

31 Mars 2024

DÉVELOPPER LA CHAÎNE MANUFACTURIÈRE LIÉE À L'HYDROGÈNE VERT

Rapport final

Marco Savoie, ing.

Associé, énergie & environnement
marco.savoie@sia-partners.com

Mathieu Demoulin

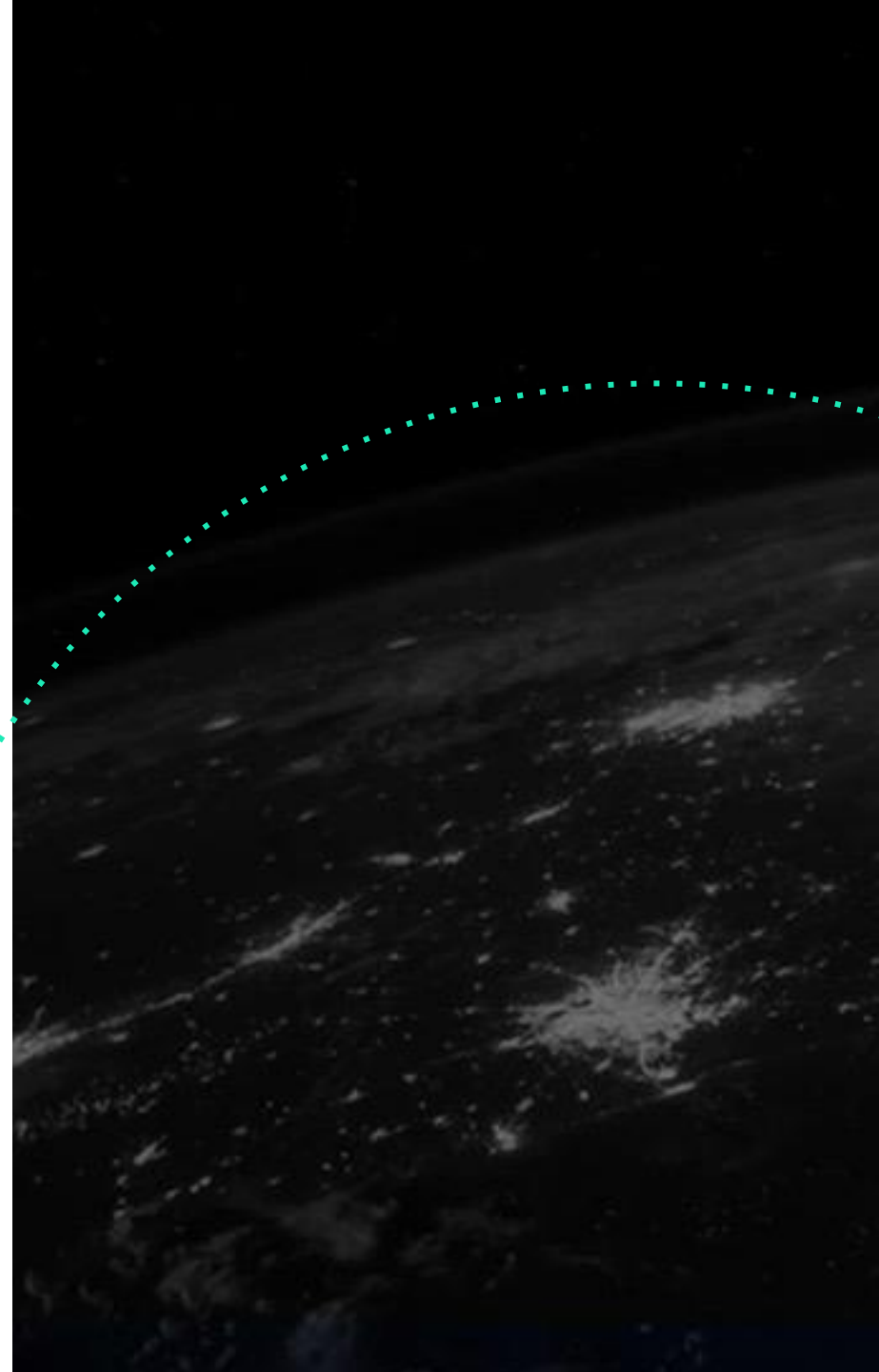
Conseiller senior, énergie & environnement
mathieu.demoulin@sia-partners.com

Myrielle Robitaille, ing.

Directrice principale, énergie & environnement
myrielle.robitaille@sia-partners.com

Catherine Kallas, CPI

Conseillère, énergie & environnement
catherine.kallas@sia-partners.com



Sommaire

1. INTRODUCTION ET MÉTHODOLOGIE GLOBALE
2. ÉTUDE DE L'ÉCOSYSTÈME MANUFACTURIER HYDROGÈNE
3. ANALYSE DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE
4. SÉLECTION DES SEGMENTS STRATÉGIQUES
5. ÉTUDE SOCIO-ÉCONOMIQUE DU DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE
6. SYNTHÈSE ET PRINCIPAUX CONSTATS

ANNEXES

ANNEXE 1. MÉTHODOLOGIE DÉTAILLÉE

Sommaire exécutif

La présente étude **analyse la pertinence d'accroître le soutien à l'écosystème manufacturier hydrogène au Québec**. Elle a été réalisée par Sia Partenaires, sous la supervision de PRIMA, avec le soutien financier du MEIE. Elle fait suite à deux précédents rapports du CNRC et des travaux conjoints de l'IRH et l'I²E³ de l'UQTR présentant un état de l'art des technologies H₂.



Une analyse complète de l'écosystème manufacturier au Québec et à l'étranger a été réalisée. Au total, ce sont plus de **350 acteurs** dont près de **200 manufacturiers** balisés, **près d'une 30^{aine} de joueurs industriels et institutionnels rencontrés** pour construire les conclusions de cette étude.



L'analyse se concentre dans un premier temps sur **14 segments manufacturiers** représentant l'ensemble de la chaîne de valeur H₂. L'étude approfondie de ces segments a permis de faire ressortir **4 équipements prioritaires pour le Québec : les électrolyseurs, les piles à combustible, les réservoirs stationnaires et les réacteurs servant à la production d'H₂** (pyrolyse par plasma, gazéification de la biomasse).



L'étude des impacts socio-économiques du développement de ces filières manufacturières au Québec a été réalisée. Les 4 filières ont d'abord été comparées entre elles, puis avec la filière batterie, ce qui a permis de mettre en évidence **un certain nombre de synergies du point de vue des minéraux critiques et stratégiques, des technologies, de la main-d'œuvre et des politiques.**



Finalement, la présente étude **a mis en lumière 8 constats sur la chaîne manufacturière H₂**. Ces constats pointent notamment **le besoin rapide de développer une politique industrielle manufacturière** mais également **d'éclaircir les orientations technologiques à prioriser, les synergies interfilières et le contexte réglementaire international.**

Glossaire | Abréviations 1/2

AFC	Pile à combustible alcaline
ALK	Électrolyseur alcalin
AMP	Adsorption modulée en pression
Aux.	Auxiliaire
BoP	Équilibre de l'usine
CRD	Construction, rénovation, démolition
DOE	Department of Energy (États-Unis)
Électro.	Électrolyseur
ENR	Énergie renouvelable
EU	Europe
ÉU	États-Unis
GNR	Gaz naturel renouvelable
GW	Gigawatt
H2	Hydrogène
IA	Intelligence artificielle

Indu.	Industriel
Integ.	Intégration
IRA	Inflation Reduction Act
kg	Kilogramme
kW	Kilowatt
LOHC	Liquides organiques porteurs d'hydrogène
MCFC	Pile à combustible à carbonates fondus
MCS	Minéraux critiques et stratégiques
NA	Non-applicable
NMT	Niveau de maturité technologique
NZE	Net zero emission
PAC	Pile à combustible
PAFC	Pile à combustible à l'acide phosphorique
PEM	Électrolyseur à membrane échangeuse de protons
PEMFC	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons

Glossaire | Abréviations 2/2

QC	Québec
R&D	Recherche et développement
SOEC	Électrolyseur à oxyde solide
SOFC	Pile à combustible à oxyde solide
T°	Température
TCAC	Taux de croissance annuel composé
Techno.	Technologie
t.m	Tonnes métriques

Glossaire | Terminologies et acronymes 1/2

Acteur présent au Québec	Acteur ayant une usine, un projet, ou un site au Québec
NMT ou TRL	1 – Observation du principe de base 5 – Validation de la technologie en environnement réel 9 – Système réel démontré en environnement opérationnel
Petite entreprise/manufacturier	Effectif compris entre 1 à 99 employés
Moyenne entreprise/manufacturier	Effectif compris entre 100 à 499 employés
Grande entreprise/manufacturier	Effectif supérieur à 500 employés
Entreprise multinationale	Exploite des installations dans au moins un pays étranger
Champion canadien	Manufacturier canadien le plus performant sur son segment
Hub	Région avec une concentration élevée d'activités reliées à l'hydrogène
CQFA	Carrefour québécois de la fabrication additive
INRS	Institut national de la recherche scientifique
CNRC	Conseil national de recherches Canada
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières

Glossaire | Terminologies et acronymes 2/2

ULaval	Université de Laval
CSA	Canadian Standards Association
MEIE	Ministère de l'Économie, de l'innovation et de l'Énergie
CMQ	Centre de métallurgie du Québec
CEPROCQ	Centre d'études des procédés chimiques du Québec
ETS	École de technologie supérieure
CDCQ	Centre de développement des composites du Québec
PME	Petite et moyenne entreprise
STIQ	Sous-traitance industrielle Québec
RICQ	Regroupement des industries des composites du Québec



1. Introduction et méthodologie globale

Contexte | Rappel des grands enjeux du projet



Le projet, dans son ensemble, vise à **analyser la pertinence d'appuyer davantage la chaîne manufacturière liée à la filière de l'hydrogène au Québec** en misant sur les atouts, tels les minéraux critiques et stratégiques (MCS) du Québec, tout en identifiant les créneaux distinctifs pour lesquels le Québec peut se démarquer.

Réalisé par l'UQTR et le CNRC

Présenté dans ce rapport

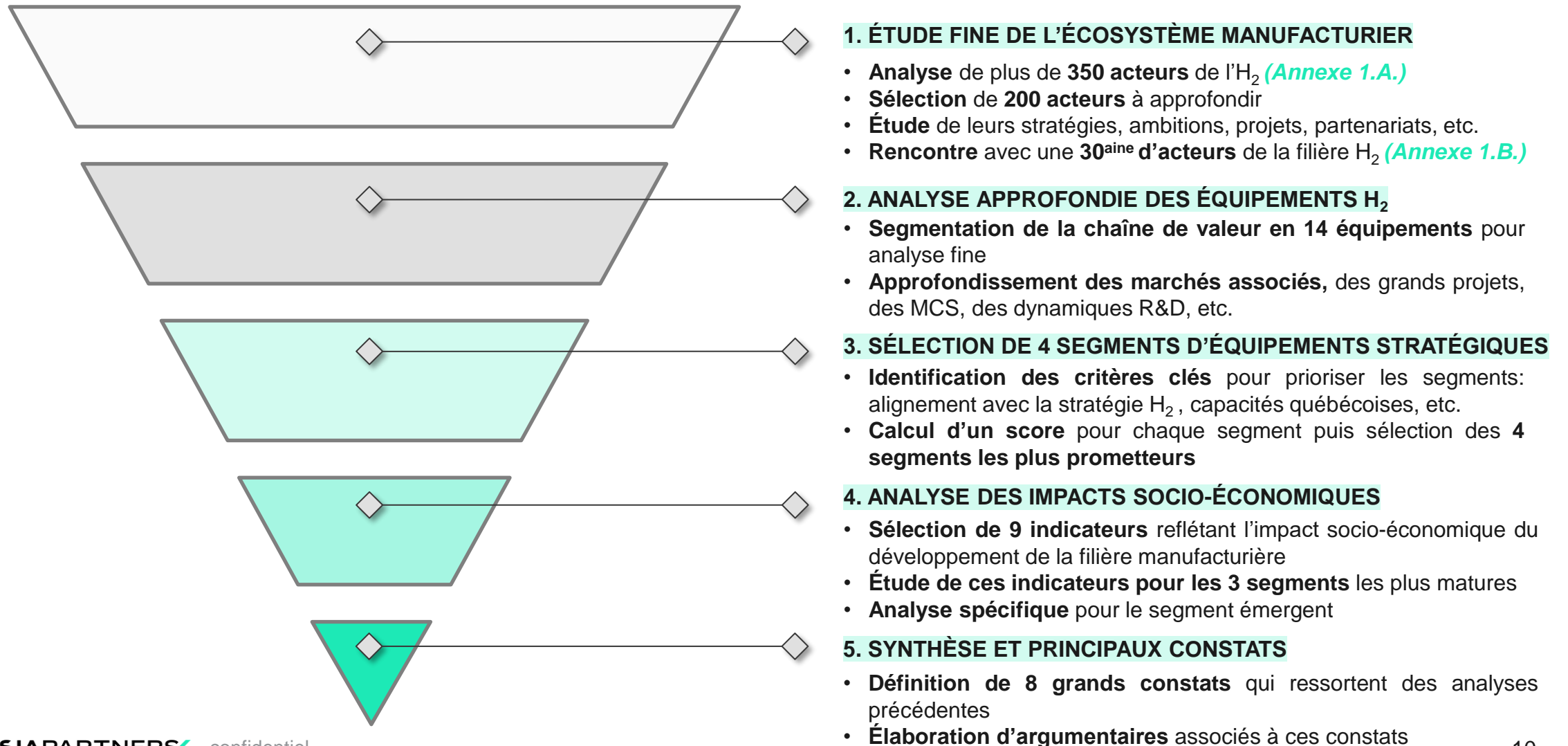


UQTR - Identification des principaux équipements et matériaux utilisés dans les systèmes de production d'hydrogène ainsi que leurs composants et sous-composants



CNRC - Revue de littérature sur les systèmes de transport, stockage et utilisation de l'hydrogène

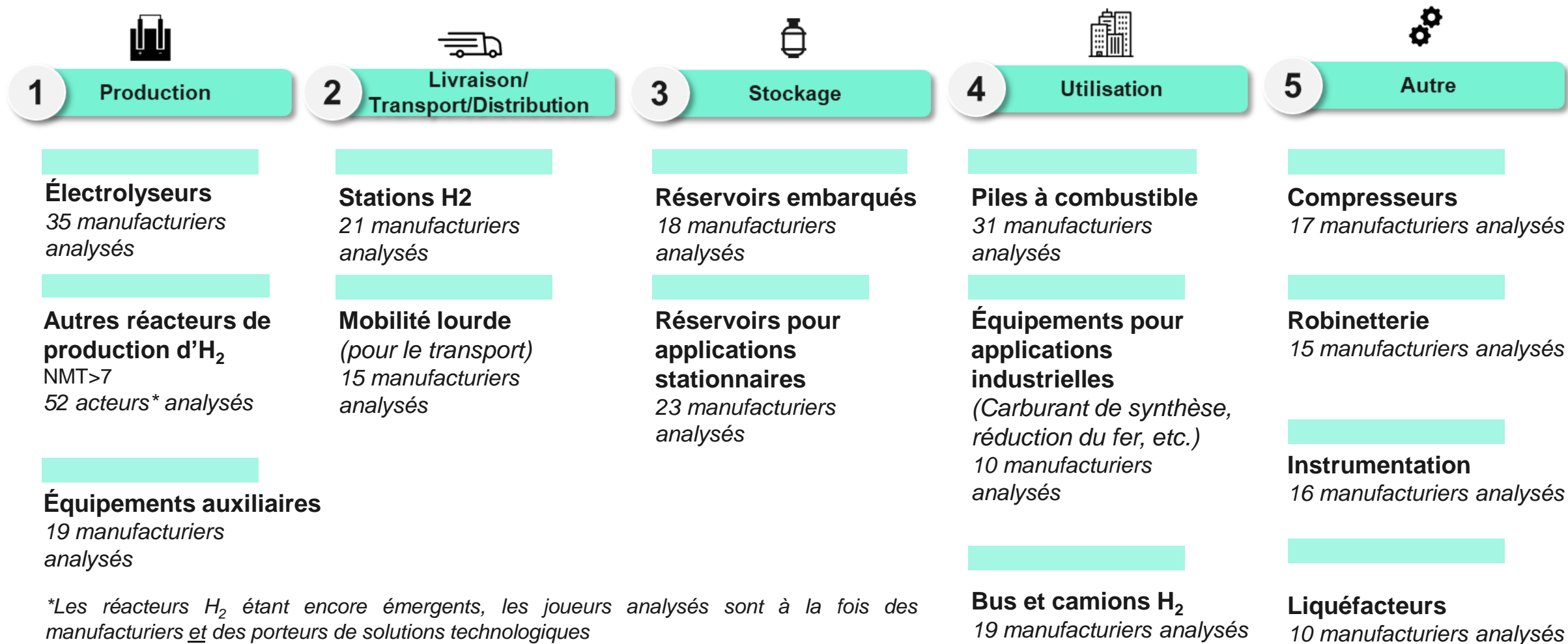
Méthodologie | Vision d'ensemble de l'approche en entonnoir



Segmentation de la chaîne de valeur | Étude de 14 équipements



La chaîne de valeur de l'hydrogène a été fragmentée en **14 équipements H₂**. Certains équipements ne sont pas étudiés, car **hors périmètre du mandat** (ex : production par SMR), ou **moins pertinents** (ex : canalisation H₂). Pour chacun de ces segments, en plus des entretiens, entre 8 et 56 manufacturiers ont été analysés finement pour **étudier les grandes tendances** (partenariats, stratégies, besoins, attentes, etc.)



