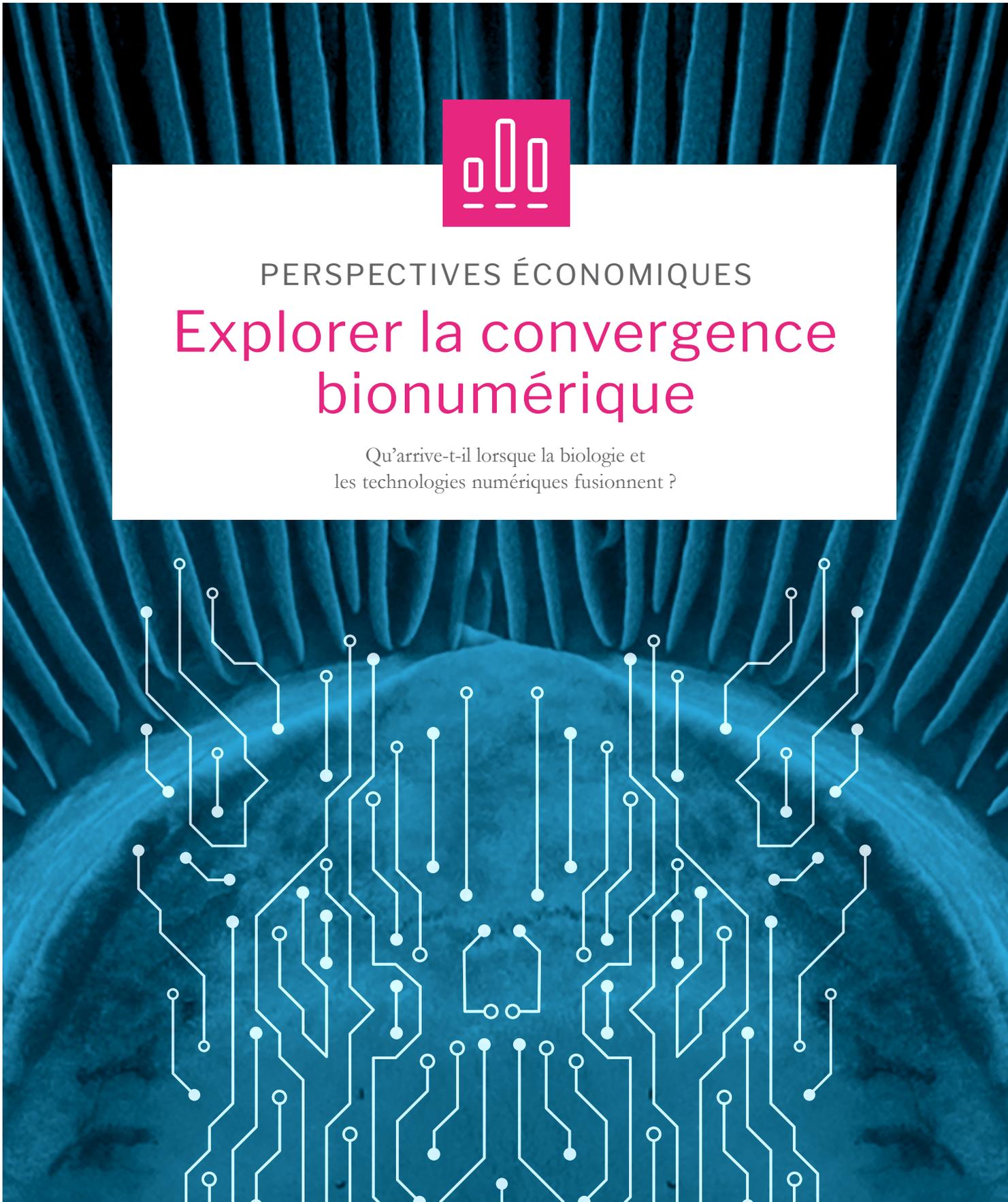




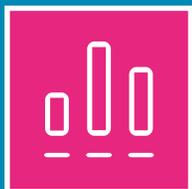
PERSPECTIVES ÉCONOMIQUES

Explorer la convergence bionumérique

Qu'arrive-t-il lorsque la biologie et
les technologies numériques fusionnent ?



Explorer la convergence bionumérique



© Sa Majesté la Reine du
Chef du Canada; 2019.

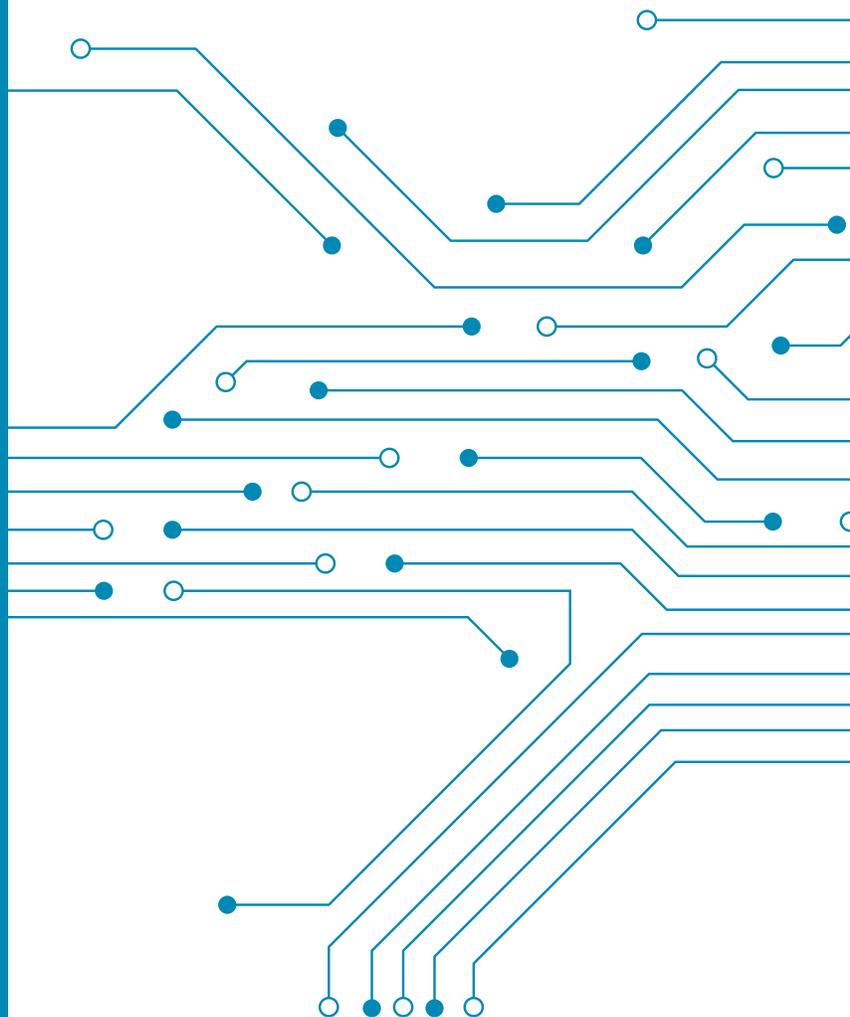
Pour obtenir des renseignements sur les
droits de reproduction : <https://horizons.gc.ca/fr/contactez-nous/>

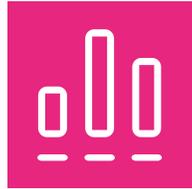
PDF

N° de cat. : PH4-185/2019F-PDF
ISBN : 978-0-660-33016-7

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.

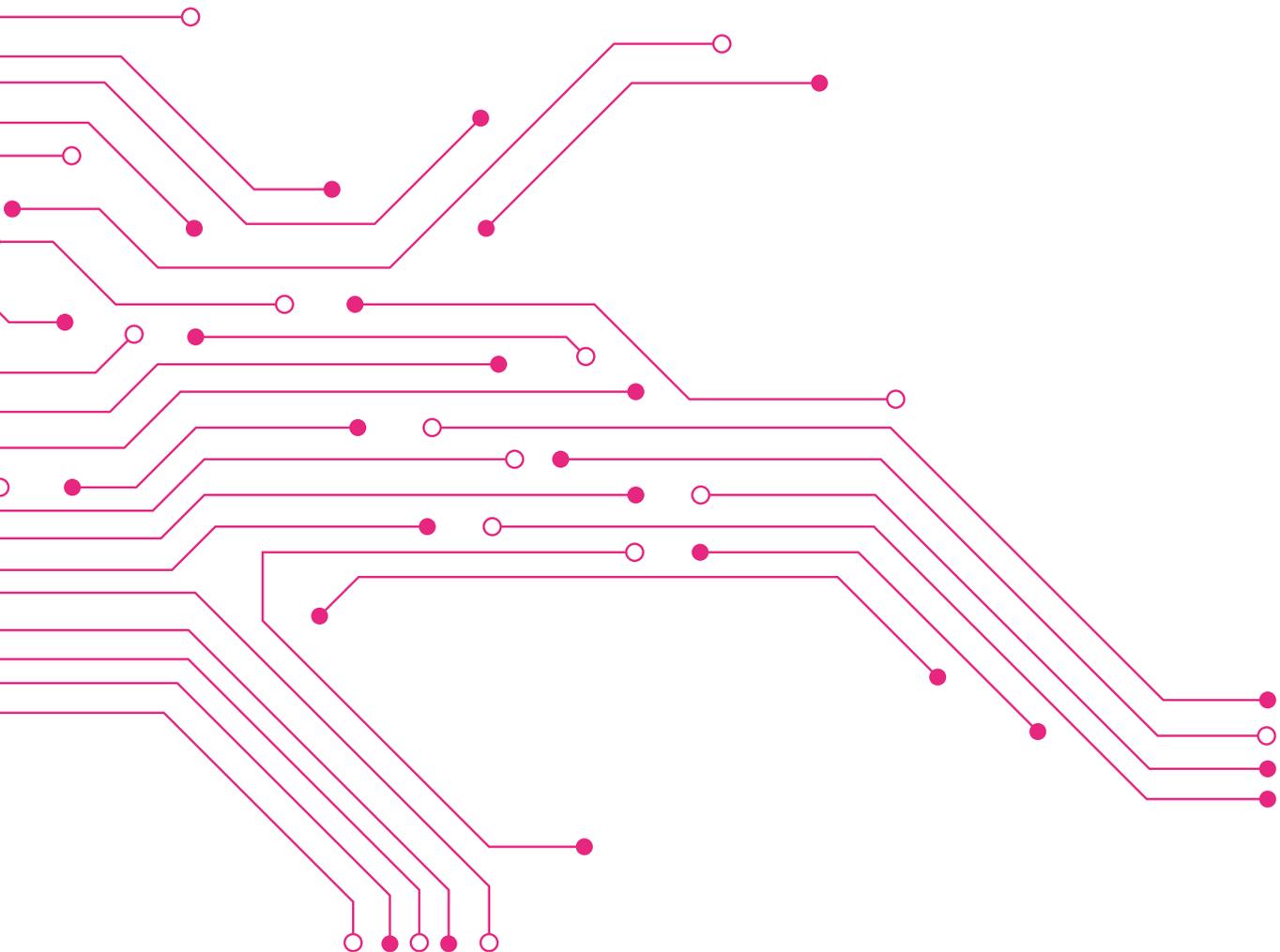




PERSPECTIVES ÉCONOMIQUES

Explorer la convergence bionumérique

Qu'arrive-t-il lorsque la biologie et
les technologies numériques fusionnent ?

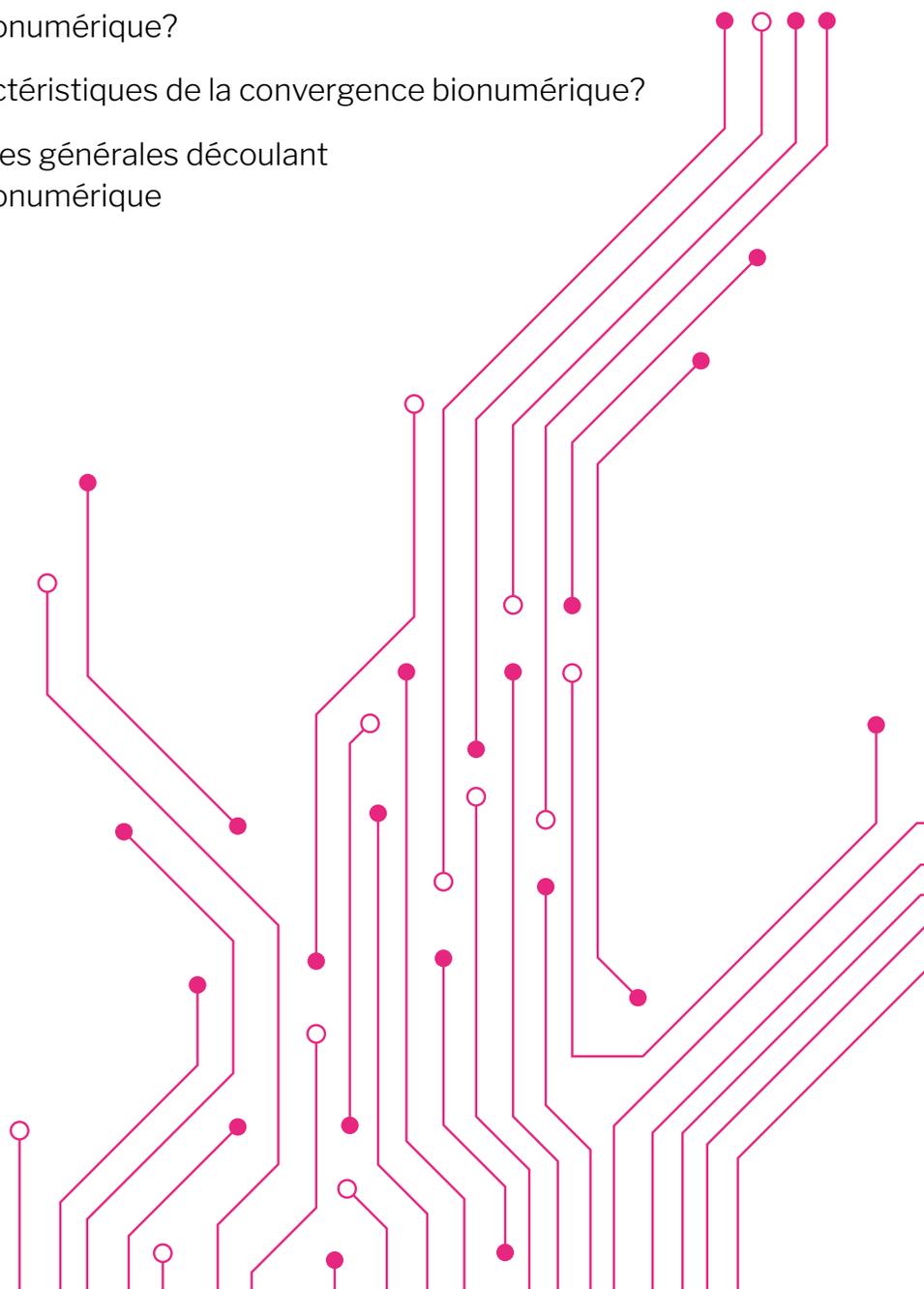


Explorer la convergence bionumérique



Tables des matières

- 04 Avant-propos
- 06 Résumé
- 08 Qu'est-ce que la convergence bionumérique?
- 12 Pourquoi examiner la convergence bionumérique maintenant?
- 16 Bonjour, le bionumérique
- 20 Quelles nouvelles capacités découlent de la convergence bionumérique?
- 32 Quelles sont les caractéristiques de la convergence bionumérique?
- 38 Questions de politiques générales découlant de la convergence bionumérique
- 49 Conclusion
- 51 Remerciements
- 52 Références



Avant-propos





Dans les années à venir, les technologies bionumériques pourraient être intégrées dans nos vies de la même manière que les technologies numériques le sont présentement. La convergence des systèmes biologiques et numériques pourraient changer notre manière de travailler, de vivre et même d'évoluer en tant qu'espèce. Plus qu'un changement technologique, cette convergence bionumérique pourrait transformer notre compréhension de nous-mêmes et nous amener à redéfinir ce que nous considérons comme humain ou naturel.

