sarah Scales. « How Do We Know If a Virus Is Bioengineered? ». *Future Human* (2020), <https://futurehuman.medium.com/how-do-we-know-if-a-virus-is-bioengineered-541ff6f8a48f>
- 168 Vivek Wadhwa. « The Genetic Engineering Genie Is Out of the Bottle ». *Foreign Policy* (2020), <https://foreignpolicy.com/2020/09/11/crispr-pandemic-gene-editing-virus/>
- 169 Margaret Talbot. « The Rogue Experimenters ». *The New Yorker* (2020), <https://www.newyorker.com/magazine/2020/05/25/the-rogue-experimenters>
- 170 Kostas Vavitsas. « Biosecurity Is Synthetic Biology's Most Crucial Ally ». *Labiotech* (2020), <https://www.labiotech.eu/in-depth/biosecurity-synthetic-biology/>
- 171 Sigal Samuel. « Is it time to regulate biohacking? California thinks so ». *Vox* (2019), <https://www.vox.com/future-perfect/2019/8/13/20802059/california-crispr-biohacking-illegal-josiah-zayner>
- 172 Asha M. George. « The National Security Implications of Cyberbiosecurity ». *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (2019), <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2019.00051/full>
- 173 Kai Kupferschmidt. « How Canadian researchers reconstituted an extinct poxvirus for \$100,000 using mail-order DNA ». *Science* (2017), <https://www.science.org/content/article/how-canadian-researchers-reconstituted-extinct-poxvirus-100000-using-mail-order-dna>
- 174 Wiley. « Making puffer fish toxin in a flask ». *Science Daily* (2020), <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/03/200306122458.htm>
- 175 Alyssa J. Forrest. « The Growing Threat of Agroterrorism and Strategies for Agricultural Defense ». *Liberty University* (2020), <https://digitalcommons.liberty.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2029&context=honors>
- 176 Frédéric Suffert et Ivan Sache. « Plant pathogens as agroterrorist weapons: Assessment of the threat for European agriculture and forestry ». *Food Security* (2009), https://www.researchgate.net/publication/226121097_Plant_pathogens_as_agroterrorist_weapons_Assessment_of_the_threat_for_European_agriculture_and_forestry
- 177 Elizabeth Culliford. « How political campaigns use your data ». *Reuters* (2020), <https://graphics.reuters.com/USA-ELECTION/DATA-VISUAL/yxmvjgojvr/>
- 178 Nicholas Thompson. « When Tech Knows You Better than You Know Yourself ». *Wired* (2018), <https://www.wired.com/story/artificial-intelligence-yuval-noah-harari-tristan-harris/>
- 179 Matthew Shaer. « The False Promise of DNA Testing ». *The Atlantic* (2016), <https://www.theatlantic.com/magazine/archive/2016/06/a-reasonable-doubt/480747/>
- 180 Tim Lau. « Predictive Policing Explained ». *Brennan Center for Justice* (2020), <https://www.brennancenter.org/our-work/research-reports/predictive-policing-explained>

- 181 Carrie Arnold. « The controversial company using DNA to sketch the faces of criminals ». *Nature* (2020), <https://www.nature.com/articles/d41586-020-02545-5>
- 182 Damon Simon. « How to Create a Biosecure Post-Pandemic House ». Property Onion (2020), <https://propertyonion.com/education/how-to-create-a-biosecure-post-pandemic-house/>
- 183 Varadaraj Velamoor et Emmanuel Persad. « Covid-19: Cultural perspectives ». *53 Asian J. Psychiatr* (2020), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7544596/>
- 184 IEC. « New standardization Evaluation Group (SEG) on Bio-digital convergence » Numéro du premier trimestre (2021), <https://www.iec.ch/issue-q1-2021>
- 185 Anita Sengupta. « Will Canadians Benefit from the Revolutionary Gene Editing Tool cRISPR-Cas9? ». *Revue de droit et santé de McGill* (2020), <https://mjlh.mcgill.ca/2020/02/11/will-canadians-benefit-from-the-revolutionary-gene-editing-tool-crispr-cas9/>
- 186 Rebecca Trager. « US biotechnology is key target for foreign cyberespionage ». *Chemistry World* (2018), <https://www.chemistryworld.com/news/us-biotechnology-is-key-target-for-foreign-cyberespionage/3009326.article>
- 187 Help Net Security, « Attacks on biotech and pharmaceutical industry escalate ». (2020), <https://www.helpnetsecurity.com/2020/11/20/attacks-biotech-pharmaceutical-industry-escalate/>