*Les réacteurs H₂ étant encore émergents, les joueurs analysés sont à la fois des manufacturiers et des porteurs de solutions technologiques



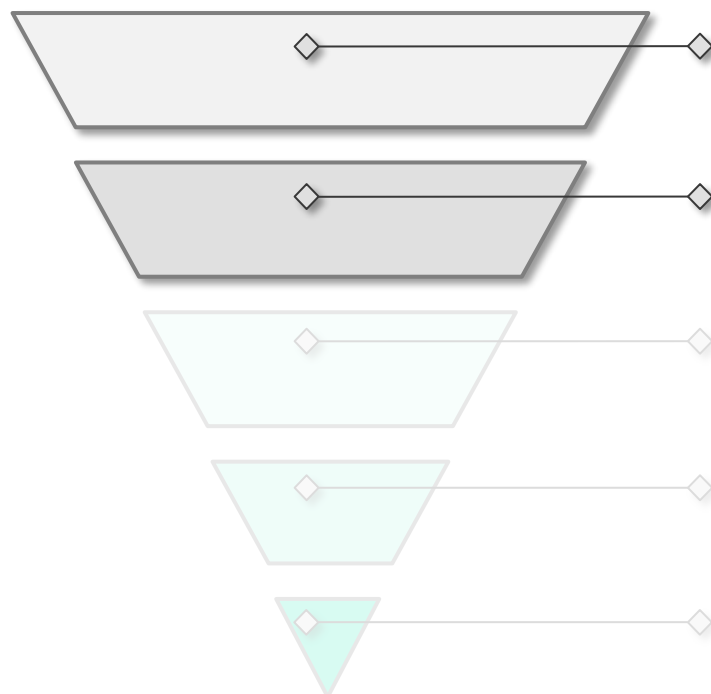
2. Étude de l'écosystème manufacturier hydrogène

Étude de l'écosystème | Rappel des enjeux et objectifs



Les objectifs principaux de cette étape consistent à **analyser et comprendre le positionnement des acteurs industriels et manufacturiers québécois et internationaux** sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'H₂. L'idée étant de **dessiner une vision globale des dynamiques et des opportunités de marché au Québec** ainsi qu'à l'export, et **d'identifier des secteurs d'application potentiels pour le tissu industriel et manufacturier québécois**.

Lien avec la méthodologie d'ensemble



1. ÉTUDE FINE DE L'ÉCOSYSTÈME MANUFACTURIER

- **Analyse** de plus de 350 acteurs de l'H₂ (*Annexe 1.A.*)
- **Sélection** de 200 acteurs à approfondir
- **Étude** de leur stratégie, ambitions, projets, partenariats, etc.
- **Rencontre** avec une 30^{aine} d'acteurs de la filière H₂ (*Annexe 1.B.*)

2. ANALYSE APPROFONDIE DES ÉQUIPEMENTS H₂

- **Segmentation** de la chaîne de valeur en 14 équipements à analyser finement
- **Approfondissement des marchés associés**, des grands projets, des MCS, des dynamiques R&D, etc.

3. SÉLECTION DE 4 SEGMENTS D'ÉQUIPEMENTS STRATÉGIQUES

- **Identification des critères clés** pour prioriser les segments : alignement avec la stratégie H₂, capacités Québécoises etc..
- **Calcul d'un score** pour chaque segment puis sélection des 4 segments les plus prometteurs

4. ANALYSE DES IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES

- **Sélection de 9 indicateurs** reflétant l'impact socio-économique du développement de la filière manufacturière
- **Étude de ces indicateurs** pour les 3 segments les plus matures
- **Analyse spécifique** pour les segments émergents

5. SYNTHÈSE ET PRINCIPAUX CONSTATS

- **Définition de 8 grands constats** qui ressortent des analyses précédentes



Enjeux principaux

- **Établir une analyse au bon niveau d'information** – se basant sur une quantité suffisante de données pour arbitrer entre les équipements H₂ à étudier en profondeur, tout en priorisant les efforts
- **Prendre en compte la réalité et les problématiques concrètes des manufacturiers** en les rencontrant



Périmètre d'analyse

- **L'ensemble de la filière manufacturière H₂ l'étape « 1. Étude fine de l'écosystème »**
- **Les 14 segments d'équipements H₂ pour « 2. Analyse approfondie des équipements »**

Analyse des 14 segments | Vue d'ensemble des angles d'étude

	THÉMATIQUE	DESCRIPTION
	État des lieux de la technologie et des enjeux R&D	<ul style="list-style-type: none">> Applications principales et marchés> Composants & minéraux critiques et stratégiques> Technologies, NMT, utilité> Perspectives R&D
	Perspectives de marché mondiales et québécoises	<ul style="list-style-type: none">> Valeur et croissance du marché mondiale et déclinaisons régionales> Technologie dominante> Vision du Québec sur ces marchés> Dynamique de projet au Québec et R&D en présence
	Typologie d'acteur et principaux projets manufacturiers	<ul style="list-style-type: none">> Taille et nationalité des manufacturiers> Typologie d'industriels en présence> Positionnement et stratégies de diversification/spécialisation> Partenariats classiques développés
	Observations générales sur le segment et étude des bonnes pratiques	<ul style="list-style-type: none">> Analyse des 3 manufacturiers les plus développés> Étude de leurs bonnes pratiques> Observations spécifiques au segment> Liste et classification des difficultés rencontrées par les manufacturiers
	Capacité et intérêt du Québec à développer ce segment	<ul style="list-style-type: none">> Analyse des capacités manufacturières actuelles du Québec> Acteurs R&D ayant une expertise utile pour le segment> Intégration dans la stratégie H₂ provinciale> Valeur ajoutée pour la province de développer ce segment



2.A. Électrolyseur

Analyse de l'écosystème | Portrait global des électrolyseurs

Les électrolyseurs sont une **technologie essentielle pour la production d'hydrogène bas carbone** et les ambitions de décarbonation de nombreux pays devraient tirer la demande dans les prochaines années. **La réalisation de tous les projets en cours pourrait conduire à une capacité installée d'électrolyseurs de 135 à 365 GW d'ici 2030** et les scénarios de l'IEA tablent **sur des besoins allant jusqu'à 3300 GW à 2050 (NZE)**. En 2023, ce sont **2,4 GW d'électrolyseurs qui ont été installés** et près de **33,5 GW d'électrolyseurs qui ont été fabriqués** (augmentation de 145% par rapport à 2022).

MCS



Techno.	NMT	Coût (\$/kW)	Barrières
PEM	9	2500-3000	Coûts
ALK	9	1000-1500	Durabilité/Intég. ENR
SOEC	6	1000-2000	Performance / Durabilité
AEM	3	1000-1500	Performance / Durabilité
PCCEL	2*	NA	Performance / Durabilité

Technologies
(Actuelles et futures)

Perspectives R&D

- > **Découverte de nouveaux matériaux:** Pour substituer les métaux critiques. L'IA pourrait permettre de modéliser de nouveaux alliages plus économiques et durables.
- > **Amélioration de la durabilité :** Travaux sur la dégradation des membranes et des matériaux catalytiques
- > **Recyclabilité des matériaux:** À l'instar de la filière batterie, nécessité de trouver des moyens de récupérer les métaux qui composent les électrolyseurs

PERSPECTIVES DE MARCHÉ



Vision mondiale

Technologie PEM & ALK

Il n'est pas clair actuellement quelle est la technologie d'électrolyseur qui va s'imposer d'ici 2030 mais les technologies dominantes sont ALK et PEM

\$92 milliards en 2030 (\$2021)

TCAC de 32% au niveau mondial à l'horizon de 2030

Amérique du Nord

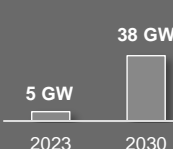
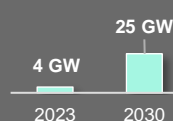
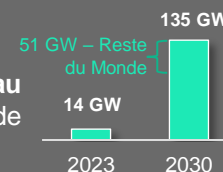
Porté par l'IRA et les « Hubs » H₂, les ÉU représenteront une grande partie du marché

Europe

Avec le développement de la banque d'investissement H₂, l'Europe déploie rapidement des capacités

Asie Pacifique

En avance actuellement, l'Asie (Chine + Inde) sera le plus gros fabricant en 2030 pour soutenir la demande locale



Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

Le Québec identifie la production d'hydrogène comme une solution visant à décarboner principalement les applications locales (industrie, transport) – pas d'exportations envisagées

Un développement de la production H₂ limité par les capacités électriques

Malgré une pression croissante sur les usages électriques: une partie des capacités délivrées par Hydro-Québec en novembre 2023 concernait des projets H₂

Des projets en cours et une demande qui augmente significativement

Avec les récents projets de production d'hydrogène à **large échelle** qui se sont vu allouer une partie des capacités électriques nécessaires (TES CANADA – 150 MW, Greenfield – 60 MW, etc.) la **demande en électrolyseur est grandissante**

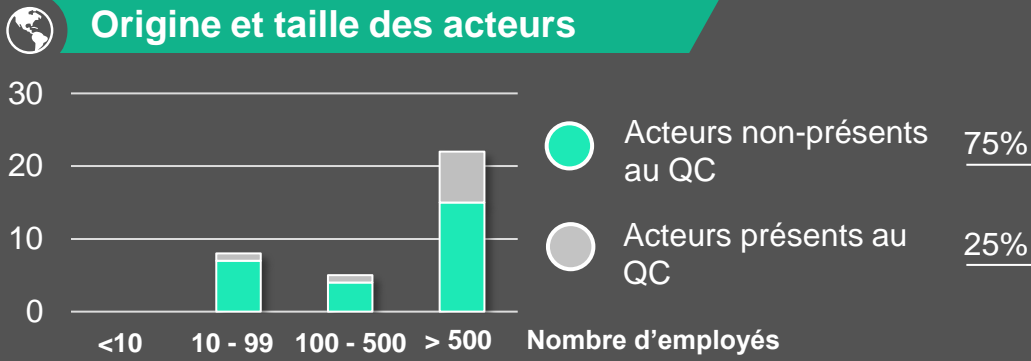
Expertise présente au Québec

R&D au niveau des **membranes, catalyseurs, des matériaux, de la modélisation numérique et de la recyclabilité des composants** (INRS, McGill, UQTR, etc.)

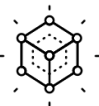
**Toujours en développement, le prix des matériaux composites limite les applications commerciales*

Projets et acteurs en présence

Électrolyseurs



Positionnement des acteurs & vision Québec | Électrolyseurs



Les manufacturiers se déploient rapidement en suivant principalement la demande et là où les infrastructures et la main-d'œuvre sont présentes. Le Québec répond à la majorité des besoins des manufacturiers, mais fait face à un enjeu de manque de main-d'œuvre qualifiée et une demande encore relativement faible par rapport au reste du Canada/É.U.

Observations sur le segment des électrolyseurs



Analyse des acteurs clés



Cummins | PEM & ALK

73 600 employés (total)
Forte présence au Québec:
Bécancour, Varennes, etc.
Électro. de 500 MW avec Chevron



John Cockerill | ALK

6 500 employés (total)
Ambition de 8 GW à 2025
Cellules ALK les plus
puissantes (6,5 MW/cellules)



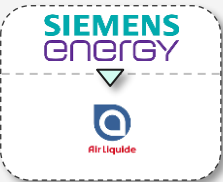
Siemens | PEM

92 000 employés (total)
Utilise son savoir-faire pour
proposer des solutions
complètes (BoP, etc.)



Partenariats développés

Les manufacturiers se développent souvent grâce à des rachats, et des alliances pour chercher une expertise H₂ ou connaissance locale



Autres observations sur le segment

Technologie SOEC – Bien que moins mature, la technologie se développe très rapidement avec des acteurs tels que Topsoe (5 GW d'ici 2025), Genvia, etc.

MCS – Certains industriels rencontrés sont bien au fait des tensions sur certains MCS et ne publient pas leurs ambitions pour ne pas faire grimper les prix



Difficultés rencontrées

1. Capacité des joueurs de l'écosystème à passer à l'échelle	●●●●
2. Difficulté à anticiper la demande pour calibrer les capacités	●●●●
3. Standardisation des technologies / projets	●●●○
4. Enjeux d'approvisionnement des composants	●●●○



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, plusieurs industriels opèrent au Québec mais aucune usine de production d'électrolyseur n'est installée sur place. Les entretiens réalisés avec les industriels montrent un intérêt grandissant pour le Canada et le Québec, avec notamment les gros projets de TES, Greenfield, etc. qui permettraient de sécuriser la demande.



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec



La production d'H₂ permet de décarboner les besoins locaux

Stratégie H₂ provinciale

> La stratégie identifie l'H₂ vert comme étant une opportunité importante pour décarboner les industries localement

Secteurs complémentaires

> Les industries polluantes au QC, notamment chimiques, sidérurgiques et les raffineries, bénéficieraient de la présence d'H₂ vert



Les forces du Québec répondent en partie aux besoins des indu.

1. Nécessité d'une demande très forte localement	Moyenne
2. Proximité avec le train/port en eau profonde	Importante
3. Volonté politique de soutenir les manufacturiers	Importante
4. Présence d'infrastructures/espaces existants	Importante
5. Main-d'œuvre qualifiée et sous-traitants présents	Moyenne

Importance relative des indicateurs





2.B. Équipements auxiliaires

Analyse de l'écosystème | Équipements auxiliaires de la production d'H₂

Les équipements auxiliaires sont **des composants/systèmes nécessaires au fonctionnement efficace d'un électrolyseur**. Ils jouent un rôle important dans la performance globale et la viabilité économique des projets. Dans la course pour rendre les électrolyseurs **plus performants et rentables**, les équipements auxiliaires sont clés pour réduire les coûts et augmenter la durabilité des systèmes. **Du point de vue des perspectives de marchés, les dynamiques sont très différentes pour chaque équipement mais toutes intimement liées aux dynamiques des cellules d'électrolyseurs et seront donc considérées comme similaires dans ces travaux.**

MCS

Équilibre usine
Purificateur d'eau
Échangeur de chaleur
Compresseur
Liquéfacteur

Cellule

Composants électroniques
Armoire électrique, redresseur, transmissions, etc.
Équilibre des équipements
Séparateur & purificateur de gaz

Équipements	Utilité
Purificateur d'eau	L'eau qui sert à l'électrolyse doit être déminéralisée et désionisée particulièrement pour les PEM
Échangeur de chaleur	Obtenir la bonne T° d'opération
Équipements d'électronique de puissance	Il est nécessaire d'alimenter l'électrolyseur par un courant continu et à la bonne intensité
Séparateur & purificateur de gaz	Pour séparer l'H ₂ de la vapeur d'eau et l'oxygène

(Actuelles et futures)

Technologies

Perspectives R&D

> Échangeur de chaleur: améliorer la sécurité des systèmes (fuites), diminuer taille et simplifier maintenance

> Purificateur d'eau : réduire les coûts de purification et les besoins énergétiques

> Équipements électroniques: capacité à gérer une alimentation électrique intermittente (renouvelables, gestion de pointe)

> Séparateur de gaz: réduire les besoins énergétiques du procédé et les pertes d'H₂ associées

PERSPECTIVES DE MARCHÉ ÉLECTROLYSEURS

Vision mondiale

Technologie PEM & ALK

Il n'est pas clair actuellement quelle est la technologie d'électrolyseur qui va s'imposer d'ici 2030 mais les technologies dominantes sont ALK et PEM

\$92 milliards en 2030 (\$2021)

TCAC de 32% au niveau mondial à l'horizon de 2030

Porté par l'IRA et les « Hubs » H₂, les ÉU représenteront une grande partie du marché

Avec le développement de la banque d'investissement H₂, l'Europe déploie rapidement des capacités

En avance actuellement, l'Asie (Chine + Inde) sera le plus gros manufacturier en 2030 pour soutenir la demande locale

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

Le Québec identifie la production d'hydrogène comme une solution visant à décarboner principalement les applications locales (industrie, transport) – pas d'exportations envisagées.