La convergence bionumérique pourrait avoir des répercussions profondes sur notre économie, nos écosystèmes et notre société. En nous tenant prêts à l'appuyer, tout en gérant les risques qui en découlent avec soin et en faisant preuve de sensibilité, nous serons en meilleure position pour gérer les considérations sociales et éthiques et pour orienter les conversations concernant les politiques et la gouvernance.

Guidé par son mandat, Horizons de politiques Canada (Horizons de politiques) souhaite amorcer un dialogue éclairé et utile sur les futurs plausibles de la convergence bionumérique et sur les questions de politiques qui pourraient émerger. Dans ce premier document, nous définissons et explorons la convergence bionumérique – l'importance de l'explorer maintenant, ses caractéristiques, les nouvelles capacités qui pourraient en découler et quelques répercussions initiales sur les politiques. Nous voulons amorcer un dialogue avec un large éventail de partenaires et d'intervenants sur la forme que pourrait prendre notre avenir bionumérique, sur les répercussions que cette convergence pourrait avoir sur les secteurs et les industries, ainsi que sur l'évolution possible de notre relation avec la technologie, avec la nature et même avec la vie.

Nous vous invitons à nous faire part de vos commentaires et à participer car nous souhaitons approfondir les questions soulevées dans le présent document.

Kristel Van der Elst

Directrice générale
Horizons de politiques Canada

Résumé

À la fin des années 1970 et au début des années 1980, les Canadiens et les décideurs ont commencé à comprendre que l'ère du numérique était à nos portes. Des pionniers ont saisi des occasions, relevé des défis et instauré des politiques judicieuses qui nous ont procuré des avantages pendant des décennies. Nous continuons de constater les implications importantes de la numérisation, et d'autres sont certainement à venir. Toutefois, nous sommes peut-être à la veille d'une autre perturbation de la même ampleur. Les technologies numériques et les systèmes biologiques commencent à se fusionner d'une manière qui pourrait bouleverser en profondeur nos hypothèses sur la société, sur l'économie et sur notre corps. C'est ce que nous appelons **la convergence bionumérique**.

Dans le présent document, nous proposons un cadre initial en vue d'orienter les travaux de prospective d'Horizons de politiques.

Trois voies par lesquelles la convergence bionumérique se concrétise



La convergence bionumérique ouvre la voie à des façons entièrement nouvelles de :

- modifier l'être humain – notre corps, notre esprit et notre comportement;
- modifier ou créer d'autres organismes;
- modifier des écosystèmes;
- percevoir, stocker, traiter et transmettre des renseignements;
- gérer l'innovation dans le domaine de la biologie;
- structurer et gérer la production et les chaînes d'approvisionnement.

Selon notre recherche initiale, voici les caractéristiques possibles du système bionumérique :

- la démocratisation
- la décentralisation
- la diffusion géographique
- l'extensibilité
- la personnalisation
- la dépendance aux données

Voici des questions initiales en matière de politiques

➤ Économie

- Les avantages concurrentiels classiques fondés sur les ressources naturelles pourraient-ils s'estomper?
- Les systèmes d'éducation et de formation devraient-ils être adaptés pour combler les lacunes éventuelles en matière de compétences?
- Quelles formes pourraient prendre les cadres de protection des données et de la propriété intellectuelle à l'ère du bionumérique?
- Comment les politiques peuvent-elles favoriser un environnement d'affaires concurrentiel dans un monde bionumérique?

➤ Société

- Les attitudes sociales pourraient-elles s'orienter vers la santé et le mode de vie?
- Quelles politiques pourraient contribuer à remédier aux inégalités en matière de santé?
- Quelles politiques pourraient favoriser la confiance entre les partenaires et les parties prenantes?

➤ Environnement

- Quels changements pourraient survenir dans l'aménagement des terres et l'environnement?

➤ Géopolitique

- Quelles politiques sont nécessaires pour demeurer concurrentiel dans un environnement bionumérique mondial?
- Que faut-il pour protéger la sécurité des citoyens dans un monde bionumérique?

➤ Gouvernance

- Comment la réglementation et l'élaboration des politiques peuvent-elles tenir compte des préoccupations sociales concernant les percées bionumériques?
- Le cadre fiscal actuel est-il adapté au monde du bionumérique?
- Le système de gestion des finances publiques doit-il être réévalué pour être durable dans un monde bionumérique?



Qu'est-ce que la convergence bionumérique?

La convergence bionumérique est l'association interactive, parfois au point de fusion, des technologies et des systèmes numériques, d'une part, et biologiques d'autre part. Horizons de politiques explore trois différentes voies de convergence.

1 L'intégration physique complète d'entités biologiques et numériques

La technologie numérique peut être incorporée dans des organismes et des composantes biologiques peuvent faire partie intégrante des technologies numériques. Le croisement physique, la manipulation et la fusion de la biologie et du numérique créent des formes hybrides de vie et de technologie, chacune fonctionnant dans le monde tangible et possédant souvent des capacités accrues.

Il existe déjà des robots dotés d'un cerveau biologique⁰¹ et des corps biologiques dotés d'un cerveau numérique⁰², de même que des interfaces homme-ordinateur et cerveau-machine⁰³. L'utilisation médicale d'appareils numériques sur l'être humain⁰⁴ et les insectes manipulés par des moyens numériques tels que des libellules-drones⁰⁵ et les sauterelles

de surveillance⁰⁶ sont des exemples de technologie numérique associée à une entité biologique. En puisant dans le système nerveux et en manipulant les neurones, la technologie peut être intégrée dans un organisme pour en modifier la fonction et le but. De nouveaux corps humains et de nouvelles définitions de l'identité⁰⁷ pourraient voir le jour à mesure que la convergence progresse.

2 L'évolution conjointe de technologies biologiques et numériques

Ce type de convergence bionumérique se produit lorsque des progrès dans un premier domaine génèrent des progrès importants dans un autre domaine. L'évolution conjointe des sciences et des technologies biologiques et numériques ouvre la voie à des progrès dans chaque domaine qui seraient impossibles autrement. Cela pourrait déboucher

sur des technologies biologiques et numériques qui seraient élaborées sous la forme de systèmes intégrés ou complémentaires.

Les systèmes vivants complexes – bactéries, champignons, plantes et animaux, dont les êtres humains – sont de plus en plus soumis à l'examen et à la compréhension d'outils et d'applications numériques comme par exemple l'apprentissage automatique. Cette compréhension approfondie, rendue possible par les technologies numériques, signifie que la biologie est soumise à des influences et à des manipulations qui étaient impossibles il y a seulement quelques années.

Par exemple, l'association du séquençage de gènes à l'intelligence artificielle permet de comprendre l'expression génétique, que l'on peut ensuite utiliser pour modifier des organismes afin de créer des composés organiques à l'aide de méthodes nouvelles⁰⁸, voire des organismes entièrement synthétiques⁰⁹. La technique CRISPR-Cas9 et d'autres techniques nouvelles de modification génique n'auraient pas vu le jour sans l'évolution de la technologie numérique et de la biologie computationnelle. Les progrès de la technologie numérique ont ainsi contribué au progrès du bionumérique.

Nous constatons également une meilleure compréhension de la biologie, ce qui alimente les progrès dans le domaine de l'informatique biologique¹⁰. Les réseaux neuronaux – systèmes informatiques conçus sur le modèle des cerveaux biologiques – sont un exemple de la manière dont la compréhension de la biologie façonne la technologie numérique.

Par ailleurs, la frontière s'estompe entre ce que nous considérons comme naturel ou organique, d'une part, et ce qui est numérique, technique ou synthétique de l'autre. Par exemple, la vanille biosynthétique est créée à partir d'acide férulique, d'eugénol et de glucose, qui font office de substrats, ainsi que de bactéries, de champignons et de levures, qui font office d'hôtes pour la production microbienne. Bien qu'elle ne provienne pas d'un vanillier, cette vanille peut tout de même porter l'appellation « arôme naturel », conformément aux lois des États-Unis et de l'Union européenne, car elle est produite au moyen de [traduction] « transformations microbiennes de précurseurs naturels »¹¹.

3 La convergence théorique de systèmes biologiques et numériques

Une troisième forme de convergence bionumérique met en jeu un bouleversement des perspectives capable de remodeler nos cadres et nos approches dans les domaines du biologique et du numérique, en accélérant la fusion de ces deux domaines.

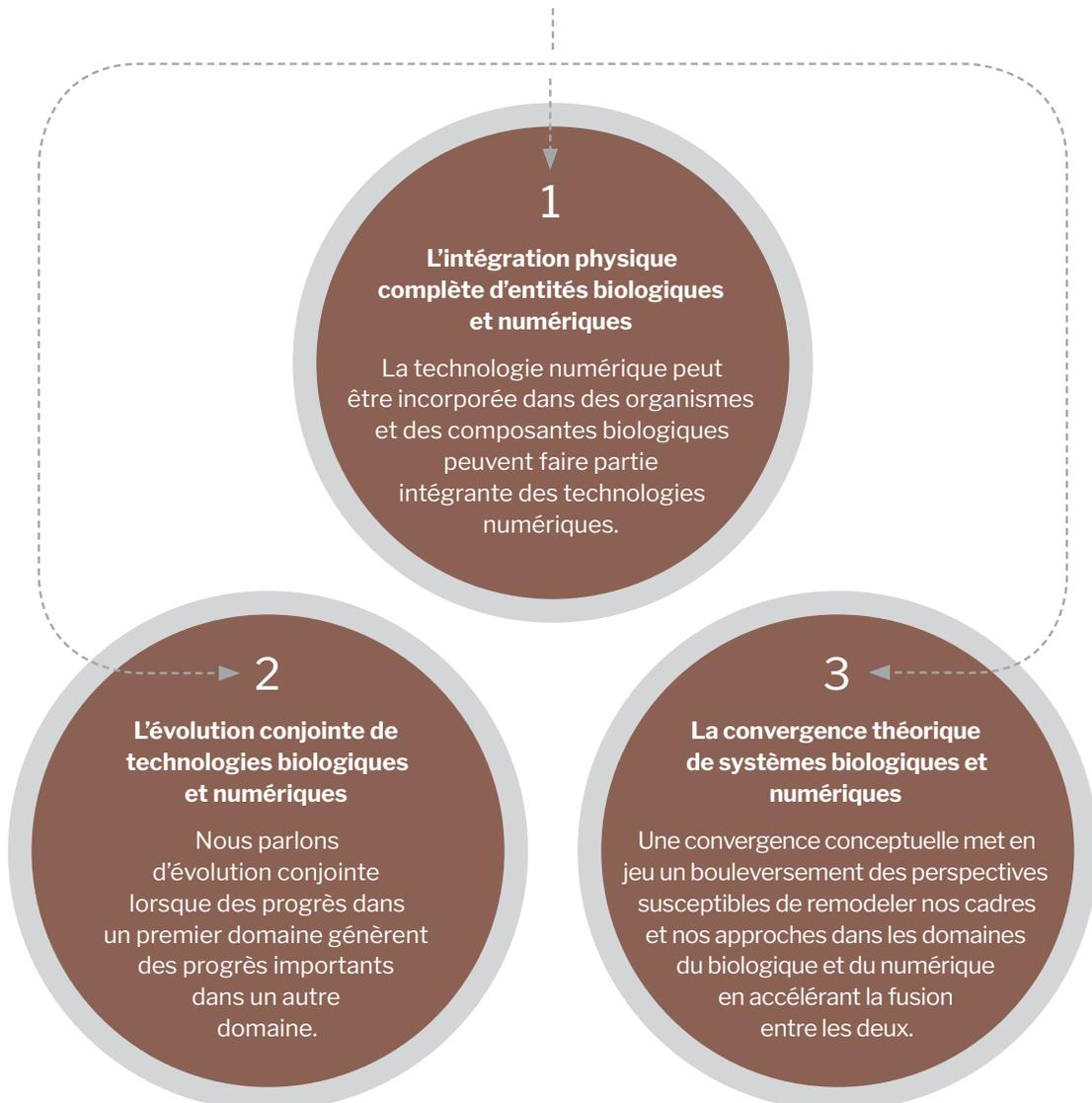
Alors que nous continuons d'affiner notre compréhension et notre maîtrise des mécanismes qui sous-tendent la biologie, nous pourrions être témoins de l'abandon du vitalisme – idée selon laquelle les organismes vivants et non vivants sont fondamentalement différents, car on estime qu'ils sont régis par des principes différents.¹² À la place, l'idée que la biologie possède des caractéristiques prévisibles, que nous pourrions manipuler par des moyens numériques, pourrait se généraliser du fait que nous vivons à l'ère du bionumérique. De nos jours, n'importe quel étudiant en biologie a grandi dans un monde numérique et peut

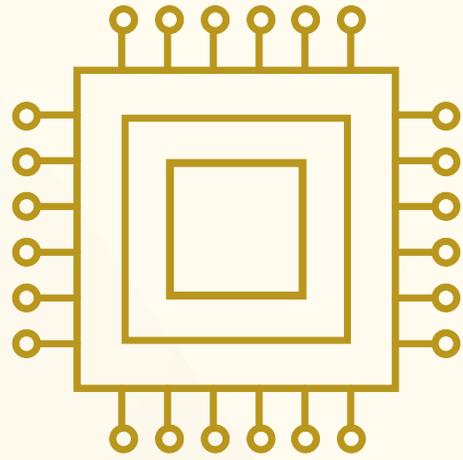
appliquer, consciemment ou non, ce cadre de référence à la biologie computationnelle et à la biologie en général.

D'un point de vue numérique, nous constatons une possibilité d'évolution dans la direction opposée. L'informatique a commencé en tant que moyen de produire des résultats prévisibles, reproductibles et relativement simples. À mesure

que la technologie numérique s'est complexifiée et connectée, le système a commencé à imiter les caractéristiques du monde biologique, ce qui a créé la notion d'écosystème technologique. Des modèles biologiques servent également à élaborer des outils numériques, tels que l'intelligence artificielle axée sur les réseaux neuronaux.

Trois voies par lesquelles la convergence bionumérique se concrétise





Pourquoi examiner la convergence bionumérique maintenant?

Il existe suffisamment de signaux pour donner forme à des futurs potentiels en matière de bionumérique. Ces signaux laissent à penser que les sciences biologiques et la biotechnologie pourraient être à l'aube d'une période de croissance rapide – peut-être semblable à celle du calcul numérique vers 1985.

Cette année-là, la société Microsoft a introduit le système d'exploitation Windows 1.0, la société Atari a lancé l'ordinateur personnel Atari ST et le premier nom de domaine, symbolics.com, a été enregistré. L'informatique pénétrait le marché de masse, créant de la valeur dans des types d'organismes et de contextes beaucoup plus nombreux qu'au cours des décennies dominées par les ordinateurs centraux géants.

