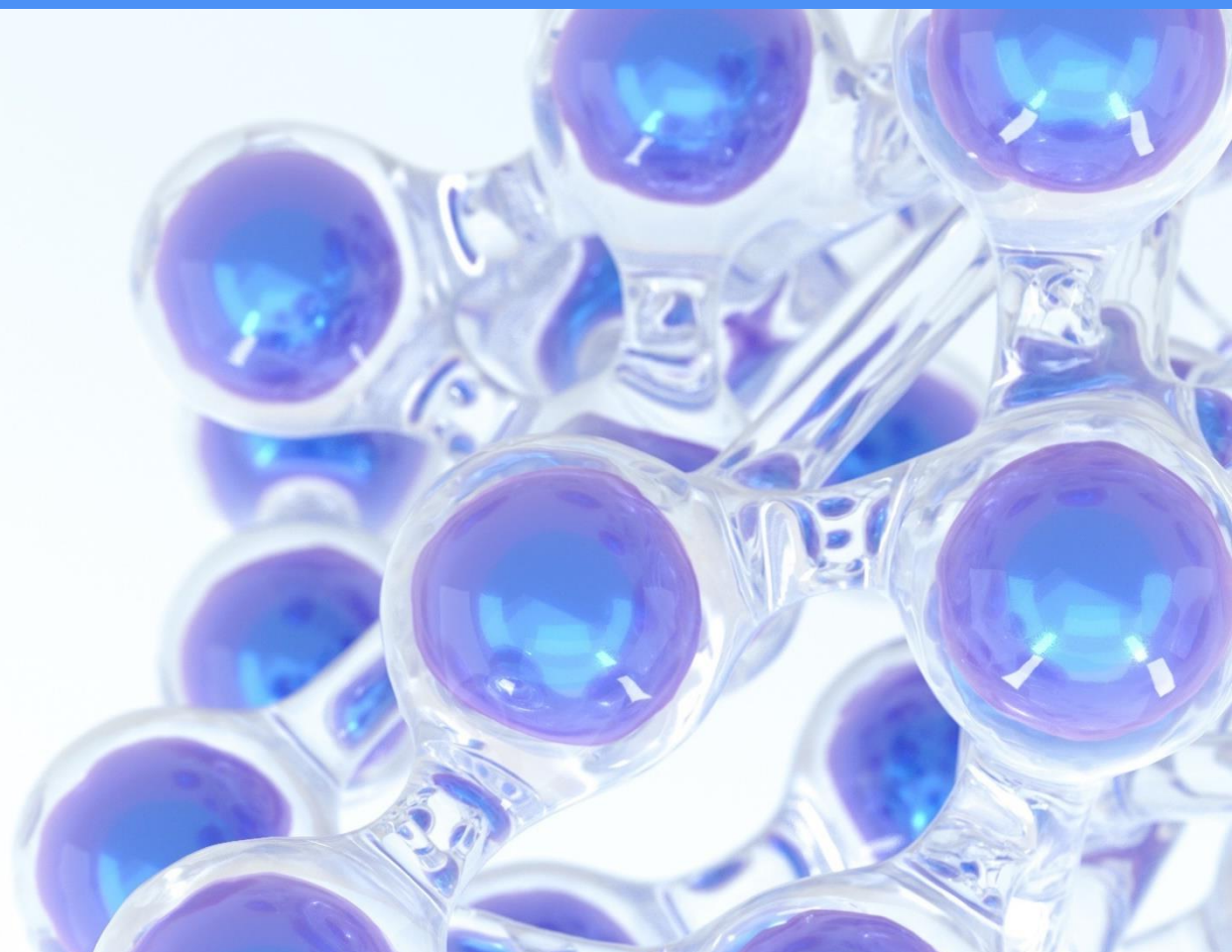




Mémoire présenté au ministère de l'Économie et de l'Innovation dans le cadre de la
Stratégie québécoise de la recherche et de l'innovation



SOMMAIRE EXÉCUTIF

La bio-innovation a le pouvoir de transformer notre monde pour le mieux, en stimulant la croissance économique et en réduisant les émissions mondiales de carbone. Dans un rapport publié en mai 2020, le McKinsey Global Institute estime que jusqu'à 60 % des intrants physiques de l'économie mondiale pourraient bientôt être produits biologiquement, ce qui signifie que nous pourrions construire plus de matériaux et de produits grâce à des processus durables et renouvelables.

Les retombées économiques directes pourraient atteindre de deux à quatre mille milliards de dollars américains d'ici 2040, dont 70 % dans la bio-innovation pour les seuls secteurs des soins de santé et de l'agriculture et agroalimentaire. En outre, d'ici 2040 à 2050, les applications directes de la génomique dans les différents secteurs pourraient réduire la moyenne annuelle d'émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine de 7 % à 9 % par rapport aux niveaux d'émissions de 2018.

Ainsi, la bio-innovation sera essentielle pour relever les grands défis de notre temps, des pandémies aux changements climatiques, en passant par la transition vers des systèmes de production durable. L'innovation et les investissements intelligents, qui stimulent la productivité et la compétitivité dans ces secteurs doivent être au cœur de la stratégie de relance économique et de croissance à long terme du Québec.

Comme toutes les périodes de bouleversements économiques et technologiques, la révolution biologique sera une ère de grandes opportunités, mais également d'importantes incertitudes. Le Québec doit décider dès maintenant s'il souhaite ou non monter à bord du train. Le cas échéant, cela passera par la prochaine Stratégie québécoise de la recherche et de l'innovation.

Pour réussir ce virage, il faut considérer revoir nos façons de faire et investir massivement. Dans cette perspective, une approche axée sur des missions spécifiques à des défis de société nous apparaît tout à fait appropriée.

En effet, maintenant qu'elle a atteint un important degré de maturité, la génomique se prête parfaitement à cette approche, d'autant plus qu'elle peut contribuer à des progrès importants dans la relève des défis intersectoriels. C'est le virage que s'apprête à prendre notre partenaire fédéral, Génome Canada, alors pour bénéficier au maximum de l'effet de levier du financement fédéral et optimiser les retombées économiques et sociales, nous proposons d'implanter au Québec, une stratégie similaire, axée sur les défis et priorités des Québécois.

Notre proposition repose sur quatre grands défis. Pour les relever, Génome Québec recommande de s'appuyer sur des programmes ciblés de financement, en misant sur une approche collaborative orientée « mission », dont le but ultime consistera à répondre aux priorités et aux défis du Québec.

Chacune des missions comprendrait des livrables, avec des indicateurs précis en termes de retombées concrètes. Les missions seraient orientées en fonction des défis suivants : changements climatiques et développement durable, surveillance et lutte contre les pathogènes, médecine de précision, et biofabrication. Pour atteindre les retombées visées pour chacun des défis, nous proposons de nous appuyer sur les axes suivants, tous des incontournables pour réussir notre pari :

- Modèle d'affaires basé sur l'effet de levier du dollar du Québec
- Partenariats public-privé
- Autosuffisance technologique
- Arrimage entre intelligence artificielle et génomique
- Accélération de la croissance des entreprises et stimulation des marchés
- Acceptabilité citoyenne

La bio-innovation, c'est l'avenir, et nous avons voulu en faire la démonstration dans ce mémoire. Dans la mesure où le Québec souhaite réellement s'appuyer sur une économie du savoir pour trouver des solutions aux grands défis de notre société moderne, cela constitue sans contredit un choix novateur, structurant et visionnaire. Génome Québec est l'organisme tout indiqué pour paver la voie à cette nouvelle réalité. Si le Québec a l'ambition de prendre sa place parmi les chefs de file de la prochaine révolution économique, il doit se doter d'une **stratégie québécoise de la génomique**, tout comme le Canada entend avoir sa propre stratégie pancanadienne en matière de génomique, tel qu'annoncé dans son dernier budget. De nombreux pays sont déjà très en avance à cet égard.

QUATRE MISSIONS POUR RÉPONDRE À NOS GRANDS DÉFIS

CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

SURVEILLANCE ET LUTTE CONTRE LES PATHOGÈNES

MÉDECINE DE PRÉCISION

BIOFABRICATION

RETOMBÉES

<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les émissions de GES grâce aux microbiomes du sol, conçus pour réduire les apports d'engrais • Réduire les émissions de GES en améliorant la génétique et la nourriture des animaux d'élevage • Améliorer la biodégradation et le recyclage par la réutilisation du plastique • Décontaminer des sites industriels dégradés • Planter aujourd'hui les arbres adaptés au climat de demain et augmenter le potentiel de séquestration du carbone • Améliorer les rendements et la résistance des cultures aux conditions locales, dans une perspective d'agriculture durable • Optimiser la culture en serre afin d'accroître la sécurité alimentaire du Québec • Réduire l'empreinte carbone, dans une perspective d'économie circulaire • Valoriser la biomasse pour créer de nouveaux bioproduits et biocarburants 	<ul style="list-style-type: none"> • Prévoir et réagir rapidement à des pandémies dévastatrices • Prévenir des millions de dollars de pertes directes par an dues aux rappels de produits alimentaires • Économiser des centaines de millions de dollars en coûts de santé, générés par des agents pathogènes d'origine alimentaire • Éliminer des millions de dollars de pertes de productivité causées par les parasites envahissants dans le secteur des ressources naturelles • Développer de nouveaux vaccins, antibiotiques et médicaments pour lutter contre les agents pathogènes • Créer de nouveaux emplois et améliorer les compétences en recherche et développement, au bénéfice de l'industrie et du secteur public 	<ul style="list-style-type: none"> • Attirer des investissements privés étrangers • Stimuler le développement d'une filière industrielle • Gagner en agilité, en efficacité et en qualité des soins en intégrant la génomique en mode clinique • Former, maintenir et attirer des talents hautement qualifiés • Offrir un environnement compétitif aux innovations de rupture et au développement de la recherche • Multiplier le nombre de thérapies, particulièrement pour les cancers • Valoriser les cohortes populationnelles en intégrant les données génomiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter l'autosuffisance du Québec • Fabriquer des produits à faible émission de carbone et favoriser l'économie circulaire • Accroître la sécurité alimentaire • Créer des emplois de haut niveau en milieux ruraux • Attirer des talents et des investissements • Créer une économie du savoir
---	---	---	---

SIX FACTEURS DE SUCCÈS POUR LIVRER LES MISSIONS

Génome Québec Modèle d'affaires unique pour traduire la recherche en retombées (effet de levier)	Encourager les partenariats public-privé et multiplier les solutions innovantes	Autosuffisance technologique Un gage de succès pour relever les défis de demain et créer de la valeur économique	Arrimage entre intelligence artificielle et génomique Passage obligé pour bâtir une économie de l'innovation	Accélérer la croissance des entreprises et stimuler les marchés Le modèle du Royaume-Uni	Acceptabilité citoyenne L'intégration de l'innovation passe par la confiance du public
--	--	--	--	--	--



PRÉAMBULE

Trois lettres : ADN, celles qui rendent tous les progrès possibles!

L'avancement des sciences biologiques, dont fait partie la génomique, combinée à l'accélération du développement informatique et technologique, au traitement des données massives et à l'intelligence artificielle pavent la voie à une nouvelle ère de l'innovation, qui aura des impacts significatifs dans des secteurs stratégiques de l'économie, tant en matière de soins de santé, d'agriculture, d'énergie qu'au niveau des biens de consommation.

La COVID-19 nous a montré le danger et le potentiel du monde biologique. La réponse rapide de la communauté scientifique a démontré l'ampleur des avancées réalisées au cours des dernières années. La vitesse à laquelle ils sont parvenus à séquencer le génome du virus, qui se compte en jours et non en mois, illustre à quel point les outils et les technologies dont nous disposons aujourd'hui, ainsi que les données et les analyses, sont véritablement révolutionnaires.

