

# **Hydrogène vert et matériaux avancés : alliance naturelle d'innovation et passerelle vers la carboneutralité**

par

**PRIMA Québec**

Mémoire présenté dans le cadre des  
Consultations sur l'hydrogène vert et les bioénergies

Janvier 2022

# Remerciements

Le 2 décembre 2021, le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) a lancé des consultations auprès de partenaires, acteurs concernés et communautés autochtones afin d'éclairer sa réflexion sur les moyens à mettre en œuvre pour accélérer le développement au Québec des filières de l'hydrogène vert et des bioénergies. Le gouvernement a invité PRIMA Québec à participer à cette discussion stratégique. L'équipe PRIMA Québec remercie le MERN pour cette considération et l'assurance de son entière collaboration dans la mise en œuvre de cette vision économique prometteuse.

Dans ce mémoire, PRIMA Québec s'intéressera au volet hydrogène vert qui est en relation directe avec les matériaux avancés.

# Table des matières

Remerciements .....	2
Table des matières .....	3
Avant-propos .....	4
Des retombées tangibles .....	4
Le continuum matériaux avancés - hydrogène vert .....	4
Sommaire des recommandations .....	5
Recommandations .....	6
Contexte .....	9
Aperçu de la situation mondiale et position relative du Québec .....	10
La stratégie canadienne .....	11
Occasions et défis pour le Québec .....	12
L’approvisionnement en électricité .....	12
Principaux domaines de recherche pour le Québec .....	15
La nécessaire collaboration fédérale-provinciale-territoriale .....	17
Infrastructure nationale d’approvisionnement et de distribution de l’hydrogène .....	17
Annexe .....	18

# Avant-propos

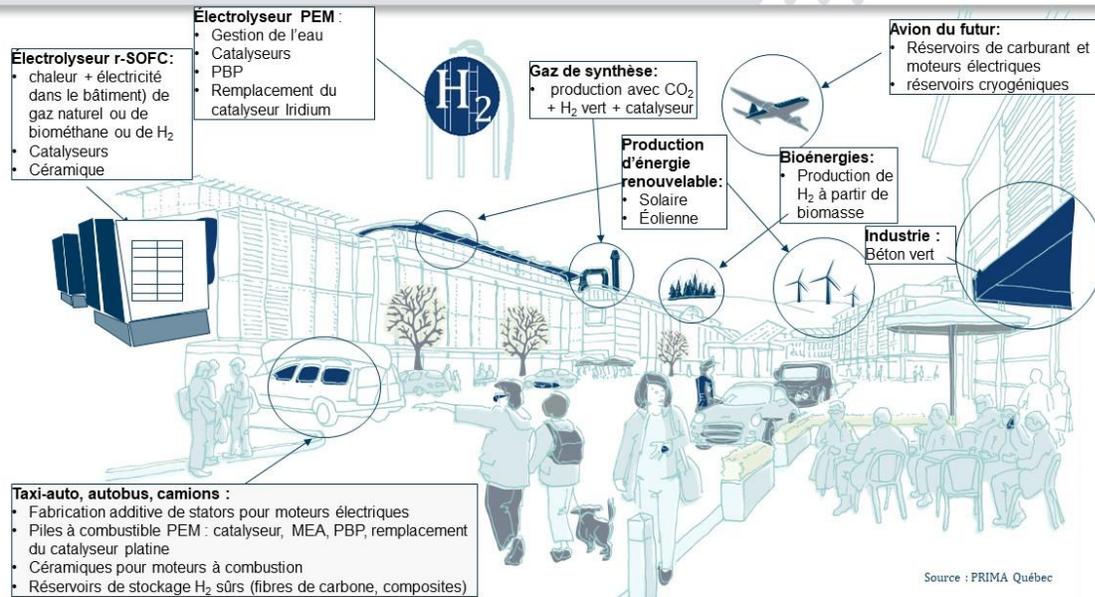
PRIMA Québec est le pôle de recherche et d'innovation en matériaux avancés. L'organisation a été créée en 2014 à l'initiative du gouvernement avec le mandat d'animer et soutenir l'écosystème des matériaux avancés qui représente un moteur d'innovation et de croissance pour le Québec. Un « matériau avancé » (MA) est un matériau nouveau ou amélioré qui offre une performance supérieure à celui qu'il remplace. Les matériaux avancés peuvent résister au froid, au feu, à l'abrasion, remplacer la peau ou un matériau polluant, être biodégradables, supraconducteurs, légers, invisibles, etc. PRIMA Québec stimule la compétitivité des entreprises québécoises en leur permettant de profiter de l'expertise de la recherche scientifique. Par son accompagnement et le financement offert, PRIMA facilite la réalisation de projets porteurs. Reconnu comme regroupement sectoriel de recherche industrielle (RSRI), PRIMA Québec bénéficie du soutien financier du gouvernement du Québec et du secteur privé pour favoriser les relations recherche-industrie selon l'approche de l'innovation collaborative.

## Des retombées tangibles

Sur la période 2016-2021, la participation de PRIMA Québec a rendu possibles 91 projets qui ont permis de développer de nouveaux matériaux, d'intégrer des nouveaux matériaux dans des produits finis ou semi-finis, ou de mettre au point des procédés ou des instruments impliquant des matériaux avancés. Ces projets ont représenté une valeur combinée de 82,4 millions \$. Ils ont réuni dans une approche de recherche collaborative, 190 partenaires industriels et 26 institutions académiques. Leurs collaborations fertiles ont aussi généré 130 publications scientifiques, 15 déclarations d'invention et 10 brevets. Elles ont en outre permis à 124 étudiants de niveau maîtrise et 277 de niveau Ph. D. et post doctoral de parfaire leur formation, tout en contribuant à l'avancement des connaissances ; ce sont d'importantes ressources utiles par la suite à l'industrie. Plusieurs projets impliquant des CCTT ont également contribué à la formation de dizaines de techniciens hautement qualifiés qui réutilisent leurs apprentissages pour d'autres projets. Enfin, PRIMA Québec soutient présentement des projets qui sont liés à l'hydrogène et d'autres sont en cours d'évaluation.