La convergence bionumérique présente les signes d'une trajectoire semblable – elle s'éloigne des modèles centralisés des biotechnologies pharmaceutique et industrielle au profit d'une utilisation commerciale et grand

public à grande échelle. Cela passe par les bio-imprimantes, qui créent des tissus organiques et par les machines de biologie synthétique qui peuvent être programmées pour créer des organismes entièrement nouveaux. Par exemple, l'outil Printeria est un appareil de bio-ingénierie tout-en-un permettant d'automatiser le processus d'impression de circuits génétiques dans des bactéries. Il a été conçu de manière à être aussi simple d'utilisation qu'une imprimante de bureau personnelle et il devrait coûter environ 1 500 \$.¹³

Les progrès rapides dans le domaine de la technologie biologique ont été rendus possibles par le faible coût, l'accessibilité

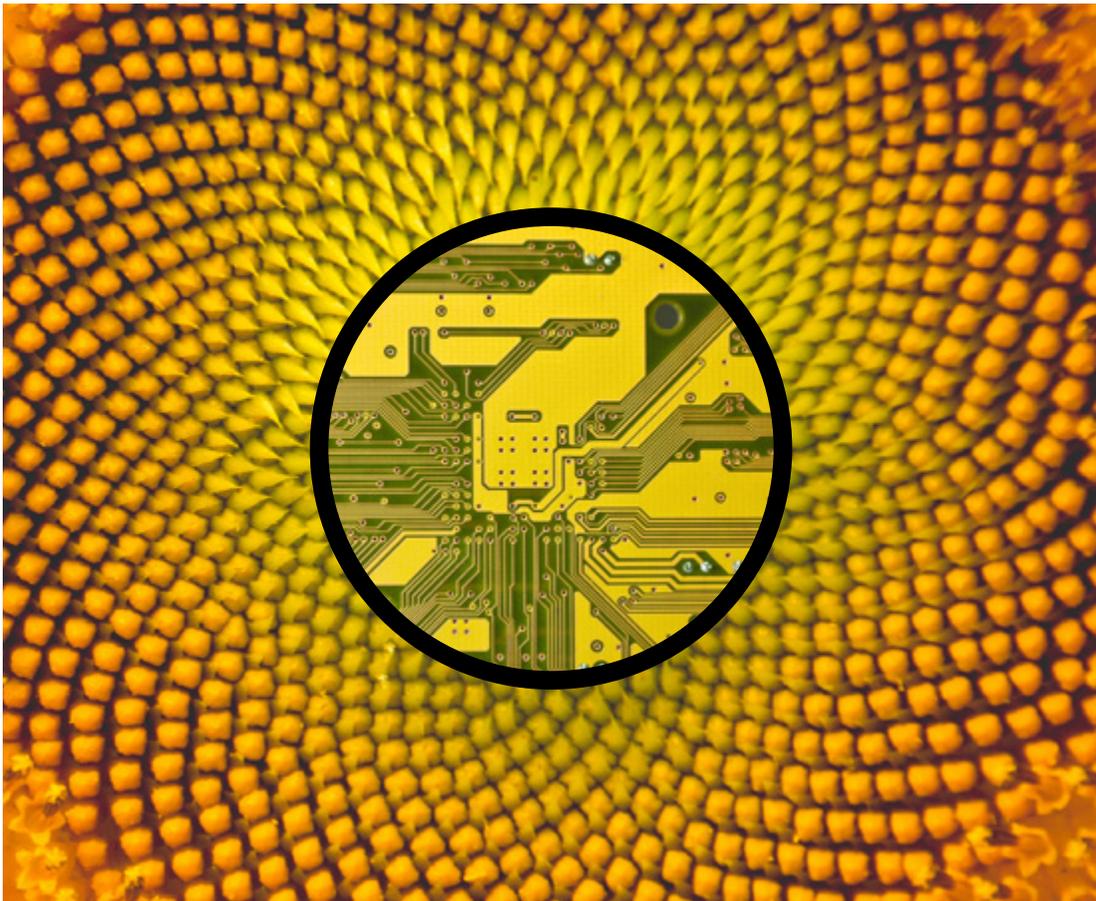
étendue et les capacités croissantes du numérique en matière de traitement, de stockage et de communication.

Les caractéristiques uniques et spéciales du secteur biologique ont toutefois des répercussions simultanées sur les systèmes numériques. Des formes nouvelles de capacités biologiques sont en cours d'intégration dans des réseaux numériques et dans des calculs et des applications axés sur l'intelligence artificielle, ce qui les rend plus efficaces et crée de nouvelles possibilités.

La convergence bionumérique nous contraint à repenser la biologie en tant que source à la fois de matières premières et

d'un mécanisme d'élaboration de procédés novateurs en vue de créer des produits, des services et des façons d'être.

De nos jours, le rythme rapide du changement et de l'innovation nous oblige à réévaluer notre compréhension des systèmes biologiques et numériques et nos attentes à leur égard. La convergence de ces domaines pourrait provoquer des changements systémiques dans tous les secteurs et avoir des répercussions sur les politiques. Les gouvernements peuvent s'attendre à devoir aider à gérer les risques et à saisir les occasions qui pourraient se présenter.





Bonjour, le bionumérique.

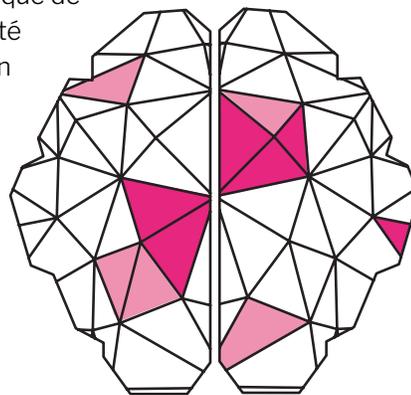
De nombreux facteurs pourraient modeler les répercussions potentielles des technologies de convergence bionumérique sur les sociétés, les pays, les cultures, les environnements et les populations dans le monde entier. Les considérations qui suivent forment l'un des nombreux scénarios plausibles fondés sur des exemples d'innovations dans un futur monde bionumérique.

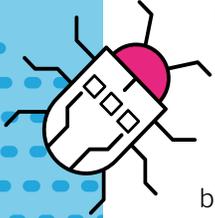


Dès mon réveil, je profite du soleil et des effluves salés de la mer Adriatique. Je n'habite pas près de la mer Méditerranée, mais mon intelligence artificielle, qui est aussi mon conseiller en santé, m'a prescrit une qualité d'air, des odeurs et une intensité solaire précises pour gérer mon niveau d'énergie le matin et elle a programmé ma chambre pour qu'elle imite ce climat.

Les draps de lit frais, produits à partir de champignons régénérateurs qui poussent dans mon immeuble sont encore meilleurs que je ne l'imaginais; je me sens reposé et prêt pour la journée. Je dois vérifier quelques éléments avant de me lever. J'envoie un message cérébral pour ouvrir l'application qui surveille mon niveau d'insuline et vérifier que mon pancréas est soutenu de manière optimale. Je n' imagine pas devoir me piquer avec des aiguilles comme ma mère le faisait quand elle était enfant. Aujourd'hui, nous avons des greffes de microbes qui s'autorégulent et qui produisent des rapports sur nos niveaux.

Comme tout semble aller bien, je vérifie l'interface numérique de mon cerveau pour lire les données de mes rêves qui ont été enregistrées et traitées en temps réel la nuit dernière. Mon application de thérapie analyse les réactions émotionnelles que j'ai exprimées pendant mon sommeil. Elle me suggère de passer du temps dans la nature cette semaine, pour réfléchir à mon rêve récurrent dans lequel je suis enfermé dans une boîte et pour améliorer mon activité neurale subconsciente utile. Mon intelligence artificielle me recommande une « journée en forêt ». Je réponds par la pensée « d'accord », et mon intelligence artificielle et mon implant neural se chargent du reste.





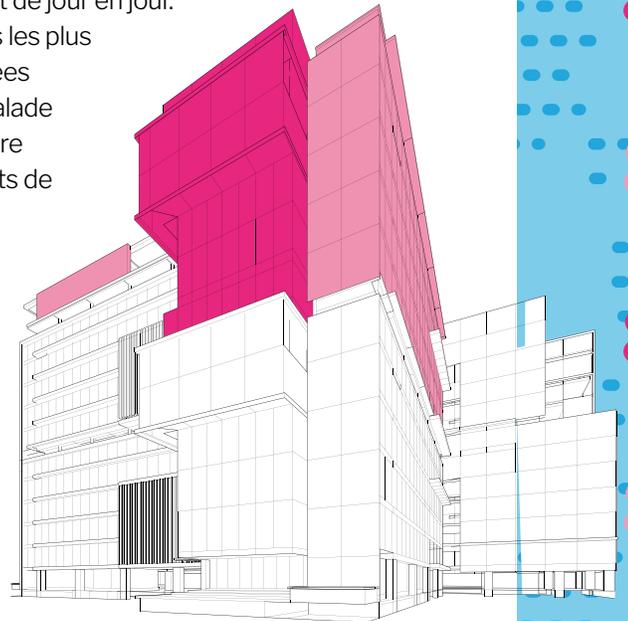
Dans le résumé des vidéos de surveillance enregistré par mes insectes-robots, je constate que mon appartement a été préservé de tout intrus (y compris d'autres insectes-robots) hier soir, mais on m'informe que mon essaim de petites cyberlibellules a faim. Elles ont travaillé dur pour recueillir des données et pour surveiller l'environnement extérieur toute la nuit, mais le nombre de moustiques et de tiques porteuses de la maladie de Lyme que mes robots chassent habituellement pour se recharger en énergie a été plus faible que prévu. D'une pensée, je leur commande un apport nutritif.

Je pose les pieds sur le tapis régénérateur et je prends un peignoir même si je n'en ai pas besoin pour me réchauffer. La température de mon appartement s'élève graduellement jusqu'à 22 degrés, grâce à un cycle quotidien qui assure mon équilibre et s'adapte constamment en fonction de l'heure et de la saison. Le code du bâtiment et l'infrastructure énergétique des maisons sont harmonisés et toutes les maisons doivent obligatoirement s'autoréguler à des fins d'efficacité. Comme les maisons et les bâtiments sont biomimétiques et intègrent, dans la mesure du possible, des systèmes vivants aux fins de climatisation, ils filtrent continuellement l'air et capturent le carbone. Je vérifie la mesure de la compensation de mes émissions de carbone, pour connaître le nombre de crédits que je recevrai pour la contribution de ma maison au programme gouvernemental d'atténuation du changement climatique.



Alors que je me dirige vers la salle de bains, je m'arrête à la fenêtre pour vérifier la croissance accélérée du bâtiment voisin. L'architecture biologique ayant atteint de nouveaux sommets, les composés d'arbres synthétiques grandissent de jour en jour. Pour vérifier que le bâtiment peut résister même aux vents les plus forts – et pour réduire le balancement des résidences situées aux étages supérieurs – une imprimante 3D robotisée escalade et parcourt la structure émergente pour ajouter un polymère biologique renforcé de carbone et consolider ainsi les points de contrainte critiques que son réseau de capteurs assistés par intelligence artificielle a repérés. Je me réjouis qu'on ait décidé de planter sur le toit de ce bâtiment des genévriers de Virginie génétiquement modifiés et résistants au feu, car les feux de forêt urbains sont devenus une source de préoccupation.

Pendant que je me brosse les dents, Jamie, mon intelligence artificielle personnelle, me demande si je veux qu'un drone de transport vienne chercher la dent de lait de ma fille, qui est tombée il y a deux jours. Les marqueurs épigénétiques contenus dans les dents

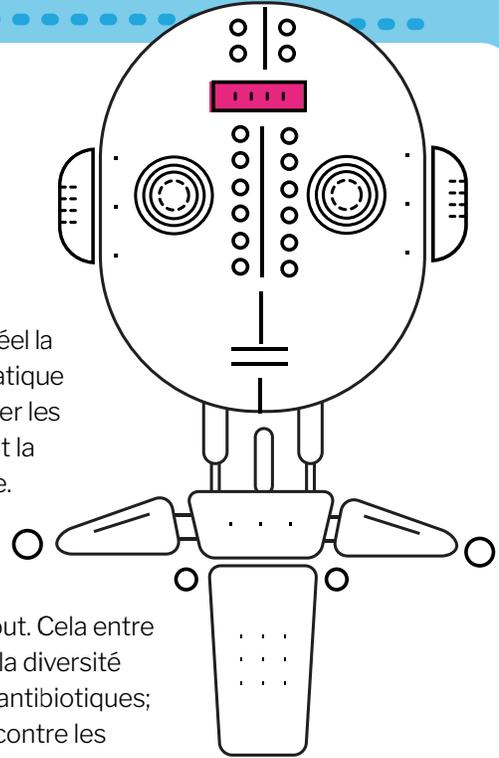


des enfants doivent être analysés et catalogués dans la chaîne de blocs génétique de notre famille pour que nous puissions bénéficier de la remise sur les soins de santé; je dois donc m'en occuper aujourd'hui.

Je remplace l'autocollant intelligent qui surveille en temps réel la composition chimique de mon sang, mon système lymphatique et le fonctionnement de mes organes. J'ai du mal à imaginer les coûts et les souffrances que les gens ont dû endurer avant la généralisation de la médecine préventive et personnalisée.

Par ailleurs, j'admets que cela semble dégoûtant, mais c'est une bonne chose que la municipalité analyse des échantillons de notre matière fécale dans les tuyaux d'égout. Cela entre dans le cadre de la plateforme d'analyse des données sur la diversité nutritionnelle, les bactéries intestinales et l'utilisation des antibiotiques; une aide à la surveillance de la santé publique et à la lutte contre les souches d'infection bactérienne résistantes aux antibiotiques.

Apparemment, le prochain téléchargement pour mon évier intelligent me permettra de choisir un mélange biotique personnalisé pour mon eau potable déchlorée.



Lorsque j'entre dans la cuisine, la composition du jour de mon microbiome s'affiche à l'avant de mon réfrigérateur. Ce dernier surveille mon évolution pendant que j'approche l'âge moyen : aujourd'hui, il me suggère de prendre une soupe miso au petit-déjeuner, car mon biome a besoin de plus de variété en raison d'un stress récent et d'une mauvaise alimentation hier soir.

Comme les immeubles de mon quartier partagent une ferme verticale, j'obtiens des crédits de carbone en mangeant du miso issu du soja produit sur mon toit et fermenté par mon réfrigérateur.

Mon réfrigérateur programme la production de plus de miso et la préparation d'un peu de kimchi pour la semaine à venir. Il ajoute aussi des ingrédients stimulants pour les défenses immunitaires à ma commande d'épicerie, car nous approchons de la saison de la grippe et une souche à laquelle je risque d'être sensible a été détectée à quelques rues de chez moi.