- 188 Richard Gray. « Why gene editing could create so many jobs ». BBC (2018), <https://www.bbc.com/worklife/article/20181003-why-gene-therapy-will-create-so-many-jobs>
- 189 Trushar R. Patel et Michael Hilary D'Souza. « Coronavirus is not a bioweapon – but bioterrorism is a real future threat ». *The conversation* (2020), <https://theconversation.com/coronavirus-is-not-a-bioweapon-but-bioterrorism-is-a-real-future-threat-135984>
- 190 Ludger Schuh. « Why Supply Chains are Getting More Complex – And Why This is not Necessarily a Problem ». *All Things Supply Chain* (2015), <https://www.allthingsupplychain.com/supply-chains-getting-complex-not-necessarily-problem/>
- 191 Deloitte. « 2020 Manufacturing industry outlook ». (2020), <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/energy-resources/2020-manufacturing-industry-outlook.pdf>
- 192 Horizons de politiques Canada. « La prochaine économie numérique ». (2019), <https://horizons.gc.ca/fr/2019/06/20/la-prochaine-economie-numerique/>
- 193 James Vincent. « Robotic lab assistant is 1,000 times faster at conducting research ». *The Verge* (2020), <https://www.theverge.com/21317052/mobile-autonomous-robot-lab-assistant-research-speed>
- 194 Tijana Radivojevic *et al.* « A machine learning Automated Recommendation Tool for synthetic biology ». *Nature* (2020), <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18008-4>
- 195 Global Biofoundries Alliance. « The Bio-Engineering Cycle ». Consulté le 14 avril 2022. <https://biofoundries.org/design-build-test-learn>

- 196 Gledon Doçi *et al.* « DNA Scanner: a web application for comparing DNA synthesis feasibility, price and turnaround time across vendors ». 5:1 *Synthetic Biology* 2020, <https://academic.oup.com/synbio/article/5/1/ysaa011/5892266>
- 197 John Cumbers. « Keep Warm This Winter With A Sweater Made From Brewed Protein, The Breakthrough Sustainable Material Inspired By Spider Silk ». *Forbes* (2020), <https://www.forbes.com/sites/johncumbers/2020/11/26/keep-warm-this-winter-with-a-sweater-made-from-brewed-protein-the-breakthrough-sustainable-material-inspired-by-spider-silk/?sh=70e668015982>
- 198 Kubi Sertoglu. « Scientists 3D print Biodegradable Leather Products Made of Silk ». 3D Printing Industry (2021), <https://3dprintingindustry.com/news/scientists-3d-print-biodegradable-leather-products-made-of-silk-189706/>
- 199 Justine Calma. « One day, your home could be made with mushrooms ». *The Verge* (2021), <https://www.theverge.com/22257120/mushroom-bricks-mycelium-sustainable-building-materials>
- 200 LABC, « Bioconcrete Heals itself. Could this be the future of construction? ». (2019), <https://www.labcwarranty.co.uk/blog/self-healing-concrete-is-bioconcrete-the-future/>
- 201 Robert Willows. « Designer Bacteria Could Fuel the Future with Cheap Hydrogen ». *Fuel Cells Works* (2019), <https://fuelcellsworks.com/news/designer-bacteria-could-fuel-the-future-with-cheap-hydrogen/>
- 202 Northwestern University. « Aquatic robot inspired by sea creatures walks, rolls, transports cargo ». *TechXplore* (2020), <https://techxplore.com/news/2020-12-aquatic-robot-sea-creatures-cargo.html>
- 203 Todd Bates-Rutgers. « Shape-shifting hydrogel mimics octopus skin ». *Futurity* (2021), https://www.futurity.org/3d-printed-hydrogel-shape-changing-2496352-2/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=3d-printed-hydrogel-shape-changing-2496352-2
- 204 Philip Ball. « Cells Form Into Xenobots on Their Own ». *Quanta Magazine* (2021), <https://www.quantamagazine.org/cells-form-into-xenobots-on-their-own-20210331/>
- 205 Mariana Labbate. « MU research puts green algae on the front line to replace fossil fuel ». *Missourian* (2020), https://www.columbiamissourian.com/innovations/agriculture/mu-research-puts-green-algae-on-the-front-line-to/article_feb45082-0f97-11ea-a959-ab9bd0d493dd.html
- 206 John J. Berge, Ph. D. « Growing A Bioeconomy: Flanders To Produce Fossil-Free Fuels, Chemicals, And Products ». *Sustain Europe* (2017), <https://www.sustaineurope.com/growing-the-bioeconomy-in-flanders--12042017.html>