Un développement limité par les capacités électriques

Malgré une pression croissante sur les usages électriques, une partie des capacités délivrées par Hydro-Québec en novembre 2023 concernaient des projets H₂

Des projets en cours et une demande qui augmente significativement

Avec les récents projets de production d'hydrogène à large échelle qui se sont vu allouer les capacités électriques nécessaires (TES CANADA – 150 MW, Greenfield – 60 MW, etc.) la demande en électrolyseur est grandissante

Expertise présente au Québec

R&D au niveau des membranes, catalyseurs, des matériaux, de la modélisation numérique et de la recyclabilité des composants

51 GW – Reste du Monde

135 GW

14 GW

2023

2030

21 GW

2 GW

2023

2030

25 GW

4 GW

2023

2030

38 GW

5 GW

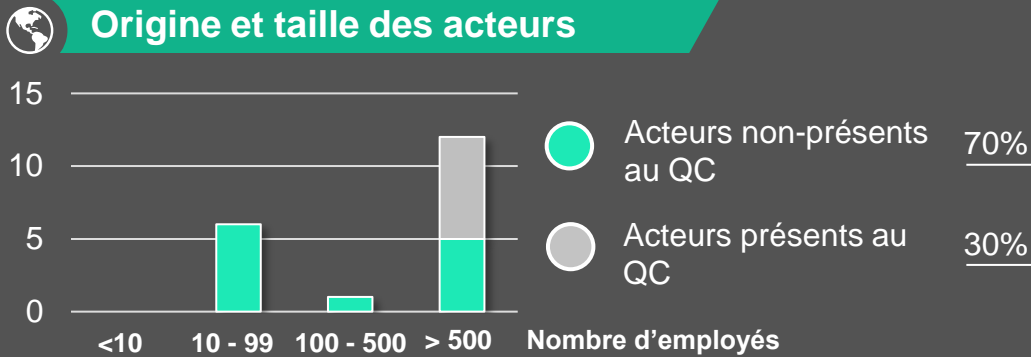
2023

2030

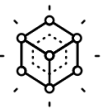
*Toujours en développement, le prix des matériaux composites limite les applications commerciales

Projets et acteurs en présence

Equipements aux. de la production d'H₂



Positionnement des acteurs & vision Québec | Équipements aux. de la prod. d'H₂



Du fait de la **complexité de chacun des équipements** présents sur ce segment et de la **diversité des expertises associées** (mécanique des fluides, électronique de puissance, thermodynamique, chimie, etc.), peu de manufacturiers d'électrolyseurs se risquent à intégrer cette étape. Néanmoins, le Québec a une **expertise reconnue en séparation des gaz** avec notamment la présence d'Ivys et son usine à Montréal.

Observations sur le segment des équipements auxiliaires



Analyse des acteurs clés



AEG

11 000 employés

Développe des systèmes complets (transformateurs, redresseurs, etc.) clés en main pour H₂



Véolia

220 000 employés

Possibilité de s'adapter à la technologie d'électrolyseur et obtenir des puissances >500 MW



Ivys adsorption

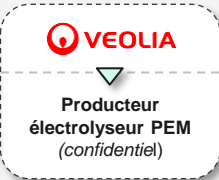
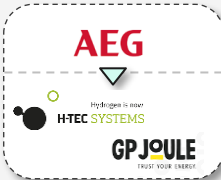
130 employés

Anciennement Xebec, s'est fait racheter en 2023 par Ivys suite à sa faillite



Partenariats développés

Les manufacturiers se développent en construisant des relations avec des porteurs de projets H₂ ou des manufacturiers d'électrolyseurs



Autres observations sur le segment

Secteur secondaire – Pour la majorité des manufacturiers d'équipements auxiliaires, l'H₂ est un marché secondaire qui représente une faible part du chiffre d'affaires

Difficulté d'intégration – Peu de fabricants d'électrolyseurs se positionnent sur ces segments qui nécessitent des expertises spécifiques



Difficultés rencontrées

1. Standardisation des projets et des technologies



2. Enjeux d'approvisionnement des composants



3. Technologies & marchés interdépendants d'autres solutions



4. Risque de développer des solutions spécifiques H₂



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, Ivys Adsorption (anciennement Xebec Adsorption) possède un **centre manufacturier important à Montréal** qui développe des systèmes de purification des gaz.

Malgré le rachat en 2023 par Ivys (basé aux États-Unis), l'usine à Montréal continue de recruter et les perspectives de production de gaz vert profitent à l'entreprise (H₂ & GNR)



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec

L'intérêt est légèrement moindre que pour les électrolyseurs

Stratégie H₂ provinciale & industries à décarboner

> Pour produire l'H₂ localement, ces équipements auxiliaires seront nécessaires pour accompagner les électrolyseurs

Valeur ajoutée un peu moins importante

> Du fait de sa dépendance au marché des électrolyseurs, et du plus faible contenu technologique, la valeur ajoutée est moindre

La capacité du Québec est renforcée par la présence d'Ivys

Manufacturier

> En plus d'Ivys et son usine à Montréal qui emploie 130 salariés, **plusieurs joueurs de ce segment sont très présents au Québec** mais sans usine de production d'équipements locale (Véolia, Air Liquide, Chart Ind., etc.)

Importance relative des indicateurs

Faible



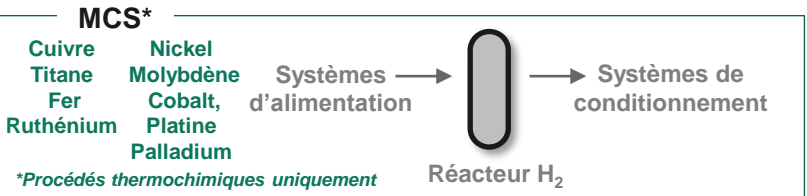
Élevé



2.C. Réacteurs H_2

Analyse de l'écosystème | Portrait global des réacteurs H₂

Malgré que la production par électrolyse soit au cœur des projets et annonces, aujourd'hui l'hydrogène est principalement produit par le reformage à la vapeur (SMR: H₂ gris). Les autres moyens de production de l'hydrogène se classifient en deux catégories: les **procédés thermochimiques** et les **procédés biologiques**. Ce segment d'équipements concerne les **réacteurs** utilisés dans les procédés suivants (NMT>7): gazéification de la biomasse, pyrolyse du biométhane par plasma, fermentation sombre, photo-fermentation, et fermentation séquentielle. Le choix d'un équipement de production de l'hydrogène vert et sa commercialisation reposent sur une **analyse technicoéconomique** poussée impliquant une évaluation des inducteurs de coûts, l'exploration de stratégies de compétitivité des coûts et l'identification de facteurs influençant le coût de production. Également, **l'élimination et/ou la valorisation des co-produits** de ces réactions sont des enjeux majeurs pour produire de l'H₂ de pureté suffisante et construire des modèles d'affaires robustes.



Procédé	NMT	Barrières et besoins	
SMR	9	Amélioration catalyseurs	THERMOCHEMQUES (Actuelles et futures)
POX	9	Gestion et contrôle du CO	
Gazéification biomasse	9	Rentabilité et sous-produits (Souffre)	
Pyrolyse par plasma	9	Performance et durabilité MTR	
Fermentation sombre	8	Micro-organismes adaptés	
Photofermentation	8	Micro-organismes adaptés	BIOLOGIQUES
Ferm. séquentielle	7	Micro-organismes adaptés	

- Perspectives R&D
- > **Procédés thermochimiques:** IA pour modéliser de nouveaux types de catalyseurs (zéolithes) et modéliser la logistique collecte et transport de biomasse (gazéification biomasse)
 - > **Procédés biologiques:** Études plus approfondies pour développer la **fermentation sombre, la photofermentation et les approches enzymatiques**
 - > **Approches synergiques:** R&D pour concevoir des **systèmes hybrides thermochimiques et biologiques** pour remédier aux limites des procédés individuels

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$1,9 milliards d'ici 2050

Une transition vers l'électrolyse

Des retombées positives (2030-2050)

Amérique du Nord et Europe

Le marché de la production d'hydrogène vert résultera en une **demande croissante dans les équipements de production** (électrolyseurs et autres réacteurs H₂)

Historiquement produit par vaporeformage, la transition vers l'H₂ vert est **majoritairement portée par les technologies d'électrolyse** mais plusieurs autres voies de production sont possibles et sont détaillées ci-après

Le marché de la production de l'hydrogène vert permettra de:
- Créer **2 millions d'emplois** par année
- Réduire les émissions de CO₂ cumulatives de **85 gigatonnes**

Les politiques et investissements se multiplient au niveau de l'H₂ vert

Les projets majeurs annoncés se concentrent prioritairement sur les électrolyseurs (avec des partenariats d'import/export par exemple), mais la **dynamique est croissante sur les autres réacteurs d'H₂ vert**

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

Une demande majoritaire pour les électrolyseurs

Soutenir la filière valorisation de la biomasse

Expertise R&D

Le Québec identifie la production d'hydrogène comme une solution visant à décarboner principalement les applications locales (industrie, transport) – pas d'exportations envisagées

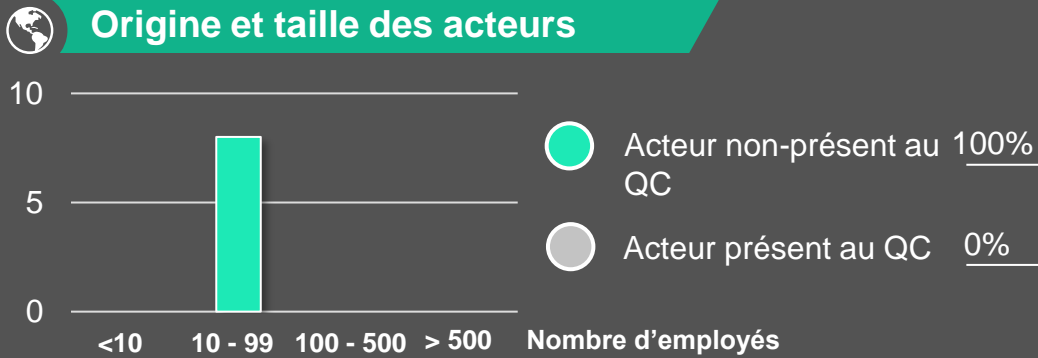
Avec les récents projets de production d'hydrogène à **large échelle, les procédés d'électrolyse sont les plus dynamiques** parmi les moyens de production de l'hydrogène vert; notamment car la réduction en émissions GES est souvent supérieure

La gazéification de la biomasse est une alternative à son incinération qui permet de réduire les émissions de GES C'est également une alternative à l'enfouissement des déchets encore très répandu au QC (CRD, médicaux...)

Expertise dans les procédés de pyrolyse par plasma détenue par universités et centres de recherche (Polytechnique, McGill, INRS, UQTR, CEPROCQ, Concordia, Sherbrooke...)

Projets et acteurs en présence

Réacteurs H₂



Typologie d'acteurs en présence

1. Typologie des acteurs

> Les typologies d'acteurs que l'on retrouve majoritairement sur ce segment sont des petites entreprises **spécialistes en réacteurs H₂**

> La plupart des manufacturiers fournissent des solutions pour les **procédés thermochimiques** puisque les procédés biologiques sont encore à l'échelle du laboratoire ou pilote

> Les acteurs se distinguent par **leurs technologies et les brevets détenus**

2. Positionnement sur la chaîne de valeur H₂

> La majorité des acteurs sont des **spécialistes de réacteurs hydrogène** qui ne se positionnent pas sur d'autres segments d'équipements de la chaîne de valeur

> La majorité des acteurs sont des **assembleurs d'équipements de production d'hydrogène**; NMT peu élevé et pour commercialiser leurs technologies, les propriétaires de technologies **externalisent la fabrication** (ex: KP Engineering effectue la manufacture des systèmes Omni Conversions; MMM Energy effectue la manufacture pour Element One)

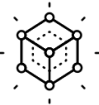
3. Partenariats typiques

> La majorité des manufacturiers développent des **partenariats stratégiques avec les organismes de recherche et développement** (Aurora Hydrogen & University of Toronto; Inentec & MIT; Innova Hydrogen & l'Université d'Alberta...) pour optimiser leurs technologies

> Des partenariats se forgent aussi en **collaboration avec les industriels pour développer des solutions personnalisées** (Développement d'une nouvelle technologie de pyrolyse du méthane: Ekona & TransAlta; Système intégré pour la production d'hydrogène: Solution intégrée pour la production d'hydrogène à partir de déchets: KP Engineering & Omni Conversions)

Capacités manufacturières majeures			
<div> <div></div> <div>SBI Bioenergy</div> <div>Edmonton</div> </div> <div> <div>Réacteurs produisant l'hydrogène à partir de bioéthanol</div> <div>1 site de 35 000 pi²</div> </div>	<div> <div></div> <div>KP Engineering</div> <div>Texas, États-Unis</div> </div> <div> <div>Unités Omni200 de Omni Conversions</div> <div>2 sites aux États-Unis</div> </div>	<div> <div></div> <div>Ekona</div> <div>Colombie Britannique</div> </div> <div> <div>Réacteurs: pyrolyse non-catalytique du méthane</div> <div>1 site en CB</div> </div>	<div> <div></div> <div>Wintec Energy</div> <div>États-Unis</div> </div> <div> <div>Démonstration de la technologie de H2SX: plasma micro-onde</div> </div>

Positionnement des acteurs & vision Québec | Réacteurs H₂



La majorité des propriétaires de technologies sur ce segment externalisent la **manufacture des réacteurs** à des firmes de génie spécialisées. La **R&D est également au cœur de ce segment** et les acteurs s'associent souvent avec des organismes de recherche. Le Québec est en position de répondre aux **besoins R&D** de ce segment mais **l'expertise manufacturière reste moins développée que le reste du Canada**.



Observations sur le segment des réacteurs H₂



Analyse des acteurs clés



SBI Bioenergy

25 employés
Se développe en créant des partenariats pour mettre en application son réacteur Golu-H2



KP Engineering

118 employés
Se développe grâce à une expertise dans la fabrication des systèmes hydrogène



Ekona

59 employés
Se développe en externalisant la commercialisation de sa plateforme technologique pour les réacteurs xCaliber



Partenariats développés

Les manufacturiers se développent souvent grâce à des **partenariats avec les propriétaires de technologies ou les usagers finaux** pour des applications spécifiques.



Autres observations sur le segment

Compétition – Ce segment est en compétition proche avec celui des électrolyseurs qui pour le moment attire le plus d'intérêt et d'investissements

R&D – R&D très dynamique pour accélérer la commercialisation des technologies à NMT faible (fermentation sombre, photo-fermentation et fermentation séquentielle)



Difficultés rencontrées

1. Capacité des joueurs de l'écosystème à passer à l'échelle	●●●●
2. Demande encore trop faible pour justifier la manufacture à grande échelle	●●●●
3. Risque dans le choix du procédé commercialisé	●●●○
4. Dynamique de manufacture sur mesure	●●●○



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, **aucun acteur n'opère au QC**. La majorité des acteurs ont des opérations au Canada ou aux États-Unis. Au Québec, l'accent est plutôt mis sur les électrolyseurs comme équipement de choix pour la production de l'hydrogène vert autant par les manufacturiers que les porteurs de projet. Le Québec possède cependant **une expertise R&D distinguée** dans ce segment et des investissements aideront la commercialisation future des technologies associées.