La bio-innovation a le pouvoir de transformer notre monde pour le mieux, en stimulant la croissance économique et en réduisant les émissions mondiales de carbone. Dans un rapport publié en mai 2020, le McKinsey Global Institute estime que jusqu'à 60 % des intrants physiques de l'économie mondiale pourraient bientôt être produits biologiquement, ce qui signifie que nous pourrions construire plus de matériaux et de produits grâce à des processus durables et renouvelables. Les retombées économiques directes pourraient atteindre de deux à quatre mille milliards de dollars américains d'ici 2040, dont 70 % en bio-innovation pour les seuls secteurs des soins de santé, et de l'agriculture et agroalimentaire. En outre, d'ici 2040 à 2050, les applications directes de la génomique dans les différents secteurs pourraient réduire la moyenne annuelle d'émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine de 7 % à 9 % par rapport aux niveaux d'émissions de 2018.

D'autres pays le reconnaissent, tant en termes de préparation aux pandémies que de prospérité future (Royaume-Uni, Allemagne, France, États-Unis, etc.), et comme l'a fait observer l'Organisation de coopération et de développement économiques en janvier 2021, à l'échelle mondiale, la recherche et l'innovation sont de plus en plus encouragées à proposer des approches transdisciplinaires pour résoudre des problèmes complexes.

La bio-innovation sera essentielle pour relever les grands défis de notre temps, des pandémies aux changements climatiques, en passant par la transition vers des systèmes de production durable. L'innovation et les investissements intelligents, qui stimulent la productivité et la compétitivité dans les secteurs doivent être au cœur de la stratégie de relance économique et de croissance à long terme du Québec.

Le 19 avril 2021, le gouvernement du Canada annonçait un premier financement pour l'élaboration d'une stratégie pancanadienne en matière de génomique, tout comme plusieurs autres pays l'ont fait au cours des dernières années. Pour Génome Québec, cela ne fait aucun doute : **le Québec doit se doter de sa propre stratégie québécoise de la génomique, se donner tous les moyens nécessaires pour influencer, voire bénéficier des choix qui seront faits à l'échelle fédérale. Cela implique d'être la première province sur la ligne de départ! Ce mémoire se veut un premier pas dans cette direction.**

MISSION – VISION - VALEURS

NOTRE MISSION

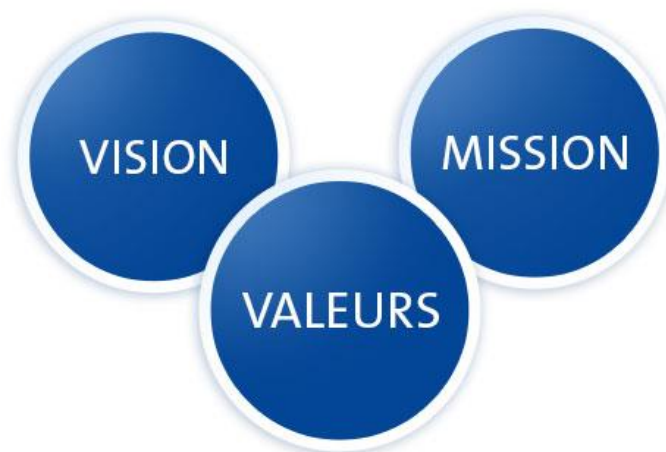
Génome Québec a pour mission de catalyser le développement et l'excellence de la recherche en génomique, son intégration et sa démocratisation. Pilier de la bioéconomie du Québec, l'organisme contribue également au développement social et durable, ainsi qu'au rayonnement du Québec.

NOTRE VISION

Les innovations issues de la génomique amélioreront la prestation des soins de santé, les pratiques agroalimentaires, environnementales et forestières, ainsi que les politiques publiques.

NOS VALEURS

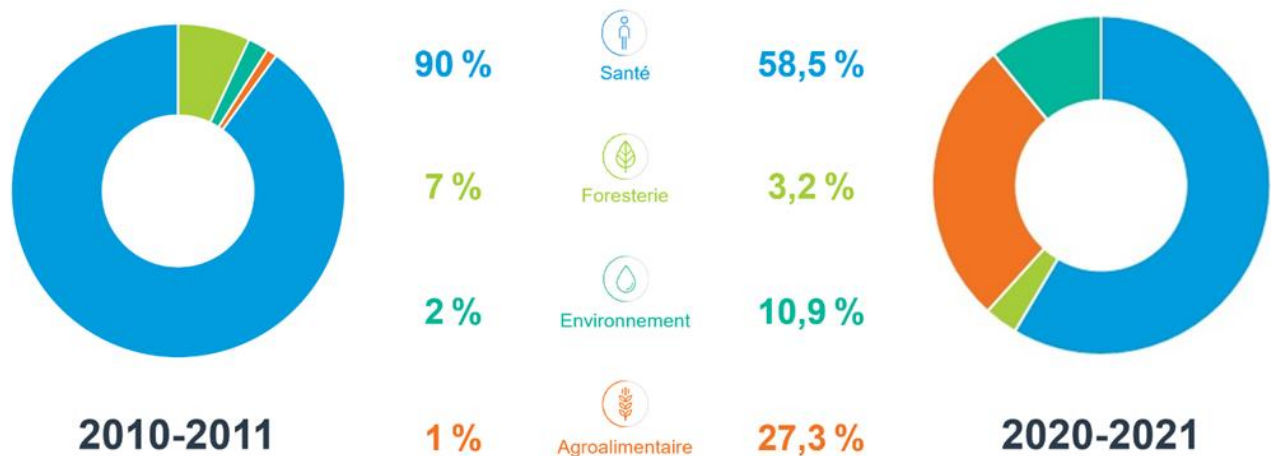
Excellence – Ouverture – Créativité – Intégrité - Éthique



INTRODUCTION

Génome Québec célèbre cette année 21 ans de réalisations en matière de soutien au développement scientifique et stratégique de la génomique au Québec. Reconnu pour son expertise multisectorielle, sa neutralité institutionnelle et le haut niveau de qualité de l'accompagnement offert, l'organisme gère actuellement un portefeuille de 95 projets de recherche actifs, d'une valeur de 400 millions de dollars. À cela s'ajoutent deux centres technologiques, qui fournissent aux chercheurs académiques et à l'industrie près de 15 millions de dollars de services annuellement.

Au cours des 10 dernières années, la contribution des partenaires, autres que le ministère de l'Économie et de l'Innovation et Génome Canada, n'a cessé de progresser pour atteindre 52,8 % du portefeuille de Génome Québec. Cette évolution illustre clairement à quel point les applications issues de la génomique répondent de plus en plus aux besoins d'utilisateurs industriels, à la recherche de solutions innovantes pour améliorer leur productivité et leur compétitivité.



Génome Québec repose sur un modèle d'affaires unique, basé sur l'effet de levier du dollar du Québec. L'organisme se distingue également par le fait que l'expertise disponible ainsi que les programmes de financement traduisent une réalité multisectorielle et multidisciplinaire.

De plus en plus, nous devons répondre à de grands défis sociaux, environnementaux et économiques : la crise climatique, les pandémies, les maladies chroniques, l'insécurité alimentaire et la génération d'une croissance économique durable et inclusive sur le plan environnemental. Ces problèmes sont complexes, systémiques, interreliés, urgents et existentiels.

Les décideurs politiques adoptent des cadres axés sur la « mission » pour stimuler les progrès et élaborer des solutions. L'exemple classique est la mission lunaire de la NASA, mais les exemples abondent, du programme européen Horizon 2020 à la Defense Advanced Research Projects Agency des États-Unis à et ses agences sœurs. Chacun d'entre eux définit les grands défis de la société et mobilise ensuite la recherche et l'innovation pour trouver des solutions.

Ces missions sont définies en consultation avec les parties prenantes, ce qui garantit l'adhésion de la société et la capacité des récepteurs. Ils adoptent une approche par portefeuille, créant ainsi de nombreuses voies vers le succès et évitant le défi de « choisir les gagnants ».

Aujourd'hui, la génomique se prête parfaitement à une approche axée sur la mission. La technologie a atteint un degré de maturité tel, qu'elle peut contribuer à des progrès importants dans la relève des défis intersectoriels. C'est le virage que s'apprête à prendre notre partenaire fédéral, Génome Canada. Afin de bénéficier au maximum de l'effet de levier du financement fédéral et d'optimiser les retombées économiques et sociales, nous proposons d'implanter au Québec, une stratégie similaire, axée sur les défis et priorités des Québécois.

Cela prendrait la forme d'un portefeuille de programmes flexible, un mélange d'appels de recherche ouverts et dirigés, des projets en partenariat axés sur les applications et l'innovation, le développement et le déploiement de technologies, la génération, l'analyse de données, ainsi que le développement des compétences et la formation. La composition du portefeuille, qui serait éclairée par des objectifs et des mesures de réussite, serait axée sur des résultats précis et mesurables à atteindre dans un délai déterminé, généralement à l'intérieur de cinq ans. Les missions se déclinaient en fonction du défi et seraient réalisées en étroite collaboration avec les parties prenantes concernées, au sein de l'écosystème ciblé.

Le présent mémoire propose une vision et des solutions dynamiques pour stimuler la bioéconomie et la bio-innovation, attirer des investissements et des talents et ainsi, contribuer à faire du Québec un modèle envié, tant au Canada qu'à l'international.

Notre proposition repose sur quatre grands défis :

1. Changements climatiques et développement durable
2. Surveillance et lutte contre les pathogènes
3. Médecine de précision
4. Biofabrication

Pour atteindre les retombées visées pour chacun des défis, nous avons identifié six facteurs incontournables de succès :

- Modèle d'affaires basé sur l'effet de levier du dollar du Québec
- Partenariats public-privé
- Autosuffisance technologique
- Arrimage entre intelligence artificielle et génomique
- Accélération de la croissance des entreprises et stimulation des marchés
- Acceptabilité citoyenne

Nous remercions le ministère de l'Économie et de l'Innovation de nous permettre de prendre part aux consultations sur la Stratégie québécoise de la recherche et de l'innovation 2022. Ce mémoire se veut une base de discussion, en prévision de la mise en place d'une éventuelle **stratégie québécoise de la génomique**.



1. Changements climatiques et développement durable

En plus de mettre en évidence les défis liés aux changements climatiques, la pandémie a révélé des problèmes systémiques en matière de sécurité alimentaire et de résilience de la chaîne d'approvisionnement, mettant en péril la croissance de ce secteur essentiel.

La génomique améliore le rendement des cultures et leur résistance aux menaces liées au climat, tout en offrant de nouvelles technologies pour atténuer les effets du climat, alors que le rythme des changements s'accélère. La crise climatique a déjà des répercussions sur notre économie et sur notre environnement. La pression sur les chaînes d'approvisionnement en ressources naturelles existantes ne cesse de s'accroître. Ainsi, un effondrement périodique de l'offre se produira si on ne s'y attaque pas de manière proactive.

Le Québec est bien placé pour mener une transition vers une bioéconomie, où l'extraction de ressources et la fabrication durable fonctionnent grâce à de nouvelles technologies, dans une perspective d'économie circulaire à carboneutralité. Nous traiterons plus en détail du potentiel de la biofabrication au point 4 du présent document.

Alors qu'il s'est engagé à réduire ses émissions de GES de 37,5 % d'ici 2030, par rapport à leur niveau de 1990, le Québec doit également relancer son économie et élever son niveau de prospérité et de qualité de vie. Pour ce faire, il devra relever le défi de l'innovation, en s'appuyant notamment sur le développement durable et sur l'émergence de filières économiques d'avenir et créatrices d'emplois de qualité.

Qu'il s'agisse de réduire l'empreinte carbone du secteur agricole, de favoriser des pratiques forestières durables, de conserver la biodiversité et les services rendus par les écosystèmes, ou encore de développer des variétés mieux adaptées à la culture en serre, la génomique est un outil de pointe puissant, qui apporte des solutions innovantes à des problématiques bien réelles dans des secteurs comme l'environnement, l'agriculture, l'agroalimentaire et la foresterie.

La génomique peut certainement dès aujourd'hui contribuer à réduire directement les émissions de GES. Elle peut être utilisée de multiples façons tout en créant de la valeur économique, notamment par l'entremise de partenariats public-privé, qui visent le développement de procédés et de produits innovants.