- 207 *Genetic Engineering & Biotechnology News*. « Lygos Teams Up with U.S. DOE to Enhance Organic Acid Production ». (2021), <https://www.genengnews.com/topics/bioprocessing/lygos-teams-up-with-us-doe-to-enhance-organic-acid-production/>
- 208 Marcus Fairs. « Mycelium is part of the solution to carbon-negative buildings ». *Deezen* (2021), <https://www.deezen.com/2021/06/25/carbon-negative-buildings-mycelium-insulation-fire-proofing/>

- 209 Sai Balasubramanian. « What Is Precision Health & Why Are Organizations Suddenly Investing Billions In It? ». *Forbes* (2021), <https://www.forbes.com/sites/saibala/2021/06/30/what-is-precision-health--why-are-organizations-suddenly-investing-billions-in-it/?sh=2187b9be7c8b>
- 210 Jennifer Rankin. « Two miles of beer: Bruges pipe dream becomes a reality ». *The Guardian* (2016), <https://www.theguardian.com/world/2016/jul/08/bruges-pipe-dream-a-reality-beer-pipeline>
- 211 Kerry Higgs. « How the world embraced consumerism ». BBC (2021), <https://www.bbc.com/future/article/20210120-how-the-world-became-consumerist>
- 212 Nations Unies. « Objectif 12 : Établir des modes de consommation et de production durables ». <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/sustainable-consumption-production/>
- 213 Ellen MacArthur Foundation. « What is a circular economy? ». <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- 214 Maria Saxton. « Mycelium Fungi as a Building Material ». Rise (2020), <https://www.buildwithrise.com/stories/mycelium-fungi-as-a-building-material>
- 215 Amy Borrett. « The great catalyst: How Covid-19 accelerated digital transformation ». Tech Monitor (2020), <https://techmonitor.ai/boardroom/strategy/covid-19-digital-transformation>
- 216 Natalie Sherman. « Zoom sees sales boom amid pandemic ». BBC (2020), <https://www.bbc.com/news/business-52884782>
- 217 Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement. « COVID-19 has changed online shopping forever, survey show ». (2020), <https://unctad.org/news/covid-19-has-changed-online-shopping-forever-survey-shows>
- 218 Levi Sumagaysay. « The pandemic has more than doubled food-delivery apps' business. Now what? ». Market Watch (2020), <https://www.marketwatch.com/story/the-pandemic-has-more-than-doubled-americans-use-of-food-delivery-apps-but-that-doesnt-mean-the-companies-are-making-money-11606340169>
- 219 Cara Murez. « Health care after COVID-19: The rise of telemedicine ». Medical Xpress (2021), <https://medicalxpress.com/news/2021-01-health-covid-telemedicine.html#:~:text=The%20study%20found%20that%20use.more%20than%204000%25%20in%20April>
- 220 Centers for Disease Control and Prevention. « Contact Tracing for COVID-19 ». <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/php/contact-tracing/contact-tracing-plan/contact-tracing.html>
- 221 University of Utah Health. « mRNA vaccines slash risk of COVID-19 infection by 91 percent in fully vaccinated people, study finds ». Science Daily (2021), <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/07/210706180911.htm>
- 222 *Genetic Engineering & Biotechnology News*. « Sequencing and COVID-19: From Genomic epidemiology to Host Response ». (2021), <https://www.genengnews.com/sponsored/sequencing-and-covid-19-from-genomic-epidemiology-to-host-response/>

- 223 Ainsley Hawthorn. « The story behind the blistering speed of COVID-19 vaccine development ». CBC (2021), <https://www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/apocalypse-then-vaccine-speed-1.6008611>
- 224 Eleni Smitham et Amanda Glassman. « The Next Pandemic Could Come Soon and Be Deadlier ». Center for Global Development (2021), <https://www.cgdev.org/blog/the-next-pandemic-could-come-soon-and-be-deadlier>
- 225 Holly Else. « How a torrent of COVID science changed research publishing – in seven charts ». *Nature* (2020), <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03564-y>
- 226 Roderick Slavcev. « Researchers Develop COVID-19 Nasal Spray Vaccine ». Medical Expo, <https://trends.medicaexpo.fr/project-433310.html>