## Le continuum matériaux avancés - hydrogène vert

PRIMA Québec appuie l'intention gouvernementale de développer l'écosystème de l'hydrogène vert et des bioénergies. Le volet hydrogène vert interpelle directement PRIMA Québec. En effet, la production d'hydrogène vert utilise des matériaux avancés indispensables, tels que les catalyseurs, permettant de synthétiser l'hydrogène. Le rôle des matériaux avancés sera aussi primordial lors de la distribution, du stockage et de l'utilisation de ce nouvel outil énergétique. Puis, dès que l'on pense aux vertus que l'on prête avec justesse à l'hydrogène vert – décarboner l'économie, réduire l'impact des industries sur la qualité de l'air, constituer un nouveau vecteur d'énergie – on entre dans un univers de projets innovants qui ne peuvent être concrétisés sans le recours à des matériaux avancés. Les recommandations de PRIMA Québec expriment cette réalité : l'intégration des matériaux avancés dans la chaîne de valeur de l'hydrogène vert, est une condition essentielle au développement de cette filière.



## Sommaire des recommandations

1. Reconnaître le rôle central joué par l'innovation et la recherche collaborative dans le développement de cette filière concurrentielle ;
2. Consolider rapidement les bases de l'écosystème de l'hydrogène vert par un appel de projets stratégiques visant l'innovation collaborative ;
3. Adopter une approche décloisonnée parce que l'hydrogène comme vecteur d'énergie dont les usages sont multiples ;
4. Favoriser les collaborations intracanadiennes pour accélérer le développement de la filière et faire face à la concurrence internationale ;
5. S'inscrire activement dans la Stratégie canadienne sur l'hydrogène.

# Recommandations

## 1. Reconnaître le rôle central joué par l'innovation et la recherche collaborative dans le développement de cette filière concurrentielle

Alors que la concurrence internationale s'accroît dans le domaine de l'hydrogène, le Québec doit pouvoir rivaliser sur le front de l'innovation. PRIMA Québec recommande au gouvernement de stimuler l'innovation sur la thématique de l'hydrogène par la promotion de la recherche et de l'innovation collaboratives qui associent les entreprises et les milieux académiques. La recherche collaborative permet de *dérisquer* les projets de R et D, d'accroître les investissements en innovation et de structurer des écosystèmes forts et concurrentiels.

Est-il pertinent de rappeler le rôle que jouent les regroupements sectoriels de recherche industrielle (RSRI)<sup>1</sup> tels que PRIMA Québec dans la mise en œuvre de l'approche de la recherche collaborative ? Les RSRI ont pour mission de mettre en place et de soutenir un écosystème d'innovation collaborative propice au développement des secteurs stratégiques de l'économie au profit des centres de recherche, des entreprises et de la société québécoise. Représentant les secteurs phares du Québec, les RSRI sont en position de force pour soutenir le tissu économique québécois dans sa quête de croissance. Rappelons qu'au nombre de neuf (9), les regroupements ont été désignés par le Gouvernement du Québec pour agir à titre d'organismes d'intermédiation et de financement de la recherche et du développement (R et D) collaboratif.

### En parallèle et en série

Depuis leur introduction il y a trois décennies, les batteries lithium-ion ont vu leurs coûts diminuer à un rythme similaire à la baisse des prix des panneaux solaires. Mais qu'est-ce qui a provoqué cette baisse des coûts d'environ 97 % ?

Des chercheurs du MIT (*Energy and Environmental Science*) ont découvert que **le facteur le plus important, expliquant plus de 50 % de la baisse, était le travail de recherche et développement en particulier en chimie et en science des matériaux**. Cela l'emportait même sur les gains obtenus grâce aux économies d'échelle.

Ces résultats pourraient être utiles aux décideurs politiques et aux planificateurs pour aider à orienter les priorités de dépenses vers des coûts toujours plus bas pour d'autres technologies cruciales de stockage d'énergie, notamment celle de l'hydrogène vert.

Référence : <https://news.mit.edu/2021/lithium-ion-battery-cost-1122>, consulté le 7 janvier 2022

---

<sup>1</sup> <https://rsri.quebec/>

## 2. Consolider rapidement les bases de l'écosystème de l'hydrogène vert par un appel de projets stratégiques visant l'innovation collaborative

Afin d'élargir les bases de l'industrie naissante de l'hydrogène vert, le gouvernement devrait lancer un appel de projets au sein des RSRI<sup>2</sup> avec pour orientations l'amélioration ou l'implantation de techniques liées à l'hydrogène vert. Les projets devraient viser trois groupes de fonctions associées à l'hydrogène :

- Production, transport et stockage de l'hydrogène : Électrolyseur et piles à combustible de plusieurs mégawatts à haute efficacité pour minimiser les pertes, conversion de la biomasse en H<sub>2</sub>, pipeline, grand réservoir.
- L'hydrogène comme facilitateur de mobilité électrique : Pile à combustible et stockage à haute densité énergétique et très sécuritaire, démarrage à froid, systèmes pour remplir les réservoirs.
- L'hydrogène pour décarboner l'économie : Hydrogène pour la production d'éléments chimiques tels que l'ammoniac, de carburant pour l'aéronautique, les procédés sidérurgiques, électrification du secteur minier.

L'investissement public dans ces projets devrait comporter :

- Un financement pour des projets collaboratifs issus du milieu académique et associant des entreprises via le Programme de soutien aux organismes de recherche et d'innovation (PSO) de TRL 1 à 9 ;
- Un soutien direct à des start-ups accompagnées par des incubateurs/accélérateurs (à l'instar du programme de technologies quantiques) ;
- Un soutien à des projets collaboratifs entre entreprises avec le soutien du milieu académique (comme dans l'appel PARTENAR-IA via le Programme Innovation).