1.1 Bâtir sur l'expérience de Génome Québec

Actuellement, 41,5 % des projets financés par Génome Québec portent sur des questions liées à des enjeux environnementaux (alimentation animale, diminution des engrais azotés, stratégie de reboisement durable, valorisation de la biomasse forestière, impacts des changements climatiques sur la biodiversité, algues bleu-vert, diffusion des pesticides, etc.), alors que 50 % des mille clients de notre Centre d'expertise et de services (plateforme de séquençage) proviennent de la filière hors santé humaine.

Pour illustrer ces impacts positifs, prenons l'exemple de deux projets financés par Génome Québec.

Des biostimulants pour augmenter le rendement et la santé des cultures : pour une diminution des GES liés à l'utilisation intensive des engrais azotés

La production végétale nécessite des apports importants de fertilisants azotés, dans le but d'augmenter et de maintenir la productivité des cultures. L'assimilation par les plantes de ces fertilisants est de moins de 60 %. De grandes quantités de ces fertilisants sont appliquées chaque année dans les champs et se transforment un oxyde nitrique, un puissant gaz à effet de serre.

Au Québec, entre 1990 et 2017, les émissions produites par la gestion des sols agricoles ont augmenté de 20,9 %, passant de 2,0 à 2,4 Mt éq. CO₂. Cette augmentation est principalement due à la progression annuelle des applications d'engrais azotés sur les cultures. Au Québec, cette problématique est particulièrement vraie dans le cas de la culture du maïs, de la pomme de terre et du blé, qui occupent de grandes superficies et sont très exigeants en azote.

De plus, une quantité importante de nitrates et phosphates présente dans l'engrais s'infiltré dans les cours d'eau et les nappes phréatiques, ce qui a pour effet d'accroître la croissance des algues, entraînant ainsi une baisse du niveau d'oxygène dans l'eau, la destruction de la biodiversité et la pollution des réserves d'eau potable.

Solution issue de la génomique

La génomique permet de comprendre le fonctionnement biologique qui sous-tend la santé des sols. Plus précisément, la cartographie et l'étude des champignons et microorganismes des sols, qui a déjà été réalisée dans un projet de recherche financé par Génome Québec, soutiennent maintenant le développement de nouveaux biostimulants à base de microorganismes. Ceci représente une alternative biologique durable pour la fertilisation des sols, tout en permettant de créer de la valeur économique pour une jeune pousse québécoise.

C'est dans cette perspective que Mohamed Hijri, chercheur à l'Université de Montréal, a décidé de lancer une entreprise basée sur la technologie développée à la suite du projet financé par Génome Québec. Quorum Inoculants développe des formulations microbiennes permettant d'augmenter la santé et le rendement des plantes. Les premiers essais en serre au Québec montrent une augmentation significative de la productivité et des rendements des plantes et une hausse de l'efficacité d'absorption d'éléments nutritifs (potassium, phosphore, azote). Le rendement dans le cas de la tomate a été augmenté de 280 % en poids total et 145 % en nombre de fruits. D'autres essais sont en cours pour la pomme de terre et le maïs.

Retombées économiques

La diminution de l'utilisation des engrais azotés dans ces cultures d'importance économique pour le Québec aura un effet significatif sur l'émission des GES de l'agriculture, tout en améliorant la santé des sols à long terme. Du point de vue économique lié à l'innovation, d'autres succès québécois ont pavé la voie dans ce créneau. L'entreprise québécoise Premier Tech a d'ailleurs bâti son modèle d'affaires sur les inoculants biologiques et remporte un vif succès à l'échelle internationale.

Le marché mondial pour ce type de produit est en croissance et atteindra 752 millions de dollars américains d'ici 2025.

Un partenariat fructueux pour revaloriser le lactose grâce à la génomique

La gestion des résidus représente un enjeu de tous les instants dans ce monde industrialisé où la surconsommation est omniprésente. Pour pouvoir transmettre en héritage à la génération qui nous suivra une planète plus saine, il importe de trouver rapidement des solutions à cette problématique qui touche de plein fouet toutes les industries. Tous les résidus génèrent leurs propres défis et ceux de l'industrie agroalimentaire ne font pas exception. Le lactose, un sous-produit de la transformation des produits laitiers, a tellement peu de valeur économique sur le marché qu'il est souvent considéré comme un résidu par l'industrie.

Solution issue de la génomique

C'est là, encore une fois, que la génomique fait partie de la solution. Tous les autres produits issus du lait, que ce soit la crème, le lait écrémé, le fromage, le beurre ou le concentré de protéines, sont vendus sur des marchés rentables. En revanche, le sous-produit du lactose, appelé perméat d'ultrafiltration (UF), est un produit de faible valeur et, dans de nombreux cas, les flux de lactose sont éliminés dans des lagunes ou même épandus sur le sol.

Grâce à un financement de 1,9 million de dollars octroyé par Génome Québec, une équipe de chercheurs de l'Université Concordia collabore étroitement avec Agropur, une coopérative québécoise chef de file de l'industrie laitière nord-américaine, afin de convertir complètement le procédé de production du lactose pour en faire un sous-produit à valeur ajoutée.

Ce projet des plus innovateurs entre des chercheurs et l'industrie utilise la génomique pour mettre au point une technologie, qui modifie un sous-produit laitier intermédiaire de faible valeur en un produit de grande valeur. Cela permettra notamment de réduire l'incidence environnementale du procédé d'élimination du lactose. L'utilisation de la génomique permettra d'utiliser la levure pour produire de l'acide fumarique par la fermentation du lactose.

Retombées économiques

Grâce à la génomique, l'industrie agroalimentaire pourra revaloriser un résidu de l'un de ses procédés de fabrication, mais les avantages seront encore plus grands pour l'environnement et ce sont les générations futures qui en bénéficieront. Avec son réseau de plus de 3 000 producteurs laitiers au Canada, Agropur sera très bien positionnée pour mettre de l'avant la technologie, qui résulte de cette collaboration tout à fait fructueuse entre chercheurs et industrie.





En mode « mission »

La multiplication des applications génomiques dans les secteurs de l'environnement, incluant l'agriculture, l'agroalimentaire et la foresterie, génère des bénéfices pour les procédés et produits. Il faut donc se donner les moyens de stimuler le potentiel industriel de la génomique pour accroître la compétitivité de secteurs clés de l'économie et soutenir les engagements climatiques et durables du Québec.

Génome Québec recommande de s'appuyer sur des programmes ciblés de financement, en misant sur une approche collaborative orientée « mission », dont le but ultime consistera à répondre aux priorités et défis du Québec. Les changements climatiques et le développement durable pourraient certainement faire l'objet de missions, dont les livrables pourraient notamment permettre de :

- Réduire les émissions de GES grâce aux microbiomes du sol, conçus pour réduire les apports d'engrais
- Réduire les émissions de GES en améliorant la génétique et la nourriture des animaux d'élevage
- Améliorer la biodégradation et le recyclage par la réutilisation du plastique
- Décontaminer des sites industriels dégradés
- Planter aujourd'hui les arbres adaptés au climat de demain et augmenter le potentiel de séquestration du carbone
- Améliorer les rendements et la résistance des cultures aux conditions locales, dans une perspective d'agriculture durable
- Optimiser la culture en serre afin d'accroître la sécurité alimentaire du Québec
- Réduire l'empreinte carbone, dans une perspective d'économie circulaire
- Valoriser la biomasse pour créer de nouveaux bioproduits et biocarburants



2. Surveillance et lutte contre les pathogènes

La pandémie de COVID-19 a pris le Québec et le monde entier par surprise, alors que la situation a eu des effets dévastateurs pour nos sociétés. La façon dont les pays ont réagi aux premiers stades de la pandémie s'est traduite par des répercussions sociales et économiques majeures, sans compter le nombre de vies perdues. Nous devons faire en sorte que le Québec soit prêt pour affronter de futures pandémies de l'ampleur de la COVID-19 et les répercussions qui en découlent sur les citoyens, la santé publique, l'économie et autres. Cela sera envisageable uniquement dans la mesure où des mécanismes de surveillance et de lutte contre les pathogènes, à la fine pointe technologique, seront mis en place.

Il est cependant fondamental de préciser que la surveillance des agents pathogènes ne doit surtout pas se limiter aux maladies infectieuses humaines. Elle est également essentielle à la sécurité et à la salubrité alimentaires, aux importations et aux exportations, ainsi qu'à la productivité agricole. À titre d'exemple, le secteur alimentaire privé perd plus d'un milliard de dollars par an en raison des rappels de produits alimentaires. Selon le Conference Board du Canada, chaque année, les aliments contaminés sont à l'origine de quatre millions de maladies, de plus de 14 000 hospitalisations et de plusieurs centaines de décès au Canada. S'ils ne sont pas contrôlés, les agents pathogènes endémiques et invasifs peuvent provoquer des milliards de pertes annuelles et des enjeux considérables de santé publique.

Dans les faits, la santé des êtres humains est étroitement liée à celle des animaux, ainsi qu'à l'environnement dans lequel nous évoluons. Au cours des dernières années, de nombreux facteurs ont modifié les interactions entre les personnes, les animaux, les plantes et notre environnement. Les populations humaines sont en croissance et s'étendent dans de nouvelles zones géographiques, alors que la proximité des individus avec les animaux ne cesse de s'intensifier, qu'il s'agisse d'animaux sauvages, de bétail ou d'animaux de compagnie. De plus, l'impact des changements climatiques se fait de plus en plus sentir notamment au niveau du climat, de l'utilisation des terres (déforestation, pratiques agricoles intensives, etc.) et de la qualité de l'air et des eaux. Enfin, le mouvement des individus, des animaux et des produits divers est en constante augmentation, en raison du commerce international et des nombreux voyages à l'étranger.

En conséquence, les maladies de tous types peuvent se propager rapidement au-delà des frontières, sur l'ensemble de la planète. D'autres épidémies, voire pandémies, sont donc à prévoir au cours des prochaines années. De là l'importance de mettre en place des mécanismes de surveillance des pathogènes, avec l'objectif ultime de bien s'outiller en matière de salubrité alimentaire, de résistance antimicrobienne ou de maladies transmissibles de l'animal à l'humain.

2.1 La génomique pour comprendre et diagnostiquer

Considérant sa capacité de répondre à diverses problématiques de santé publique, la génomique devient de plus en plus incontournable et devrait faire partie intégrante des outils mis à la disposition des autorités de santé publique du Québec. Il s'agit d'une technologie puissante, suffisamment mature pour apporter des solutions en temps de crise, comme ce fut le cas lors de crises sanitaires telles que E. coli, salmonellose et listériose, ou actuellement, dans le contexte du SRAS-CoV-2, alors que la génomique est omniprésente au sein du processus de compréhension du virus, des variants, des réactions antigéniques, etc.

Par exemple, en matière de salubrité alimentaire, une équipe d'experts a découvert que les souches de salmonelle ne sont pas toutes virulentes et dangereuses pour l'humain. L'équipe a identifié des méthodes génomiques de diagnostic rapide, qui ont été incorporées aux opérations de surveillance de routine de PulseNet Canada. De plus, l'équipe a aussi développé un cocktail de phages en mesure de neutraliser la salmonellose sur les légumes. À cet égard, elle termine des tests dans les champs. Les impacts à

court et long termes de ces découvertes sont très importants puisque ces outils permettront une identification plus précise et plus rapide de la souche responsable d'une contamination à la salmonelle. Conséquemment, cela permettra de retirer spécifiquement les aliments contaminés et non l'ensemble des étalages, ce qui réduira significativement les pertes commerciales, le nombre de contaminations et les coûts médicaux associés.

Par exemple, en couplant un séquençage métagénomique rapide et précis à une plateforme de surveillance et d'intervention renforcée, en collaboration avec des partenaires clés tels que le Laboratoire de santé publique du Québec et autres, le Québec disposerait des outils nécessaires pour agir de façon plus proactive en matière de prévention et de contrôle des éclosions. Ainsi, en se dotant d'un système de surveillance national, en mesure de contribuer à l'effort canadien, voire international, le Québec s'enrichirait d'un processus décisionnel fondé sur des données probantes.