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec

Répondre aux objectifs de décarbonation

- > Le développement d'un **écosystème manufacturier** de réacteurs H₂ permettrait au QC de réduire les émissions issues des procédés SMR tout en soutenant la filière de valorisation de la biomasse (vs incinération)
- > La **demande demeure cependant très faible** au niveau de ce segment d'équipement comparée à celle observée au niveau des électrolyseurs (dynamique à suivre)

Un écosystème manufacturier peu développé

Expertise R&D

- > Expertise dans les procédés de fermentation et pyrolyse par plasma détenue par McGill, UQTR, Polytechnique, etc.

Écosystème manufacturier

- > Aucun acteur au QC identifié capable de produire des réacteurs H₂ mais présence de firmes spécialisées avec des compétences complémentaires (Pyrogenesis: fabrication de torches au plasma)

Importance relative des indicateurs





2.D. Stations H2

Analyse de l'écosystème | Portrait global des stations hydrogène

Les stations hydrogène sont clés pour la diffusion des technologies à propulsion hydrogène. Malgré la croissance du nombre de stations, **la dynamique est moins importante que celle observée sur les stations électriques**. Les stations hydrogène font intervenir plusieurs équipements auxiliaires: tuyauterie, systèmes de stockage, compresseurs, liquéfacteurs, équipements de production hydrogène, évaporateurs, pompes cryogéniques, distributeurs, etc. Deux systèmes cohabitent (gazeux et liquide) et sont envisageables en deux configurations selon le besoin (sur-site ou hors-site). Aujourd'hui, **on retrouve plus de 1000 stations dans le monde**, la Chine est responsable du tiers de ces installations. Les stations d'hydrogène gazeux permettent un avitaillement à deux pressions distinctes: 350 bars ou 700 bars selon le type de véhicule.

MCS

Cuivre

Titane

Inox (Nickel)

Platine

Cobalt

Graphite

Production H₂

Transport lourd H₂

Canalisations

Compresseur

Réservoir

Évaporateur

Pompe cryogénique

Réservoir

Distributeur

Gazeux

Liquide

Type	NMT	Demande en énergie*	Avantages	Inconvénients
Gazeux	9	4.21 kWh/kg <small>*Passage de 10 à 55 MPa</small>	350 bars Capacité 700 bars Temps d'avitaillement	350 bars Spectre FCEV 700 bars Capacité moindre
Liquide	9	8.57 kWh/kg	Capacité élevée	Coûts élevés

Technologies (Actuelles et futures)

Perspectives R&D

> **Stockage liquide:** R&D pour développer le stockage liquide embarqué: densité de stockage prometteuse mais liquéfaction énergivore & évaporation

> **Météo:** Recherche des solutions pour relever les défis liés aux conditions météorologiques extrêmes: fuites d'H₂ au niveau des distributeurs amplifiées par les vents

> **Modularité:** Conception modulaire pour permettre l'évolutivité des technologies

> **Interopérabilité:** Standardisation pour permettre l'interopérabilité et la compatibilité entre les fabricants

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$0,95 milliard en 2022

TCAC de 26.43% à l'horizon 2030

Sur-site ou hors-site

Stations sur-site représentent **56% des revenus dans le marché** (besoins de transport et stockage limités); Stations mobiles est un segment émergent

Segment majoritaire

Les stations de moins de 1 tonne par jour représentent **92% du marché**, cependant une tendance vers des stations de plus grandes tailles est observées pour améliorer la rentabilité

Europe

Croissance attribuée aux investissements des gouvernements et des industriels qui se multiplient

Amérique du Nord

Aéroport Pearson: **première station hydrogène publique**; Partenariats pour développer les technologies d'avitaillement (CHFCA);

Asie Pacifique

Corée du Sud: projet annoncé par le gouvernement de produire **6.2 millions de véhicules hydrogène** et déployer au minimum **1200 stations d'ici 2040**

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

Le Québec positionne l'hydrogène comme une alternative prometteuse pour décarboner le secteur de la **mobilité lourde et de longue distance**

Infrastructure peu mature

Très peu d'infrastructure d'avitaillement: **une adoption en croissance mais des coûts d'infrastructure élevés**

chaîne de valeur à consolider

Absence de chaîne de valeur pour l'hydrogène: **absence de gros producteurs et une majorité de producteurs sur-site**

Des opportunités

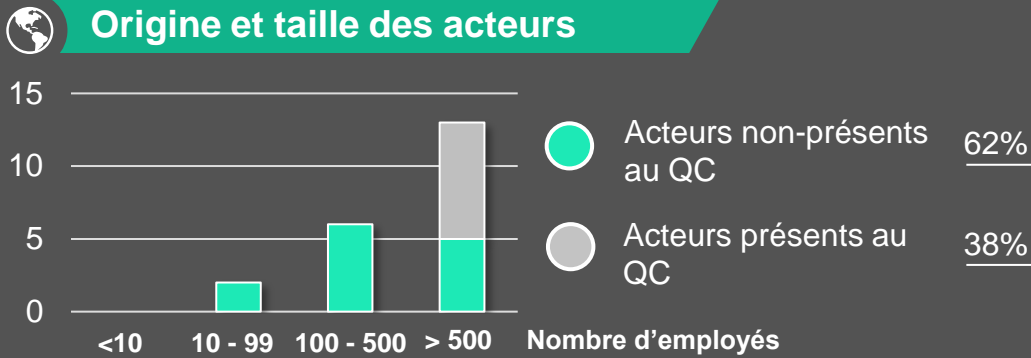
Expertise présente au QC détenue par Harnois Énergies et des projets qui émergent: Hydrolux – réseau de station H₂ produites par Vinci et TES - dont 1/3 de la production pourrait servir le transport lourd.

Marché co-dépendant

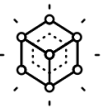
Besoin que le développement des stations se fasse en même temps que celui de la mobilité H₂

**Incluant la compression de l'hydrogène pour les systèmes gazeux de 10 à 55 MPa et la liquéfaction pour les systèmes liquides; Hors-électrolyse*

Projets et acteurs en présence



Positionnement des acteurs & vision Québec | Stations H₂



Les acteurs clés des stations hydrogène se démarquent par leur capacité à **absorber les coûts élevés de manufacture** et d'opération de l'infrastructure d'avitaillement par la construction **de modèles d'affaires solides**. Ces éléments constituent les deux barrières majeures à l'entrée de ce segment. Au Québec, bien que **la demande pour les stations se développe, peu de joueurs ont été identifiés** comme capable d'installer des capacités manufacturières conséquentes malgré quelques projets annoncés.



Observations sur le segment des stations H₂



Analyse des acteurs clés



Nel Hydrogen

556 employés
+ grosse capacité industrielle
Produit des électrolyseurs



Plug Power

3 353 employés
3 sites manufacturiers
S'occupe de la manufacture
des distributeurs



Linde

74 207 employés
1 site manufacturier
Produit compresseurs
ioniques et pompes
cryogéniques



Partenariats développés

Les manufacturiers qui passent à l'échelle **sont ceux qui sont capables de sécuriser les équipements auxiliaires aux stations hydrogène.**

nel

HTEC
Hydrogen Technology & Energy Corporation

plug

Manufacture des
distributeurs

Linde

HYOSUNG



Autres observations sur le segment

Des marchés interdépendants – Manufacturiers hésitants à fabriquer des automobiles à propulsion hydrogène par manque d'infrastructure d'avitaillement et vice-versa

Tendances à la spécialisation – Les acteurs généralistes ont tendance à se spécialiser et délaisser certains segments (Achat par Ataway de la division Stations H₂ de Mcphy)



Difficultés rencontrées

1. Standardisation des pressions d'avitaillement



2. Compétitivité économique par rapport aux alternatives



3. Absence de gros producteurs d'hydrogène



4. Capacité des joueurs de l'écosystème à passer à l'échelle



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

1 seul acteur balisé est présent au QC: HTEC (dont les stations sont fabriquées par Plug Power). Malgré la présence d'autres acteurs au QC, leurs projets annoncés se font hors-QC (Linde, Air Products). Les entretiens réalisés ont listé First Hydrogen comme **potentiellement intéressé de développer des activités manufacturières** au Québec (véhicules FCEV) en offrant une solution clé en main pour ses clients du secteur de la mobilité lourde (intégration de services d'avitaillement)



Intérêt pour le
Québec



Capacité du
Québec



Produire des stations sert la décarbonation du transport

Objectifs provinciaux de décarbonation

- > Le gouvernement du Québec a pour objectif de réduire ses émissions de GES de 37,5% d'ici 2030 et le transport compte pour **44% de ces émissions.**
- > Par ailleurs la stratégie provinciale pour l'H₂ verte identifie le transport lourd comme débouché de **priorité moyenne** pour l'H₂.



Une demande peu élevée pour le moment

Des expertises complémentaires présentes au QC

- > Capacité de répondre aux besoins des manufacturiers et opérateurs de stations: Harnois Énergie est un acteur éprouvé dans l'opération des stations hydrogène et l'intégration de processus de facturation

Manufacturier

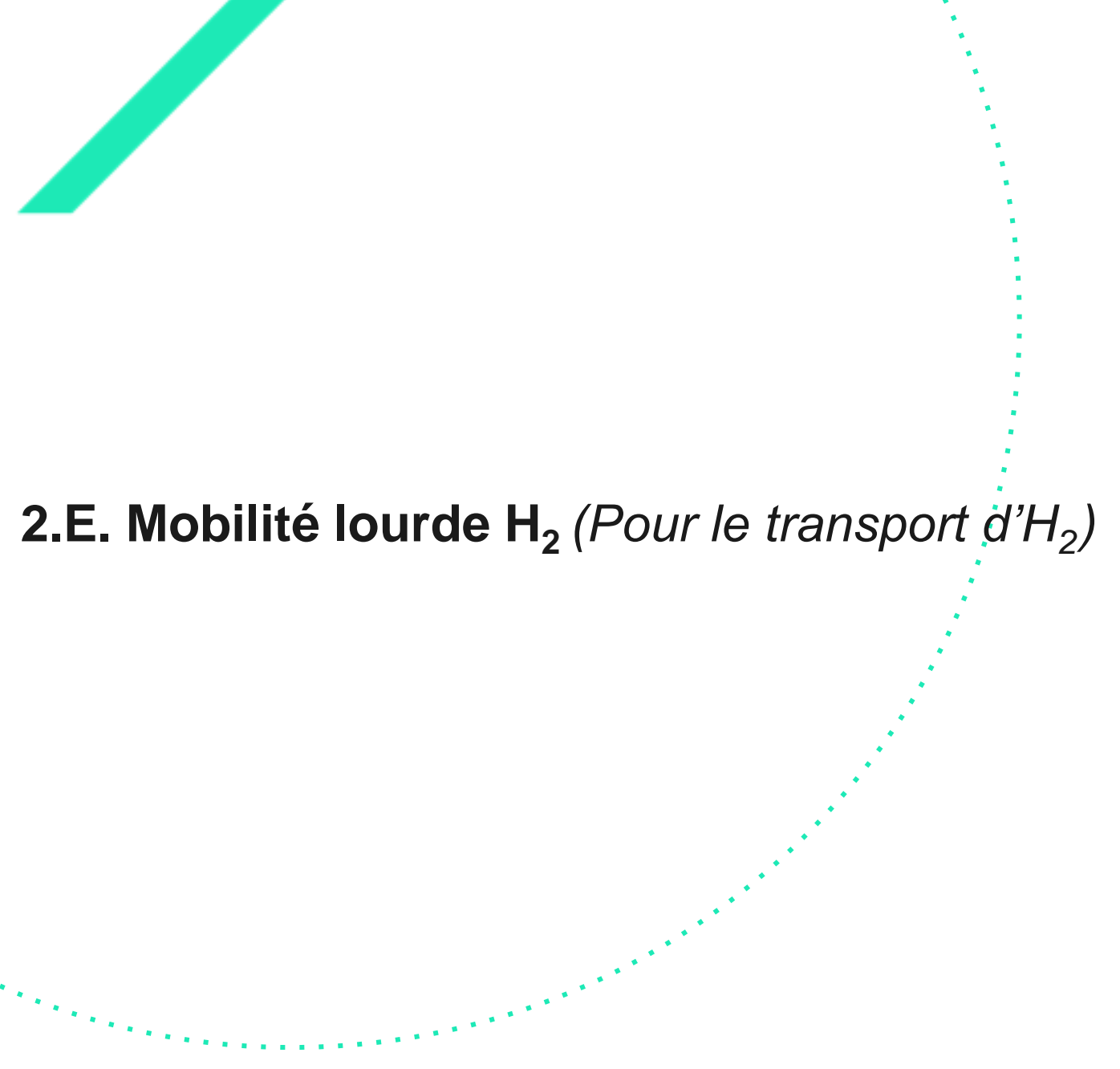
- > Peu/pas d'acteurs QC identifiés capables de produire des stations à grande échelle mais dynamique émergente (7 stations d'hydrogène annoncées par Hydrolux et produites par Vinci) et demande peu élevée pour le moment

Importance relative des
indicateurs

Faible



Élevé



2.E. Mobilité lourde H₂ (*Pour le transport d'H₂*)

Analyse de l'écosystème | Portrait global de la mobilité lourde H₂

Plusieurs moyens de transport et distribution d'hydrogène existent: canalisations (approvisionnement long-terme), camions, navires et trains (court-moyen terme). L'engouement pour le transport H₂ est surtout observé au niveau des navires et canalisations et peu au niveau du transport lourd par camions qui est déjà répandu depuis plusieurs dizaines d'années (transport cryogénique ou pressurisé). L'hydrogène peut être transporté sous trois formes: **gazeux, liquide et par molécules porteuses**. Les molécules porteuses sont surtout utilisées pour des applications d'exportation par navire et camion (l'ammoniac liquide, le méthanol et les LOHC). Au Canada, l'acheminement de l'hydrogène par canalisations est regardé de près avec Enbridge en tête de file pour le secteur industriel; cette analyse se concentre cependant sur le transport de l'hydrogène par **mobilité lourde H₂** plus adaptée pour la situation du Québec (**production centralisée et approvisionnement court-moyen terme nécessaire**).