Par cette approche, le Québec consoliderait rapidement les bases d'un écosystème de l'hydrogène vert avec des chaînes de valeur présentes dans plusieurs régions, des projets concrets et des alliances porteuses entre les milieux de la recherche et de l'entreprise. La collaboration entre ces deux milieux permet de décupler l'ampleur des innovations, l'impact des investissements publics et privés en recherche et la capacité de nos entreprises à affirmer leur présence sur les marchés internationaux. Enfin, l'innovation collaborative touchant le développement de matériaux avancés contribuera à diminuer les coûts de différentes technologies de production et d'utilisation de l'innovation. Ainsi, l'expertise d'ici est bonifiée et est susceptible d'attirer des investissements étrangers de la part de joueurs actifs dans la filière de l'hydrogène.

## 3. Adopter une approche décloisonnée parce que l'hydrogène comme vecteur d'énergie dont les usages sont multiples

L'hydrogène est un vecteur d'énergie. Comme le bois, comme l'électricité, il a une application horizontale et sera utilisé par un nombre grandissant d'organisations pour une

---

<sup>2</sup> Quelques regroupements sectoriels de recherche industrielle (RSRI) sont interpellés par la thématique : CRIAQ, CRIBIQ, CRTIM, INNOVÉÉ, PRIMA Québec.

gamme croissante d'usages<sup>3</sup>. Cette présence de plus en plus courante de l'hydrogène signifie que l'éventuelle stratégie gouvernementale sur l'hydrogène devrait prévoir des croisements avec d'autres stratégies gouvernementales de développement économique (électrification des transports, minéraux critiques et stratégies, etc.) afin d'en maximiser les retombées.

#### **4. Favoriser les collaborations intracanadiennes pour accélérer le développement de la filière et faire face à la concurrence internationale**

Les plus grandes puissances économiques du monde déploient des stratégies sur l'hydrogène. Le Québec, malgré des atouts certains, ne fera pas le poids seul. Il doit prévoir des collaborations et des partenariats avec les autres provinces canadiennes afin de mettre en commun des forces stratégiques et accroître les retombées. Un tel partenariat permettrait au Québec de mieux développer son industrie de production et d'élargir sa base de clients acheteurs de notre hydrogène vert.

#### **5. S'inscrire activement dans la Stratégie canadienne sur l'hydrogène**

La Stratégie canadienne sur l'hydrogène présentée par le gouvernement fédéral en 2020 prévoit des investissements sans précédent afin de stimuler le développement de la production, l'innovation, la commercialisation et le déploiement de plateformes technologiques en lien avec l'hydrogène au Canada. Le gouvernement du Québec devrait encourager les entreprises québécoises à aller chercher leur part et les accompagner dans le processus afin que les entreprises québécoises restent dans la course et s'insèrent dans les chaînes de valeur canadiennes qui vont découler de ces investissements fédéraux.

---

<sup>3</sup> Tanguy, P.-A. et al (2020). *Étude sur le potentiel technico-économique du développement de la filière de l'hydrogène au Québec et son potentiel pour la transition énergétique – Volet A : Portrait régional, canadien et international actuel de l'économie de l'hydrogène*. Rapport préparé pour Transition énergétique Québec. Polytechnique Montréal, 80 p.

# Contexte

Bien que très abondant sur Terre, l'hydrogène ne se retrouve presque jamais naturellement dans une forme libre, que ce soit dans le sol, dans l'air ou dans l'eau. L'hydrogène doit donc être « produit ». On parle d'hydrogène vert lorsque la molécule est extraite de la biomasse ou de l'eau (elle peut aussi être extraite d'hydrocarbure, mais on ne parle plus alors d'hydrogène vert) et que l'énergie électrique utilisée est de source renouvelable (p. ex. hydroélectricité, éolien, photovoltaïque). L'hydrogène doit être synthétisé de manière artificielle au moyen de catalyseurs. On ne peut ainsi obtenir de l'hydrogène sans l'utilisation de matériaux avancés intégrés dans des dispositifs multifonctionnels.

Puis, une fois l'hydrogène produit, tout ce qui permet le développement de la filière, appelle encore des matériaux avancés. Le développement de l'hydrogène vert implique des approvisionnements continus, fiables et sécurisés en minéraux critiques et stratégiques. Ces minéraux, constituants de plusieurs matériaux avancés, sont essentiels à la fabrication d'éoliennes, de panneaux solaires, d'électrolyseurs, de piles à combustible, de réservoirs de stockage, de camions-citernes, de remorques porte-tubes, d'hydrogénoducs, etc. qui sont quelques-unes des infrastructures nécessaires au développement de l'hydrogène vert.

Poussés par l'urgence climatique, plus d'une vingtaine de pays ont élaboré des stratégies pour développer les filières hydrogène. Ils en ont fait une priorité de leurs politiques visant l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050. Aussi prometteur soit-il, l'hydrogène vert a ses limites. Sa production nécessite beaucoup d'énergie, de biomasse ou beaucoup d'eau qui doit, bien souvent, être purifiée (dépendamment de la technologie d'électrolyse utilisée). Dans des pays désertiques qui ne possèdent pas cet or bleu (ex. Maroc<sup>4</sup>) prises de décisions éthiques, sociales et morales pourraient orienter une éventuelle production d'hydrogène à partir d'eaux saumâtres ou des eaux de pluie, ou encore des eaux grises. L'utilisation directe de ces eaux ou leur purification nécessiterait là encore des matériaux avancés.

Au-delà de toutes ces considérations, le Québec a donc raison de s'intéresser à l'hydrogène, mais il doit réaliser que la concurrence sera féroce et mondiale. Il doit aussi réaliser qu'il a des atouts pour se tailler une place dans ce créneau d'avenir.