Dès le début de la pandémie, la communauté génomique québécoise et canadienne a réagi rapidement pour mettre toute son expertise à contribution. Les médecins, les autorités de santé publique, les décideurs politiques et les entreprises, qui travaillent dans le domaine du dépistage, des pharmacothérapies et des vaccins, s'appuient en grande partie sur la génomique pour trouver des solutions au bénéfice des populations.

Réseau canadien de génomique COVID-19 (RCanGéCO)

Créé au tout début de la pandémie grâce à un investissement initial de 40 millions de dollars du gouvernement du Canada, RCanGéCO, un consortium dirigé par Génome Canada, a comme mission de traquer le virus SRAS-CoV-2 causant la COVID-19 : son origine, sa propagation, son évolution au sein de la population canadienne et le rôle de certains facteurs génétiques associés à la maladie. Le consortium fournira, en temps réel, des données aux autorités de santé publique pour la prise de décision pendant la pandémie. Le réseau veut également doter les laboratoires à travers le pays des infrastructures nécessaires, afin de devenir une plateforme nationale qui permettra de réagir rapidement face à de futures éclosions de coronavirus et à d'autres pandémies. Ce réseau national génère des données génomiques pour assurer le suivi de la transmission, éclairer les décisions en matière de politique de santé publique et orienter les stratégies de dépistage et de recherche des contacts, la mise au point de vaccins et de traitements, en effectuant le séquençage des génomes de 10 000 canadiens et de 150 000 échantillons viraux. Génome Québec est impliqué, en collaboration avec le LSPQ, dans l'axe VirusSeq du consortium, dont le mandat est de récolter et d'analyser quelque 150 000 séquences virales provenant de patients ayant obtenu un diagnostic positif à la COVID-19.

En combinant le financement du RCanGéCO à celui du ministère de la Santé et des Services sociaux, dont les fonds proviennent de l'enveloppe dédiée à la stratégie québécoise de surveillance des variants du SRAS-CoV-2, le Laboratoire de santé publique du Québec, qui se charge du séquençage, estime pouvoir livrer 65 000 séquences virales, soit près de 43 % de l'objectif de l'axe VirusSeq. Le séquençage sera en grande partie réalisé en utilisant les infrastructures du Centre d'expertise et de services de Génome Québec. Dans l'axe HostSeq, Génome Québec collabore avec la Biobanque québécoise de la COVID-19 (BQC19), afin de faciliter la recherche de haute qualité sur la COVID-19, en donnant accès à des échantillons biologiques et aux métadonnées associées à la communauté scientifique. Après sa première année d'opération, c'est plus de 20 000 échantillons qui ont été récupérés, provenant de plus de 2 626 participants et permettant la publication de cinq articles sur les facteurs de risque et marqueurs de diminution de susceptibilité à la COVID-19, traduisant l'impact et l'importance de la BQC19.

2.2 Traiter grâce à la génomique

La résistance aux antimicrobiens est responsable d'environ 85 000 milliards de dollars de pertes annuelles dans le monde entier. En favorisant une approche globale multidisciplinaire et multisectorielle pour nous attaquer à la menace croissante générée par la résistance aux antimicrobiens, nous espérons neutraliser le risque tout en garantissant l'accès à des marchés mondiaux, dont les exigences réglementaires sont élevées.

Pour agir sur la réduction de la prévalence des bactéries affichant une résistance aux antimicrobiens dans les hôpitaux, les exploitations agricoles et au niveau de l'environnement, il serait judicieux de structurer une masse critique d'experts en génomique microbienne. Cela permettrait au Québec de s'outiller à la fine pointe technologique, en vue d'anticiper des crises sanitaires de très grande envergure et de soutenir la compétitivité du Québec en matière d'innovation (antibiotiques, traitements, etc.).

L'utilisation de la génomique pour la surveillance accrue des pathogènes favorisera des prises de décisions rapides et éclairées en matière de prévention, de contrôle et de gestion des éclosions (réinfections, super-propagation, efficacité vaccinale), de détection de nouveaux variants, de corrélation avec la pathogénicité et à plus long terme, de développement de nouveaux traitements et vaccins.

Statistiques importantes

Selon le Conseil des académies canadiennes, en 2018, environ 26 % des infections étaient résistantes aux médicaments généralement utilisés pour les traiter. D'ici 2050, le taux de résistance passera à 40 %.

De plus, toujours d'ici 2050, les coûts cumulatifs liés à la résistance aux antimicrobiens pour le Canada seront de :

396 000 vies
120 milliards de dollars en frais hospitaliers
388 milliards de dollars de produit intérieur brut

L'Organisation mondiale de la Santé a identifié en 2019, la résistance aux antimicrobiens comme une des 10 plus grandes menaces en santé publique auxquelles l'humanité fait face. Contrairement aux nouvelles pandémies virales, qui font les manchettes de tous les médias de façon ponctuelle, celle-ci ne concerne pas un seul agent pathogène (pouvant causer une maladie), mais plutôt une multitude de virus, parasites, champignons et surtout des bactéries.

En comparaison avec d'autres maladies virales comme la COVID-19, la résistance aux antibiotiques et aux antimicrobiens peut bel et bien être qualifiée de pandémie. À long terme, ses impacts économiques et en santé publique risquent d'être pires que la crise sanitaire actuelle.

Cependant, les défis que nous traversons nous ont appris qu'une coopération mondiale est possible. Si la société et la communauté scientifique travaillent de pair, comme elles l'ont fait avec la COVID-19, nous pouvons espérer enrayer cette autre pandémie ou du moins, en limiter l'impact.



En mode « mission »

Génome Québec recommande de s'appuyer sur des programmes ciblés de financement, en misant sur une approche collaborative orientée « mission », dont le but ultime consistera à répondre aux priorités et aux défis du Québec. La surveillance accrue et en temps réel des pathogènes, couplée au potentiel de développer de nouveaux traitements, pourrait certainement faire l'objet d'une mission, dont les livrables pourraient notamment permettre de :

- Prévoir et réagir rapidement à des pandémies dévastatrices
- Prévenir des millions de dollars de pertes directes par an dues aux rappels de produits alimentaires
- Économiser des centaines de millions de dollars en coûts de santé, générés par des agents pathogènes d'origine alimentaire
- Éliminer des millions de dollars de pertes de productivité causées par les parasites envahissants dans le secteur des ressources naturelles
- Développer de nouveaux vaccins, antibiotiques et médicaments pour lutter contre les agents pathogènes
- Créer de nouveaux emplois et améliorer les compétences en recherche et développement, au bénéfice de l'industrie et du secteur public



3. Médecine de précision : de la science au développement économique

Dans sa Stratégie québécoise des sciences de la vie (SQSV) 2017-2027, le gouvernement du Québec, au terme de nombreuses consultations, avait clairement affirmé sa volonté de renforcer deux créneaux transversaux porteurs : la médecine de précision et l'exploitation des mégadonnées en santé. Il y était clairement stipulé que : *Le Québec dispose de chercheurs et d'organisations qui se trouvent parmi les plus réputés au monde dans ces deux créneaux et doit continuer d'encourager la formation de la relève dans ces derniers. Il s'agit de créneaux transversaux, dont le développement profitera à l'ensemble des domaines phares de recherche au Québec. Le croisement de ces deux grands créneaux permettra aussi au Québec d'acquérir un positionnement unique, ambitieux et visionnaire à l'échelle internationale et, à terme, de stimuler l'attraction d'investissements privés étrangers et de contribuer au développement d'un nouveau secteur industriel.*

Cela fera bientôt cinq ans que la SQSV a été déposée et le Québec ne dispose toujours pas d'un plan stratégique structuré et développé, en concertation avec l'écosystème de la médecine de précision. Un plan qui devrait comprendre des livrables clairs et des indicateurs de mesures de résultats, permettant de suivre l'évolution de ce virage, mais surtout, d'atteindre les cibles pour réellement tirer profit de l'expertise, dont nous disposons pour créer de la richesse et attirer des investissements étrangers.

Selon une étude publiée en février 2020 par le Global Market Insights, la taille du marché de la médecine de précision a dépassé 57 milliards de dollars américains en 2019. L'étude prévoit que le marché mondial de la médecine de précision connaîtra une croissance annuelle de 11 % entre 2020 et 2026, avec des revenus estimés à 119 milliards de dollars en 2026.

Représentative de l'ensemble des parties prenantes de la chaîne d'innovation en médecine de précision au Québec, la Table de concertation en médecine de précision, sous la gouverne de Génome Québec, est le partenaire stratégique tout indiqué pour mener une réflexion, visant à maximiser le déploiement des ressources et des expertises investies, en vue de tirer le plein potentiel sociétal et économique de la médecine de précision.

En septembre 2020, le Royaume-Uni présentait sa National Genomics Healthcare Strategy. Fait assez intéressant, aucun budget spécifique n'a été annoncé, toutefois, le gouvernement a précisé qu'il allait s'inspirer du budget 2020 du Royaume-Uni, qui prévoit augmenter les dépenses publiques de R-D à environ 22 milliards de livres sterling d'ici 2025, pour lancer sa nouvelle stratégie nationale en matière de santé génomique. Cette dernière vise à offrir aux patients britanniques les meilleurs soins prédictifs, préventifs et personnalisés possible, en exploitant le potentiel du séquençage avancé du génome. Cette stratégie définit comment la communauté britannique de la génomique (des chercheurs au National Health Service) s'unira pour exploiter les dernières avancées de la science, de la recherche et de la technologie génétiques et génomiques au profit des patients, afin de créer le système de soins génomiques le plus avancé au monde.

À cet égard, le Québec n'est toujours pas monté à bord du train, qui lui permettrait de rejoindre les grands leaders internationaux, alors que le 30 avril 2021, le secrétaire d'État à la Santé et à la Protection sociale du Royaume-Uni, Matt Hancock, annonçait, dans le cadre de la conférence annuelle de l'Association of the British Pharmaceutical Industry, un investissement additionnel de 37 millions de livres sterling dans des projets de génomique et des initiatives axés sur les données, en vue de faire du Royaume-Uni le leader mondial en matière de sciences de la vie. Un des piliers de la stratégie britannique repose sur l'arrimage entre Innovate UK et le National Health Service.

« Jamais le public n'a été aussi engagé à propos de la recherche en santé, alors nous devons bâtir sur cet enthousiasme. Nous avons fait de la lutte contre la COVID-19 une mission mondiale, mais il y a tant d'autres nobles missions qui nous attendent, pensons notamment à la lutte contre les cancers, les traitements contre la démence ou la prévention des maladies cardiaques. »

Le nouveau soutien apporté à l'initiative britannique de génomique fonctionnelle permettra de mettre en place des approches révolutionnaires pour mieux comprendre comment les changements génétiques provoquent les maladies. Le séquençage génomique sera utilisé comme un élément de routine dans le diagnostic et le traitement quotidiens. »

Traduction libre d'une citation tirée des propos de Matt Hancock, secrétaire d'État à la Santé et à la Protection sociale, Royaume-Uni

3.1 La place du Québec sur l'échiquier

Le vieillissement de la population et la prévalence des maladies chroniques sont une réalité qu'on ne peut nier, alors que les coûts de soins de santé ne cessent de croître, atteignant 43 % du budget global de l'État en 2020-2021. Pour répondre efficacement à cette problématique et freiner l'expansion des coûts, le Québec doit accélérer dès maintenant l'intégration de l'innovation dans le système de santé. Selon un énoncé de positionnement publié en mai 2020 par le Forum Économique Mondial, les avantages de la médecine de précision en termes d'efficacité et d'amélioration des soins de santé sont de plus en plus évidents.

Les innovations cliniques, scientifiques et industrielles permettront d'offrir aux patients les meilleurs soins. Toutefois, le succès d'un tel virage passe d'une part par l'adéquation entre les besoins du réseau de la santé et la recherche de pointe, et d'autre part, par l'attraction d'investissements privés. Cependant, pour que les entreprises innovent, elles doivent s'appuyer sur la recherche et les découvertes issues des laboratoires, mais malheureusement, trop de bonnes idées demeurent sur les tablettes. Une situation qui s'explique en grande partie par le déficit de dialogue entre les secteurs académique et privé.