MCS

Inox (Nickel)
Titane
Cuivre

Site d'origine

Camion

Rail

Navire

Réservoirs ou tubes
Conteneurs
Conteneurs

Site final

PRODUCTIONTRANSPORT, LIVRAISON, DISTRIBUTIONUTILISATION

Moyens	NMT	État	Barrières et besoins
Camions	9	Gazeux	Capacités de stockage Limites de pressions Certification nouvelles approches
		Liquide	Réduction coûts et évaporation Augmentation capacité
Rail	7	Gazeux	Capacités de stockage Limites de pressions Certification nouvelles approches
		Liquide	Sécurité; Réduction coûts (poids) Capacité faible
Navire	7	Liquide Molécules porteuses	Limites de température Maturité technologie

Technologies (Actuelles et futures)

FUTUR

ÉMERGENT

Perspectives R&D

> Alliages alternatifs: R&D pour le développement de nouveaux alliages résistants à la corrosion

> Capteurs: Les capteurs de la prochaine génération devront se multiplier pour répondre aux besoins grandissants au niveau de la qualité de l'hydrogène transporté dans les réservoirs; les nouveaux capteurs pourront faire appel aux 4 types de technologies suivantes: FA, IA, électronique imprimée avec antennes RFID, et points quantiques pour les capteurs optiques

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

Au cœur du débat

Technologies les plus répandues

Des enjeux R&D à maîtriser à l'échelle mondiale

Amérique du Nord

Compromis entre: production centralisée et infrastructure de transport de l'hydrogène développée & production décentralisée avec coûts de distribution (-) mais coûts de production (+) élevés (Influence sur coût H₂)

Transport par camions: Camions citernes (liquide): méthode la plus répandue et économique pour transport H₂ sur de longues distances (Capacité élevée) Remorques porte-tubes (gaz): plus petites distances (capacité limitée par poids des réservoirs embarqués)

Efforts R&D et investissements pour développer de nouvelles technologies telles que les molécules porteuses pour le transport haute densité - ex: Chiyoda Corporation: démonstration technologie SPERA LOHC (210 tonnes par an)

Travaux de simulation et optimisation dirigés par les ÉU: DOE effectue des analyses par scénario de transport pour optimiser les technologies de transport H₂ en fonction des usages finaux (H2A Delivery Analysis)

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

Une production d'hydrogène vert pour le besoin local

Atteinte des objectifs de décarbonation

Co-développement nécessaire

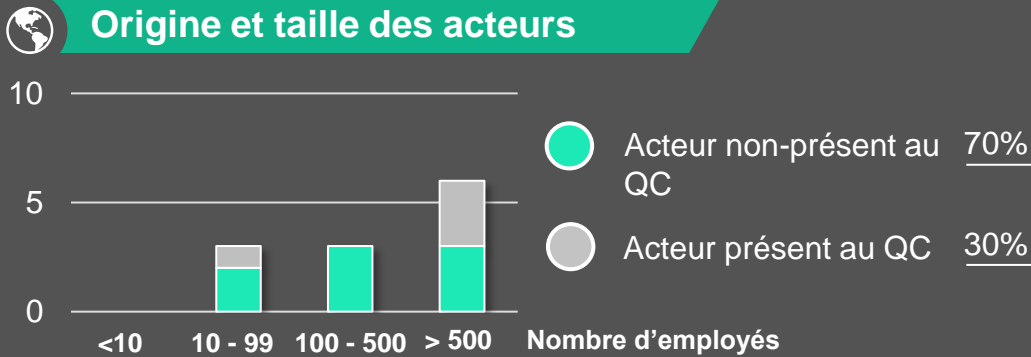
Applications industrielles et de ravitaillement ciblées et qui vont tirer demande pour le transport de l'H₂: besoin d'acheminer H₂ du lieu de production au lieu d'utilisation;

Pas d'exportations prévues: livraisons prévues majoritairement locales (entre producteurs et usagers);
- Camions: segment le plus adapté
- Navires: peu développés
- Rail: manque de standards et moins attrayants pour des grandes quantités

Il est attendu que les véhicules lourds utilisés pour le transport H₂ soient électrifiés sinon analyse sur les émissions associées nécessaire pour justifier cet usage

Surtout au niveau de l'adaptation des réservoirs de type 4 à une échelle compatible avec l'opération du transport de l'H₂

Projets et acteurs en présence



Mobilité lourde H₂

Typologie d'acteurs en présence

1. Typologie des acteurs

> Les typologies d'acteurs que l'on retrouve majoritairement sont des industriels en diversification dont le cœur de métier n'est pas l'hydrogène et des généralistes de l'H₂ dont le cœur de métier est l'hydrogène; **Aucun spécialiste de la mobilité lourde pour le transport de l'H₂ identifié**

> Les manufacturiers fournissent des technologies surtout dans le segment des camions lourds pour le transport de l'hydrogène (liquide ou gazeux)

2. Positionnement sur la chaîne de valeur H₂

> On retrouve une majorité de généralistes qui sont positionnés sur plusieurs mailles de la chaîne de valeur de l'hydrogène (Charbone, Chart, Air Products, Bayotech, etc.)

> Deux profils majoritaires: manufacturiers de réservoirs embarqués ou stationnaires qui internalisent la production des réservoirs (Luxfer, Iljin) ou manufacturiers de stations hydrogène (Plug Power, Powertech, etc.)

> Les acteurs sont majoritairement assembleurs des solutions finales utilisées dans ce segment (camion/navire/train: externalisés + citernes/tubes/réservoirs: internalisés)

> Hydrogenious a été identifié comme spécialiste de transport de l'hydrogène par navires et trains sous forme de LOHC

3. Partenariats typiques

> Partenariats avec les manufacturiers de la mobilité lourde (ex: BayoTech & Nikola: camions lourds à propulsion H₂ pour pour le transport de l'hydrogène)

> Partenariats entre généralistes de l'H₂ et les manufacturiers de réservoirs pour fournir des solutions complètes de transport de l'H₂ (BayoTech & Luxfer; Luxfer & Octopus Hydrogen; Powertech & NPROXX)

Manufacturiers clés

Bayotech

Mexique, États-Unis

50 camions achetés pour des applications de transport H₂; commande de 4 camions HyFill par Chevron

Chart

Theodore, AL

Capacité manufacturière x5 en 18 mois 55 ans d'expérience en transport H₂

Air Products

États-Unis, Chine, Inde

Camions pour le transport H₂: technologie interne testée dans +250 projets

Powertech

Colombie-Britannique

Acquisition Lift H2 Plus grosse capacité qui existe sur le marché (1,2 tonne de H₂ gazeux compressé à 550 bars)

Positionnement des acteurs & vision QC | Mobilité lourde H₂



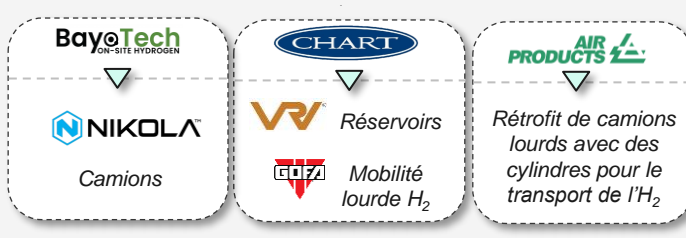
La dynamique de ce segment est surtout tirée par la formation de **partenariats pour la construction de solutions complètes pour le transport de l'hydrogène**. Au Québec, le développement de la demande provient de la nécessité de combler les **besoins locaux en hydrogène** acheminant ce dernier du point de production au point final. Le Québec possède une expertise R&D qui permettrait de développer davantage les capacités de transport des réservoirs mais la demande ne justifie pas encore le déploiement d'un réseau de distribution extensif malgré la présence de plusieurs acteurs.

Observations sur le segment de la mobilité lourde H₂

Analyse des acteurs clés et années d'expérience

BayoTech 101 employés Développement d'un hub pour l'hydrogène au Missouri BayoGaas (production et livraison de l'hydrogène)	Chart 5 200 employés Se développe par acquisitions: James Russell Engineering Works, GOFA, VRV	Air Products 19 275 employés Technologie de marque déposée h2fM utilisée dans 20+ pays
---	---	---

Observations
Les manufacturiers de ce segment s'associent à des partenaires pour sécuriser les briques constitutives des solutions finales (mobilité lourde et/ou réservoirs de stockage)



Autres observations sur le segment

Influence sur le prix de l'H₂ – La dynamique de ce segment influence fortement le prix de l'hydrogène qui doit tenir compte d'une variation du coût de distribution selon le monde de transport

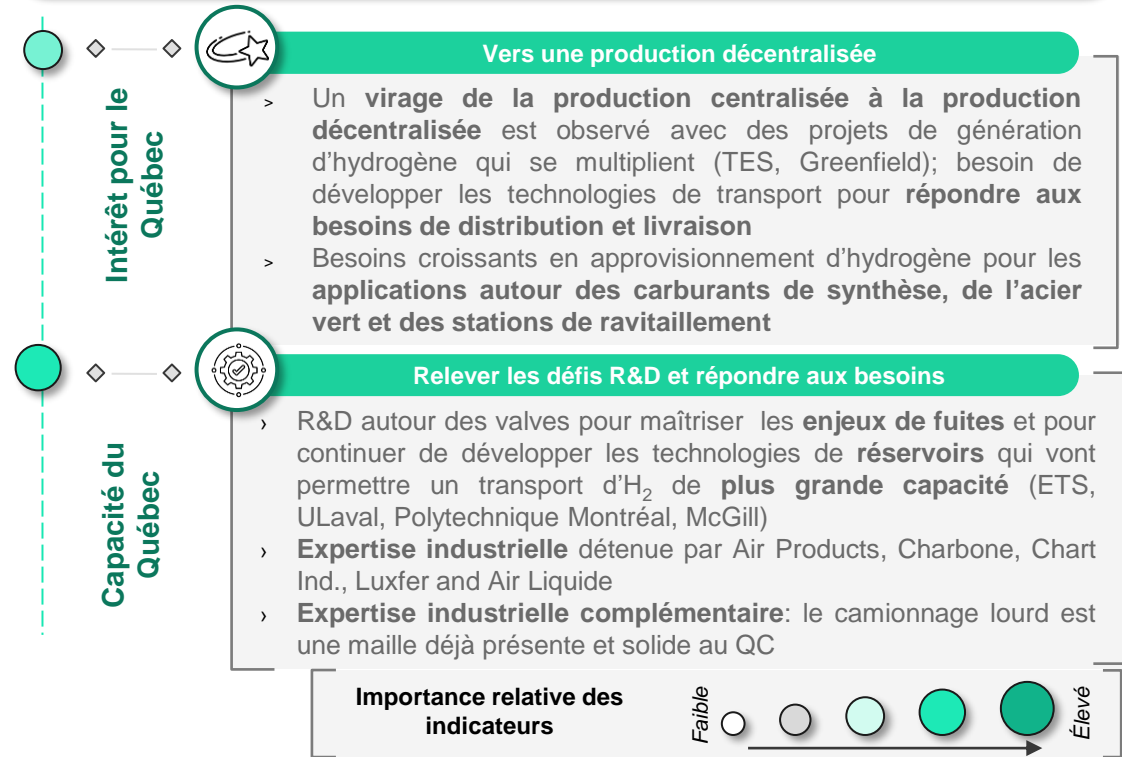
Flexibilité – Le risque lié au développement d'une technologie spécifique est compensé par la flexibilité associée au transport par camion (ex: Chart a pour projet de fournir également des solutions de transport H₂ gazeux)

Difficultés rencontrées

1. Modèles de distribution et infrastructures peu matures	●●●●
2. Demande encore trop faible pour justifier la manufacture à grande échelle (production centralisée)	●●●○
3. Co-développement des technologies complémentaires	●●●○
4. Enjeu au niveau de la robustesse des technologies	●●●○

Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, **4 acteurs sont présents au QC** (Air Products, Charbone, Chart Ind., et Luxfer) mais leurs **activités manufacturières se font hors-QC**. La demande observée est surtout locale et les distances de transport H₂ demeurent assez faibles; secteur du camionnage électrique est bien développé au QC et justifierait l'utilisation de camions lourds pour transport H₂ sur des courtes distances

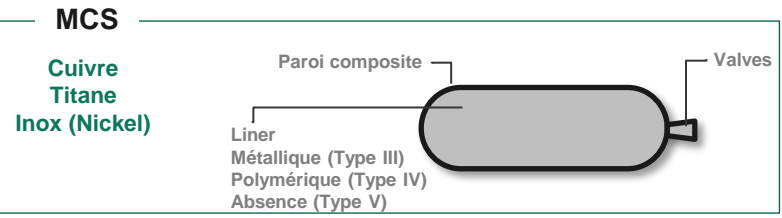




2.F. Réservoirs embarqués

Analyse de l'écosystème | Portrait global des réservoirs embarqués

Les **réservoirs embarqués** font partie des nombreux moyens de stockage de l'hydrogène. Contrairement aux réservoirs en sous-sol et les réservoirs hors-terre destinés à des applications stationnaires, les réservoirs embarqués sont utilisés pour le **transport routier, aérien ou maritime**. Leur composition varie selon leur usage mais ils sont généralement composés de **fibres de carbone** ou **acier inoxydable**. Les réservoirs de **type IV** sont les plus fréquemment utilisés grâce à leur légèreté et densité de stockage d'hydrogène. Certaines applications de stockage liquide/cryogéniques sont envisagées aujourd'hui mais l'application de stockage **gazeuse** présentée dans la section Technologies est la plus courante.



Type	NMT	Coûts	Poids	Applications
Type I	9	++	-	Stationnaires
Type II	9	+	=	Stationnaires
Type III	9	-	+	Embarquées
Type IV	9	-	++	Embarquées
Type V*	7	++	+++	Embarquées

- Technologies (Actuelles et futures)
- Perspectives R&D
- > **Fabrication additive**: pour la réparabilité des systèmes en INOX qui sont fragilisés à des pressions élevées
 - > **Robustesse des systèmes de sécurité**: R&D pour une conception au même niveau que pour les véhicules à moteur à combustion interne actuels
 - > **Stockage liquide et solide**: R&D pour développer le stockage liquide embarqué (technologie mature mais densité de stockage prometteuse mais liquéfaction énergivore & évaporation) et les applications de stockage LOHC

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$22 milliards en 2030 (\$2021)

TCAC de 5,2% à l'horizon de 2030

Réservoirs composites: croissance de part de marché directement dépendante du **prix des fibres de carbone** (50% de leurs poids)

Réservoirs de type IV

Les plus couramment utilisés

Applications dans le **secteur de la mobilité**: légèreté et densité de stockage

Plus grande part de revenus à horizon 2030

portée par plusieurs initiatives de R&D: densité de stockage et réduction des coûts pour des applications embarquées

Amérique du Nord

Europe

Asie Pacifique

Croissance constante: investissements continus dans la filière manufacturière

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

Le Québec positionne l'hydrogène comme une alternative prometteuse pour décarboner le secteur de la **mobilité lourde et de longue distance**

Un secteur d'application en pleine croissance

Récente étude de Propulsion Québec - **Transport lourd et de longue distance est une application complémentaire** à l'électrification des camions lourds

Des projets en cours et une demande qui augmente

Harnois Énergies a commandé **5 camions H₂** pour entrer en opération en 2026

Projets Hydrolux de **7 stations H₂** et **20 camions H₂** sur la route 117

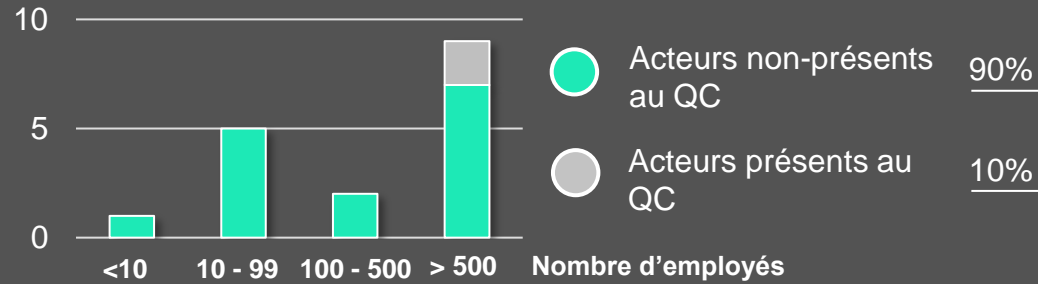
Expertise présente au Québec

R&D au niveau des réservoirs embarqués: liquéfaction, amélioration de la densité de stockage, fabrication additive, métaux et composites (CQFA, CMQ, McGill, CDCQ)

*Réservoirs sans liner, paroi composite uniquement; toujours en développement, le prix des matériaux composites limite les applications commerciales

Projets et acteurs en présence

Origine et taille des acteurs



Positionnement des manufacturiers

★ Champion Canadien + Acteurs présents au Québec



Réservoirs embarqués



Typologie d'acteurs en présence

1. Typologie des acteurs

- > Les 3 typologies d'acteurs que l'on retrouve majoritairement sur ce segment sont des **multinationales dont le cœur de métier n'est pas l'hydrogène**, des **manufacturiers de réservoirs de gaz industriels** qui se diversifient avec l'H₂ et des **PME ayant une spécialisation technologique** (réservoir innovant, plus léger, etc.)
- > Il existe donc de **larges différences dans les capacités de production des acteurs**. Les forces de frappe des acteurs sont très inégales : de moins de 100 réservoirs vendus à +100 000 réservoirs par an

2. Positionnement sur la chaîne de valeur H₂

- > La majorité des acteurs sont des **spécialistes des réservoirs embarqués** qui ne développent pas d'autres solutions hydrogène. Ceux qui se diversifient proposent des **systèmes plus complets pour le transport/stockage** (remorques H₂, applications de stockage stationnaire, etc.)

3. Partenariats typiques

- > La majorité des plus grands manufacturiers (>500 employés) (Faurecia, Plastic Omnium, etc.) développent des **partenariats stratégiques avec des acteurs de la mobilité H₂** (Hyzon, Symbio, etc.)
- > Des partenariats se forment aussi au sein des **chaînes d'approvisionnement** pour se sourcer en matériaux composites, fibre de carbone, etc. (Ex: Faurecia & Arkema)



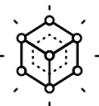
Projets manufacturiers majeurs

Faurecia
Allenjoie – En opération
100 000 réservoirs/an
Multiplication capacité de production par 10

Plastic Omnium
Michigan - 2026
+100 000 réservoirs/an
Plus grande usine de réservoirs à hydrogène des États-Unis

Plastic Omnium
Compiègne – 2025
80 000 réservoirs/an
Réservoirs 700 bars, 200 emplois créés sur place

Positionnement des acteurs & vision Québec | Réservoirs embarqués



Les acteurs clés des réservoirs embarqués se démarquent **par l'innovation technologique** ainsi que la capacité à **former des partenariats avec les joueurs de la mobilité hydrogène** pour sécuriser la demande. Au Québec, bien que **la demande pour les réservoirs se développe, peu de joueurs ont été identifiés** comme capable d'installer des capacités manufacturières conséquentes.