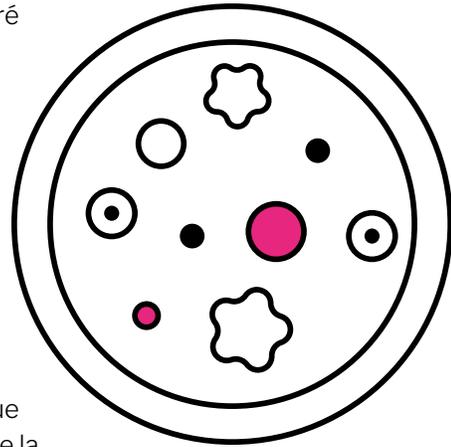


Je prends mon supplément intelligent qui vient de sortir de ma bio-imprimante. Il contient les nutriments et les microbes supplémentaires dont j'ai besoin, tout en renvoyant des données sur mon corps à ma bio-imprimante pour qu'elle ajuste

le supplément de demain. La boucle de rétroaction entre ma bio-imprimante et moi comprend aussi le stockage dans le nuage de données quotidiennes en vue de déterminer les prochaines mesures préventives à prendre pour ma santé. Il est important de surveiller en temps réel mon taux de triglycérides, étant donné mes marqueurs génétiques.

Pendant que mon café coule, je vérifie le dernier projet scolaire de ma fille, qui pousse sur le comptoir depuis une semaine. Dans le cadre de son initiative scolaire sur l'empathie, elle fait pousser un foie pour un chiot dans le besoin. D'autres cellules souches serviront bientôt à fabriquer un rein, parce qu'elle veut aider aussi d'autres animaux. Je prends mon café, préparé à partir d'une nouvelle variété de grains certifiés sans émissions de carbone, puis je m'assois sur le canapé pendant une minute.

Il semble que le traitement nutritif que j'ai fait peindre à la surface du canapé et des chaises leur a permis de rajeunir. Il faut que j'essaie le traitement sur mes chaussures de course bio-imprimées, car elles commencent à s'user.

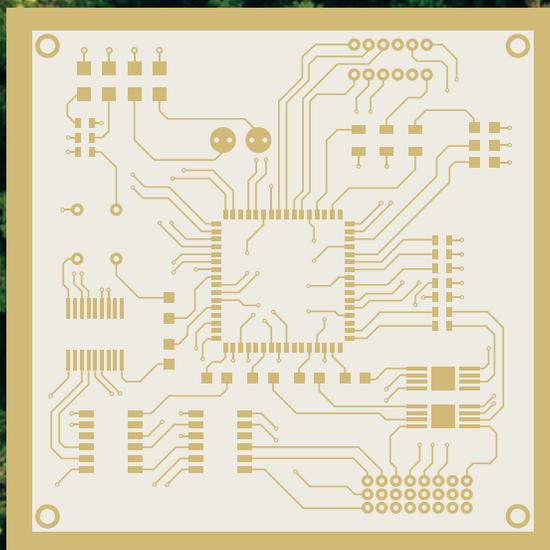


C'est pas vrai, il est déjà cette heure-là? Il ne me reste que 10 minutes avant ma première réunion virtuelle. J'attache la ceinture de ma chaise à renforcement ostéomusculaire, je m'appuie au dossier et j'ouvre une session dans mon espace de travail. Pour commencer, je reçois le compte rendu de mes collègues qui terminent leur journée de travail à l'autre bout du monde. Je frissonne un instant en réalisant à quel point nous sommes tous connectés intimement dans cette biosphère numérique – mais cela passe. C'est parti pour la journée.



Cette histoire peut sembler farfelue, mais toutes les technologies mentionnées existent présentement, sous une forme ou une autre. Même si elles ne sont pas encore accessibles sur le marché sous la forme présentée plus haut, un monde dans lequel nous tenons pour acquis l'interaction entre les technologies biologiques et numériques commence déjà à émerger.

Si cette histoire est une représentation de technologies qui pourraient faire partie d'un monde bionumérique, elle ne représente toutefois pas le seul avenir plausible. Il s'agit plutôt d'une vitrine imaginative, dans laquelle nous décrivons les changements radicaux qui pourraient se produire dans un avenir bionumérique optimiste. Nous pourrions imaginer d'autres scénarios avec des niveaux d'accès et d'adoption différents, ainsi que d'autres réalités.



Quelles nouvelles capacités découlent de la convergence bionumérique?

Nous vivons déjà l'expérience de l'association entre des systèmes numériques et biologiques par le truchement de nouveaux produits, plateformes, services et industries.

La convergence bionumérique offre de nouvelles opportunités pour :

- modifier l'être humain – notre corps, notre esprit et notre comportement;
- modifier ou créer d'autres organismes;
- modifier des écosystèmes;
- percevoir, stocker, traiter et transmettre des renseignements;
- gérer l'innovation dans le domaine de la biologie;
- structurer et gérer la production et les chaînes d'approvisionnement.



Tableau 1 : Capacités nouvelles découlant de la convergence des systèmes numériques et biologiques

Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?	Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?	Quelles sont les possibilités actuelles?
<i>Des manières nouvelles de modifier l'être humain – notre corps, notre esprit et notre comportement</i>		
<p>Modification du génome humain – nos attributs et nos caractéristiques biologiques de base</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Progrès dans le domaine du séquençage et de la modification de gènes, par exemple l'outil CRISPR/Cas9. • L'apprentissage automatique aide les scientifiques à prédire les gènes à cibler aux fins de modification. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les premiers bébés au monde dotés d'un génome modifié sont nés en Chine [en anglais]¹⁴ • La biologie moléculaire améliorée à l'aide d'outils informatiques [en anglais]¹⁵
<p>Surveillance, modification et manipulation des pensées et des comportements humains</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les technologies neuronales lisent les signaux du cerveau pour surveiller l'attention et gérer la fatigue. • Des applications numériques peuvent aider à améliorer la santé du cerveau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les sociétés SAP et EMOTIV collaborent pour aider les employés de SAP à gérer leur stress [en anglais]¹⁶ • Les États-Uniens ont dépensé 1,9 milliard de dollars l'an dernier en applications permettant de maintenir le cerveau en forme [en anglais]¹⁷

Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?	Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?	Quelles sont les possibilités actuelles?
<i>Des manières nouvelles de modifier l'être humain – notre corps, notre esprit et notre comportement (suite)</i>		
<p>Manières nouvelles de surveiller, de gérer et d'agir sur les fonctions corporelles, ainsi que de prédire, de diagnostiquer et de traiter les maladies</p>	<ul style="list-style-type: none">• Le séquençage de gènes dans des échantillons entiers nous aide à comprendre des environnements complexes, tels que le microbiome humain.• Il est possible de porter des appareils numériques ou de les intégrer à notre corps pour traiter et surveiller ses fonctions.• Les systèmes d'apprentissage automatique peuvent prédire la mortalité et les résultats de traitements.	<ul style="list-style-type: none">• La biopsie liquide mise au point par la société Guardant s'avère plus précise et plus rapide que la biopsie tissulaire pour les patients atteints d'un cancer du poumon [en anglais]¹⁸• Des chercheurs de l'Université de Waterloo mettent au point un capteur autoalimenté pour la surveillance médicale [en anglais]¹⁹• Une application brevetée par la société Amazon permettra à l'assistant Alexa de détecter une toux ou un rhume [en anglais]²⁰• L'intelligence artificielle fournit des prédictions fiables sur l'issue d'un coma [en anglais]²¹

Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?

Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?

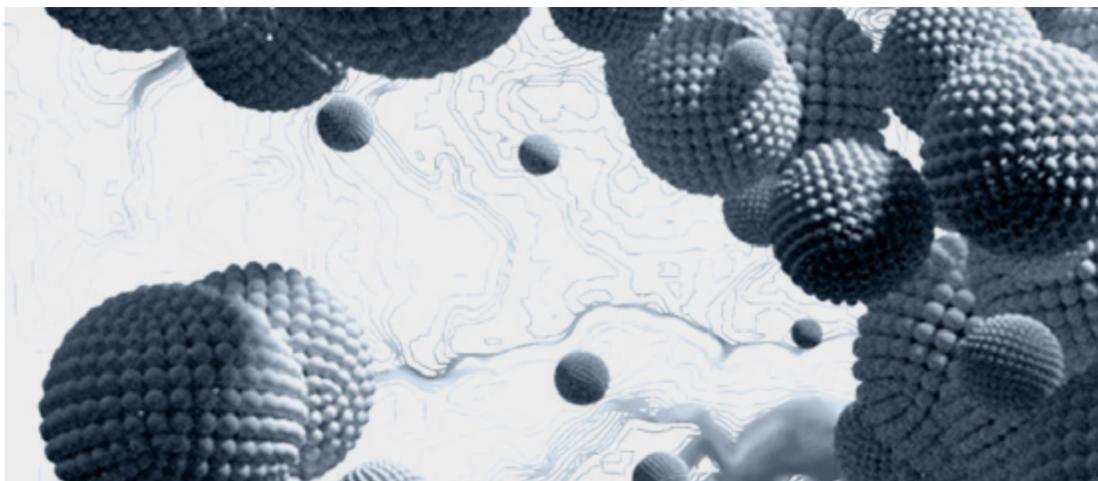
Quelles sont les possibilités actuelles?

Des manières nouvelles de modifier l'être humain – notre corps, notre esprit et notre comportement (suite)

Création de nouveaux organes et amélioration des fonctions humaines

- Des tissus imprimés en 3D à partir de dessins et d'outils de production numériques peuvent créer des organes personnalisés.
- La bio-informatique libre utilise des dispositifs numériques implantés pour améliorer les fonctions corporelles.

- Des bio-ingénieurs réussissent à imprimer en 3D des structures qui imitent les tissus pulmonaires et les vaisseaux sanguins [en anglais]²²
- Des reins cultivés en laboratoire et greffés sur des animaux s'avèrent parfaitement fonctionnels [en anglais]²³
- Des puces implantées créent une version très personnelle de l'authentification à deux facteurs [en anglais]²⁴



Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?	Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?	Quelles sont les possibilités actuelles?
<i>Des manières nouvelles de modifier l'être humain – notre corps, notre esprit et notre comportement (suite)</i>		
Manières nouvelles de vivre et d'interagir avec le monde	<ul style="list-style-type: none">• Des interfaces cerveau-machine permettent de contrôler les machines à l'aide de signaux du cerveau.• Des prothèses augmentent les fonctions et la sensibilité à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique.	<ul style="list-style-type: none">• La société Neuralink annonce une plateforme à interface cerveau-machine intégrée et composée de milliers de canaux [en anglais]²⁵• La société Infinite Biomedical obtient l'approbation de la Food and Drug Administration des États-Unis pour son système de commande de prothèses axé sur l'apprentissage profond [en anglais]²⁶• La Food and Drug Administration des États-Unis publie des directives réglementaires sur les prothèses contrôlées par le cerveau [en anglais]²⁷

Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?	Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?	Quelles sont les possibilités actuelles?
<i>Des manières nouvelles de modifier l'être humain – notre corps, notre esprit et notre comportement (suite)</i>		
<p>Manières nouvelles de concevoir, de fabriquer et de dispenser des thérapies</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Des techniques d'apprentissage automatique permettent de simuler le pliage des protéines et participent à la conception de médicaments. • Des tissus sont imprimés en 3D pour tester des thérapies. • Des nanorobots et des nanomatériaux sont capables d'agir et de délivrer avec précision des médicaments au sein d'êtres vivants. • L'apprentissage automatique permet de prédire les résultats d'essais cliniques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Des algorithmes d'intelligence artificielle pour le pliage des protéines corrigent des structures plus rapidement que jamais [en anglais]²⁸ • Une scientifique néo-zélandaise, Shalini Guleria, bio-imprime des cellules tumorales dans l'espoir de cultiver des tumeurs pour déterminer les traitements les plus efficaces [en anglais]²⁹ • Des robots minuscules parcourent l'estomac d'une souris pour guérir des ulcères [en anglais]³⁰ • Des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology appliquent des techniques d'intelligence artificielle pour prédire les résultats d'essais cliniques [en anglais]³¹

Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?	Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?	Quelles sont les possibilités actuelles?
<i>Des moyens nouveaux de modifier des organismes ou d'en créer d'autres</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Modification du type ou de la quantité d'intrants dont un organisme a besoin pour se développer 	<ul style="list-style-type: none"> • Progrès dans le domaine du séquençage et de la modification de gènes, par exemple l'outil CRISPR/Cas9. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une amélioration de la photosynthèse dans des plants de tabac transgéniques augmente leur productivité de 40 % [en anglais]³²
<ul style="list-style-type: none"> • Création d'organismes entièrement nouveaux et dotés de caractéristiques sur mesure 	<ul style="list-style-type: none"> • La biologie synthétique s'inspire de la biologie, du génie, de l'informatique et de la physique pour concevoir et construire des entités biologiques nouvelles. • L'intelligence artificielle peut aider à concevoir des micro-organismes dotés de caractéristiques précises. 	<ul style="list-style-type: none"> • À l'image des outils de conception assistée par ordinateur, de nombreux logiciels libres aident les chercheurs à analyser et à concevoir des circuits génétiques complexes au sein d'organismes vivants qui remplissent des fonctions précises [en anglais]³³ • La société Gingko Bioworks conçoit des organismes sur mesure « pour remplacer la technologie par la biologie » [en anglais]³⁴

Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?

Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?

Quelles sont les possibilités actuelles?

Des moyens nouveaux de modifier des organismes ou d'en créer d'autres (suite)

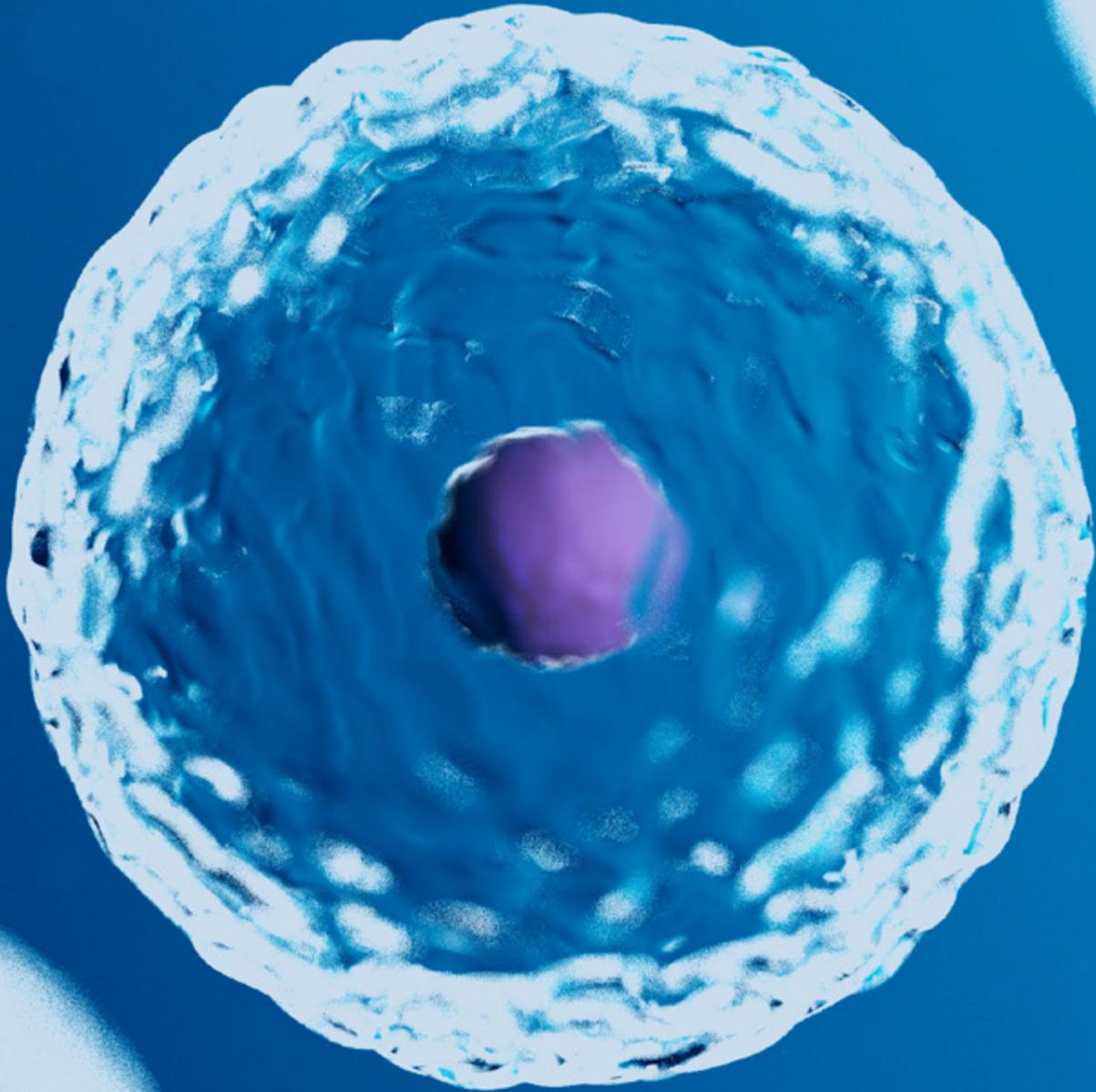
- Des scientifiques utilisent l'apprentissage automatique pour accélérer la production de biocarburants [en anglais]³⁵
- À l'image des circuits numériques, un « multimètre biologique » du nom de PERSIA permet aux chercheurs de mesurer les fonctions biologiques de circuits génétiques in vitro et en temps réel [en anglais]³⁶



Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?	Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?	Quelles sont les possibilités actuelles?
<i>Des moyens nouveaux de modifier des organismes ou d'en créer d'autres (suite)</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Modification des substances produites par des organismes et des méthodes correspondantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Progrès dans le domaine du séquençage et de la modification de gènes, par exemple l'outil CRISPR/Cas9. 	<ul style="list-style-type: none"> • Des chercheurs utilisent des bactéries pour synthétiser du butanol à partir d'eau, de CO₂ et de la lumière du soleil [en anglais]³⁷
<i>Des manières nouvelles de modifier les écosystèmes</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Modifier et éradiquer des espèces entières 	<ul style="list-style-type: none"> • La modification de cellules germinales, à l'aide d'approches telles que l'outil CRISPR et le forçage génétique, crée des manières nouvelles de modifier la faune ou les écosystèmes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le consortium Target Malaria libère des moustiques génétiquement modifiés au Burkina Faso, dans le cadre d'un essai de forçage génétique [en anglais]³⁸
<ul style="list-style-type: none"> • Modification de l'environnement naturel à une échelle donnée 	<ul style="list-style-type: none"> • Des approches de géoingénierie permettent de modéliser avec précision la capture du CO₂ ou la réflectance solaire. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ingénierie de micro-organismes dans des tourbières pour capturer et stocker le CO₂ et contrebalancer le changement climatique [en anglais]³⁹

Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?	Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?	Quelles sont les possibilités actuelles?
<i>Des manières nouvelles de modifier les écosystèmes (suite)</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Prédiction et gestion de la propagation des organismes 	<ul style="list-style-type: none"> • L'épidémiologie numérique s'appuie sur des technologies de communication et d'analyse numériques pour suivre des maladies. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les systèmes Flutracking⁴⁰ et InfluenzaNet utilisent des réseaux de volontaires connectés numériquement pour suivre les éclosions de grippe [en anglais]
<i>Des manières nouvelles de percevoir, de stocker, de traiter et de transmettre des renseignements</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Manières nouvelles de stocker des renseignements à l'aide de systèmes biologiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Stocker de grandes quantités de renseignements numériques dans des systèmes biologiques pendant des périodes plus longues qu'avec les technologies actuelles. 	<ul style="list-style-type: none"> • La société Microsoft et l'Université de Washington font la démonstration du premier système entièrement automatisé de stockage de données dans de l'ADN [en anglais]⁴¹
<ul style="list-style-type: none"> • Transformation d'organismes en ordinateurs biologiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des organismes et des caractéristiques biologiques pour effectuer des calculs. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'outil CRISPR permet de construire des ordinateurs bicœurs à l'intérieur de cellules humaines [en anglais]⁴²
<ul style="list-style-type: none"> • Création de matériaux biomimétiques 	<ul style="list-style-type: none"> • S'inspirer de systèmes biologiques pour concevoir des systèmes électroniques et numériques plus efficaces. 	<ul style="list-style-type: none"> • Des chercheurs créent une peau et des systèmes nerveux artificiels plus sensibles que la peau humaine [en anglais]⁴³

Quelles nouvelles capacités s'offrent à nous?	Quelles associations de technologies biologiques et numériques le permettent?	Quelles sont les possibilités actuelles?
<i>De nouvelles façons de gérer l'innovation biologique, la production et les chaînes d'approvisionnement</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Approches plus efficaces et plus évolutives en matière de recherche et de production 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser des systèmes numériques pour augmenter la production biologique. • Utiliser des systèmes numériques pour automatiser la recherche. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'institut Fraunhofer automatise la culture de microalgues dans des photobioréacteurs [en anglais]⁴⁴ • L'automatisation des laboratoires accélère la recherche [en anglais]⁴⁵ • Des robots fermiers réussissent à planter et à récolter de l'orge tout seuls [en anglais]⁴⁶ • Vers la découverte autonome d'antibiotiques [en anglais]⁴⁷
<ul style="list-style-type: none"> • Gestion des chaînes d'approvisionnement de plus en plus ouverte et efficace 	<ul style="list-style-type: none"> • L'apprentissage automatique et les registres partagés permettent de suivre le matériel et simplifient les contrôles. 	<ul style="list-style-type: none"> • La chaîne de blocs devient une « source de vérité » pour la biopharmaceutique [en anglais]⁴⁸
<ul style="list-style-type: none"> • Collaboration ouverte sur les lignées cellulaires et les génomes à l'appui de la recherche 	<ul style="list-style-type: none"> • Des réseaux numériques facilitent l'échange efficace de codes et de matériel biologiques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le projet « The Frozen Farmyard » : création d'un dépôt de lignées cellulaires de viande propres [en anglais]⁴⁹



Quelles sont les caractéristiques de la convergence bionumérique?

Au vu des premiers signaux faibles, voici les caractéristiques possibles du système bionumérique :

- la démocratisation;
- la décentralisation;
- la diffusion géographique;
- l'extensibilité;
- la personnalisation;
- la dépendance aux données.

Voici un aperçu de chacune des caractéristiques potentielles du bionumérique et de leurs répercussions possibles.

La démocratisation

Jusqu'à récemment, la biologie cellulaire et la biotechnologie consistaient généralement en des activités d'élaboration et de production dans des laboratoires stériles et des usines spécialisées, à l'aide d'une expertise et d'un équipement coûteux.

Aujourd'hui, les progrès réalisés dans les domaines des logiciels et du matériel informatique éliminent ces contraintes sur la production dans les sciences biologiques et la biotechnologie. La possibilité de commander des systèmes à distance et de transmettre des ensembles d'instructions sous une

forme numérique, ainsi que les niveaux d'automatisation plus élevés, rapproche les consommateurs de la production axée sur la biologie.

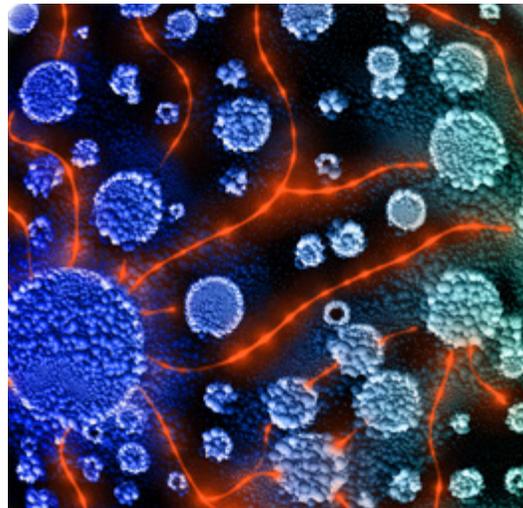
Par exemple, la bio-ingénierie par correspondance ou les trousse d'outils CRISPR permettent aux pirates de la bio-informatique d'acheter et de réaliser des altérations génétiques à domicile. Parmi la gamme d'options de consommation accessibles en ligne à un prix relativement abordable, nous citerons une « trousse de démarrage en conception génétique » à 30 USD qui permet à un débutant travaillant confortablement à sa table de cuisine d'insérer un gène dans une méduse pour la faire briller⁵⁰. Une autre trousse d'outils CRISPR permet à son acheteur de modifier le génome de bactéries capables de se reproduire, pour 159 USD⁵¹. Une troisième trousse de démarrage en « biologie moléculaire et en génie génétique » coûte moins de 170 USD.⁵²

La baisse du coût du séquençage du génome est un autre exemple de la démocratisation de la biotechnologie. Le premier séquençage d'un génome complet (lecture des 3 milliards de paires de bases) en 2003 a duré 13 ans et a coûté plus de 3 milliards d'USD. En 2016, le prix avait chuté à environ 1 000 USD. En juillet 2019, cela coûte 599 USD, et la société de génétique à caractère personnel Veritas Genetics prévoit que le prix tombera en dessous de 200 USD d'ici 2022⁵³. En conséquence, un marché de consommateurs pour le génotypage (séquençage de moins de 1 % du génome) a émergé, pour des personnes qui s'intéressent à leur patrimoine ou pour découvrir des renseignements sur

leur santé ciblés, ce qui se traduit par des services tels que 23andMe.

La décentralisation

Les productions décentralisées devraient se multiplier, à mesure que les capacités de la biologie synthétique augmenteront. Les produits qu'il fallait créer ou extraire dans un lieu géographique précis pourraient être créés à plus grande échelle, à mesure que l'humain progressera en matière d'assemblage – ou de culture – de composés organiques et non organiques au moyen de procédés chimiques et biologiques plus rapides, moins coûteux et personnalisés.



Nous citerons notamment la capacité de créer de la nourriture et de la viande industrielles sans avoir besoin de terres arables⁵⁴. Les cellules de viande cultivées en laboratoire – qui se développent dans un environnement contrôlé pour produire des cellules musculaires et de la viande cultivée – pourraient changer la donne en entraînant la décentralisation de multiples industries, de l'agriculture au transport.

La société de biotechnologie japonaise Spiber a mis au point une protéine génétiquement modifiée, appelée Brewed Protein⁵⁵, qui peut servir soit en tant que textile pour l'industrie de la mode soit en tant que matériau robuste pour les industries de la construction et de l'automobile. Quant à la biomasse produite localement grâce à des bioréacteurs⁵⁶ axés sur des algues capturant le dioxyde de carbone, elle pourrait être transformée en produits tels que du carburant, du plastique ou des cosmétiques.

La diffusion géographique

La décentralisation pourrait permettre aux économies pauvres en ressources naturelles de concurrencer les pays qui en sont riches dans le domaine de la production de biens, grâce à des technologies bionumériques permettant de produire des matériaux qu'il fallait auparavant importer.

L'intérêt croissant pour la recherche libre et accessible au public pourrait permettre une diffusion géographique rapide. Plus généralement, la diffusion des connaissances dans le domaine du bionumérique pourrait être rapide s'il existe une volonté de partager les renseignements. Certains chercheurs offrent un accès à toutes leurs données. Par exemple, des bioingénieurs pionniers de l'Université de Washington commercialisent des progrès récents en matière d'organes 3D. Par l'intermédiaire de leur société Volumetric, ils ont mis gratuitement à disposition toutes les données de base de leurs expériences sur des réseaux vasculaires imprimés en 3D⁵⁷.



L'extensibilité

L'expansion pourrait être rapide, aussi bien dans le monde numérique que dans le monde biologique. Il est possible de copier des données rapidement et, en général, de copier facilement des organismes biologiques simples. Cela signifie qu'il sera possible de créer rapidement des unités de production supplémentaires dans les deux domaines.

En d'autres termes, l'économie bionumérique pourrait avoir pour particularité des coûts marginaux de production très faibles. En cas de concurrence entre des fournisseurs, cette caractéristique pourrait réduire de manière considérable le coût de bon nombre de biens ou de services bionumériques pour les consommateurs.

Des coûts marginaux de production faibles et une simplicité de duplication signifient par ailleurs que les innovations dans l'économie de la convergence bionumérique pourraient être très évolutives.



La personnalisation

Les systèmes biologiques sont à la fois simples et complexes. En tant que systèmes dynamiques, ils peuvent réagir de manière imprévue ou provoquer des répercussions multiples difficiles à dissocier. Cette complexité constitue une caractéristique des systèmes biologiques, et non un bogue, car elle signifie que les systèmes peuvent être très adaptables et variés. Plusieurs méthodes pourraient permettre d'obtenir un même résultat souhaité, ce qui témoigne d'une possibilité d'atteindre des degrés élevés de personnalisation.

Les approches et les dispositifs de production pourraient tirer parti de cette complexité pour produire des résultats biologiques multiples et personnalisés à partir d'un système unique. Par exemple, les économies d'échelle permettent aux entreprises spécialisées en biologie synthétique de produire des centaines d'organismes et de produits différents à l'aide de procédés semblables⁵⁸.

Dans le contexte des soins de santé, nous pouvons citer, à titre d'exemple de la complexité biologique, notre compréhension croissante du microbiome humain – les trillions de bactéries non humaines qui vivent dans et sur notre corps et dont le nombre, selon les estimations, est égal ou supérieur à celui de nos propres cellules humaines. Notre microbiome a des répercussions sur de nombreux aspects de notre vie, de la digestion à l'humeur en passant par les odeurs corporelles. Des thérapies bionumériques ciblant les microbiomes, personnalisées pour une efficacité maximale, pourraient émerger en premier.

La dépendance aux données

Les technologies et les applications tirant parti de la convergence bionumérique ne pourront pas fonctionner sans de grandes quantités de données. Par exemple, le domaine de la biologie computationnelle met à profit des outils numériques et l'analyse de données pour comprendre des systèmes biologiques⁵⁹, y compris le déploiement d'algorithmes d'apprentissage profond pour analyser des images de cellules afin de détecter des tendances que des humains ne parviendraient pas à distinguer⁶⁰. Des techniques telles que le séquençage de gènes de prochaine génération sont extrêmement gourmandes en données, ce qui crée de nouveaux défis en matière de partage, d'archivage, d'intégration et d'analyse de ces données⁶¹.

Le marché mondial de la biologie computationnelle devrait passer de 7,73 milliards d'USD en 2018 à 13,50 milliards d'USD en 2023, soit un taux de croissance annuel composé de 14,5 %⁶².

Le taux de croissance des données qui alimentera cette expansion pourrait être supérieur encore.

Les données demandées sont très variées. En amont des procédés de production, les données peuvent aussi constituer un atout important, sous la forme de génomes, de phénotypes ou de contextes environnementaux concernant un ensemble diversifié d'humains et une vaste gamme d'organismes uniques. La bioprospection constitue déjà un

aspect important de la mise au point de médicaments et elle pourrait continuer de prendre de l'importance – et provoquer une controverse encore plus intense dans le domaine des soins de santé⁶³.

L'atteinte du plein potentiel de la convergence bionumérique peut ainsi exiger un flux constant de données. La collecte, la gestion, la diffusion et la gouvernance de ces données pourraient devenir un processus gourmand en ressources, voire une industrie à part entière et beaucoup plus importante.