3.2 Un terreau extrêmement fertile pour l'innovation

Le Québec fait figure de leader en matière de médecine de précision et cela n'est pas totalement étranger à la contribution de Génome Québec, dont les octrois spécifiques à cette filière atteignent près de 150 millions de dollars pour les 10 dernières années. Pour pouvoir tirer profit de tous ces investissements, il est essentiel de mettre des mécanismes en place pour s'assurer que les découvertes sortent des laboratoires, génèrent de la valeur économique et s'intègrent à notre système de santé.

Dans cette perspective, outre ses programmes habituels de financements, Génome Québec a récemment mis en place une mesure tremplin visant à bâtir de nouveaux ponts entre les chercheurs et le secteur privé issus du domaine de la santé. Le programme vise à cofinancer des partenariats entre des chercheurs académiques et des utilisateurs pouvant implanter ou commercialiser les résultats des recherches. Ces fonds seront exclusivement dédiés à l'établissement de preuves de concept servant de levier à l'obtention de financement subséquent.

Le but du *Programme pour l'intégration de la génomique - Volet santé humaine* est de permettre à une entreprise d'établir un partenariat avec un chercheur dans le but d'amener une technologie à maturation et d'ainsi s'outiller adéquatement pour accéder à des financements à plus grande échelle. Considérant que dans le secteur de la santé, plusieurs entreprises (PME, *start-up*) ont de la difficulté à accéder à des fonds d'amorçage, ce qui freine leur capacité à développer des preuves de concept, un tel programme constitue une alternative des plus intéressantes.

De plus, ce programme permet aux utilisateurs publics tels que le ministère de la Santé et des Services sociaux et les hôpitaux, de bénéficier d'un véhicule de financement pour valider et intégrer les outils génomiques dans les soins offerts aux patients.

3.3 La génomique : un des piliers de la médecine de précision

En matière de génomique, le modèle britannique est clairement le plus avancé, mais il y en a d'autres. On pense notamment à des pays qui se dotent de stratégies nationales de médecine génomique et qui investissent massivement pour faire le virage, dont les États-Unis, la France et l'Estonie. Le Québec souhaite-t-il vraiment acquérir un positionnement unique? Attirer des investissements étrangers? Bâtir une filière industrielle? Le cas échéant, le temps presse d'agir, de prioriser et de se doter d'une stratégie forte, et surtout, de se donner les moyens de nos ambitions. Ceux qui avancent sont ceux qui font des choix!

La génomique est une technologie très puissante, qui révolutionnera la pratique médicale, tant au niveau de la prévention, du diagnostic que du traitement. Elle permettra d'orienter les traitements, d'identifier des gènes de prédisposition pour des cancers héréditaires, de prédire la réponse aux médicaments et de découvrir de nouvelles thérapies ciblées. Elle est carrément à la base de la médecine de demain. Une fois combinée à l'intelligence artificielle, son potentiel deviendra exponentiel et on assistera à une accélération sans précédent de l'analyse de données, d'émergence de nouvelles solutions (particulièrement prometteuses en cancers), alors qu'une fois éprouvés, les algorithmes pourront s'appliquer à d'autres maladies, même à des défis liés aux changements climatiques.



Voici deux exemples de solutions diagnostiques, qui illustrent l'immense impact de la génomique pour les patients, le réseau de la santé et l'économie. Ces projets sont financés par Génome Québec.

Maladies rares : mettre fin à l'odyssée diagnostique

Le Dr Jacques L. Michaud a obtenu un financement de plus de six millions de dollars pour un projet axé sur le séquençage rapide du génome entier chez les nouveau-nés et les nourrissons en contexte de soins intensifs. Ce projet suscite beaucoup d'espoir dans la lutte contre les maladies génétiques rares, puisqu'il permettrait un diagnostic plus précoce et plus systématique de ces maladies chez les nouveau-nés.

Les maladies génétiques rares et les malformations congénitales indiquant un possible syndrome génétique touchent de 1 % à 2 % des naissances et représentent la principale cause d'hospitalisation et de décès chez les nourrissons au Canada. Un diagnostic génétique au cours des premiers mois de la vie peut avoir des répercussions importantes sur la prise en charge clinique ainsi que sur la santé d'un enfant tout au long de sa vie.

Le diagnostic précis des maladies génétiques rares se révèle souvent très difficile chez les nouveau-nés et les nourrissons, puisqu'on compte plus de 8 000 maladies génétiques rares et que les patients, très jeunes, présentent des symptômes non spécifiques ou différents de ceux observés chez les patients plus âgés.

Solution issue de la génomique

L'objectif du projet du Dr Jacques L. Michaud du CHU Sainte-Justine consiste à offrir le séquençage clinique rapide du génome entier à tous les nouveau-nés et nourrissons gravement malades, qui pourraient bénéficier de cette analyse au Québec. Le premier volet consiste à élaborer un programme de séquençage rapide du génome entier pour en étudier l'incidence dans l'évaluation des enfants. Le deuxième volet consistera à mettre en œuvre le programme au sein du système de santé québécois.

Retombées humaines et économiques

Coût réel associé à une trajectoire diagnostique typique

- 10 000 \$ – 15 000 \$
- Temps de réponse : des années
- Coût avec l'approche basée sur le séquençage : 2 000 \$
- Temps de réponse : deux à quatre mois



Dans une étude australienne de 40 enfants gravement malades, les tests génomiques ont entraîné des économies sur les coûts de santé estimés à 500 000 dollars canadiens par rapport aux tests de diagnostics traditionnels. Une étude similaire sur 42 patients menée à San Diego a estimé des économies nettes de 172 000 dollars canadiens.

En extrapolant ces chiffres à une population de 250 patients, correspondant au nombre de nouveau-nés admis aux soins intensifs pédiatriques avec une suspicion de maladie rare génétique chaque année au Québec, il est estimé que l'implantation d'un programme de séquençage rapide du génome entier au se traduirait par des économies, à court terme, d'environ un à trois millions de dollars par an.

Cancer de l’ovaire et de l’endomètre : un test de dépistage Pap qui sauvera des vies

Ensemble, le cancer de l’endomètre et le cancer des ovaires touchent environ 10 000 femmes au Canada chaque année et sont responsables de plus de 3 000 décès. Cependant, malgré l’escalade des coûts, les taux de guérison de ces types de cancer n’ont pas changé en 30 ans.

Les décès liés au cancer de l’ovaire et de l’endomètre figurent parmi les quatre principales causes de décès par cancer chez les femmes nord-américaines. En raison de l’absence de symptômes à un stade précoce, ces cancers continuent d’être diagnostiqués au stade 3 ou 4, avec des métastases à l’extérieur des organes gynécologiques, ce qui rend la guérison peu probable. Les taux de guérison sont supérieurs à 80 % lorsque les cancers de l’ovaire et de l’endomètre sont diagnostiqués aux stades 1 et 2.

Solution issue de la génomique

Dre Lucy Gilbert, du Centre universitaire de santé McGill (CUSM), a obtenu un financement de plus de six millions de dollars pour finaliser le développement d’un test de dépistage des cancers ovariens, beaucoup plus rapide et précis que les tests actuels, et qui pourrait sauver des milliers de vies chaque année au Canada et dans le monde.

La solution proposée vise à mettre au point le test DOvEEgene, un examen de frottis utérin génomique, qui vise à dépister et à détecter ces cancers lorsqu’ils sont confinés aux organes gynécologiques et par conséquent, guérissables. L’examen permettra de tester 28 gènes impliqués dans le développement de cancers sporadiques et héréditaires de l’ovaire et de l’endomètre chez les femmes âgées de 45 à 70 ans. Ce projet est mené en collaboration avec OPTILAB et le CUSM.

Retombées humaines et économiques

L’objectif vise à mettre à la disposition des médecins de famille et des gynécologues, dans les prochaines années, un test diagnostique capable de détecter plus de 70 % des cancers précoces de l’ovaire et de l’endomètre, avec un taux de faux positifs près de zéro. Actuellement, il n’existe aucun test offrant ce niveau de précision.

Il s’agit d’une innovation avant-gardiste, qui pourrait bénéficier aux femmes touchées par ces cancers gynécologiques et réduire la charge du système de santé dans le traitement des cancers avancés. Elle pourra également stimuler l’économie québécoise et canadienne grâce à une invention québécoise. À l’heure actuelle, les coûts directs du traitement des 10 000 femmes canadiennes atteintes de ces cancers s’élèvent à plus d’un milliard de dollars par année. On prévoit que le test DOvEEgene, avec un diagnostic à un stade plus précoce, permettra de réduire ces dépenses de 231 millions de dollars par an.





En mode « mission »

À cet égard, Génome Québec recommande de s'appuyer sur des programmes ciblés de financement, en misant sur une approche collaborative orientée « mission », dont le but ultime consistera à répondre aux priorités et aux défis du Québec. Acquérir un positionnement unique en se dotant d'un plan stratégique misant sur la synergie entre la médecine de précision et l'exploitation des mégadonnées pourrait certainement faire l'objet d'une mission, dont les livrables pourraient notamment permettre de :

- Attirer des investissements privés étrangers
- Stimuler le développement d'une filière industrielle
- Gagner en agilité, en efficacité et en qualité des soins en intégrant la génomique en mode clinique
- Former, maintenir et attirer des talents hautement qualifiés
- Offrir un environnement compétitif aux innovations de rupture et au développement de la recherche
- Multiplier le nombre de thérapies, particulièrement pour les cancers
- Valoriser les cohortes populationnelles en intégrant les données génomiques



4. La biofabrication : la future révolution manufacturière

Près de sept décennies après la découverte de la structure en double hélice d'une molécule d'ADN, le monde de la biologie semble entrer dans une nouvelle phase de croissance. Une vague d'innovations récentes telles que le CRISPR-Cas9 pour modifier les gènes, ou encore les avancements spectaculaires en matière de thérapies géniques et cellulaires permettant de reprogrammer les cellules, mènent à de nouvelles connaissances, de nouveaux matériaux et de nouveaux outils. Cela permettra une démocratisation des outils ainsi qu'une réduction des coûts des technologies de séquençage, d'édition et de synthèse de l'ADN. Grâce aux progrès scientifiques, un nombre croissant d'applications sortent désormais du laboratoire à des fins de commercialisation.

Les outils et les technologies issus de la bio-innovation bouleversent le marché mondial et créent des opportunités d'envergure pour les organisations les plus innovantes. Les principales juridictions du G20, incluant les États-Unis, l'Australie, la Chine et Singapour, investissent massivement dans le développement de la bio-innovation, et en retirent des avantages tant sur le plan économique que dans la lutte contre la COVID-19.

Le gouvernement du Canada a annoncé, dans le cadre de son dernier budget, un investissement de 2,2 milliards de dollars pour rétablir notre capacité nationale en matière de biofabrication, de mise au point et de production de vaccins. Le Québec a tout intérêt à se positionner rapidement à cet égard.



Nous proposons au Québec de mettre en place un réseau pleinement intégré, qui englobe la communauté québécoise de la biofabrication, afin de faciliter le passage de la découverte à la commercialisation dans tous les secteurs : le démarrage de l'innovation, le renouvellement des industries traditionnelles et le développement des talents et des compétences nécessaires aux emplois de l'avenir dans ce domaine.

4.1 Secteur de la santé humaine

C'est en santé humaine que l'on recense les plus importants progrès en matière de biofabrication. La bio-innovation contribue déjà à sauver des vies grâce à des traitements innovants adaptés à notre génome et à nos microbiomes. Dans le futur, nous estimons que près de la moitié du poids de la morbidité mondiale pourrait être traitée par des applications génomiques, qui sont aujourd'hui scientifiquement concevables. En outre, bon nombre des avancées issues de la bio-innovation ont contribué à la réponse mondiale à la pandémie de SRAS-CoV-2 au début de 2020. Les thérapies géniques pourraient offrir pour la première fois des traitements curatifs pour certaines maladies. Bref, d'ici peu, il sera tout à fait courant de produire des diagnostics, des thérapies, des vaccins et des médicaments à partir d'une cellule biologique. Il n'est pas nécessaire de se projeter très loin dans le temps puisque déjà, cela existe à Montréal, et des vies ont été sauvées grâce à cette approche révolutionnaire.