---

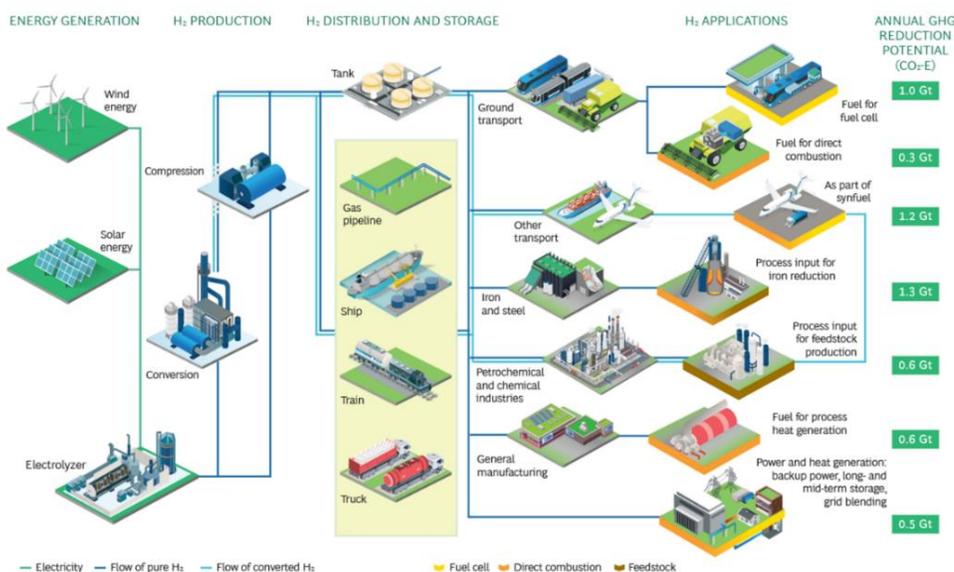
<sup>4</sup> <https://www.h24info.ma/culture/debats-idees/jamal-chaouki-produire-de-lhydrogene-au-maroc-a-grande-echelle-est-absurde/>

# Aperçu de la situation mondiale et position relative du Québec

Le Japon, l'Allemagne, la France, les États-Unis, la Corée du Sud, la Chine, l'Australie, le Chili, l'Union européenne ont tous lancé leur feuille de route pour développer la filière de l'hydrogène notamment pour décarboner l'économie. L'engouement est nourri par l'atteinte d'une certaine maturité technologique. Plusieurs verrous qui entravaient l'essor de l'industrie ont en effet été levés. Néanmoins, il reste encore plusieurs étapes à franchir avant que l'usage de l'hydrogène se généralise. Les technologies sont prometteuses, mais toujours très coûteuses. Les techniques doivent encore être améliorées par la recherche. En outre, une main-d'œuvre qualifiée doit encore être formée dans plusieurs pays pour donner corps à une industrie de masse. Ceci considéré, on peut affirmer que le Québec n'est pas en retard.

En fait, lorsqu'on considère certains atouts du Québec, on peut même dire qu'il a une longueur d'avance. Le schéma suivant est intéressant. Autant par ce qu'il montre que par ce qu'il ne montre pas. Il provient de la firme d'experts en gestion Boston Consulting Group (BCG) et présente la chaîne de valeur de l'hydrogène.

Exhibit 1 - The Green Hydrogen Ecosystem Offers Major Reductions in GHGs



Source: BCG analysis.

De gauche à droite, il faut générer de l'électricité, synthétiser l'hydrogène par électrolyse, le compresser, le stocker et le distribuer dans une foule de secteurs. On comprend que ce schéma reflète la réalité américaine. Il conviendrait donc d'ajouter l'hydroélectricité sous « Energy Generation » pour bien prendre en compte la réalité québécoise. Un approvisionnement fiable, stable, abondant en énergie renouvelable

de source hydroélectrique est pour le Québec un atout distinctif qui peut le positionner parmi les acteurs d'influence sur la scène mondiale de l'hydrogène vert.

### La stratégie canadienne

En décembre 2020, le gouvernement du Canada a présenté la [Stratégie canadienne de l'hydrogène](#). Celle-ci s'accompagne d'une série de mesures et de programmes de soutien financier afin de stimuler le développement de la production, l'innovation, la commercialisation et le déploiement de plateformes technologiques en lien avec l'hydrogène.

Parmi ses nombreuses initiatives, la Stratégie canadienne de l'hydrogène prévoit notamment :

- a. 8 G\$ sur 7 ans pour l'Accélérateur zéro-émission pour des projets industriels liés aux combustibles propres et à la capture du carbone ;
- b. 5 G\$ pour un *fonds pour les combustibles propres* visant le développement de nouvelles capacités de production (notamment de l'hydrogène), l'établissement de chaînes d'approvisionnement de biomasses et l'élaboration de normes et de règlements ;
- c. 300 M\$ pour encourager la R et D et les initiatives de captage, stockage et utilisation du carbone;
- d. Différentes mesures fiscales et incitatives.

Ces exemples sont tirés du Budget 2021 du Canada où le mot « hydrogène » apparaît 40 fois. Le gouvernement du Canada est engagé sérieusement envers le développement de la filière hydrogène et les investissements annoncés sont d'ampleur.

Tout en encourageant le Québec à développer sa propre stratégie sur l'hydrogène vert, PRIMA Québec estime que le gouvernement doit inciter et même accompagner les entreprises québécoises afin qu'elles profitent des mesures fédérales. Les sommes sont importantes ; les mesures contribueront à l'essor de l'écosystème québécois de l'hydrogène vert ; et comme toujours, les mesures fédérales sont en partie financées par les contribuables québécois. Il ne doit pas y avoir d'hésitation à profiter de ce qui nous revient.

# Occasions et défis pour le Québec

Le Québec, comme il a été mentionné, a cet atout extraordinaire de l'énergie renouvelable, stable, abondante et à prix très concurrentiel, ainsi qu'une grande réserve d'eau douce, en majorité potable. Il a aussi déjà certaines caractéristiques d'un écosystème de l'hydrogène.