Quels changements pourraient survenir à mesure que la convergence bionumérique se poursuit?

La dynamique du monde bionumérique décrite précédemment – démocratisation, décentralisation, diffusion géographique, extensibilité, personnalisation et dépendance aux données – pourrait contraindre les personnes, les gouvernements, les organisations et l'industrie à changer leur mode de fonctionnement.

À Horizons de politiques, nous explorerons les répercussions potentielles de la convergence bionumérique dans le cadre d'une étude prospective approfondie. Dans la section qui suit, nous mettons en lumière certaines questions initiales pertinentes pour les politiques dans les domaines économique, social, écologique, géopolitique et de la gouvernance.

Économie

Les avantages concurrentiels classiques fondés sur les ressources pourraient-ils s'estomper?

Les systèmes de production – leur structure, les personnes aux commandes et celles qui bénéficient de leur valeur – pourraient évoluer de manière drastique durant la convergence bionumérique.

La demande de nombreux produits de base traditionnels, y compris les matières premières, pourrait chuter si nous concevons des alternatives d'origine biologique. Le passage à une production distribuée ou décentralisée reposant sur des technologies biologiques pourrait réduire la primauté de la répartition des terres ou d'autres ressources naturelles entre les pays et les régions.

La démocratisation et la décentralisation de la production pourraient mettre au défi les pays, les régions, les collectivités et les entreprises qui comptaient jusqu'alors sur des ressources naturelles rares ou des facteurs géographiques uniques pour produire des biens et des services. Les fabricants dépendants d'une certaine proximité ou d'un accès spécial à des ressources actuellement rares pourraient se voir contraints de concevoir ou d'adopter des technologies et des approches nouvelles⁶⁴ pour demeurer concurrentiels.

Les systèmes d'éducation et de formation devraient-ils être adaptés pour combler les lacunes éventuelles en matière de compétences?

La production et l'utilisation finale de technologies bionumériques pourraient être simplifiées, mais la conception et l'élaboration de ces technologies pourraient demeurer exigeantes sur le plan technique. La demande de compétences dans les domaines du numérique et du biologique pourrait augmenter à mesure que la convergence bionumérique progressera, et les personnes capables d'intervenir à la frontière entre les deux pourraient être très recherchées. La demande de

talents pourrait dépasser l'offre, du moins temporairement.

Quelles formes pourraient prendre les cadres de protection des données et de la propriété intellectuelle à l'ère du bionumérique?

Les répercussions possibles des services bionumériques pourraient stimuler des changements dans les régimes nationaux ou mondiaux des droits de propriété intellectuelle, en particulier en réaction aux thérapies novatrices en matière de santé, aux innovations agricoles qui sont particulièrement importantes pour la sécurité alimentaire, et aux approches qui pourraient atténuer le changement climatique.

Les règles touchant la propriété intellectuelle et la protection des données pourraient constituer des goulots d'étranglement dans un monde bionumérique en encourageant et en restreignant l'innovation tout à la fois. En parallèle, la démocratisation de l'accès aux outils bionumériques pourrait simplifier la reproduction de nombreuses innovations bionumériques exclusives grâce à des approches parallèles, mais distinctes, ce qui accroîtrait la concurrence et diminuerait les rentes générées par la propriété intellectuelle.

Comment les politiques peuvent-elles favoriser un environnement d'affaires concurrentiel dans un monde bionumérique?

Les plateformes pourraient jouer un rôle important dans un monde où les systèmes biologiques et numériques seraient étroitement liés, à l'image de la publicité en ligne, des réseaux sociaux et du

commerce électronique. Les politiques en matière de données pourraient avoir des répercussions sur la position avantageuse ou non des grands organismes dans une économie bionumérique axée sur la capacité exclusive d'accéder à de grandes quantités de données, de les acheter, de les gérer et de les protéger.

La dépendance aux données inhérente à la convergence bionumérique signifie que la demande de données pourrait augmenter considérablement – en particulier les données humaines, animales, végétales et bactériennes. De grandes plateformes pourraient recueillir et contrôler de grandes quantités de renseignements sur les personnes, leur contexte et le monde naturel. Certaines plateformes pourraient essayer de capter de la valeur en exploitant un écosystème bionumérique fermé.

Société

Les attitudes sociales pourraient-elles s'orienter vers la santé et le mode de vie?

La définition d'une bonne santé pourrait évoluer au cours de la convergence bionumérique, ce qui aurait des répercussions sur les relations sociales. Aujourd'hui, la santé est associée principalement à la capacité d'éviter les maladies et de participer à une gamme complète d'activités humaines.

En cas de convergence bionumérique, la connaissance détaillée du corps humain, de son microbiome et des fonctions biologiques pourrait créer des occasions nouvelles de comprendre et d'agir sur notre santé. Une amélioration maximale de la santé pourrait nécessiter un large éventail d'interventions comportementales et nutritionnelles

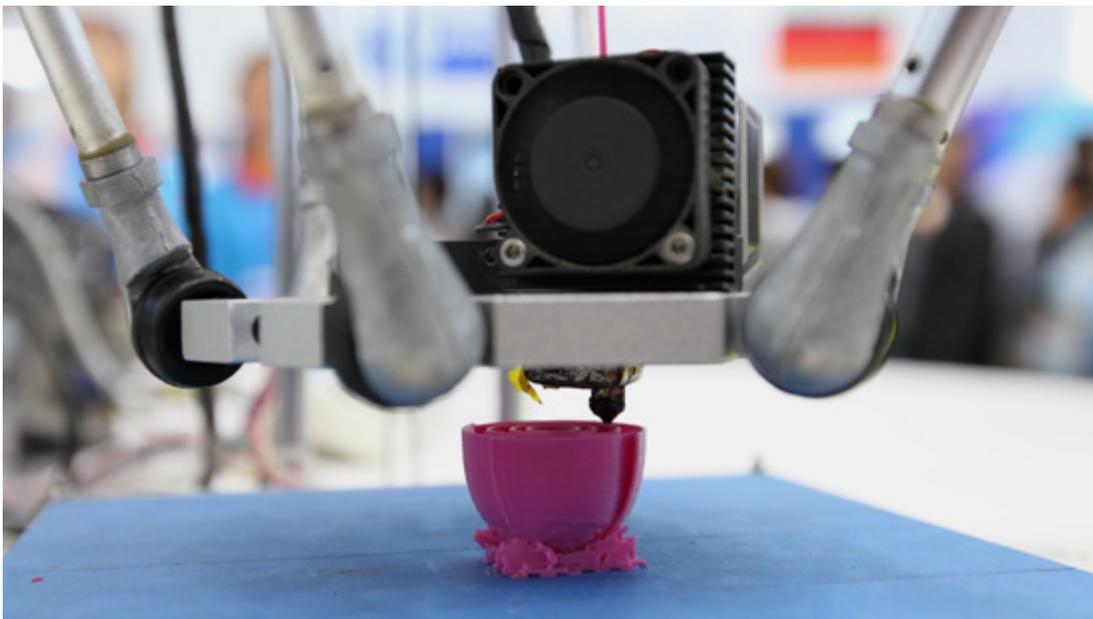
plus précises. À mesure que les données deviendront plus accessibles, la santé pourrait devenir un symbole de statut. L'accès à des médicaments nootropiques (médicaments visant l'amélioration du fonctionnement du cerveau) et leur financement pourraient soulever des questions de politique sociale.

Les progrès pourraient améliorer considérablement la santé, mais certaines personnes pourraient percevoir l'amélioration des technologies bionumériques comme un moyen d'atténuer les effets de modes de vie malsains.

Quelles politiques pourraient contribuer à remédier aux inégalités en matière de santé?

La convergence bionumérique pourrait accélérer l'élaboration de technologies capables de rehausser les capacités humaines au-dessus de la norme, que ce soit à l'aide de médicaments, de compléments alimentaires, de prothèses ou de technologies neuronales. L'inégalité d'accès à des technologies coûteuses pourrait aggraver les inégalités économiques.

L'inégalité d'accès pourrait avoir des répercussions négatives sur des groupes défavorisés et vulnérables, mais la démocratisation des produits et des services de santé bionumériques pourrait compenser en partie cette fracture. Par exemple, si nous pouvions produire des médicaments capables de sauver ou d'améliorer des vies d'une manière sûre, fiable et bon marché, les inégalités en matière de santé pourraient diminuer en conséquence.



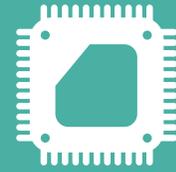
Quelles politiques pourraient favoriser la confiance entre les partenaires et les parties prenantes?

La convergence bionumérique repose sur un large éventail de données biologiques, ce qui pourrait changer la manière dont les citoyens interagissent avec les entreprises prestataires de services. La relation entre les entreprises et les personnes pourrait exiger des niveaux de confiance plus élevés si les entreprises cherchent à accéder à des données très personnelles sur notre vie et notre corps.

Par exemple, des « jumeaux numériques » d'êtres humains pourraient devenir des atouts précieux à d'autres fins que les soins de santé. Les services sociaux, le système judiciaire, les services environnementaux et les prestataires de services éducatifs pourraient tous avoir besoin de gagner notre confiance, de gérer des données de plus en plus intimes concernant les gens et le monde qui les entoure, et de manipuler ces données en conséquence.

Des politiques acceptables par le public en matière de données pourraient tantôt favoriser la convergence bionumérique et tantôt lui nuire. La facilité avec laquelle de nombreuses parties pourraient extraire ou utiliser des données personnelles concernant le génome, le biome, les marqueurs de santé et le contexte d'une personne pourrait entraîner une demande pour des règlements plus poussés que les lois existantes en matière de protection des renseignements personnels sur la santé. À mesure que le séquençage de gènes deviendra moins coûteux et plus répandu, des préoccupations entourant la protection de la vie privée – qui ont été largement limitées au système judiciaire et aux pratiques en matière d'assurance – pourraient se manifester dans d'autres domaines de l'activité humaine.

« L'avenir n'est plus ce qu'il était. »



Le bionumérique pourrait évoluer de nombreuses manières, et un avenir dans lequel le bionumérique ferait partie intégrante de l'existence humaine pourrait s'avérer très différent. Les récits qui suivent sont hypothétiques, mais ils décrivent des scénarios qui pourraient survenir à mesure que les systèmes biologiques et numériques convergeront.

Un prolongement radical de la durée de vie : Après une décennie de simulation de la biochimie humaine à l'aide de l'apprentissage automatique, une entreprise asiatique est la première à concevoir et à breveter une thérapie radicale de prolongation de la vie. Axée sur la modification du génome humain dans les cellules de tout le corps, cette thérapie ralentit considérablement la détérioration cellulaire, ce qui offre aux utilisateurs jusqu'à 15 années de vie saine supplémentaires. Elle est toutefois efficace pour les personnes âgées de moins de 40 ans seulement. Le traitement est commercialisé dans le monde entier au prix de 10 millions d'USD par séance. Plus de 5 000 patients s'inscrivent au traitement au cours du premier mois suivant l'annonce, dont 120 Canadiens. Scénario inspiré du rapport de la banque Barclays sur la longévité « Beyond 100 » [en anglais]⁶⁵

Une nourriture adaptée à votre système digestif unique : L'une des entreprises du secteur alimentaire dont la croissance est la plus rapide utilise l'analyse des microbiomes pour créer des plans nutritionnels personnalisés et évolutifs. En concevant des aliments pour les besoins précis de votre corps – et les trillions d'organismes non humains qui composent votre microbiome – le programme MyBestBiome vous promet plus d'énergie et un mieux-être. En outre, 90 % des protéines animales sont produites à l'aide de méthodes durables à partir d'insectes spécialement conçus à cet effet. Le piège? Pour recevoir le produit et ses prétendus bienfaits pour la santé, vous devez accorder à l'entreprise des droits d'accès à l'ensemble de votre biome et aux données connexes. Scénario inspiré des articles [Les régimes alimentaires devraient être adaptés à votre microbiome intestinal, selon une étude](#) [en anglais] et [Des aliments conçus pour nourrir le microbiote intestinal humain](#) [en anglais]⁶⁶

Cauchemar neurotechnologique : Un supermarché canadien de premier plan connaît une année difficile. Il a été mêlé à un scandale concernant plusieurs aspects de son programme de fidélisation. Le programme « Votre choix » offre des rabais spéciaux et des commandes programmées à l'avance si vous lui accordez un accès complet à votre « double numérique », c'est-à-dire un accès complet à votre vie et à votre activité. Selon un rapport interne ayant fait l'objet d'une fuite, il semble que ces données sont utilisées conjointement avec des technologies neuronales intrusives qui encouragent les membres à consommer davantage. Au cœur du scandale se trouve le fait que le supermarché s'applique essentiellement à vendre l'accès à l'esprit des membres de son programme « Votre choix », en sous-traitant massivement la manipulation ciblée de consommateurs. Scénario inspiré de l'article [Vers de nouveaux droits de la personne à l'ère des neurosciences et de la neurotechnologie](#) [en anglais]⁶⁷

Un séquençage de gènes omniprésent pourrait avoir des répercussions sur la vie privée et sur le consentement des familles et des collectivités, étant donné que le test d'ADN d'un individu fournit des renseignements sur ses proches biologiques. Depuis des décennies, les collectivités autochtones sont des chefs de file en matière de formulation d'une éthique de la recherche axée sur la collectivité, particulièrement en ce qui concerne les renseignements génétiques et sur la santé⁶⁸. Les gouvernements pourraient être contraints d'étendre leurs réflexions au-delà de la vie privée individuelle, pour examiner le concept de vie privée collective, en particulier lorsque des données génétiques peuvent avoir des répercussions sur les droits ou les libertés d'autres personnes.

Environnement

Quels changements pourraient survenir dans l'aménagement des terres et l'environnement naturel?

La convergence bionumérique pourrait modifier nos outils et nos valeurs en ce qui concerne la terre et l'environnement naturel.

Si la demande pour certaines matières premières produites de manière traditionnelle diminue, le prix de ces ressources pourrait diminuer, ce qui modifierait l'utilisation des terres. Les zones industrielles pourraient prendre de la valeur au détriment des terres agricoles, tandis que les zones présentant une biodiversité particulière pourraient gagner en valeur et en importance si elles offrent des données, des services écologiques et des matières premières pour la bioprospection.

L'ampleur du défi climatique pourrait accroître l'attrait et la faisabilité de la géoingénierie et de la bio-ingénierie. La libération de micro-organismes personnalisés pourrait aider à rehausser l'efficacité des tourbières à absorber le dioxyde de carbone⁶⁹.

Le bionumérique pourrait modifier notre trajectoire vers la durabilité et l'économie circulaire, grâce à une utilisation plus efficace des matériaux et à la réduction des répercussions sur l'environnement de la production et de l'extraction de ressources. Par exemple, la société Fraunhofer IGB a élaboré une nouvelle approche pour créer des bioplastiques biodégradables et sûrs pour une utilisation alimentaire. Les polymères hybrides minéralo-organiques ainsi créés empêchent les gaz et les vapeurs de nuire aux aliments, et ils peuvent être appliqués aux emballages en bioplastique et en papier, ce qui permet d'obtenir des produits enduits (tels que les emballages pour aliments à emporter) entièrement biodégradables⁷⁰.

Géopolitique

Quelles politiques sont nécessaires pour demeurer concurrentiel dans un environnement bionumérique mondial?