Centre d'excellence en thérapie cellulaire de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont

Grâce au soutien de Génome Québec et Génome Canada de 13,5 millions de dollars, dont 4,7 millions proviennent du gouvernement du Québec, l'équipe multidisciplinaire des docteurs Claude Perreault et Denis-Claude Roy travaille activement à améliorer les chances de survie des patients atteints de cancers hématologiques et résistants à la chimiothérapie. Depuis six ans, l'équipe travaille au développement d'une technologie de greffe novatrice nommée Guided Lymphocyte by Immunopeptide Derived Expansion (GLIDE), une approche de médecine de précision, qui vise à fabriquer des cellules activées spécifiquement pour s'attaquer aux cellules cancérigènes. Les avancées de la génomique ont permis au groupe de recherche d'identifier cent cibles anticancer sur lesquelles concentrer les traitements. Ces cellules activées s'attaquent spécifiquement aux tumeurs, évitent les cellules saines et favorisent l'acceptation du greffon.

Une étude de phase 1 réalisée auprès de patients détenant un très mauvais pronostic, et chez qui la méthode traditionnelle de chimiothérapie avait échoué, a été complétée et a permis de conclure aux résultats suivants :

- Amélioration cliniquement significative
- Très faible taux de rejet des greffons
- Très faible problème de toxicité lors de l'administration du traitement GLIDE

L'Institut universitaire d'hémo-oncologie et de thérapie cellulaire de l'Hôpital Maisonneuve-Rosemont débutera, en janvier 2021, une deuxième étude de phase 1 utilisant GLIDE. Cette fois pour la prévention de la rechute.

L'approche GLIDE répond aux besoins de la moitié des cas diagnostiqués de cancer du sang, qui ne réagissent pas bien à la méthode traditionnelle de chimiothérapie et de greffe de cellules souches. Une fois le stade de commercialisation atteint, cette thérapie deviendra rapidement la norme. Sur la base du nombre de greffes à haut risque, aux États-Unis et au Canada, on estime le potentiel de marché à 1,2 milliard de dollars pour le traitement GLIDE.

L'expertise de pointe développée par cette équipe est unique et reconnue mondialement, faisant de Montréal un pôle d'excellence en matière d'hémo-oncologie et de thérapie cellulaire. Le financement octroyé par Génome Québec en 2012 leur a permis d'établir les jalons de leur démarche scientifique, faisant d'eux des précurseurs, mais surtout d'être LA référence dans leur domaine. Les résultats issus de ce financement permettent aujourd'hui d'alimenter leurs démarches de développement d'affaires et d'attirer des investissements privés, mais plus important encore, de sauver des vies.

Cette expertise est telle qu'on parle maintenant de construire un centre de production commerciale en thérapie cellulaire et génique dans l'est de Montréal, advenant que la Zone d'innovation en santé de l'est de Montréal voie le jour.



La révolution CRISPR : l'histoire de Victoria Gray

Victoria Gray n'est pas une Américaine comme les autres. Elle est la première personne atteinte d'une maladie génétique à être traitée aux États-Unis avec la technique révolutionnaire d'édition de gènes appelée CRISPR.

À l'approche du premier anniversaire de son traitement historique, Victoria Gray vient de recevoir de bonnes nouvelles : les milliards de cellules génétiquement modifiées injectées dans son corps semblent clairement atténuer pratiquement toutes les complications de sa maladie, la drépanocytose, une maladie du sang rare qui touche de manière disproportionnée les Afro-Américains aux États-Unis.

La drépanocytose est due à une mutation génétique qui produit une forme défectueuse de l'hémoglobine, une protéine dont les globules rouges ont besoin pour alimenter l'organisme en oxygène. L'hémoglobine défectueuse transforme les globules rouges en cellules déformées, en forme de faucille, qui se coincent dans les vaisseaux sanguins, provoquant des douleurs atroces, des lésions organiques et souvent une mort prématurée.

Pour le traitement expérimental, les scientifiques prélèvent des cellules de la moelle osseuse des patients et utilisent CRISPR pour modifier un gène, ce qui permet aux cellules de produire une protéine appelée hémoglobine fœtale. L'hémoglobine fœtale est fabriquée par les fœtus dans l'utérus pour obtenir de l'oxygène du sang de leur mère, mais après la naissance, sa production cesse généralement sous peu.

En rétablissant la production d'hémoglobine fœtale, les médecins du Sarah Cannon Research Institute, basé à Nashville au Tennessee, espéraient compenser l'hémoglobine défectueuse produite par les patients atteints de drépanocytose, puisque ces derniers n'ont pas assez d'hémoglobine. Les scientifiques espéraient qu'après le traitement reçu le 2 juillet 2019, au moins 20 % de l'hémoglobine présente dans le système de madame Gray serait de l'hémoglobine fœtale. Les tests sanguins effectués jusqu'à présent ont montré que les taux étaient bien supérieurs. Selon les chercheurs, environ 46 % de l'hémoglobine présente dans l'organisme de la patiente est toujours de l'hémoglobine fœtale. En outre, l'hémoglobine fœtale est restée présente dans 99,7 % de ses globules rouges.

Autre résultat prometteur, une biopsie des cellules de la moelle osseuse a révélé que plus de 81 % des cellules contenaient la modification génétique nécessaire à la production d'hémoglobine fœtale, ce qui indique que les cellules modifiées continuent de survivre et de fonctionner dans son organisme pendant une période prolongée. Aujourd'hui, après neuf mois de tests minutieux, le traitement ne montre aucun signe d'affaiblissement, ce qui rend ses médecins plus confiants que jamais de la réussite de l'expérience.

Les chercheurs ont également signalé que le premier patient à recevoir le même traitement pour la bêta-thalassémie en Allemagne, a maintenant pu vivre sans transfusion sanguine pendant 15 mois.



4.2 Secteur hors santé

La bio-innovation pourrait aussi être utilisée pour produire une grande partie des matériaux physiques de l'économie mondiale, entraînant une amélioration de la performance et de la durabilité. Il s'agit d'une approche très prometteuse, qui permettrait d'améliorer les caractéristiques des matériaux, de réduire le profil d'émissions de GES de la fabrication et du traitement, et de raccourcir les chaînes de valeur.

À titre d'exemple, la fermentation, utilisée pendant des siècles pour faire du pain et brasser de la bière, est maintenant utilisée pour créer des tissus tels que la soie artificielle. La biologie est de plus en plus utilisée pour créer de nouveaux matériaux susceptibles d'améliorer la qualité, d'introduire des capacités entièrement nouvelles, d'être biodégradables et dont le processus de production générerait beaucoup moins d'émissions de carbone. On peut même recourir à des racines de champignons plutôt qu'à la peau des animaux pour fabriquer du cuir. Le plastique peut être fabriqué avec de la levure au lieu de produits pétrochimiques. Et tout cela, à partir d'une simple cellule. On parle vraiment d'une réelle révolution biologique!

La bioéconomie mondiale représentera 4 000 milliards de dollars par an d'ici 2040, dont la moitié dans des secteurs autres que la santé. La technologie va remodeler la façon dont les humains fabriquent les matériaux qui sous-tendent notre vie quotidienne.





En mode « mission »

À cet égard, Génome Québec recommande de s'appuyer sur des programmes ciblés de financement, en misant sur une approche collaborative orientée « mission », dont le but ultime consistera à répondre aux priorités et aux défis du Québec. Alimenter la compétitivité économique multisectorielle en tirant profit de la capacité de la bio-innovation pour devenir un chef de file mondial, pourrait certainement faire l'objet d'une mission, dont les livrables pourraient notamment permettre de :

- Augmenter l'autosuffisance du Québec
- Fabriquer des produits à faibles émissions de carbone et favoriser l'économie circulaire
- Accroître la sécurité alimentaire
- Créer des emplois de haut niveau en milieux ruraux
- Attirer des talents et des investissements
- Créer une économie du savoir



PARTIE II - FACTEURS DE SUCCÈS

Pour se réaliser et se transformer en réussites québécoises, l'approche collaborative orientée « mission » proposée par Génome Québec, devra s'appuyer sur six facteurs de succès. De façon transversale, ces facteurs clés viendront soutenir l'excellence de la recherche, le développement de l'innovation, la compétitivité, la collaboration, l'attraction d'investissements privés, l'attraction de talents, la formation et l'acceptabilité citoyenne. Ultimement, la vision exposée dans ce mémoire consiste à mettre la génomique au service de certains des plus grands défis de la société québécoise, en proposant une approche intégrée, axée sur les synergies, les résultats et l'effet de levier du dollar du Québec.

1. Modèle d'affaires unique pour traduire la recherche en retombées

Génome Québec a été créé en 2000 pour soutenir le développement stratégique et scientifique de la génomique au Québec, et faire du Québec un chef de file dans ce domaine. Notre modèle unique, basé sur l'effet de levier du dollar du Québec, nous permet de mettre en place des partenariats public-privé de recherche et d'innovation grâce à des programmes compétitifs, basés sur l'excellence et l'impact socioéconomique.

Génome Québec fait partie de l'Entreprise génomique, un grand réseau pancanadien multisectoriel et multidisciplinaire, composé de six centres de génomique régionaux et de Génome Canada, auxquels s'ajoutent des partenaires industriels, universitaires et à but non lucratif. Au fil du temps, la communauté a mûri, alors que la science et ses applications ont progressé de manière exponentielle. Le modèle a évolué pour devenir un catalyseur permettant de traduire la recherche en retombées. La valeur ajoutée de ce modèle unique se traduit comme suit :

- Financement à fort effet de levier, soit 1,3 pour chaque dollar versé par le ministère de l'Économie et de l'Innovation du Québec
- Accompagnement de projets de recherche appliquée, avec des équipes interdisciplinaires et multisectorielles de chercheurs et d'utilisateurs
- Gestion scientifique et financière efficace des financements octroyés aux projets
- Offre de services technologiques de très haute qualité, à des prix compétitifs
- Création d'emplois hautement qualifiés et bien rémunérés
- Mobilisation des connaissances auprès des parties prenantes, des jeunes et du public
- Solides connexions et collaborations internationales, qui contribuent au rayonnement de l'expertise québécoise

Tout comme Génome Canada, Génome Québec entend désormais orienter ses programmes de financement selon un cadre axé sur des « **missions** », en déterminant et en privilégiant des missions où la génomique contribuera à des résultats et des retombées tangibles, toujours en maintenant le cap sur l'effet de levier du dollar du Québec. Cela devra s'organiser dans une perspective de collaboration et de cocréation.

2. Encourager les partenariats public-privé et multiplier les solutions innovantes

L'amélioration de la performance de l'économie québécoise passe notamment par un rapprochement entre l'industrie et la recherche académique. Dans cette perspective, Génome Québec a mis en place des initiatives visant à favoriser les maillages public-privé. Ces dernières ont permis d'investir au Québec plus de 87 millions de dollars (dont plus de 60 % ont été octroyés dans des secteurs hors santé) en projets de recherche appliquée, menés en partenariats public-privé, auxquels participent une importante variété d'acteurs industriels, dont Agropur, Olymel et les Producteurs de grains du Québec.

Plusieurs de ces projets sont également réalisés en partenariat avec des utilisateurs publics, soit des ministères provinciaux et fédéraux, lesquels intègrent de plus en plus des outils issus de la génomique dans leurs pratiques. Ces maillages public-privé témoignent de la maturité de la technologie et de la volonté des utilisateurs d'en accélérer l'adoption.

En doublant ses efforts de maillages, Génome Québec pourrait contribuer de façon importante au développement de zones d'innovation, à proximité des grandes institutions de recherche québécoises, notamment en stimulant la prolifération d'innovations brevetables.