- Une force en recherche : Depuis 1994, l'Université du Québec à Trois-Rivières abrite l'Institut de recherche sur l'hydrogène. À cela s'ajoutent de nombreux instituts de recherche et entreprises menant des activités de R et D dans les domaines connexes de l'énergie et des matériaux. – Plus de détails à l'Annexe.
- Des entreprises de taille : Des entreprises québécoises telles que Enerkem, Xebec, Pyrogenesis, Evolugen, Charbone, Rio Tinto, CEZinc, SAF+ sont actives dans le domaine de la filière hydrogène. Aussi, des entreprises industrielles internationales du domaine ont déjà pris pied au Québec comme Air Liquide, Cummins, Hy2Gen, Siemens.
- Une communauté active : L'initiative Coalition Hydrogène Québec<sup>5</sup> a vu le jour au début 2020 avec l'objectif d'accélérer une transition énergétique écoresponsable mettant à profit l'hydrogène. Elle regroupe déjà des industriels producteurs d'hydrogène vert (Cummins), un distributeur mondial (Air Liquide), des infrastructures d'approvisionnement en hydrogène (Harnois, Filgo, Messer, Sonic) et des utilisateurs finaux dans le secteur automobile (Toyota et Hyundai).
- Un marché intérieur : L'économie québécoise, très diversifiée, avec plusieurs créneaux industriels développés, représente un bassin réceptif pour développer l'hydrogène vert, que ce soit pour augmenter la production, pour appuyer l'essor de la mobilité verte, ou pour usage dans des industries voulant réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub>.
- Un accès à des marchés de masse : L'économie québécoise est intégrée à l'économie nord-américaine avec des accès rapides aux autres marchés du Canada et des États-Unis. Dans l'environnement nord-américain, le Québec, qui se distingue par l'envergure de sa production d'hydroélectricité, peut devenir le premier producteur d'hydrogène vert.
- Un cadre réglementaire favorable : Au Canada, le prix du carbone atteindra 170 \$/tonne en 2030, le plafond des émissions de GES de l'industrie du pétrole et du gaz devrait être abaissé fortement, de même que les émissions de méthane issues du secteur pétrolier et gazier. De surcroît, le Québec et le Canada ont adopté des stratégies visant la carboneutralité d'ici 2050. Cet encadrement réglementaire créera un contexte favorisant les technologies de réduction des émissions comme l'hydrogène vert.

## L'approvisionnement en électricité

Une éventuelle industrie de l'hydrogène vert augmentera grandement la demande en énergie électrique renouvelable ajoutant ainsi la pression à la hausse provoquée par l'électrification des transports, l'exportation d'électricité et la croissance de l'économie. L'époque des surplus d'électricité tire à sa fin. Il faut d'emblée envisager comment le Québec pourrait assurer un approvisionnement en électricité de

---

<sup>5</sup> <https://hydrogene.quebec/>

source renouvelable suffisant, à long terme et à prix concurrentiel à l'industrie de l'hydrogène vert, tout en répondant à ses autres besoins et obligations.

Ce qui implique qu'Hydro-Québec devra, selon plusieurs experts, augmenter à moyen terme sa production d'énergie hydroélectrique (centralisée) et aussi d'énergies renouvelables décentralisées, soit éoliennes et solaires. Cette augmentation de production devra être combinée à un accroissement de l'efficacité énergétique du côté de ses clientèles. Dunsky, dans ses scénarios sur la carboneutralité<sup>6</sup>, et la Chaire sur la gestion de l'énergie de HEC Montréal, ont notamment conclu tous deux à cette nécessité d'une augmentation éventuelle de la production.

Hydro-Québec a indiqué à la Régie de l'énergie du Québec qu'il était possible de réduire de 14 % la consommation d'électricité du Québec d'ici 5 à 10 ans. Ces économies d'énergie pourraient provenir d'améliorations dans le chauffage des bâtiments (7 TWh), dans l'utilisation de l'eau chaude (2 TWh), dans les industries (11 TWh) et dans d'autres usages (moteurs, éclairage, etc.).<sup>7</sup> En outre, selon Pierre-Olivier Pineau de la Chaire de gestion du secteur de l'énergie de HEC Montréal, 50 % à 90 % des économies potentielles d'énergie pourraient être obtenues rapidement, uniquement dans le domaine des transports, ce qui serait autant d'électricité disponible pour décarboner, exporter de l'énergie renouvelable ou attirer des entreprises étrangères énergivores désireuses de réduire leurs émissions.<sup>8</sup>

## La production d'hydrogène vert exige un apport important d'énergie électrique

140 kT d'hydrogène vert permettraient de faire rouler 4 666 camions lourds<sup>9</sup>, soit la moitié du parc de camions lourds du Québec. Pour produire cette quantité d'hydrogène vert, nous avons besoin actuellement de 8 TWh d'électricité de source renouvelable. L'utilisation de matériaux avancés (MA) augmentera l'efficacité de la production d'électricité ou de la production d'hydrogène par divers moyens :

- Les MA pour accélérer et augmenter l'efficacité énergétique des systèmes et bâtiments. L'énergie économisée peut alors être redirigée vers d'autres usages, comme la production d'hydrogène ;
- Les MA pour augmenter l'efficacité des panneaux solaires et éoliennes pour produire plus d'énergie électrique de source renouvelable ;
- Les MA pour minimiser les pertes énergétiques dans la chaîne de production, transport et utilisation de l'hydrogène et ainsi produire plus d'hydrogène pour le même TWh.