Observations sur le segment des réservoirs embarqués



Analyse des acteurs clés



Plastic Omnium

28 330 employés
+ grosse capacité industrielle
(180 000 réservoirs/an)
Réservoirs 40% plus légers



Faurecia

110 000 employés
50 sites manufacturiers
(100 000 réservoirs/an)
Se développe avec partenariats



Luxfer Gas Cylinder

1 350 employés
7 sites manufacturiers
(70 millions de réservoirs en utilisation)



Partenariats développés

Les manufacturiers qui passent à l'échelle **travaillent de pair avec les acteurs de la mobilité hydrogène**



Autres observations sur le segment

Nouveaux compétiteurs – Certains acteurs de la mobilité H₂ tendent à réintégrer la production de réservoirs (Ex: Toyota)

R&D – Nerf de la guerre technologique : poids, coûts, volume. R&D très importante et qui laisse la place à de nouvelles technologies d'où le développement de PME spécialistes



Difficultés rencontrées

1. Standardisation des pressions de transport H ₂	●●●●
2. Enjeux d'approvisionnement des composants	●●●○
3. Capacité des joueurs de l'écosystème à passer à l'échelle	●●○○
4. Difficulté à anticiper la demande pour calibrer les capacités	●○○○



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, **seuls 2 acteurs balisés opèrent** au QC : Chart Ind. et Arkema mais il **n'est pas clair si leurs activités au QC sont en lien avec l'H₂**. La fabrication de ces réservoirs **pourrait être prise en charge par des PME spécialistes existantes**, gravitant autour du domaine de l'aéronautique, et qui pourraient être identifiées à travers le STIQ ou le RICQ.



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec



Produire des réservoirs sert la décarbonation du transport

Objectifs provinciaux de décarbonation

- > Le gouvernement du Québec a pour objectif de réduire ses émissions de GES de 37,5% d'ici 2030 et le transport compte pour **44% de ces émissions**.
- > Par ailleurs la stratégie provinciale pour l'H₂ vert identifie le transport lourd comme débouché de **priorité moyenne** pour l'H₂.



Bien que la R&D soit dynamique, peu d'acteurs manufacturiers

Expertise R&D

- > **La R&D est clé dans ce segment de marché** où il reste beaucoup de place à l'innovation technologique. Au QC, le CQFA est le guichet unique où les acteurs sont regroupés pour travailler sur les problématiques de **fabrication additive**.

Manufacturier

- > PME spécialistes existantes pourraient potentiellement produire ces équipements

Importance relative des indicateurs

Faible

○

○

○

●

●

●

●

●

●

●

●

●

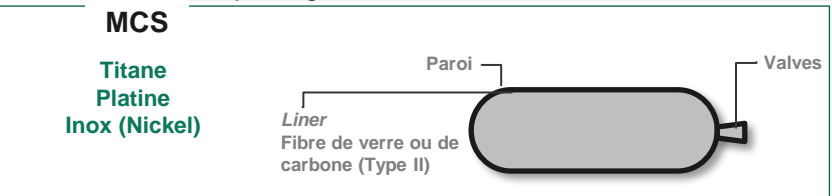
Élevé



2.G. Réservoirs stationnaires

Analyse de l'écosystème | Portrait global des réservoirs stationnaires

Les **réservoirs stationnaires** font partie des différents moyens de stockage de l'hydrogène. Contrairement aux réservoirs embarqués, les réservoirs stationnaires sont utilisés pour le **stockage moyen ou long-terme**. Leur composition varie selon leur usage mais ils sont généralement composés **d'acier et d'aluminium**. Les réservoirs de **type I** sont utilisés pour des applications sous-marines ou du stockage industriel à grande échelle tandis que les réservoirs de **type II** sont adaptés pour des pressions plus élevées (300 bars) grâce à leur *liner* en filament qui leur confère une meilleure rigidité. Les réservoirs stationnaires sont utilisés dans plusieurs applications: stockage temporaire après production, stockage pour conversion en électricité, stockage dans les stations d'avitaillement et stockage pour utilisation dans les procédés industriels. L'hydrogène peut être stocké sous différentes formes: liquide, gazeux ou solide.



Type	NMT	Coûts	Pression maximale	Poids	Applications
Type I	9	++	-	-	Stationnaires
Type II	9	+	=	=	Stationnaires
Type III	9	-	++	+	Embarquées
Type IV	9	-	++	++	Embarquées
Type V	7	++	++	+++	Embarquées

- Technologies
(Actuelles et futures)
- Perspectives R&D
- > **Stockage liquide**: R&D pour développer le stockage liquide embarqué: densité de stockage prometteuse mais liquéfaction énergivore & évaporation
 - > **Stockage en sous-sol**: R&D pour développer le stockage en caverne: taille, forme et profondeur des cavernes; revalorisation d'anciens sites miniers, surtout ceux à base de sel
 - > **Stockage solide**: R&D pour développer une solution qui permet de rendre l'hydrogène disponible à un taux plus élevé après sa liaison à des molécules solides

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$21,8 milliards en 2021

TCAC de 5,2% à l'horizon de 2030

Les réservoirs de type I et type II représentent plus que 50% de la part de marché des réservoirs hydrogène

Réservoirs stationnaires

Plus grande croissance à horizon 2028

Applications principales: stockage pour conversion en électricité (équilibre de réseau) et stockage dans les stations H2

Amérique du Nord

Plusieurs projets de stockage d'hydrogène majeurs avec une dominance par les États-Unis

Europe

Croissance rapide: réglementations gouvernementales encourageant les technologies de stockage

Asie Pacifique

TCAC le plus élevé: demande croissante en énergie propre contribue à l'adoption du stockage stationnaire par les industriels

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

L'utilisation d'H₂ dans les procédés industriels et les carburants de synthèse: **applications à prioriser**; Réservoirs stationnaires essentiels à ces applications

Une opportunité pour le stockage de l'électricité

L'hydrogène est **complémentaire aux énergies intermittentes** (éoliennes et solaires) et constitue une avenue possible pour le **stockage stationnaire d'électricité** et l'équilibrage de réseau

Une demande prévue d'augmenter

La demande pour les réservoirs stationnaires sera portée par plusieurs applications dont l'utilisation de l'hydrogène pour des génératrices ou pour alimenter les centres de données.

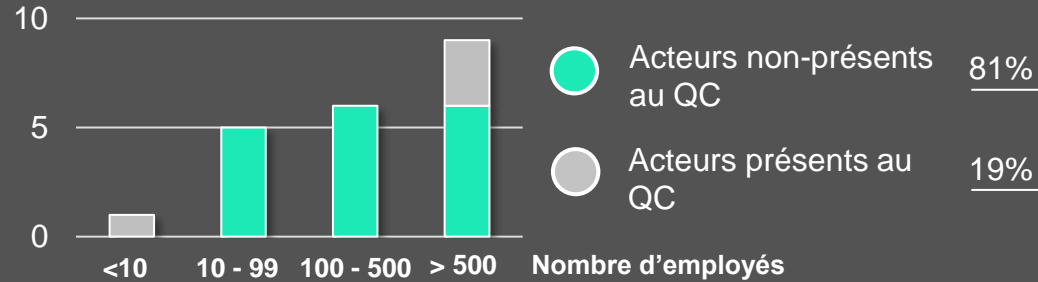
Expertise présente au Québec

Plusieurs acteurs se démarquent au QC au niveau des **systèmes de sécurité des réservoirs stationnaires** (AS Devices)

Projets et acteurs en présence



Origine et taille des acteurs



Positionnement des manufacturiers

Champion Canadien Acteurs présents au Québec



Réservoirs stationnaires



Typologie d'acteurs en présence

1. Typologie des acteurs

- > Les 3 typologies d'acteurs que l'on retrouve majoritairement sur ce segment sont des **multinationales dont le cœur de métier est l'hydrogène**, des **manufacturiers de réservoirs de gaz industriels** (Kawasaki, Arkema, Mincatec) qui se diversifient avec l'H₂ et des **acteurs ayant une spécialisation technologique** (stockage sous-terrain - Linde, stockage solide - Mincatec, etc.)
- > Les acteurs les mieux positionnés sur ce secteur sont ceux qui possèdent une présence importante dans le segment des stations hydrogène (application principale de ces réservoirs)

2. Positionnement sur la chaîne de valeur H₂

- > Sur la chaîne manufacturière, ils développent majoritairement des solutions pour répondre au stockage stationnaire dans les **stations hydrogène avec une minorité de solutions pour les applications industrielles**. Certains d'entre eux intègrent la **fabrication des réservoirs** (Chart, Fives Nordon, GKN Hydrogen)

3. Partenariats typiques

- > La majorité des manufacturiers de grande taille développent des **partenariats stratégiques avec des fabricants de sous-composants** (Chart, Tissot Industrie, etc.)
- > Des partenariats se forment pour fournir des **solutions d'infrastructures d'avitaillement hydrogène clés en main** (Fluitron et Ara Partners, Charbone et Resato Hydrogen Technology, Matrix Service et Chart...etc)

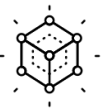


Projets manufacturiers majeurs*

 Chart Industries États-Unis, Europe, Asie 800 réservoirs produits	 Air Products États-Unis, Chine, Inde 250 stations déployées	 Linde Chine 200 stations déployées	 Plug Power États-Unis +60 stations déployées
--	--	---	---

*L'application la plus répandue pour les réservoirs stationnaires et qui connaîtra la plus grande croissance est l'utilisation de ces équipements pour le stockage dans les stations H₂. La capacité des acteurs majeurs a alors été analysée sous cet angle.

Positionnement des acteurs & vision Québec | Réservoirs stationnaires



Les acteurs clés des réservoirs stationnaires se démarquent par leur capacité à fournir des solutions clés en main pour des applications d’avitaillement; ce large spectre de services leur offre un avantage compétitif important par rapport aux autres manufacturiers. Au Québec, bien que **la demande pour les réservoirs stationnaires se développe, peu de joueurs ont été identifiés** comme capables d’installer des capacités manufacturières conséquentes.



Observations sur le segment des réservoirs stationnaires



Analyse des acteurs clés



Chart Industries

5 200 employés
+ grosse capacité industrielle
(Capacité de stockage liquide élevée)



Air Products

19 275 employés
98 sites manufacturiers
Se développe avec partenariats (Cummins)



Linde

74 207 employés
73 sites manufacturiers
Se développe avec partenariats (Hyosung Corporation)



Observations

Les manufacturiers qui passent à l’échelle **intègrent d’autres segments d’équipements complémentaires de la chaîne de valeur**



Liquéfacteurs
Compresseurs
Contrôleurs de débit



Systèmes de purification
Stations H2



Électrolyseurs
Stations H2



Tendances du segment

Application principale– Majorité des acteurs développent des solutions pour le stockage dans les stations hydrogène

R&D – R&D très importante et produit non « fini » technologiquement d’où le développement de PME spécialistes et les travaux sur le stockage solide ou sous-terrain



Difficultés rencontrées

1. Robustesse des systèmes de sécurité	●●●●
2. Enjeux d’approvisionnement des composants	●●●○
3. Dynamique sur mesure pour l’intégration dans les applications	●●○○
4. Difficulté à anticiper la demande pour calibrer les capacités	●○○○



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, **6 acteurs balisés sont présents au QC mais la majorité opèrent hors-QC.**

Les entretiens réalisés ont souligné l’importance de sécuriser la chaîne d’approvisionnement locale au niveau des réservoirs stationnaires pour répondre aux besoins croissants en stockage.



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec



Produire des réservoirs sert la décarbonation du transport

Objectifs provinciaux de décarbonation

› La fabrication de réservoirs stationnaires au QC permettrait de consolider la chaîne d’approvisionnement (réservoirs présents sur toute la chaîne de valeur) pour les futurs projets (TES, Greenfield Global et stations qui seront déployées (Hydrolux).



Bien que la R&D soit dynamique, peu d’acteurs manufacturiers

Expertise R&D

› **La R&D est clé dans ce segment de marché** où il reste beaucoup de place à l’innovation technologique. Au QC, Plusieurs acteurs se démarquent au niveau des systèmes de sécurité des réservoirs: un enjeu technologie important (AS Devices)

Manufacturier

› Quelques acteurs présents mais avec des chaîne de production hors-QC (Europe et États-Unis)

Importance relative des indicateurs





2.H. Piles à combustible

Analyse de l'écosystème | Portrait global des piles à combustible

Les piles à combustible combinent l'H₂ et l'O₂ pour produire de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Les piles à combustible peuvent être construites pour répondre à diverses spécifications ou besoins énergétiques, allant de **quelques watts à plusieurs mégawatts de puissance**. Il existe **trois marchés principaux** pour la technologie des piles à combustible : **l'usage stationnaire** (génératrice de secours pour centre de données, hôpitaux, gestion de pointe hivernale, etc.), **les transports** (véhicules légers et lourds) et **les applications portatives** qui concerne tous les usages portables (fourniture d'électricité dans régions éloignées, vente aux particuliers, etc.)

MCS

Inox (Nickel)

Platine

Cobalt

Graphite

Cellule

Plaque terminale

Électrode

Membrane

Plaque bipolaire

Techno.	NMT	Avantages	Difficultés
PEMFC	9	Temp. faible Réponse rapide	Catalyseur cher Sensible impureté
AFC	Mature	Peu de MCS	Sensible au CO ₂
PAFC	Moyen	Tolérance impureté	Réponse lente
MCFC	Faible	Forte efficacité	Corrosion
SOFC	9	Complémentarité électricité/chaleur	Réponse lente Corrosion composants

Technologies (Actuelles et futures)

Perspectives R&D

> **Efficacité**: améliorer l'efficacité des PAC (aujourd'hui de l'ordre de 60% pour les PEMFC et SOFC, et de 40% pour les PAFC)

> **MCS**: trouver des catalyseurs alternatifs au Platine

> **Matériaux** : développer une alternative aux PFAS (présentement en discussions pour être interdits en Europe, regardés de près aux ÉU et au Canada)

> **Modélisation** : simulation des coûts totaux de possession

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$12 Mds en 2028

Le marché devrait passer de \$4,4 Mds en 2023 à \$12 Mds à 2028 avec un TCAC de 21,7%

Principales applications

Les usages stationnaires sont les plus développés et devraient le rester, portés par la demande des centres de données. Le deuxième marché se développant rapidement est celui de la mobilité H₂

Technologie dominante

Les piles à combustible PEM représentent la majorité des usages, notamment car elles peuvent être utilisées dans les 3 marchés des PACs

Évolutions régionales du marché

\$3,5 Mds

\$4,4 Mds

\$12 Mds

2022

2023

2028

Asie

Europe

Amérique du nord

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

Le Québec positionne plusieurs applications des piles à combustible comme étant prioritaires pour l'hydrogène : le stockage saisonnier, le remplacement des génératrices diesel et le camionnage longue distance de classe 8

Étude Propulsion Québec

Dans son étude publiée en 2023, Propulsion Québec réaffirme l'intérêt pour les camions lourds et longues distances H₂

Des projets en cours

Le projet d'Hydrolux prévoit 7 stations H₂ et 20 camions H₂ sur la route 117 (Hydrolux). First H₂ souhaite développer des activités manufacturières à Shawinigan

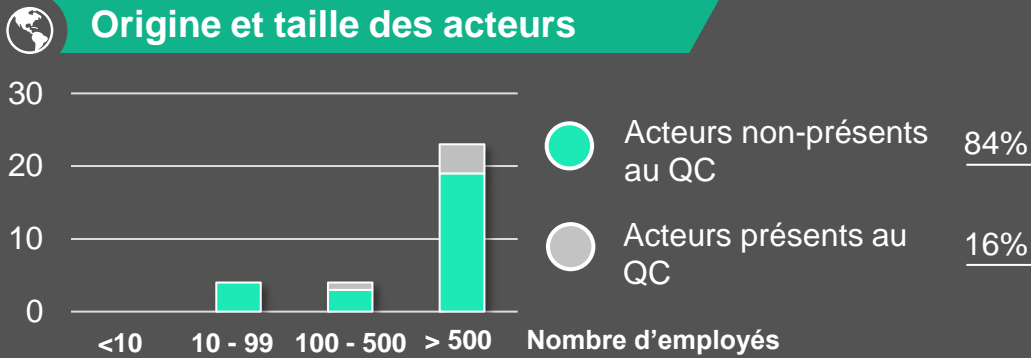
Les besoins de R&D sont importants

Plusieurs acteurs québécois ont été identifiés comme ayant une expertise transposable aux piles à combustible: CNRC, INRS, Polytechnique de Montréal

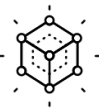
*Incluant la compression de l'hydrogène pour les systèmes gazeux de 10 à 55 MPa et la liquéfaction pour les systèmes liquides

Projets et acteurs en présence

Piles à combustible



Positionnement des acteurs & vision Québec | Piles à combustible



Longtemps resté un marché de niche, celui des piles à combustible se développe rapidement porté par la demande pour la mobilité et les systèmes d'alimentation de secours, **poussant plusieurs acteurs à se positionner en rachetant des PME spécialisées**. Au Canada, Ballard est un acteur clé, présent **dans la majorité des projets nécessitant des piles à combustible au Québec** (First H₂, etc.). C'est un segment dont le développement est largement relié aux objectifs fixés par le DOE notamment en termes de coûts.