À ce jour, il est possible de démontrer qu'en profitant de l'offre de financement de Génome Québec, couplée aux incitatifs fiscaux découlant des crédits pour la R-D, les entreprises qui investissent en recherche au Québec bénéficient d'un soutien parmi les plus profitables en Amérique du Nord. En effet, en participant à des projets d'intégration de la génomique financés par Génome Québec (*Programme de partenariats pour les applications de la génomique*), les entreprises peuvent multiplier jusqu'à 10 fois leur mise de fonds dans la recherche, c'est pourquoi on parle de l'un des programmes les plus intéressants en Amérique du Nord. L'échelle de financement disponible varie entre 300 000 et 6 millions de dollars par projet, avec un effet de levier significatif, qui vise à financer l'étape de validation nécessaire pour un transfert de la recherche vers le partenaire utilisateur.



Stimuler les investissements privés et partager les risques : un effet de levier en faveur de l'attraction d'investissements, du savoir-faire et de la compétitivité

Pour accroître la compétitivité des PME québécoises et attirer de nouveaux investissements au Québec, nous avons mis en place une mesure tremplin visant à bâtir de nouveaux ponts entre les chercheurs et le secteur privé. Il s'agit d'un programme proposant des financements variant entre 50 000 et 200 000 dollars. Cette enveloppe cofinancera des partenariats entre des chercheurs académiques et des utilisateurs, pouvant implanter ou commercialiser les résultats des recherches. Ces fonds seront exclusivement dédiés à l'établissement de preuves de concept, servant de levier à l'obtention de financement subséquent. Cette approche s'inscrit dans notre volonté de soutenir des compétences clés, qui contribueront à propulser le secteur de la génomique, de renforcer le dialogue avec l'industrie et de proposer des solutions collaboratives en lien avec les enjeux prioritaires du Québec. Pour les entreprises privées, le bénéfice se concrétisera par l'amélioration des procédés, une réduction des coûts ou le développement de nouveaux produits ou services, le tout dans une perspective de développement durable.

Nous proposons de tirer profit de l'expérience acquise dans la gestion de ces programmes et les remodeler en mode « **mission** ». L'idée étant de s'appuyer sur des programmes ciblés de financement, en misant sur une approche collaborative orientée « **mission** », dont le but ultime consistera à répondre aux priorités et aux défis du Québec énoncés dans la partie I du présent document.

3. Autosuffisance technologique : un gage de succès pour relever les défis de demain et créer de la valeur économique

Le développement de nouvelles technologies et plateformes technologiques sera au cœur de toutes éventuelles missions. Les plateformes fourniront l'expertise et les technologies nécessaires pour soutenir les activités de la mission, tandis que les nouvelles technologies et les nouveaux outils joueront un rôle essentiel dans les résultats de la mission. Il sera donc essentiel de travailler en étroite collaboration avec les parties prenantes concernées pour garantir le soutien et la compétitivité des principales plateformes.

L'élément déclencheur de la révolution génomique est sans contredit la diminution des coûts des technologies, notamment du séquençage, au cours des 12 dernières années. Ce phénomène a favorisé l'accès à ces technologies et propulsé en flèche la production de données. Avec toute cette capacité, la génomique atteint une nouvelle étape dans sa maturation et on assiste maintenant à l'émergence de filières industrielles issues du savoir en génomique.

Mais étonnamment, on oublie parfois de considérer la génomique comme un vecteur de développement économique, au même titre que le font d'autres chefs de file dans le monde, notamment Cambridge (Royaume-Uni), Broad Institute (Boston), VIB (Belgique) et Cancéropôle Lyon Auvergne Rhône-Alpes (France). Ces grands pôles ont compris que des infrastructures de recherche de pointe constituent un facteur des plus mobilisateurs et attrayant pour la communauté de recherche et les entreprises. D'ailleurs, les faits parlent d'eux-mêmes puisque ces filières de référence structurées autour de l'expertise génomique sont aujourd'hui entourées d'entreprises privées en démarrage, petites et moyennes. De plus, ces infrastructures créent des emplois de très haut niveau, une activité économique importante et permettent de maintenir la compétitivité de leurs chercheurs sur la scène internationale.

Selon un rapport de Roots Analysis publié en 2019, le séquençage génomique humain a propulsé les initiatives de recherches cliniques de manière fulgurante. Au moment de la publication du rapport, plus de 2 600 études cliniques en cours à l'échelle mondiale utilisaient des données de séquençage (30 % en développement de médicaments, 30 % en diagnostic, 15 % sur des études comportementales, 10 % sur le microbiome et 5 % sur des études généalogiques). De plus, 36 % des études portaient sur l'oncologie, 10 % sur les maladies neurologiques, 10 % sur les désordres gastro-intestinaux et un peu moins de 10 % sur les maladies infectieuses.

Depuis 2015, près de 50 initiatives publiques de séquençage du génome humain ont été financées (Royaume-Uni, États-Unis, Chine, Kuwait, Islande, Qatar, Estonie, Danemark, etc.) et 70 par des compagnies privées, les plus actives étant Roche, Pfizer, Johnson & Johnson et Amgen.

Au cours des 10 prochaines années, le marché du séquençage de nouvelle génération sera marqué par de nouvelles innovations technologiques en réponse à une demande accrue pour des données de recherche clinique de haute qualité à un prix toujours plus bas. Le marché global des fournisseurs de services est anticipé de croître de 18 % par année d'ici 2030.

Plus de la moitié (56 %) du marché des services sera orienté vers le développement du médicament et de la médecine de précision. Les institutions de recherche académiques représenteront 45 % du marché des utilisateurs des technologies de séquençage de nouvelle génération.

Le Québec a tous les outils en main pour tirer son épingle du jeu

Le Québec dispose des infrastructures et du savoir-faire pour servir la recherche de très haut niveau, et être autosuffisant lorsqu'il s'agit de services technologiques, notamment au niveau des tests diagnostiques, du séquençage, d'analyses, etc. Grâce à son Centre d'expertise et de services et à sa biobanque située au Saguenay-Lac-Saint-Jean, Génome Québec est le plus important fournisseur intégré de services technologiques génomiques au Canada. Avec ses 40 employés hautement qualifiés, il génère des revenus d'environ 15 millions de dollars par année, facturés à des clientèles académiques et industrielles de partout dans le monde.



Centre d'expertise et de services Génome Québec et Centre québécois de données génomiques

Le Centre d'expertise et de services (CES) Génome Québec existe depuis 2002 et offre à la communauté scientifique des services génomiques de très haute qualité en appui à la recherche en santé humaine, en agroalimentaire, en foresterie et en environnement. Maintenant situé au CHU Sainte-Justine depuis décembre 2019, le CES est une source inestimable d'expertise et de technologies à la disposition de la communauté de recherche académique et industrielle canadienne et internationale. Les grands projets pancanadiens réalisés en ses murs depuis plus de 10 ans, ainsi que la croissance annuelle du nombre d'utilisateurs, témoignent aux financeurs publics, collaborateurs et utilisateurs de la capacité de Génome Québec à fournir des données pertinentes de qualité exceptionnelle.

En partenariat avec le Centre québécois de données génomiques, le CES entend développer une expertise pour l'analyse bio-informatique de données génomiques humaines.

Le CES explore également la possibilité de développer un second partenariat avec l'Université Laval pour un centre de valorisation des données génomiques non humaines, GenoVal-IA. Cela permettrait de créer de la valeur en misant sur la synergie entre l'intelligence artificielle et les données génomiques hors santé.

Virage numérique pour soutenir l'agriculture, la foresterie ou l'environnement

La réalité des métadonnées hors santé est très différente, qu'il s'agisse de géolocalisation, de senseurs divers, de données climatiques, etc. Le secteur fait présentement face à plusieurs défis, dont la fragmentation en silos, le manque d'outils et d'expertise pour l'analyse et l'interprétation, ainsi que le manque de standardisation dans la collecte et de capacité computationnelle de haut niveau.

Dans la perspective où le gouvernement du Québec souhaite effectuer un virage numérique pour des secteurs comme l'agriculture, la foresterie ou l'environnement, Génome Québec propose de mettre en place un premier centre de production, de traitement et de valorisation des données génomiques hors santé, orchestré dans un contexte de gestion rigoureuse des données, selon les principes FAIR (facilement trouvables, accessibles, interopérables et réutilisables). Une telle ressource serait complémentaire et viendrait bonifier les services offerts par le CES.

La génomique est encore considérée comme une technologie de rupture, mais elle se démocratise et devient assez bien définie. Cette notion de maturité permet maintenant de standardiser plusieurs pratiques afin d'assurer, voire garantir, des services de la plus grande qualité. Le Québec peut donc compter sur le CES pour produire des données génomiques de grande valeur, assurer la compétitivité scientifique et économique, créer de la richesse et aspirer à améliorer le bien-être de la population dans son ensemble. Le CES s'est taillé une place enviable au Québec et au Canada, et tous les éléments de succès sont en place pour se hisser encore plus haut en soutenant la réalisation des « **missions** » proposées pour relever nos grands défis de demain.

Accélérer l'intégration de ces technologies à l'économie du Québec

Il serait tout à fait envisageable de mettre en place une plateforme servant d'interface entre les producteurs de technologies et les milieux preneurs, un espace de convergence et d'infrastructures réunies autour de personnes hautement spécialisées, qui œuvrent à la production et la valorisation de données génomiques. Ultimement, cet espace viserait à favoriser la création et l'essor d'entreprises privées, la création d'emplois de haut niveau et de valeur issue des découvertes génomiques. Ce type de concept pourrait très bien s'intégrer aux zones d'innovation proposées par le gouvernement du Québec, ou s'organiser en complémentarité. Deux modèles à succès d'écosystèmes similaires, dédiés à l'accompagnement de *start-up* en génomique, existent déjà à San Francisco (États-Unis) et à Cambridge (Royaume-Uni). Ces initiatives sont soutenues par le programme *Illumina Accelerator*. Le CES de Génome Québec est déjà l'un des deux plus importants clients partenaires canadiens d'illumina, et le numéro un, si on parle de génomique, tous secteurs confondus (santé, agroalimentaire, foresterie et environnement).

Biobanque Génome Québec et CIUSSS du Saguenay-Lac-Saint-Jean

Depuis juin 2020, la Biobanque Génome Québec et CIUSSS du Saguenay-Lac-Saint-Jean héberge la quasi-totalité (240 000) des échantillons positifs à la COVID-19, récoltés dans les 80 centres de dépistages québécois. En janvier 2021, le gouvernement du Québec et l'Institut national de santé publique du Québec ont mis de l'avant une initiative visant à séquencer 10 % des échantillons viraux, afin de mieux suivre l'évolution de la pandémie, plus particulièrement l'émergence et l'épidémiologie des variants britannique, sud-africain, brésilien et maintenant indien du virus. La Biobanque et le CES sont au cœur de cette initiative et continuent d'entreposer le virus (pour des projets de recherche futurs) et d'en séquencer plusieurs dizaines de milliers au cours de la prochaine année. C'est l'agilité de l'organisation et surtout de son personnel qui permettront à Génome Québec de continuer de soutenir le gouvernement du Québec et les instances de la santé publique dans les efforts pour comprendre et contrer la COVID-19 en ces temps extraordinaires.

4. Arrimage entre intelligence artificielle et génomique : passage obligé pour bâtir une économie de l'innovation

Outre sa masse critique d'expertise en génomique, le Québec détient également des atouts de taille et occupe une position unique grâce à son pôle d'excellence en intelligence artificielle. C'est la convergence de ces deux univers, qui donnera au Québec tous les actifs nécessaires pour construire une filière puissante et attrayante pour les investisseurs étrangers et les talents, pour alimenter le pipeline de découvertes et d'outils d'aide à la décision pour le réseau de la santé, mais éventuellement aussi en matière d'environnement, d'agroalimentaire et autres secteurs clés.

Le Québec se targue avec raison de son imposante force compétitive en intelligence artificielle. Ce créneau d'excellence est reconnu par la communauté scientifique, l'écosystème de l'innovation, les grands joueurs internationaux et les gouvernements. On parle beaucoup moins de notre imposante force compétitive en génomique, alors que la fusion de ces deux univers pourrait bien être un moteur pour la prochaine génération de progrès, tant au niveau de la biologie qu'en matière d'apprentissage profond.