<sup>6</sup> Dunsky, *Rapport final. Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050* (Mise à jour 2021), [https://www.dunsky.com/wp-content/uploads/2021/09/Rapport\\_Final\\_Trajectoires\\_QC\\_2021.pdf](https://www.dunsky.com/wp-content/uploads/2021/09/Rapport_Final_Trajectoires_QC_2021.pdf)

<sup>7</sup> <https://www.hydroquebec.com/a-propos/resultats-financiers/rapport-annuel.html>

<sup>8</sup> <https://lactualite.com/environnement/pourquoi-le-quebec-ne-priorise-t-il-pas-lefficacite-energetique/>

<sup>9</sup> Tanguy, P.-A et al. (2020) Op. Cit.p. 36



## Principaux domaines de recherche pour le Québec

Considérant les différents atouts et défis de notre économie, PRIMA Québec estime que trois axes de recherche et développement devraient être priorités par le gouvernement pour favoriser l'essor de l'industrie de l'hydrogène vert. Dans chacun de ces axes, les matériaux avancés sont essentiels tels que les catalyseurs, des plaques bipolaires (PBP), des assemblages de membranes d'électrode (MEA) avec polymères ioniques, des métaux résistant à l'hydrogène, des matériaux pour le stockage tels que les *Metal Organic Framework* (MOF), les hydrures métalliques.

### 1. La production, transport et stockage de l'hydrogène

La production d'hydrogène se fait principalement par électrolyse de l'eau ou par la biomasse ce qui pourrait aussi être intéressant pour le Québec. Le transport se ferait par hydrogénoducs (pipelines à hydrogène) ou avec des citernes par camions, trains, navires. Dans certaines régions, une production locale pourra être envisagée. Il sera aussi nécessaire de développer le stockage que ce soit pour l'énergie, si elle est de source intermittente et pour l'hydrogène lui-même, sur les sites de production et dans les zones d'utilisation.

### 2. L'hydrogène pour la mobilité électrique

Pour la mobilité électrique, des piles à combustible sont nécessaires pour la conversion de l'hydrogène en électricité, de même que des réservoirs compacts et sécuritaires. Les principaux clients potentiels sont le transport lourd, les flottes captives, le transport ferroviaire, maritime et le secteur aéronautique.

### 3. L'hydrogène pour la chimie et autres industries aux procédés énergivores

L'hydrogène sera indispensable pour le secteur de la chimie qui a amorcé son virage vert, le secteur de la pétrochimie ne se passera du pétrole que grâce à l'utilisation de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub> dont la combinaison permettra d'obtenir molécules et polymères utiles pour nos industries (méthanol, éthanol, gaz de synthèse, ammoniac, éthylène, carbonates, diméthyle éther). La production de chacun de ces composés à valeur ajoutée et à faible empreinte carbone se fait simplement par un choix éclairé des matériaux avancés utilisés comme catalyseurs sur des supports multifonctionnels dans des réacteurs dont la surface est sécurisée et optimisée. Aussi l'hydrogène sera nécessaire pour décarboner les secteurs de sidérurgie, de la construction de l'acier, de cimenteries et d'autres domaines émissifs de CO<sub>2</sub>. Cette utilisation d'hydrogène nécessitera de nouveaux matériaux avancés tels que les catalyseurs, des matériaux optimisés de gazoducs, canalisations et de réservoirs, des réacteurs fonctionnalisés

## Sujets de recherche potentiels impliquant des matériaux avancés<sup>10</sup>

- Prioriser l'utilisation des minéraux critiques et stratégiques (MCS) du Québec comme catalyseurs à haute efficacité pour l'électrolyse de l'eau
- Membrane échangeuse d'ions (généralement un polymère fluoré, la recherche vise le développement de membranes sans fluor)
- Catalyseurs pour transformer les biogaz en hydrogène ainsi que des membranes pour purifier l'hydrogène (dans le cas de production à partir de la biomasse)
- Production d'hydrogène à partir des microalgues et de cyanobactéries
- Panneaux solaires pour l'électrolyse de l'eau (solaire thermique, à concentration, photo-électrocatalyse).
- Piles à combustible (plusieurs innovations à venir, notamment le développement de plaques de polymère recouvertes de graphite avec une haute conduction), catalyseurs performants et sans platine pour la réduction de l'oxygène
- Réservoirs compacts et à haute densité
- Nouveaux revêtements ou de réservoirs et pipelines de nouvelles méthodes moins énergivores pour comprimer l'hydrogène, parce que les métaux sont fragilisés par l'hydrogène
- Production locale de peroxyde d'hydrogène (abondamment utilisé dans des procédés chimiques, la santé, l'alimentation, l'électronique, la purification des eaux, le blanchiment du papier)
- Conversion à l'hydrogène de brûleurs et creusets au gaz naturel.
- Sécurité des infrastructures (électrolyseurs PEM – membranes échangeuses de protons - et alcalins, pipelines et réservoirs) au moyen de capteurs de fuite d'hydrogène faisant appel à des antennes RFID (« Radio Frequency Identification ») pour des mesures *in-situ* en temps réel (électronique imprimée)
- Design de nouveaux matériaux catalytiques en ayant recours à l'intelligence artificielle et aux simulations quantiques
- Développement de nouvelles céramiques fonctionnant à plus basse température pour les piles à combustible réversibles de piles à combustible à oxyde solide (r-SOFC)

Ces différents domaines de recherche peuvent aussi profiter des autres stratégies du gouvernement du Québec, dédiées notamment à l'intelligence artificielle et aux technologies quantiques qui peuvent accélérer la découverte de nouveaux matériaux et optimiser la filière de l'hydrogène.

---

<sup>10</sup> Voir Annexe : Les innombrables usages de l'hydrogène au Québec et un aperçu des entreprises et chercheurs qui s'y intéressent.