Les avantages économiques de la convergence bionumérique stimulent déjà la concurrence à l'échelon national, ainsi que les efforts pour protéger les industries et empêcher les prises de contrôle étrangères de l'innovation nationale dans certains pays. Par exemple, plusieurs transactions impliquant des investisseurs étrangers dans des entreprises de biotechnologie aux États-Unis ont échoué depuis l'ajout de ce domaine à la

Committee on Foreign Investment in the United States Law, à l'occasion de la mise à jour de 2018⁷¹.

Les pays pourraient aussi entrer en concurrence, en fonction de la rigueur et de la rapidité des approbations réglementaires et de l'éthique. Certains pays pourraient essayer d'attirer des investissements en offrant des environnements réglementaires propices à des progrès rapides dans le domaine du bionumérique, potentiellement au détriment des normes et des pratiques en matière de bioéthique qui seraient en vigueur ailleurs.

Que faut-il pour protéger la sécurité des citoyens dans un monde bionumérique?

La biologie synthétique pourrait comprendre de nombreuses technologies à double usage, possiblement appliquées aussi bien à des fins civiles que militaires. Des micro-organismes peuvent produire des agents pathogènes ou des toxines. La gestion des utilisations malveillantes des technologies – en particulier celles qui sont distribuées – dans un monde bionumérique constitue déjà une source de préoccupation⁷².

La biosûreté pourrait être importante dans un monde dépendant de systèmes bionumériques. Par exemple, l'initiative Safe Genes de la Defense Advanced Research Projects Agency des États-Unis a pour objectif de mettre au point des outils pour contrôler, contrer et peut-être inverser les effets de modifications du génome, y compris les forçages génétiques, dans les systèmes biologiques⁷³.

Il existe également un risque de dissémination malveillante, imprudente ou accidentelle de virus mortels fabriqués en laboratoire. Par exemple, un virologue de l'Université de l'Alberta est parvenu à utiliser des techniques de biologie synthétique pour recréer la variole équine (un virus semblable à la variole), en recombinant de l'ADN commandé par la poste afin de reconstituer la séquence du génome de cette maladie, qui a été publiée en 2006⁷⁴.

Gouvernance

Comment la réglementation et l'élaboration des politiques peuvent-elles tenir compte des préoccupations sociales concernant les percées bionumériques?

Il existe une distinction importante entre ce qui est technologiquement possible et ce qui est socialement acceptable. La convergence bionumérique pourrait mettre en évidence des lacunes et des retards en matière de politiques et de réglementation, tant au sein des gouvernements que d'un gouvernement à l'autre. Elle pourrait aussi offrir des possibilités de concevoir des approches réglementaires nouvelles, intégrées et adaptées aux systèmes bionumériques, tout comme d'autres technologies émergentes permettent aux systèmes de gouvernance de devenir plus agiles⁷⁵.

L'acceptabilité sociale peut jouer un rôle central dans l'évolutions technologiques et réglementaires, en particulier lorsqu'il est question de reproduction humaine ou de systèmes alimentaires. Par exemple, les disparités dans la réaction juridique et sociale aux cultures génétiquement modifiées – qui sont liées à des approches philosophiques divergentes quant à la



gestion des risques et à des dynamiques du pouvoir différentes entre les secteurs privé et public – ont donné naissance à des environnements réglementaires très différents en Amérique du Nord et en Europe⁷⁶. Les barrières réglementaires à l'entrée pourraient avoir des répercussions négatives sur les petits exploitants, en particulier dans les secteurs de l'alimentation et des soins de santé, qui sont très réglementés et compartimentés par secteur de compétence.

Les préoccupations sociales ont souvent une incidence sur les systèmes de réglementation et sur les processus de réforme – en particulier dans les domaines de la sécurité, de la sûreté, de la tarification, de l'accès et les droits des travailleurs. Par ailleurs, l'acceptation sociale peut souvent être un moteur plus puissant que les recours en justice ou l'application de la loi afin d'encourager la conformité⁷⁷. Les perspectives sur les technologies bionumériques peuvent varier d'un groupe à l'autre, et les diverses traditions en

matière d'éthique, y compris les points de vue et les connaissances autochtones⁷⁸, pourraient aider à façonner des solutions éclairées.

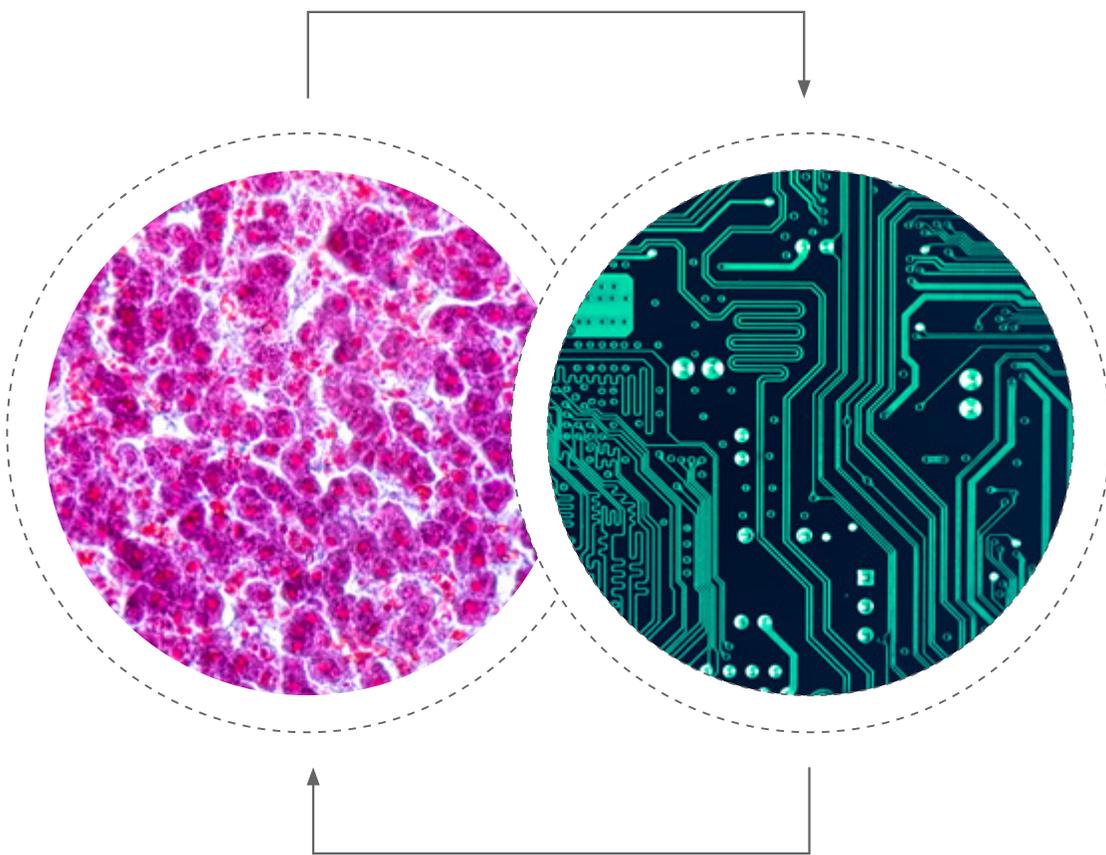
Le cadre fiscal actuel est-il adapté au monde du bionumérique?

Les caractéristiques du domaine du numérique pourraient s'étendre au domaine du bionumérique, ce qui compliquerait le suivi et la perception des taxes. Cette situation pourrait à son tour créer des défis quant aux éléments à soumettre à des taxes et aux agences de revenu⁷⁹. La valeur de l'homologation éventuelle d'un bien bionumérique découle de ses composants, et non du produit final combiné. Cela pourrait restreindre la capacité des autorités d'évaluer les taxes dues à la vente d'un produit final et de prélever ces taxes, ce qui réduirait par la même occasion les recettes totales tirées de taxes sur la valeur ajoutée.

Les systèmes de finances publiques doivent-ils être réévalués pour être durables dans un monde bionumérique?

Outre les avantages d'une vie prolongée, l'allongement de l'espérance de vie pourrait remettre en question la fiscalité, la sécurité sociale, les soins de santé et les systèmes de logement si les avantages

pour la santé offerts par la convergence bionumérique s'avéraient importants. Les fonds de retraite, les dépenses de santé publique et l'hébergement des personnes âgées pourraient connaître des répercussions à la fois positives et négatives.





Questions de politiques générales découlant de la convergence bionumérique

➤ Économie

- Les avantages concurrentiels classiques fondés sur les ressources pourraient-ils s'estomper?
 - Les systèmes d'éducation et de formation devraient-ils être adaptés pour combler les lacunes éventuelles en matière de compétences?
 - Quelle forme pourraient prendre les cadres de protection des données et de la propriété intellectuelle à l'ère du bionumérique?
 - Comment les politiques peuvent-elles favoriser un environnement d'affaires concurrentiel dans un monde bionumérique?
-

➤ Société

- Quelles politiques pourraient favoriser la confiance entre parties prenantes?
 - Quelles politiques pourraient aider à éviter l'accroissement potentiel des inégalités en matière de santé?
 - Les attitudes sociales à l'égard de la santé et du mode de vie pourraient-elles changer?
-

➤ Environnement

- Quels changements pourraient survenir dans l'utilisation des terres et l'environnement naturel?
-

➤ Géopolitique

- Quelles politiques sont nécessaires pour demeurer concurrentiel dans un environnement bionumérique mondial?
 - Que faut-il pour protéger la sécurité des citoyens dans un monde bionumérique?
-

➤ Gouvernance

- De quelle manière l'élaboration de règlements et de politiques peut-elle tenir compte des préoccupations sociales concernant les progrès du bionumérique?
- Le cadre fiscal actuel est-il adapté au monde du bionumérique?
- Les systèmes de gestion des finances publiques doivent-ils être réévalués pour être durables dans un monde bionumérique?

Conclusion

Avec l'émergence du bionumérique, nous sommes peut-être à l'aube d'une transformation à long terme de notre économie, de notre société, de nos institutions et de notre environnement. Cette convergence bionumérique pourrait bouleverser notre manière de produire et de consommer des biens et des services, d'interagir les uns avec les autres, d'entretenir et d'améliorer notre corps, de collecter et de traiter des données, de prendre des décisions ou encore de gérer notre place au sein des écosystèmes.

À la fin des années 1970 et au début des années 1980, les Canadiens et les décideurs ont commencé à comprendre que l'ère du numérique était à leur porte. Des pionniers ont saisi des occasions, discerné des défis et instauré des politiques judicieuses qui nous ont procuré des avantages pendant des décennies. Le moment est peut-être venu de consentir des investissements semblables et de prendre des décisions éclairées pour guider le Canada à l'aube d'une convergence bionumérique.

Horizons de politiques Canada se réjouit à l'idée de collaborer avec des partenaires et des intervenants pour bâtir une vision prospective pertinente en matière de politiques dans ce domaine.



Remerciements

Horizons de politiques se situe à l'avant-garde d'un domaine de la prospective appelé la « convergence bionumérique ». Le présent document d'orientation constitue le cadre initial d'une étude prospective approfondie à venir. Avec de l'émergence de ce nouveau domaine, nous continuerons d'examiner les avenir plausibles de la convergence bionumérique et les questions de politiques qui pourraient se poser.

Équipe du projet « Explorer la convergence bionumérique »

Marcus Ballinger, gestionnaire

Steffen Christensen, analyste principal en prospective

Nicholas Davis, SWIFT Partners Sàrl

Kristel Van der Elst, directrice générale

Pierre-Olivier DesMarchais, analyste en prospective

Avalyne Diotte, analyste en prospective

Eric Ward, directeur principal

Communications

Maryam Alam, conseillère en communications

Nelly Leonidis, gestionnaire

Alain Piquette, graphiste

Nadia Zwierzchowska, stratège en communications

Nous tenons à remercier nos collègues Imran Arshad, Pascale Louis et Claudia Meneses pour leur appui à ce projet.

Nous nous réjouissons à l'idée de travailler avec des partenaires et des intervenants à l'étude de la convergence bionumérique.

horizons.gc.ca

Références

- 01 Kevin Warwick. « Implications and consequences of robots with biological brains ». Ethics and Information Technology. (2010) : 223-234. https://www.researchgate.net/publication/225865087_Implications_and_consequences_of_robots_with_biological_brains
- 02 Josh L. Morgan et Jeff W. Lichtman. « Digital tissue and what it may reveal about the brain ». BMC Biology. (2017). <https://bmcbiol.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12915-017-0436-9>
- 03 Elon Musk et Neuralink. « An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels ». (2019). <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/703801v2.full>
- 04 Toffler Associates. « Bio-Digital Convergence: The Human as Critical Infrastructure? ». (2016). <https://www.tofflerassociates.com/vanishing-point/biodigital-convergence-the-human-as-critical-infrastructure>
- 05 Emily Matchar. « Turning Dragonflies Into drones ». Smithsonian. (2017). <https://www.smithsonianmag.com/innovation/turning-dragonflies-drones-180962097/>
- 06 Travis M. Andrews. « Navy grants \$750,000 to develop bomb-sniffing locusts ». Washington Post. (2016). <https://www.washingtonpost.com/news/morning-mix/wp/2016/07/06/navy-grants-750000-to-develop-cyborg-locusts-to-sniff-out-bombs/?noredirect=on>
- 07 Kate O’Riordan. « Revisiting Digital Technologies: Envisioning Biodigital Bodies ». (2011). https://www.researchgate.net/publication/272554346_Revisiting_Digital_Technologies_Envisioning_Biodigital_Bodies
- 08 Victor Tangermann. « Scientists Gene-Edited Tequila Bacteria To Make Cannabinoids ». Neoscope, Futurism.com. 27 mars 2019. <https://futurism.com/scientists-gene-edited-tequila-bacteria-cannabinoids>
- 09 Ian Sample. « World’s first living organism with fully redesigned DNA created ». The Guardian. 15 mai 2019. <https://www.theguardian.com/science/2019/may/15/cambridge-scientists-create-worlds-first-living-organism-with-fully-redesigned-dna>
- 10 Hyojin Kim, Daniel Bojar et Martin Fussenegger. « A CRISPR/Cas9-based central processing unit to program complex logic computation in human cells ». PNAS. 9 avril 2019. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821740116>