- 227 Qatar Foundation. « Global genomic study could lead to new therapies for COVID patients ». *Phys Org* (2021), <https://phys.org/news/2021-07-global-genomic-therapies-covid-patients.html>
- 228 Yun Kit Yeoh *et al.* « Gut microbiota composition reflects disease severity and dysfunctional immune responses in patients with COVID-19 ». *70 Gut* 698, 2021, <https://gut.bmj.com/content/70/4/698>
- 229 Ronald N. Kostoff *et al.* « The under-reported role of toxic substance exposures in the COVID-19 pandemic ». *Food and Chemical Toxicology*, 2020, <https://europepmc.org/article/MED/32805343>
- 230 Josh Lowe. « Treat pandemic preparedness as a national security issue, says former UK PM Tony Blair. ». *Global Government Forum* (2021), <https://www.globalgovernmentforum.com/pandemic-preparedness-national-security-issue-former-uk-pm-tony-blair/>
- 231 Sander van der Linden *et al.* « Inoculating Against Fake News About COVID-19 ». *Frontiers in Psychology* (2020), <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2020.566790/full>
- 232 David Robert Grimes. « How to take on Covid conspiracy theories ». *Financial Times* (2021), <https://www.ft.com/content/6660cb80-8c11-476a-b107-e0193fa975f9>
- 233 European External Action service, « My friend Thinks Bill Gates Will Microchip Humanity. Now What? ». 2021, https://eeas.europa.eu/headquarters/headquarters-homepage/93863/%E2%80%9Cmy-friend-thinks-bill-gates-will-microchip-humanity%E2%80%9D-now-what_en
- 234 Horizons de politiques Canada. « L'avenir de la création de sens ». 2021, <https://horizons.gc.ca/fr/2021/05/29/lavenir-de-la-creation-de-sens/>
- 235 Harry G. Broadman. « Protectionism Makes The Coronavirus Even More Lethal ». *Forbes* (2020), <https://www.forbes.com/sites/harrybroadman/2020/03/31/protectionism-makes-the-coronavirus-even-more-lethal/?sh=591314ff1413>
- 236 Polina Devitt. « Russia will suspend grain exports for 6 weeks if its quota runs out in mid-May ». *Reuters* (2020), <https://www.reuters.com/article/health-coronavirus-russia-grains-idUSL8N2C52>

- 237 Michael Corkery et David Yaffe-Bellany. « The Food Chain's Weakest Link: Slaughterhouses ». *The New York Times* (2020), <https://www.nytimes.com/2020/04/18/business/coronavirus-meat-slaughterhouses.html>
- 238 Singapour. « 30x30 Express – Ramping Up Local Production to Enhance Singapore's Food Security » Ministère de la Durabilité et de l'Environnement (2020), <https://www.mse.gov.sg/resource-room/category/2020-04-08-press-release-on-30-x-30-express/>
- 239 Chang Ai-Lien. « Singapore sets 30% goal for home-grown food by 2030 ». *The Straits Times* (2019), <https://www.straitstimes.com/singapore/spore-sets-30-goal-for-home-grown-food-by-2030>
- 240 ISDE, « Le gouvernement du Canada poursuit ses efforts pour renforcer le secteur canadien de la biofabrication ». CISION (2021), <https://www.newswire.ca/fr/news-releases/le-gouvernement-du-canada-poursuit-ses-efforts-pour-renforcer-le-secteur-canadien-de-la-biofabrication-894967364.html>
- 241 Anne Damiani. « France to give €7 billion boost to healthcare system ». Euroactiv (2021), <https://www.euractiv.com/section/health-consumers/news/france-to-give-e7-billion-boost-to-healthcare-system/>
- 242 Asher Mullard. « How COVID vaccines are being divvied up around the world ». *Nature* (2020), <https://www.nature.com/articles/d41586-020-03370-6>
- 243 Stuart Blume et Maurizia Mezza. « How the sun was privatized ». Eurozine (2021), <https://www.eurozine.com/how-the-sun-was-privatized/>
- 244 Mia Sheldon. « The difficulty of vaccinating the world against COVID-19 is enormous ». CBC (2021), <https://www.cbc.ca/news/world/global-vaccine-supply-1.6056550>
- 245 Paul Dyer. « Policy and Institutional responses to COVID-19: South Korea ». Brookings (2021), <https://www.brookings.edu/research/policy-and-institutional-responses-to-covid-19-south-korea/>
- 246 Gyuwon Jung *et al.* « Too Much Information: Assessing Privacy Risks of Contact Trace Data Disclosure on People With COVID-19 in South Korea ». *8 Front Public Health* 305, 2020, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7314957/>