## La nécessaire collaboration fédérale-provinciale-territoriale

Les plus grandes puissances économiques mondiales ont développé des stratégies sur l'hydrogène. La concurrence sera féroce et les investissements colossaux. Le Québec, malgré tous ses atouts, ne peut pas faire le poids seul. Plusieurs provinces se sont d'ailleurs engagées à la carboneutralité d'ici 2050 et ont adopté des stratégies en lien avec l'hydrogène ou s'appêtent à le faire (Ontario, Québec, Alberta, C.-B., Maritimes, Terre-Neuve-Labrador). Il importera de développer une collaboration intracanadienne portant sur des projets et investissements communs, et ce, d'une manière qui respectera l'autonomie des partenaires.

## Infrastructure nationale d'approvisionnement et de distribution de l'hydrogène

Le Québec et les autres partenaires de la fédération pourraient en outre bénéficier de la mise en place d'une infrastructure pancanadienne d'approvisionnement et de distribution de l'hydrogène. Pour le Québec, une telle infrastructure pourrait l'aider à exporter sa production d'hydrogène vert.

Ce réseau d'approvisionnement en hydrogène au Canada pourrait comprendre à la fois de grandes usines centralisées dans les provinces riches en électricité ou en gaz naturel et une production électrolytique distribuée à plus petite échelle près des centres de demande et des installations de stockage. La collaboration fédérale-provinciale-territoriale permettrait de planifier, mettre en œuvre et construire une infrastructure de distribution visant à diminuer les coûts de transport et faciliter les raccordements, ainsi que des hubs régionaux. Une hausse de la nouvelle production d'hydrogène à grande échelle permettrait aussi à partir de 2035 de commercialiser un mélange hydrogène-gaz naturel dans des centres régionaux à des fins d'utilisation par le secteur industriel et l'environnement bâti ainsi que comme matière première pour la production chimique.

# Annexe

## Les innombrables usages de l'hydrogène au Québec et un aperçu des entreprises et chercheurs qui s'y intéressent

Les exemples de chercheurs, institutions et entreprises dans cette annexe sont donnés à titre indicatif et non exhaustifs. Et ce n'est pas parce qu'un joueur a été placé dans une catégorie qu'il ne s'intéresse pas à une autre aussi. Cette annexe veut illustrer la diversité de joueurs dans le domaine de la filière à hydrogène.

### Entreprises

#### Volet production, transport et stockage de l'hydrogène

- Production d'hydrogène, le Québec compte sur Evolugen, Boralex, Enercon, Air Liquide, HydroSolutions, Messer, HQ, WSP, Hatch.
- L'industrie minière est intéressée à l'hydrogène qui représente une solution de stockage d'énergie en milieu isolé hors réseau, dans les mines, les communautés nordiques.
- Pour la production d'hydrogène, Hydro-Québec, Cummins avec Air Liquide, Hy2gen à Varennes, CSAR Energy, Hydrolux sont parmi les entreprises présentes.
- Pour la production d'hydrogène par la conversion de la biomasse, le Québec compte, Hatch et Air Liquide.
- Production d'hydrogène grâce au plasma avec Pyrogenesis.
- Production d'hydrogène avec panneaux solaires, CSAR Energy (start-up) + STACE + 3iT de l'université Sherbrooke.
- Détection et purification d'hydrogène, LDetek, Xebec.
- Certification de la pureté, Kemitek avec ASDevices.
- Filtration grâce à des membranes à base de Palladium avec l'INRS + Air Liquide.
- Nemaska Lithium (évolution d'hydrogène à valoriser lors de leur procédé électrochimique).
- La production d'hydrogène peut aussi être un sous-produit non désiré dans des réactions électrochimiques pour la génération d'hypochlorite de sodium (NaClO-Eau de Javel) et de Chlorate de sodium (NaClO<sub>3</sub>).
- Olin<sup>11</sup> fabrique des produits chlorés (procédés chlor-alkali, Omnichem, PPG Canada), ce qui rejette de l'hydrogène, lequel est utilisé par Arkema pour produire du peroxyde.
- Charbone est un groupe d'énergie renouvelable qui fournit des solutions hydroélectriques allant des centrales hydroélectriques à petite échelle aux installations de production de carburant hydrogène vert.

---

<sup>11</sup> <https://olinchloralkali.com/products/sodium-hypochlorite/>

## Volet hydrogène pour la mobilité électrique

- Plusieurs constructeurs développent une offre hydrogène en Amérique du Nord : Volvo-Daimler, Toyota, Hyundai, Honda, Mercedes-Benz.
- L'hydrogène est vu comme une solution pour longue distance et poids lourds dans la stratégie d'électrification des transports terrestres.
- Des entreprises telles que Bombardier, Nova Bus, Prevost, Autobus Lion, Nordresa, TM4 pourraient pousser les développements dans les piles à combustible.
- La plupart des grands acteurs mondiaux du secteur aéronautique comme Airbus, Boeing et Safran voient en l'hydrogène une alternative intéressante.
- L'hydrogène peut être utilisé comme gaz porteur pour un dirigeable, s'inspirer de la société Flying Whales ou H2 Clipper
- L'hydrogène via les piles à combustible pour toutes les flottes captives des ports et aéroports servant à la manutention.
- La logistique au sol dans les aéroports (chariots élévateurs, nacelles et véhicules de transport de bagage) peut s'appuyer sur l'énergie hydrogène qui permet de réduire la pollution.
  - Pour les éléments d'une pile à combustible et électrolyseurs, le Québec compte des producteurs de graphite tel que Nouveau Monde Graphite, et de graphène (issu de la transformation du graphite) tel que NanoXplore.
  - Des entreprises dans les polymères qui peuvent fabriquer des membranes, comme Cummins ou BASF.
  - Rio Tinto Fer et Titane avec l'université de Sherbrooke pour la production de catalyseurs à partir de résidu minier.
- Infrastructure de distribution avec : ABB, SIEMENS Energy, Hydrogenics/Cummins, HTEC