- 11 Nethaji J.Gallage et Birger Lindberg Møller. « Vanillin–Bioconversion and Bioengineering of the Most Popular Plant Flavor and Its De Novo Biosynthesis in the Vanilla Orchid ». *Molecular Plant*. Vol. 8, n° 1 (5 janvier 2015) : 40-57. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2014.11.008>
- 12 Doctrine selon laquelle [traduction] « les organismes vivants sont fondamentalement différents des organismes non vivants, parce qu'ils contiennent certains éléments non physiques ou ne sont pas régis par les mêmes principes que les choses inanimées ». <https://en.wikipedia.org/wiki/Vitalism>
- 13 « Printeria: Team Valencia ». IGEM. Consulté le 5 août 2019. http://2018.igem.org/Team:Valencia_UPV
- 14 « CRISPR babies: more details on the experiment that shocked the world ». *New Scientist*. Consulté le 28 août 2019. <https://www.newscientist.com/article/2186911-crispr-babies-more-details-on-the-experiment-that-shocked-the-world/>
- 15 « Molecular biology meets computer science tools in new system for CRISPR ». *Phys.org*. Consulté le 28 août 2019. <https://phys.org/news/2016-01-molecular-biology-science-tools-crispr.html>
- 16 « Adaptive Assistance for Improved Well-Being and Productivity at Work ». SAP. Consulté le 28 août 2019. <https://news.sap.com/2018/10/sap-emoativ-adaptive-assistance-well-being-productivity-work/>
- 17 « People spent \$1.9 billion last year on apps to keep their brains sharp as they age—here's what actually works ». *MarketWatch*. Consulté le 28 août 2019. <https://www.marketwatch.com/story/older-americans-spent-19-billion-last-year-on-apps-to-keep-their-brains-sharp-heres-what-actually-works-2019-05-24>
- 18 « Guardant's liquid biopsy matches tissue testing in lung cancer ». *Vantage*. Consulté le 28 août 2019. <https://www.evaluate.com/vantage/articles/news/trial-results/guardants-liquid-biopsy-matches-tissue-testing-lung-cancer>
- 19 « The Self-Powered Sensor That Could Enable Remote Medical Monitoring ». *DZone*. Consulté le 28 août 2019. <https://dzone.com/articles/the-self-powered-sensor-that-could-enable-remote-m?fromrel=true>
- 20 « Amazon's new patent will allow Alexa to detect a cough or a cold ». *TheNextWeb*. Consulté le 28 août 2019. <https://thenextweb.com/artificial-intelligence/2018/10/15/amazons-new-patent-will-allow-alexa-to-detect-your-illness/>
- 21 « AI gives reliable coma outcome prediction ». *MedicalXpress*. Consulté le 28 août 2019. <https://medicalxpress.com/news/2019-06-ai-reliable-coma-outcome.html>

- 22 « New Progress in the Biggest Challenge With 3D Printed Organs ». SingularityHub. Consulté le 28 août 2019. <https://singularityhub.com/2019/05/07/new-progress-in-the-biggest-challenge-with-3d-printed-organs/>
- 23 « Lab-Grown Kidneys Shown to Be Fully Functional in Animal Recipients ». ScienceAlert. Consulté le 28 août 2019. <https://www.sciencealert.com/lab-grown-kidneys-shown-to-be-fully-functional-in-animal-recipients>
- 24 « Man Meets Machine: What It Means to Be A Biohacker ». Thrillist. Consulté le 28 août 2019. <https://www.thrillist.com/tech/nation/man-meets-machine-what-it-means-to-be-a-biohacker>
- 25 Elon Musk et Neuralink. « An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels ». BioRxiv. (2019). <https://doi.org/10.1101/703801>
- 26 « Bionic Limbs «learn» To Open A Beer ». Wired. Consulté le 28 août 2019. <https://www.wired.com/story/bionic-limbs-learn-to-open-a-beer/>
- 27 « Implanted Brain-Computer Interface (BCI) Devices for Patients with Paralysis or Amputation - Non-clinical Testing and Clinical Considerations ». FDA. (2019). <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/implanted-brain-computer-interface-bci-devices-patients-paralysis-or-amputation-non-clinical-testing>
- 28 « AI protein-folding algorithms solve structures faster than ever ». Nature. Consulté le 28 août 2019. <https://www.nature.com/articles/d41586-019-01357-6>
- 29 « Can bio-printing tumour cells, become a treatment against cancer? ». 3DNatives.com. Consulté le 28 août 2019. <https://www.3dnatives.com/en/bio-printing-tumour-treatment-cancer-180920184/>
- 30 Timothy Revell. « Tiny robots crawl through mouse's stomach to heal ulcers ». New Scientist. (2017). <https://www.newscientist.com/article/2144050-tiny-robots-crawl-through-mouses-stomach-to-heal-ulcers/#ixzz5v0xWhlrD>
- 31 « MIT researchers apply AI techniques to predict clinical trial outcomes ». Clinical Trials Arena. Consulté le 28 août 2019. <https://www.clinicaltrialsarena.com/news/mit-researchers-apply-ai-techniques/>
- 32 Paul F. South et coll. « Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field ». Science. Vol. 363, n° 6422 (janvier 2019).
- 33 Anna Nowogrodzki. « The automatic-design tools that are changing synthetic biology ». Nature. (Décembre 2018). <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07662-w>
- 34 « Biology By Design ». Ginkgo Bioworks. Consulté le 28 août 2019. <https://www.ginkgobioworks.com/>

- 35 « Scientists Use Machine Learning to Speed Up Biofuel Production ». R&D. Consulté le 28 août 2019. <https://www.rdmag.com/article/2018/06/scientists-use-machine-learning-speed-biofuel-production>
- 36 “A ‘biomultimeter’ lets scientists measure RNA and protein production in real time”, Lincoln Laboratory MIT , accessed October 17, 2019, <https://www.ll.mit.edu/news/biomultimeter-lets-scientists-measure-rna-and-protein-production-real-time>
- 37 Xufeng Liu et coll. « Modular engineering for efficient photosynthetic biosynthesis of 1-butanol from CO₂ in cyanobacteria ». Energy and Environmental Science. (2019).
- 38 « Target Malaria proceeded with a small-scale release of genetically modified sterile male mosquitoes in Bana, a village in Burkina Faso ». Target Malaria. Consulté le 28 août 2019. <https://targetmalaria.org/target-malaria-proceeded-with-a-small-scale-release-of-genetically-modified-sterile-male-mosquitoes-in-bana-a-village-in-burkina-faso/>
- 39 Christian Dunn, Nathalie Fenner, Anil Shirsat et Chris Freeman. « Options for Geoengineering the Climate via Microorganisms: A Peatland Case Study ». (2016). <https://www.caister.com/hsp/abstracts/climate/12.html>
« Climate Change and Microbial Ecology: Current Research and Future Trends ». Caister Academic Press, Royaume-Uni. (2016) : 185-200. <https://doi.org/10.21775/9781910190319.12>
- 40 « What is FluTracking? ». FluTracking. Consulté le 28 août 2019. <https://info.flutracking.net/>
- 41 « With a “hello,” Microsoft and UW demonstrate first fully automated DNA data storage ». Microsoft Innovation Stories. Consulté le 28 août 2019. <https://news.microsoft.com/innovation-stories/hello-data-dna-storage/>
- 42 « CRISPR used to build dual-core computers inside human cells ». New Atlas. Consulté le 28 août 2019. <https://newatlas.com/crispr-cell-computer/59336/>
- 43 Wang Wei Lee et coll. « A neuro-inspired artificial peripheral nervous system for scalable electronic skins ». Science Robotics. Vol. 4, n° 32 (17 juillet 2019).
- 44 « Process development in photobioreactors ». Fraunhofer IGB. Consulté le 5 août 2019. <https://www.igb.fraunhofer.de/en/research/competences/environmental-biotechnology/microalgae/process-development-in-photobioreactors.html>
- 45 « Taking Biotech to the Next Level with Laboratory Automation ». LabioTech.eu. Consulté le 28 août 2019. <https://labiotech.eu/features/biotech-laboratory-automation/>

- 46 Dyllan Furness. « Robot farmers have successfully planted and harvested barley by themselves ». Digital Trends. (2017). Consulté le 28 août 2019. <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/robot-farmers-harvest-barley/>
- 47 Cesar de la Fuente-Nunez. « Toward Autonomous Antibiotic Discovery ». Systems. Washington. Vol. 4, n° 3 (2019).
- 48 « Blockchain becomes a “source of truth” for biopharma ». MedCityNews. Consulté le 28 août 2019. <https://medcitynews.com/2018/12/blockchain-becomes-a-source-of-truth-for-biopharma/>
- 49 « Gets 250.000 US\$ to grow ethical meat in the lab ». Université d’Oslo. Consulté le 28 août 2019. <https://www.med.uio.no/imb/english/about/news-and-events/news/2019/250000-dollars-from-gfi.html>
- 50 « Genetic Design Starter Kit - Glowing Jellyfish Bacteria ». The Odin. Consulté le 5 août 2019. <http://www.the-odin.com/colorbacteria/>
- 51 « DIY CRISPR Kit ». The Odin. Consulté le 5 août 2019. <http://www.the-odin.com/diy-crispr-kit/>
- 52 « Genetic Engineering Home Lab Kit ». The Odin. Consulté le 5 août 2019. <http://www.the-odin.com/genetic-engineering-home-lab-kit/>
- 53 « Next in the Genomics Revolution: The Era of the «Social Genome» ». Veritas. Consulté le 21 août 2019. <https://www.veritasgenetics.com/next-genomics-revolution-era-social-genome>
- 54 « Researchers using tissue engineering to create lab-grown meat ». Phys. Org. Université de Bath. 20 mars 2019. <https://phys.org/news/2019-03-tissue-lab-grown-meat.html>
- 55 Mai Lide. « Japan bio venture to sell jacket made with synthetic protein textile ». Kyodo New. 29 août 2019. Consulté le 18 septembre 2019. <https://english.kyodonews.net/news/2019/08/1a3e6ab4b4c7-japan-bio-venture-to-sell-jacket-made-with-synthetic-protein-textile.html>
- 56 « Hypergiant Industries Launches Eos Bioreactor: A Prototype Bioreactor for Commercial and Personal Carbon Sequestration ». PR Newswire. 17 septembre 2019. Consulté le 18 septembre 2019. <https://www.prnewswire.com/news-releases/hypergiant-industries-launches-eos-bioreactor-a-prototype-bioreactor-for-commercial-and-personal-carbon-sequestration-300919790.html>
- 57 « Bioengineers have cleared a major hurdle on the path to 3D printing replacement organs ». Innovation Toronto. 4 mai 2019. <https://www.innovationtoronto.com/2019/05/bioengineers-have-cleared-a-major-hurdle-on-the-path-to-3d-printing-replacement-organs/>
- 58 « About ». Gingko Bioworks. Consulté le 5 août 2019. <https://www.ginkgobioworks.com/about/>

- 59 « Introduction to Bioinformatics ». In M. Yousef et J. Allmer (éd.), *miRNomics: MicroRNA Biology and Computational Analysis, Methods in Molecular Biology (Methods and Protocols)*. Humana Press, Tolga Can. Vol. 1107. (2014).
- 60 Sarah Webb. « Deep learning for biology ». *Nature*. N° 554 (2018) : 555-557. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-02174-z>
- 61 Rashmi Tripathi, Pawan Sharma, Pavan Chakraborty et Pritish Kumar Varadwaj. « Next-generation sequencing revolution through big data analytics ». *Frontiers in Life Science*. Vol. 9, n° 2 (2016). <https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1178180>
- 62 « Global Bioinformatics Market 2018-2023 ». Research and Markets. 20 septembre 2018. Consulté le 5 août 2019. <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/09/20/1573558/0/en/Global-Bioinformatics-Market-2018-2023-Growing-Demand-for-Nucleic-Acid-and-Protein-Sequencing-Due-to-Reduction-in-Sequencing-Cost-and-Technological-Advancement.html>
- 63 Bioprospection : Recherche de composés chimiques et de biomatériaux d'origine naturelle; cette activité s'applique actuellement aux organismes non humains. L'importance des vastes ensembles de données liés à la biologie et au comportement des individus signifie que la bioprospection pourrait être élargie aux humains et que les chercheurs et les entreprises pourraient mener activement un échantillonnage auprès de groupes raciaux, ethniques et culturels précis afin de rechercher des gènes précis ou des caractéristiques particulières du microbiome, afin de connaître les préoccupations relatives au consentement à ce sujet.
- « Protection of Traditional Knowledge Associated with Genetic Resources ». In Padma Nambisan, *An Introduction to Ethical, Safety and Intellectual Property Rights Issues in Biotechnology*. (2017) : 345-356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809231-6.00016-8>
- 64 « Process development in photobioreactors ». Fraunhofer IGB. Consulté le 5 août 2019. <https://www.igb.fraunhofer.de/en/research/competences/environmental-biotechnology/microalgae/process-development-in-photobioreactors.html>
- 65 « Beyond 100: Whitepaper ». Barclays. 23 novembre 2018. <https://privatebank.barclays.com/news-and-insights/beyond-100/beyond-100-impact-of-longevity-on-family-future-and-investments/>
- 66 “Food Design to Feed the Human Gut Microbiota”, PMC. March 22, 2018, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5951603/>
- 67 “Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology”, BMC. 26 April 2017, <https://lssjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40504-017-0050-1>

- 68 Voir par exemple Les principes PCAP^{MD} des Premières Nations, Centre de gouvernance de l'information des Premières Nations. Consulté le 9 octobre 2019. <https://fnigc.ca/fr/pcap>
- 69 Christian Dunn, Nathalie Fenner, Anil Shirsat et Chris Freeman. « Options for Geoengineering the Climate via Microorganisms: A Peatland Case Study ». In Jürgen Marxsen (éd.), *Climate Change and Microbial Ecology: Current Research and Future Trends*. Caister Academic Press, Royaume-Uni. (2016) : 185-200. <https://doi.org/10.21775/9781910190319.12>
- 70 « Whitepaper: Biological Transformation and the Bioeconomy ». Fraunhofer. (2019). <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/Publications/Brochures/whitepaper-biological-transformation-and-bioeconomy.pdf>.
- 71 Steve Dickman. « US Crackdown On Foreign Biotech Investment Makes Us Poorer, Not Safer ». Forbes. 24 mai 2019. Consulté le 5 août 2019. <https://www.forbes.com/sites/stevedickman/2019/05/24/us-crackdown-on-foreign-biotech-investment-makes-us-poorer-not-safer/#333027e35581>
- 72 « A Proposed Framework for Identifying Potential Biodefense Vulnerabilities Posed by Synthetic Biology: Interim Report ». National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The National Academies Press, Washington D.C. (2017). <https://doi.org/10.17226/24832>
- 73 « Safe Genes ». DARPA. Consulté le 5 août 2019. <https://www.darpa.mil/program/safe-genes>
- 74 David Kushner. « Synthetic Biology Could Bring a Pox on Us All ». Wired. 25 mars 2019. Consulté le 5 août 2019. <https://www.wired.com/story/synthetic-biology-vaccines-viruses-horsepox/>
- 75 « Agile Governance: Reimagining Policy-making in the Fourth Industrial Revolution ». White Paper. Forum économique mondial. (2018). http://www3.weforum.org/docs/WEF_Agile_Governance_Reimagining_Policy-making_4IR_report.pdf
- 76 Jessica Lau. « Same Science Different Policies. Signal to Noise, Regulating Genetically Modified Foods in the U.S. and Europe ». Université Harvard. 9 août 2015. <http://sitn.hms.harvard.edu/flash/2015/same-science-different-policies/>
- 77 Neil Gunningham, Robert A. Kagan et Dorothy Thornton. « Social License and Environmental Protection: Why Businesses Go Beyond Compliance ». *Law and Social Inquiry*. Vol. 29, n° 2 (printemps 2004) : 307-341. <https://doi.org/10.1111/j.1747-4469.2004.tb00338.x>

- 78 Voir par exemple l'obligation de la Nouvelle-Zélande de tenir compte de la perspective maorie dans la réglementation de la manipulation génétique telle qu'elle est définie dans « Indigenous Perspectives and Gene Editing in Aotearoa New Zealand ». In M. Hudson, A. Mead, D. Chagné, N. Roskrige, S. Morrison, P. Wilcox et A. Andrew, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. Vol. 7. (2019). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2019.00070/full>
- 79 « In a world of 3D printing, how will you be taxed? ». EY Global. 26 avril 2018. https://www.ey.com/en_gl/trust/in-a-world-of-3d-printing--how-will-you-be-taxed



horizons.gc.ca