- 247 Anna Wnuk *et al.* « The acceptance of Covid-19 tracking technologies: The role of perceived threat, lack of control, and ideological beliefs ». 15(9) *PLoS One*, 2020, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7485859/>
- 248 Annalies Winny. « In New Zealand, A Response to be Proud of ». *Global Health Now* (2021), <https://www.globalhealthnow.org/2021-04/new-zealand-response-be-proud>
- 249 Matthew Pelletier. « How PEI Set the Bar for the Canadian COVID-19 Response ». *Nouvelle* (2020), <https://nouvelle.news/2020/09/the-little-province-that-could-how-pei-set-the-bar-for-the-canadian-covid-19-response/>
- 250 Jackie Dunham. « Predicting the next pandemic: New online tool ranks viruses' potential to infect humans ». *CTV News* (2021), <https://www.ctvnews.ca/health/coronavirus/predicting-the-next-pandemic-new-online-tool-ranks-viruses-potential-to-infect-humans-1.5379482>

- 251 National Science Foundation. « Predictive Intelligence for Pandemic Prevention Phase I: Development Grants ». États-Unis (2021), <https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21590/nsf21590.htm>
- 252 SciTechDaily. « Predicting the Next Pandemic Virus Is Harder Than We Think – Here's Why ». (2021), <https://scitechdaily.com/predicting-the-next-pandemic-virus-is-harder-than-we-think-heres-why/>
- 253 Rachel Kraus. « Injecting this sensor under your skin could prevent future pandemics » Mashable (2020), <https://mashable.com/article/under-the-skin-sensor-flu-pandemic-coronavirus>
- 254 Jonathan Josephs. « Qantas boss: Governments to insist on vaccines for flying ». BBC (2021), <https://www.bbc.com/news/business-56460329>
- 255 Aljazeera. « Austrians refusing COVID vaccine will face up to \$4,000 fines ». (2021), <https://www.aljazeera.com/news/2021/12/9/austria-plans-to-fine-coronavirus-vaccine-holdouts-up-to-4000>
- 256 Anne Marie Lecompte. « Le Québec imposera une contribution santé aux non-vaccinés, dit François Legault ». Radio-Canada (2022), <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1853357/démission-arruda-legault-boileau-direction-santé-publique-contribution>
- 257 Rachel Treisman. « Singapore will stop covering the medical bills of unvaccinated COVID-19 patients ». NPR (2021), <https://www.npr.org/sections/coronavirus-live-updates/2021/11/09/1053889069/singapore-medical-bills-covid-19-patients-unvaccinated-by-choice#:~:text=Music%20of%202021-,Singapore%20will%20stop%20paying%20the%20medical%20bills%20of%20unvaccinated%20COVID,on%20its%20health%20care%20system>
- 258 Santé publique Ontario. « Surveillance de la COVID-19 dans les eaux usées ». 2021, <https://www.publichealthontario.ca/-/media/documents/ncov/phm/2021/04/public-health-measures-wastewater-surveillance.pdf?la=fr>
- 259 Centers for Disease Control and Prevention. « National Wastewater Surveillance System (NWSS) », <https://www.cdc.gov/healthywater/surveillance/wastewater-surveillance/wastewater-surveillance.html>
- 260 Nicole Mather. « How we accelerated clinical trials in the age of coronavirus ». *Nature* (2020), <https://www.nature.com/articles/d41586-020-02416-z>
- 261 Melody M. Bomgardner. « Ginkgo to expand COVID-19 response with \$1.1 billion US government loan ». *Chemical & Engineering News* (2020), <https://cen.acs.org/pharmaceuticals/vaccines/Ginkgo-expand-COVID-19-response/98/i47>
- 262 *The Lancet*. « Genomic Sequencing in pandemics ». 397 *The Lancet* 10273, 2021, [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(21\)00257-9/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(21)00257-9/fulltext)
- 263 Serge Horbach. « Pandemic Publishing: Medical journals drastically speed up their publication process for Covid-19 ». *Quantitative Science Studies*, 2020, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.04.18.045963v1.full>
- 264 Crowdfight COVID-19. Consulté le 14 avril 2022. <https://crowdfightcovid19.org/>
- 265 ZOE COVID Study. Consulté le 14 avril 2022. <https://covid.joinzoe.com/>





horizons.gc.ca