Observations sur le segment des piles à combustible



Analyse des acteurs clés



HTWO | PEMFC

105 000 employés
Développe sa filière PAC en étroite collaboration avec Kia et Gore (pour les membranes)



Bloom Energy | SOFC

2530 employés
Propose des systèmes d'urgence SOFC pour les hôpitaux et centres de données



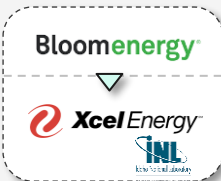
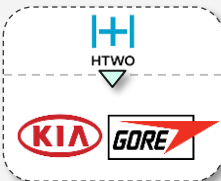
Ballard | PEMFC

1300 employés
Produit la majorité de ses sous- composants (dont les membranes)



Partenariats développés

Les manufacturiers qui passent à l'échelle se regroupent avec des acteurs de la mobilité pour bâtir des solutions H₂ complètes



Autres observations sur le segment

MCS – Les manufacturiers ont une connaissance fine des enjeux liés aux MCS, Bloom s'est engagé à fournir un rapport pour donner de la visibilité sur ces sujets



Difficultés rencontrées

1. Présence de **main-d'œuvre qualifiée et formée**



2. **Difficulté d'approvisionnement de composants critiques**



3. **Absence d'infrastructures d'avitaillement d'H₂**



4. Risque de **dépassement technologique**



Secteur très dynamique – Les positionnements des acteurs sur ce secteur sont pour la plupart très récents (Kohler, Airbus etc...) et les objectifs de production très importants



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Sur les 3 acteurs balisés qui opèrent au QC, aucun **n'a de chaîne manufacturière présente au Québec**. Au Canada, **Ballard est un chef de file du développement des piles à combustible** et s'est dit intéressé pour éventuellement s'implanter au Québec **dans le cas où une demande importante le justifierait**. Au QC, les usages mobiles des PAC se justifient pour les trains ou camions de classe 8.



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec



Les centres de données et le camionnage tirent la demande

Objectifs de la stratégie H₂ québécois

- > Les PACs sont utilisées dans des applications qui sont prioritaires dans la stratégie hydrogène le remplacement des génératrices diesel, la gestion de pointe hivernale et le transport lourd par camion de classe 8.
- > Les bus ne semblent pas faire partie des applications prioritaires



Au Québec l'écosystème R&D est dynamique

Expertise R&D

- > Le CNRC, l'INRS, l'UQTR et l'École Polytechnique de Montréal sont des potentiels acteurs de la R&D sur le segment des piles à combustible

Manufacturier

- > Peu d'acteurs présents au Québec qui pourraient développer des activités manufacturières localement

Importance relative des indicateurs





2.I. Équipements industriels

Analyse de l'écosystème | Portrait global des équipements industriels

L'H₂ est utilisé dans de nombreux procédés industriels : les raffineries, l'industrie chimique, etc. Cette étude se concentre sur deux nouvelles applications, **l'acier vert et les carburants de synthèse**. Ces derniers sont obtenus en **combinant l'H₂ et le CO₂** et sont à faibles émissions lorsque l'hydrogène est produit à partir d'électricité décarbonée. **Différents types de carburants peuvent être produits** à partir de cette combinaison : méthanol, méthane, ammoniac, etc. Ils devraient jouer un rôle important dans la décarbonation des transports selon l'IEA. L'H₂ est aussi **prometteur pour la décarbonation des applications sidérurgiques**, en faisant réagir l'hydrogène directement avec le minerai de fer, on produit du fer et de l'eau à la place du fer et du CO₂. Bien que peu mature, **cette réduction du fer associée à un four à arc électrique permettrait de largement décarboner la production d'acier**.

MCS

Cobalt
Cuivre
Inox (Nickel)

CARBURANT DE SYNTHÈSE

Réacteur « Reverse
Water-Gas Shift »

Réacteur « Fischer-
Tropsch »

Réacteur à
réduction
directe

ACIER VERT
Four à arc
électrique

Équipements	Utilité
Réacteur « Reverse Water-Gas Shift »	Convertit le CO ₂ en CO, nécessaire à la synthèse de FT
Réacteur « Fischer-Tropsch »	Synthétise la molécule d'intérêt avec l'H ₂ et le CO
Réacteur à réduction directe	Réduit les minerais de fer de façon décarbonée (-jusqu'à 95% d'émissions CO ₂)
Four à arc électrique	Transforme les minerais de fer en acier à partir d'électricité

> **Production d'acier vert à partir d'H₂**: réduire les coûts de production (10-50% plus chers actuellement que version fossile selon IEA), sécurité des fours, corrosion et fragilisation de l'acier par l'H₂

> **Production de carburant de synthèse** : amélioration de l'efficacité des réactions de transformations de l'H₂/CO₂, nouvelles voies de réactions pour éliminer des étapes de conversion, développement des e-biofuels, capacité à gérer des flux intrants intermittents

Technologies

(Actuelles et futures)

Perspectives R&D

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

ACIER VERT

Analyses IEA

Passage à l'échelle

Vision Québec

Des projets en cours pour déployer l'H₂ vert

CARBURANT DE SYNTHÈSE

Analyses IEA

Molécule dominante

Dans sa feuille de route 2020 (scénario « SDS ») l'IEA mentionne que plus de 8% de la production d'acier mondiale proviendra d'un système utilisant l'H₂ vert comme agent réducteur (12Mt H₂/an)

La course est engagée entre les producteurs d'acier pour se positionner rapidement sur ces nouvelles technologies avec des projets à large échelle annoncés en Europe, en Amérique du Nord et au Japon

Dans son étude publiée en décembre 2023, l'IEA propose des scénarios d'intégration des carburants de synthèse allant **jusqu'à 10% des carburants** de l'aviation, du maritime et du routier

Selon les projets annoncés, sur les 14Mt de carburants de synthèse produits à 2030, plus de **90% devraient être sous forme d'ammoniac**, 4% de méthane, 1% de méthane et 5% autres

Le Québec a identifié l'utilisation d'H₂ dans les procédés industriels et les carburants de synthèse comme étant **les deux applications à prioriser**

H2Green Steel est en discussion actuellement avec le QC pour développer une usine de 3Mds à 6 Mds de \$.

Arcelor Mittal a testé jusqu'à 7% d'H₂ dans son réacteur à Contrecoeur, mais ses usines **sont trop vieilles** au QC pour développer l'H₂ à grande échelle

Mauricie – TES Canada. 150 Tep de méthane de synthèse pour injection dans le réseau de gaz naturel

Montréal – SAF+. 75 Tep d'e-kérosène pour l'aviation

Varennes – Enerkem. 105 Tep d'e-méthanol

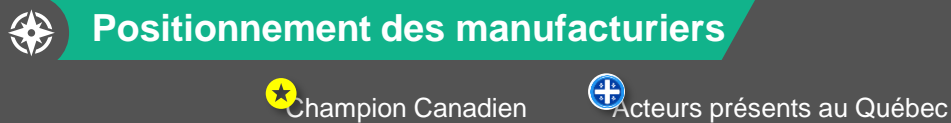
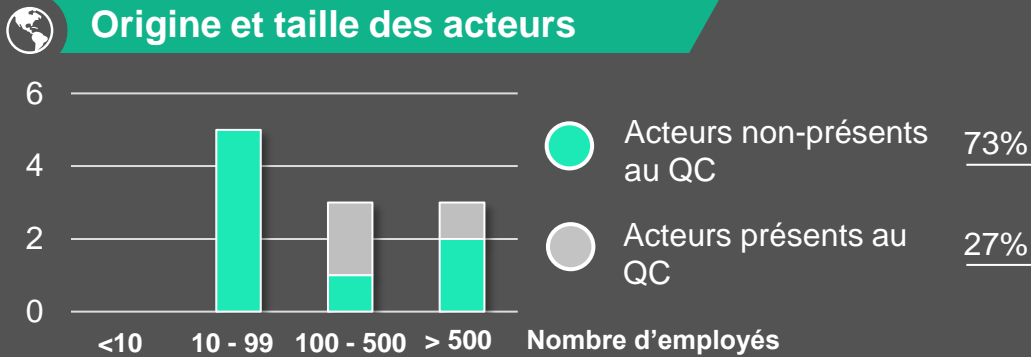
Baie-Comeau – Hy2Gen. 90 Tep d'e-ammoniac, pour les usages locaux.

Montréal – Greenfield. Production d'e-méthanol pour le transport maritime.

*Toujours en développement, le prix des matériaux composites limite les applications commerciales

Projets et acteurs en présence

Équipements industriels



Typologie d'acteurs en présence

1. Typologie des acteurs

> Dans la course à l'acier vert, les grands équipementiers industriels de la sidérurgie développent et testent les solutions H₂. Peu d'acteurs se positionnent sur le segment du fait de la **grande complexité technologique** et la **forte intensité capitalistique**. Le segment est **dominé par des entreprises japonaises** (Midrex – 80% des réacteurs DRI, Primetals)

> Les entreprises des carburants de synthèse sont en majorité des TPE/PME (<100 employés) en développement.

2. Positionnement sur la chaîne de valeur H₂

> Les acteurs développant des solutions pour l'acier vert **sont toujours des spécialistes** qui se concentrent sur le segment des équipements industriels.

> De la même manière, la totalité des acteurs se positionnant sur les carburants de synthèse **sont des spécialistes** à l'exception de Sunfire qui produit également des électrolyseurs

3. Partenariats typiques

> Les joueurs de l'industrie sidérurgique se regroupent pour développer des **écosystèmes complets** (ex : Primetals – Engie - Forvia); et avec des **acteurs majeurs des énergies renouvelables** (Ex: H2Green Steel - Primetal – Iberdrola; LKAB – SSAB - Vattenfall) pour la production d'H₂ vert.

> Les entreprises du secteur des carburants de synthèse se regroupent en consortium avec des **producteurs d'énergie renouvelable, d'hydrogène vert, des porteurs de projets et des fournisseurs technologiques** (électrolyseurs, etc.) pour **compléter les expertises et partager les risques** sur ces premiers projets.

Projets manufacturiers majeurs

Primetals

Sutton, Worcester

+4 usines de production d'acier vert fournies (Russie, US)

Midrex

Etats-Unis

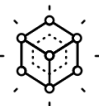
+100 modules de DRI déployés mondialement (80% des DRI mondiaux)

Enerkem

Québec

+5 projets majeurs En Espagne, en Europe, aux US, au Canada

Positionnement des acteurs & vision Québec | Équipements industriels



Ces deux applications industrielles **sont récentes et se développent rapidement** car les marchés sont prometteurs. Des écosystèmes d'industriels se déploient pour lancer les premiers projets, **où les fournisseurs de technologies sont au premier plan**. Pour le Québec, **les enjeux de décarbonation sont majeurs**, et certains acteurs sont bien positionnés pour y répondre.

Observations sur le segment des équipements industriels



Analyse des acteurs clés



Primetals

7 000 employés
Impliqué dans la majorité des projets de production d'H₂ vert de grande ampleur (France, Suède)



Midrex

500 employés
Déploie 80% des DRI au monde. Complémentarité avec maison mère Kobe Steel



Enerkem

380 employés
Se développe rapidement et est très mature par rapport à son segment



Partenariats développés

Les manufacturiers se développent en construisant des **partenariats avec l'écosystème** pour monter les premiers projets.



Autres observations sur le segment

Modularité des solutions – La majorité des fabricants de réacteurs pour la production de carburants de synthèse sont capables de produire une grande diversité de molécules différentes

Maturité – Ce sont deux segments très jeunes et qui sont fortement soumis aux effets d'annonce dans lesquels il est compliqué de distinguer les projets qui verront le jour



Difficultés rencontrées

1. Fragilité du modèle d'affaire de la solution décarbonée	●●●●
2. Positionnement: fournisseur de liscense ou manufacturier	●●●●
3. Difficulté à anticiper la demande	●●●○
4. Passage à l'échelle de l'écosystème	●○○○



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue des manufacturiers, **quelques industriels opèrent déjà au Québec avec notamment les procédés Midrex qui sont utilisés à Contrecœur**; Par ailleurs, Enerkem propose sa solution technologique pour des **projets majeurs de conversion de déchets en carburant de synthèse (spécifiquement pour le méthanol)**



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec

Ces segments sont clés et prioritaires pour le Québec

Objectifs provinciaux de décarbonation

- > L'acier vert est une priorité pour le Québec – les industries métallurgiques comptant pour 29% des émissions de CO₂ soumises au SPEDE
- > Par ailleurs les carburants de synthèse répondent aux besoins de décarbonation de la chimie et du transport

La forte demande pourrait attirer des indutriels au Québec

Manufacturier

- > L'engouement général autour de l'acier et de carburants synthétiques pourrait justifier l'établissement d'un manufacturier au Québec, d'autant qu'Enerkem est déjà présent

R&D

- > Polytechnique Montréal et l'université de Sherbrooke ont des expertises dans les procédés de prod. de carburant de synthèse

Importance relative des indicateurs





2.J. Bus et camions H2

Analyse de l'écosystème | Portrait global des bus et camions à propulsion H₂

Les véhicules à propulsion hydrogène sont souvent classés sous deux catégories: les **véhicules personnels** et les **véhicules commerciaux** comprenant les **véhicules moyens ou lourds**. Les véhicules commerciaux connaissent la commercialisation la plus importante en raison des plus longues distances parcourues et de l'efficacité moindre des véhicules conventionnels qui en font partie. Ce segment fait intervenir plusieurs technologies majeures dont **les piles à combustible, les moteurs à combustion hydrogène et les solutions de réhabilitation ou d'injection d'hydrogène**. Ce sont les **systèmes à circuits fermés** qui sont les plus intéressants. L'analyse suivante se **concentre sur le transport lourd**, qui présente une dynamique intéressante au Québec et plus particulièrement sur les **camions et bus à propulsion hydrogène**. **Le gouvernement du Québec a récemment annoncé la fin de son projet-pilote pour les véhicules légers à hydrogène** et aucun nouvel investissement pour ce type de véhicules n'est prévu.

MCS

Cuivre
Titane
Inox (Nickel)
Platine
Cobalt
Graphite

Batterie Lithium/ions

Moteur à combustion H₂

Réservoir embarqué

Châssis

Pile à combustible

Type	NMT	Besoin recharge rapide	Besoin autonomie	Pertinence vs VÉ	Technologies (Actuelles et futures)
Véhicules légers	9	+	+	-	
Bus	9	+++	++	++	
Camions	9	+++	+++	+++	

- Perspectives R&D
- > **Analyse du stress sur les composants:** R&D pour optimiser le transfert de l'hydrogène liquide ou gazeux à grand débit
 - > **Stockage liquide:** R&D pour développer le stockage liquide embarqué: densité de stockage prometteuse mais liquéfaction énergivore & évaporation

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$1,3 milliards en 2023

Une demande majoritaire

Amérique du Nord

Japon et Corée du Sud

Europe

Le marché des véhicules à propulsion H₂ connaîtra un TCAC de 47,9% entre 2024 et 2030

95% de la demande en hydrogène par volume résultera des véhicules commerciaux. Les véhicules moyens et lourds prévus d'avoir la part de marché la plus élevée à horizon 2050.