La découverte et le développement d'un nouveau médicament prennent généralement plus de 10 ans et coûtent en moyenne près d'un milliard de dollars. En effet, seulement 6 % des médicaments développés finissent par atteindre le marché. L'utilisation de l'IA, combinée à une connaissance fine des processus biologiques des maladies, possède le potentiel d'augmenter ce taux de succès pour lutter contre les futures pandémies ou stopper les maladies incurables.

Par ailleurs, en combinant les algorithmes d'apprentissage profond et les puissants outils d'imagerie et de séquençage, les experts espèrent stimuler les progrès dans la compréhension, le diagnostic et le traitement des maladies, tout en faisant progresser l'IA elle-même.

À titre d'exemple, des chercheurs ont récemment indiqué qu'ils utilisaient une nouvelle technique pour déterminer comment les gènes sont exprimés dans les cellules individuelles et comment ces cellules interagissent chez les personnes décédées de la maladie d'Alzheimer, permettant ainsi aux scientifiques de mieux comprendre le développement de cette maladie neurocognitive, qui touche plus de 500 000 Canadiens aujourd'hui.

Les algorithmes d'apprentissage profond peuvent également être utilisés pour comparer l'expression des gènes dans des cellules infectées par le SRAS-CoV-2 à des cellules traitées avec des milliers de médicaments différents, afin d'essayer de prédire par calcul, les médicaments susceptibles d'inhiber le virus.

La synergie entre ces deux grands créneaux d'excellence permettra d'extraire de toutes ces données des informations utiles, qui permettront d'accélérer le développement de produits commercialisables et de trouver de nouvelles solutions aux défis de nos sociétés modernes, donc l'épidémie de cancers à prévoir au cours des 10 à 20 prochaines années ou encore, les enjeux de changements climatiques. L'arrimage de ces deux technologies de rupture constitue sans contredit un puissant levier de développement économique, compétitif à l'échelle mondiale.

Comment réorganiser les choses pour tirer le plein potentiel de l'arrimage entre l'intelligence artificielle et la génomique?

Il faudra changer les règles du jeu, car cet avenir prometteur dépendra de la capacité d'organiser, d'analyser et d'interpréter les données. À titre d'exemple, les bénéfices de la génomique dans le secteur de la santé humaine ne se feront sentir que dans la mesure où il sera possible de coupler les données génomiques avec les données cliniques, au sein d'un même système. Il s'agit pour le moment d'un enjeu de taille, d'autant plus que la question d'accès aux données médicales des patients demeure, à ce jour, irrésolue.

Pour tirer le maximum de ce potentiel de synergie, il faut créer un réseau harmonisé de banques de données génomiques accessibles à la recherche. Nous proposons de confier le mandat de développer une série d'outils d'harmonisation et de standardisation de format à une entité neutre comme le Centre québécois de données génomiques. L'idée est de permettre l'interopérabilité et le partage fédéré multiplateformes.

Le mandat consisterait à :

- Créer une plateforme bio-informatique sécurisée pour l'hébergement de données génomiques cliniques produites au Québec
- Harmoniser ces données cliniques avec des données de recherche
- Encourager le dépôt de données de recherche
- Procurer à la communauté de chercheurs un accès sécuritaire à ces données
- Augmenter la compétitivité du Québec en génomique et devenir un chef de file dans le partage de données génomiques

Le Centre québécois de données génomiques permettra d'augmenter la compétitivité des chercheurs québécois, d'accroître l'investissement du secteur privé, d'attirer de nouveaux talents et ultimement, d'améliorer la qualité des soins aux patients.

Au cours de la dernière année, Génome Québec a investi 1,25 million de dollars afin de jeter les bases du Centre québécois de données génomiques. Il financera également à hauteur de 4,2 millions de dollars le séquençage et le géotypage des échantillons CARTaGENE. L'objectif est d'une part, de valoriser cette biobanque populationnelle unique et d'autre part, d'alimenter ce centre en données génomiques. Ce financement de Génome Québec a bénéficié d'un effet de levier important. Spécifiquement, le Centre québécois de données génomiques s'est vu octroyer un financement de la Fondation canadienne pour l'innovation de 7,5 millions de dollars en 2020, ce qui illustre concrètement le niveau de compétitivité de l'expertise en place.

5. Accélérer la croissance des entreprises et stimuler les marchés : le modèle du Royaume-Uni

Pour combler le fossé entre la recherche et l'industrie, nous proposons de considérer la mise en place d'un réseau, inspiré de ce qui se fait au Royaume-Uni par le biais de Catapult Network. Il s'agit de centres physiques dotés d'infrastructures de R-D de pointe, notamment des hubs, des laboratoires, des bancs d'essai, des usines et des bureaux, ainsi que des experts techniques qui développent et adoptent des produits, des processus, des services et des technologies révolutionnaires.

Catapult Network travaille avec des milliers d'entreprises innovantes dans un large éventail de secteurs tels que la fabrication, l'espace, la santé, le numérique, l'énergie, les transports, les télécommunications, l'environnement urbain et bien d'autres. Les meilleures entreprises, scientifiques, spécialistes techniques et ingénieurs du Royaume-Uni travaillent côte à côte sur des projets de recherche et de développement avancés, aidant l'industrie à commercialiser des idées à fort potentiel, stimulant ainsi la croissance et la productivité des entreprises.

En s'inspirant d'un tel modèle, le Québec se donnerait les moyens de relever les plus grands défis auxquels la société et nos industries sont confrontées, notamment en matière de changements climatiques et développement durable, lutte aux pathogènes, cancers et maladies rares ou économie circulaire. En réunissant les connaissances, les infrastructures et en stimulant des collaborations, un tel réseau contribuerait à rendre les industries d'aujourd'hui plus productives et à créer les marchés de demain.

L'intérêt d'une telle approche consisterait notamment à établir des centres de premier plan, qui pourraient être répartis sur plusieurs sites à travers le Québec. Cela contribuerait à transformer la capacité d'innovation dans nos divers créneaux d'excellence, en plus de créer des emplois de haut niveau dans les régions.

Exemple : la filière de la thérapie cellulaire et génique

La filière de Catapult Network dédiée aux thérapies cellulaires et géniques accélère la transformation de la recherche en thérapies commercialement viables et mûres pour attirer des investisseurs, en aidant les entreprises à démarrer, à croître et à développer en toute confiance des thérapies avancées pour les mettre à la disposition des patients rapidement et efficacement. Son objectif consiste à faire du Royaume-Uni un leader mondial dans le développement et la commercialisation de thérapies cellulaires et géniques.

Pour ce faire, il met à disposition de l'infrastructure et une équipe de spécialistes, couvrant l'ensemble du cycle de vie de la thérapie cellulaire et génique. Ces derniers travaillent de concert avec les chercheurs ou l'industrie, afin de leur permettre d'obtenir les meilleurs résultats. Leur accompagnement permet d'accélérer les projets, en favorisant la production de thérapies cellulaires et géniques plus sûres, plus efficaces, évolutives et abordables.

6. Acceptabilité citoyenne : l'intégration de l'innovation passe par la confiance du public

Depuis le début de la pandémie de COVID-19, tous les yeux du monde sont tournés vers la science. La recherche n'a jamais disposé d'autant d'espace médiatique, avec les avantages et les désavantages que cela comporte. À peu près tout le monde a une opinion sur la question, mais celle-ci est basée sur quoi et alimentée par quelles sources d'information?



Nous sommes à l'ère des complotistes, des cyberactivistes, des gens qui vivent dans un monde où rien n'est vrai, mais où tout est possible. De l'autre côté du miroir, nous avons la majorité, souvent trop silencieuse, qui fait confiance aux experts. Il y a énormément d'informations qui circulent et les gens sont d'une certaine façon, livrés à eux-mêmes pour départager le vrai du faux. De là la nécessité de développer des ressources fiables, objectives et accessibles. Le Québec veut miser sur l'innovation pour dynamiser son économie, une vision ambitieuse, mais tout à fait adaptée à notre société moderne. Toutefois, le succès de ce passage vers une société innovante, preneuse de ses propres innovations, passe inévitablement par la confiance de la population. Il s'agit d'une composante essentielle trop souvent considérée en second plan, alors qu'elle devrait faire partie intégrante de la chaîne d'innovation.

La génomique est là pour de bon : la population a besoin d'accompagnement. Qui dit génomique, dit médecine de précision, intelligence artificielle, agriculture de précision, sélection de précision, accès et partage des données de santé, consentements, etc. Quand nous parlons de génomique, nous faisons référence à la transformation des façons de faire et conséquemment, à la résistance aux changements.

À ce jour, nous devons admettre que le niveau de compréhension et de réceptivité aux répercussions sociales et économiques de la génomique demeure très mitigé. Nous voyons sans surprise que les nombreux avantages que peuvent entrevoir les chercheurs pour la santé, la nutrition, l'environnement et l'économie suscitent beaucoup d'enthousiasme en terrain conquis. Toutefois, la réalité nécessite de composer quotidiennement avec des publics peu informés, souvent sceptiques et réticents face aux nouvelles technologies.

Nous voilà donc en présence d'un défi d'envergure sur lequel se jouera en grande partie le virage vers une société innovante : la **confiance de la population**. La vision du gouvernement du Québec en matière d'innovation doit impérativement tenir compte du défi énorme que constitue la confiance des publics. À plusieurs égards, les gens ont besoin d'être outillés adéquatement pour comprendre ce qu'il adviendra de leurs données de santé, et jusqu'où peut aller l'intelligence artificielle. Un vaccin à ARN peut-il vraiment modifier la génétique d'un individu? Une meilleure sélection des plantes ou des arbres, est-ce de la modification génétique?

Bref, il y a du pain sur la planche, mais la bonne nouvelle c'est qu'il existe au Québec des organisations qui disposent des connaissances, de l'expertise et dont l'éducation et la formation sont inscrites dans leur mission. Pourquoi ne pas confier à ces organisations des mandats spécifiques, visant à soutenir le gouvernement dans son virage?

Il est clair qu'en matière d'enjeux relatifs à la génomique, Génome Québec a déjà développé plusieurs outils et initiatives permettant de jeter les bases d'une opération plus large d'éducation citoyenne. Les ressources sont en place et l'organisme peut certainement jouer un rôle important dans le cadre d'une stratégie globale d'éducation de la population, comme le font notamment le National Institutes of Health aux États-Unis et le National Health Service au Royaume-Uni.

CONCLUSION

Le présent mémoire a été développé dans le respect des objectifs identifiés dans l'appel de mémoires du ministère de l'Économie et de l'Innovation. Génome Québec est un organisme dont le modèle d'affaires est unique à plusieurs égards, tant du point de vue de l'effet de levier du dollar du Québec qu'au niveau de son expertise multisectorielle et multidisciplinaire, spécifique à une technologie de rupture porteuse d'avenir. Les progrès issus de la génomique ne cessent de s'accélérer, menant de plus à des solutions à haut facteur d'impact. Cela fait maintenant 21 ans que le gouvernement du Québec renouvelle sa confiance à l'égard de Génome Québec, qui est aujourd'hui devenu l'un des fleurons du Québec. Ce mémoire reflète notre vision pour les 20 prochaines années.

Une nouvelle ère se dessine, celle de la révolution biologique. Comme toutes les périodes de bouleversements économiques et technologiques, il s'agit d'une période de grandes opportunités, mais également d'importantes incertitudes. Le Québec doit décider dès maintenant il souhaite ou non monter à bord du train. Le cas échéant, cela passera par la prochaine Stratégie québécoise de la recherche et de l'innovation.

La bio-innovation, c'est l'avenir, et nous avons voulu en faire la démonstration dans ce mémoire. Dans la mesure où le Québec souhaite réellement s'appuyer sur une économie du savoir pour trouver des solutions aux grands défis de notre société moderne, cela constitue sans contredit un choix novateur, structurant et visionnaire. Génome Québec est l'organisme tout indiqué pour paver la voie à cette nouvelle réalité.

Le Québec a de la difficulté à faire des choix. Cette fois, il faudra trancher. Le Québec veut-il tirer profit de tous les actifs accumulés au cours des deux dernières décennies pour prendre sa place parmi les chefs de file de la prochaine révolution économique, celle de la biologie? Si oui, il faut se doter d'une **stratégie québécoise de la génomique**.