## Autres usages de l'hydrogène

- Les entreprises intéressées à la décarbonation : les minières, les aciéries telles qu'ArcelorMittal, le secteur pétrochimique, raffinerie, zone innovation Est de Montréal (Parachem), SAF+ avec Polytechnique sur les catalyseurs pour la production de carburant vert pour le transport aérien. Les cimenteries, fabricants de verre, les producteurs de céramique.
- Les entreprises utilisant du peroxyde surtout à haute pureté dans le domaine alimentaire, santé et électronique pourraient être intéressées à soutenir des projets de production de peroxyde via les piles à combustible.
- Secteur métallique :
  - Arcelor Mittal : fabrication de boulettes d'acier au carbone
  - QMP (Québec Metal Powder), Rio Tinto fer et titane : fabrication de poudre d'acier au carbone atomisé à l'eau...
  - 5N Plus : producteur de poudres métalliques, d'alliages ...
  - AP&C (GE Additive) : producteur de poudres métalliques
  - CeZinc utilise de l'hydrogène pour ces chaufferies
  - Finkl Steel
  - Blackrock metals (start up) : installation métallurgique spécialement conçue pour utiliser de l'hydrogène vert à l'échelle industrielle pour traiter des minéraux critiques (Vanadium Titane Fer) – la seule du genre au Canada et dans le monde.
  - Pratt & Whitney Canada

Valorisation des matières résiduelles non recyclables et de biomasse forestière résiduelle avec de l'hydrogène vert : en décembre 2020, Enerkem annonçait la construction d'une usine de biocarburants de 875 M\$ CA à Varennes avec un groupe de partenaires stratégiques incluant Shell, comme investisseur principal, ainsi que Suncor et ProMan, et Hydro-Québec qui fournira l'hydrogène et l'oxygène renouvelables, et avec l'appui des gouvernements du Québec et du Canada. Recyclage Carbone Varennes (RCV) produira des biocarburants et des produits chimiques renouvelables.

## Acteurs en recherche

Il existe un grand ensemble de chercheurs parmi toutes les universités au Québec, centres de recherche publique (CNRC, IREQ) et CCTT (Kemitek, CNETE, CEPROCQ, CMQ, CTA, CDCQ, COALIA, Groupe CTT, IVI, Nergica) qui travaillent sur différents sujets autour de l'hydrogène, ou qui auraient les capacités scientifiques et techniques pour commencer des projets de recherche autour de l'hydrogène.

### Volet production, transport et stockage de l'hydrogène

- Les professeurs qui travaillent sur les piles à combustible peuvent travailler sur les électrolyseurs. Rajeshwar Dayal Tyagi d'INRS-ETE pour la production d'hydrogène via les bactéries. MOFs sont étudiés à l'IREQ (centre de recherche d'Hydro-Québec à Varennes) par le chercheur Michel Trudeau.
- Plusieurs chercheurs dans le domaine de la biomasse et des piles microbiennes, par exemple :
  - Polytechnique avec Pr Oumarou Savadogo, Pr Gregory Patience
  - IRH et l'IZE3 de l'UQTR
  - Sherbrooke avec la Pr Bruna Rego de Vasconcelos : Conversion électrocatalytique du CO<sub>2</sub>. (Laboratoire des technologies de la biomasse)
- Des chercheurs dans les CCTT peuvent travailler sur la catalyse, le stockage, les membranes : Les CCTT tel que le CEPROCQ, CNETE, KEMITEK
- Il y a bien l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) de l'UQTR
- Pour tout ce qui se rapporte aux métaux pour le stockage et transport : CNRC, CMQ, les professeurs de génie métallurgique des différentes universités québécoises (Laval, Polytechnique Montréal, McGill, Concordia, Sherbrooke, etc.).
- Les polymères et composites pour les membranes, transport et stockage : les professeurs et chercheurs actifs dans le domaine des alliages, polymères et composites
- Recherche : IRH (Loïc Boulon), Polytechnique Montréal (Pr Philippe Tanguy, Pr Frédéric Sirois), CNRC QC (Asmae Mokrini, Eddy Zuppel) et BC (François Girard), IREQ (Marie-Lise Tremblay, Michel Trudeau, Robert Schultz), IVI, Nergica (Frédéric Côté)

## Volet hydrogène pour la mobilité électrique

- Pour les piles, électrolyseurs, catalyseurs pour la production d'hydrogène, la chimie verte, voici quelques exemples non exhaustifs : Pr Karim Zaghbi et Pr Tomislav Friščić de l'université McGill pour les MOF ; Pr Hashlee Howarth de l'Université Concordia pour les MOF, Pr Audrey Moores de l'université McGill travaille sur des catalyseurs verts
- Plusieurs chercheurs de l'INRS-EMT dont Pr Shuhui Sun qui participe à un groupe de tête mondial concernant les catalyseurs non nobles pour les PEM, Pr Mohamed Mohamedi pour le développement d'une pile sans membrane et plusieurs autres dont Pr My Ali El-Khakani, Pr Daniel Guay, Pr Federico Rosei, Pr Ana Tavares, Pr Dongling Ma
- À Polytechnique Montréal, Pr Oumarou Savadogo travaille sur les piles à combustible.
- À l'UQTR et l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH), des chercheurs universitaires associés au Centre québécois sur les matériaux fonctionnels (CQMF) ou au Réseau québécois énergie intelligente (RQEI)
- En appui aux Pr Simon Barnabé et Pierre Bénard de IRH et UQTR, deux nouveaux professeurs Bruno Pollet et Samaneh Shagaldhi, ont été recrutés comme experts dans les domaines des électrolyseurs alcalin, PEM, ou à partir d'eau de mer et aussi dans les piles à combustible PEM
- Le CNRC de Boucherville est actif dans la production de membranes échangeuses d'ions (la chercheuse Asmae Mokrini)
- Des CCTT également tels que le CNETE, KEMITEK

## Autres usages de l'hydrogène

- Les différentes universités telles que Concordia, McGill, Polytechnique Montréal, ÉTS, Sherbrooke, Laval, Université de Montréal travaillent des projets en lien avec l'hydrogène dans le secteur aéronautique.