En 2022, part de 8% du marché qui va continuer d'augmenter: partenariats et support gouvernemental (ex: Projet AZETEC & Edmonton Hydrogen Hub)

Tendance différente: l'hydrogène pour les véhicules personnels fortement subventionné et manufacturiers dirigent le marché avec leurs technologies éprouvées; Densité de population élevée

Un leader en termes de volumes de véhicules: avec plus de 850 000 véhicules hydrogène à poids moyen et lourd d'ici 2035

Vision Québec

Étude Propulsion QC

Le segment des camions à H₂ est dynamique...

... mais les bus sont concurrencés par les VÉ

Un manque d'infra.

Un écosystème manufacturier niche

Les camions lourds (classe 8) représentent un fort potentiel de décarbonation; L'étude ne fait pas mention des bus qui sont surtout ciblés par des objectifs ambitieux d'électrification pour le moment

Des projets/annonces démontrent la dynamique du secteur au QC : **5 camions H₂** en opération en 2026 (Harnois Énergies) et **7 stations H₂** et **20 camions H_s** sur la route 117 (Hydrolux)

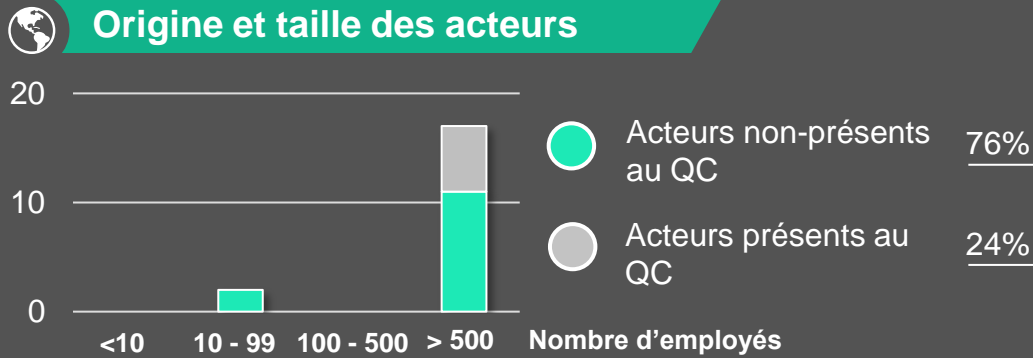
Il n'y a pas de projets annoncés pour les bus à hydrogène au QC malgré la présence de manufacturiers (PACCAR, Prevost)

Le manque d'infrastructure d'avitaillement est un frein à l'adoption des véhicules à propulsion hydrogène; à ce jour on ne compte qu'une seule station au QC, pour des véhicules légers.

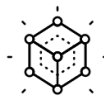
Deux projets manufacturiers annoncés à ce jour: First Hydrogen à Shawinigan (assemblage de véhicules et production d'hydrogène) et Prevost à Bellechasse

Projets et acteurs en présence

Bus et camions à propulsion H₂



Positionnement des acteurs & vision Québec | Bus et camions à propulsion H₂



Les acteurs clés de ce segment se démarquent par leur capacité à former des **partenariats pour sécuriser les chaînes d’approvisionnement sur les composants clés** pour les bus et camions (piles à combustible, réservoirs, moteurs à combustion). Au Québec, bien que **la mobilité lourde H₂ présente une dynamique intéressante** et que certains **joueurs ont été identifiés** comme capables de produire ces équipements à grande échelle, la demande demeure faible.

Observations sur le segment des bus et camions H₂



Analyse des acteurs clés



Hyundai

278 735 employés
+ grosse capacité industrielle
(1000 camions déployés à ce jour)
Produit les piles à combustibles



New Flyer

8000 employés
5 sites manufacturiers
(Commande de 108 camions)
Produit les réservoirs



Nikola

1 500 employés
1 site manufacturier
(Commande de 50 camions)
Se développe par partenariat



Partenariats développés

Les manufacturiers qui passent à l’échelle travaillent de pair avec les fournisseurs d’équipements annexes ou les produisent eux même. D’autres, comme Nikola établissent des partenariats avec des manufacturiers de stations pour fournir des solutions clés en main à leurs clients.



Autres observations sur le segment

Complémentarité avec les VÉ – Dans les objectifs gouvernementaux pour la décarbonation des transports, des objectifs chiffrés et ambitieux sont présentés pour les VÉ. Le potentiel de décarbonation de l’hydrogène est reconnu mais des objectifs clairs restent à définir.



Difficultés rencontrées

1. Modèle d'affaires en construction	●●●●
2. Manque d'infrastructures d'avitaillement	●●●○
3. Performance et usure des équipements annexes	●●○○
4. Capacité des joueurs de l'écosystème à passer à l'échelle	●○○○



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, **3 acteurs balisés opèrent au QC**: First Hydrogen à Shawinigan, PACCAR à Sainte-Thérèse et éventuellement Prevost à Bellechasse (ambition de s’orienter vers l’hydrogène) même si leurs dynamiques de croissance sont portées par des projets hors-QC (Los Angeles, Londres, New York). Les entretiens réalisés ont permis d’identifier First Hydrogen comme **intéressée de développer des activités manufacturières** au Québec.



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec

Produire des camions et bus sert la décarbonation du transport

Objectifs provinciaux de décarbonation

- > Le gouvernement du Québec a pour objectif de réduire ses émissions de GES de 37,5% d’ici 2030 et le transport compte pour **44% de ces émissions**.
- > Par ailleurs la stratégie provinciale pour l’H₂ verte identifie le transport lourd comme débouché de **priorité moyenne** pour l’H₂.

Une dynamique émergente

- > **Bus et/ou camions H₂?** Les projets et études de faisabilité se concentrent sur le segment des camions pour des applications à l’H₂; Aucun projet de bus H₂ n’a été annoncé au QC; dynamique à suivre (présence de Prevost)
- > **Manufacturier:** Plusieurs acteurs capables de produire des bus et camions H₂ et dynamique émergente, mais les classes 8 ne sont pas privilégiées pour le moment (exemple: First Hydrogen – future usine d’assemblage à Shawinigan)

Importance relative des indicateurs





2.K. Compresseurs

Analyse de l'écosystème | Portrait global des compresseurs

Les technologies de compression d'hydrogène se distinguent en deux catégories: **mécanique et non-mécanique**. La première catégorie regroupe les compresseurs alternatifs, à diaphragme, ioniques et liquides. La deuxième catégorie regroupe les compresseurs cryogéniques, à hydrures de métal, électrochimiques et à adsorption. **Les compresseurs mécaniques sont les plus fréquemment utilisés aujourd'hui**. Le segment des compresseurs connaît une **évolution dynamique**: la méthode la plus répandue de stockage-livraison d'hydrogène est la compression suivie de la livraison par camions surtout pour les petites stations et les faibles demandes. Des efforts continus sont alors déployés pour améliorer les technologies de compression. D'autre part, les compresseurs sont nécessaires à chaque étape de la chaîne de valeur de l'hydrogène.

MCS

Titane
Inox (Nickel)

Piston
Cylindre
Disque
Pompe
...

Valves

Paroi

Type	NMT	Efficacité*	Applications
Alternatifs	9	45%	Haute pression
Diaphragme	9	45%	Faible débit
Linéaires	9	>70%	Aérospatiale
Ioniques	9	70%	Stations H2
Cryogéniques	9	25-50%	Liquide
Hydruure de métal	7	25%	Exothermique
Électrochimiques	7	60%	Gazeux
Adsorption	7	-	Solide

Technologies
(Actuelles et futures)

FUTUR

Perspectives R&D

> **Étanchéité des systèmes de sécurité**: la maintenance des valves et pistons pour éviter les fuites dans les compresseurs représente environ 90% des coûts d'opération

> **Efficacité des systèmes hydrures de métal et électrochimiques**: R&D nécessaire pour réduire la consommation énergétique afin d'améliorer l'efficacité

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$2,3 milliards en 2024

TCAC de 5,28% à l'horizon de 2029

Compresseurs mécaniques: plus grosse part de marché en termes de revenus en 2022 et tendance qui se poursuivra jusqu'en 2029

Pétrolière et gazière

Part de marché la plus élevée en 2022

Application la plus courante pour les compresseurs hydrogène à horizon 2032

Amérique du Nord

États-Unis: marché qui connaît la croissance la plus importante

Croissance expliquée par la demande grandissante dans les procédés de raffinage

Europe

Utilisation importante des compresseurs hydrogène dans les applications d'énergies renouvelables soutenues par les gouvernements

Asie Pacifique

Dominance du marché: politiques gouvernementales favorables pour les manufacturiers en Chine, au Japon et en Inde

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2022

Le Québec positionne l'hydrogène comme une alternative prometteuse pour décarboner plusieurs secteurs

Compresseurs essentiels pour ces applications

Un équipement qui se retrouve sur toute la chaîne de valeur

Les compresseurs sont utilisés à travers l'ensemble de la chaîne de valeur

Leur développement au Québec pourrait répondre aux projets récents annoncés et attirer de nouveaux projets

Un écosystème manufacturier niche

À ce jour, aucun manufacturier de compresseur n'a été identifié au QC comme capable de produire cet équipement à grande échelle

Expertise présente au QC

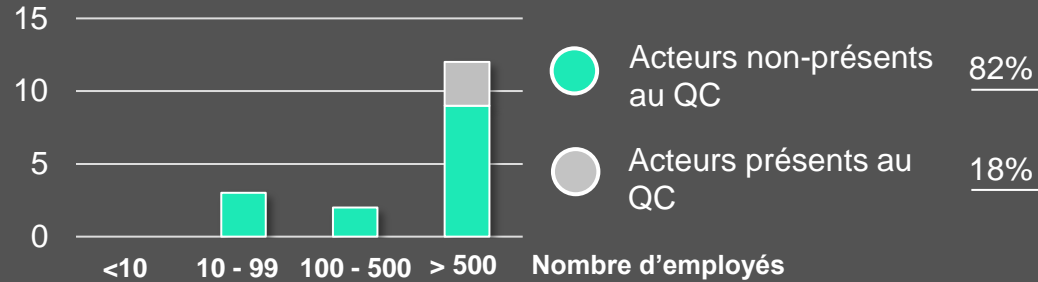
Expertise de pointe autour de la compression électrochimique détenue et démontrée par le CNRC en 2003

*Efficacité de compression évaluée pour un système de compression de 10 Mpa à 87.5 Mpa et un débit d'hydrogène de 100 kg/h;

Projets et acteurs en présence



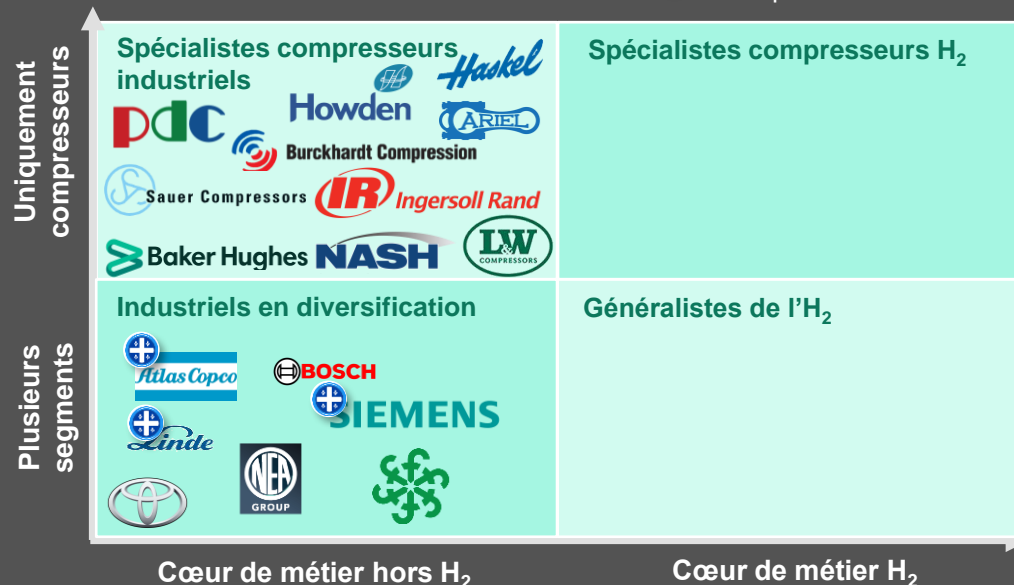
Origine et taille des acteurs



Positionnement des manufacturiers



Acteurs présents au Québec



Compresseurs H₂



Typologie d'acteurs en présence

1. Typologie des acteurs

- > Les typologies d'acteurs que l'on retrouve majoritairement sur ce segment sont des **manufacturiers de compresseurs industriels dont le cœur de métier n'est pas l'hydrogène, et quelques multinationales** déjà impliquées dans la chaîne de valeur de l'hydrogène qui se positionnent sur le segment des compresseurs (Linde, Siemens, Bosch...)
- > Aucun acteur dont le cœur de métier est l'hydrogène n'a été identifié; la compression hydrogène est compliquée technologiquement: barrière à l'entrée pour les généralistes

2. Positionnement sur la chaîne de valeur H₂

- > La majorité des acteurs sont des **spécialistes de compresseurs hydrogène** qui ne développent pas d'autres solutions hydrogène (Baker Hughes, Howden, PDC Machines...)
- > La majorité des acteurs sont des **assembleurs** de compresseurs avec quelques acteurs qui produisent également les **sous-composants** (Ariel Corporation et Burckhardt: cylindres de compression)

3. Partenariats typiques

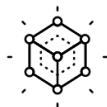
- > La majorité des manufacturiers développent des **partenariats stratégiques avec les usagers finaux** (Howden & Everfuel, Bosch & Maximator Hydrogen, PDC Machines & Hynion)
- > Des partenariats se forment aussi pour **développer des solutions de compressions qui répondent à des applications spécifiques**: Mobilité pour les stations à capacité et pression élevées (Ariel Corporation & Hoerbiger); Liquéfaction (Atlas Copco & Plug Power)



Capacité des principaux manufacturiers identifiés

Siemens Inde, États-Unis, Allemagne, Suède 2500 compresseurs H ₂ livrés	Baker Hughes Australie, Asie, Europe, États-Unis, Moyen-Orient 2000 compresseurs H ₂ livrés	PDC Machines Europe, Amériques, Océanie 2000 compresseurs H ₂ et autres gaz livrés	Howden Australie, Europe, Asie, États-Unis, Pays-Bas, Royaume-Uni, République Tchèque 1500 compresseurs livrés H ₂ et autres gaz
---	---	--	--

Positionnement des acteurs & vision Québec | Compresseurs H₂



Les acteurs clés capables de se positionner sur ce segment se démarquent par leur expertise technologique très spécifique. Il s'agit d'un secteur critique avec un procédé de manufacture complexe technologiquement. Au Québec, bien que **la filière se développe et que les applications faisant intervenir les compresseurs se multiplient, peu de joueurs ont été identifiés** comme capables d'installer des capacités manufacturières conséquentes.



Observations sur le segment des compresseurs



Analyse des acteurs clés



Siemens

92 000 employés
+ grosse capacité industrielle
2 lignes de produits bien référencées (alternatifs et turbocompresseurs)



Baker Hughes

55 000 employés
10 sites manufacturiers
Se développe avec partenariats (Air Products et Terna)



PDC Machines

1 350 employés
3 sites manufacturiers
Expertise en compression hydrogène depuis 1992



Partenariats développés

Les manufacturiers qui passent à l'échelle **travaillent de pair avec les usagers finaux.**

SIEMENS

Linde

22 compresseurs alternatifs fournis

Baker Hughes

GEK TERNA

AIR PRODUCTS

PDC

HyNion



Autres observations sur le segment

Secteur peu mature – Compresseur: équipement critique; Plusieurs acteurs sont encore en phase de test engendrant des obstacles dans d'autres maillons de la chaîne

Choix technologique risqué – Les manufacturiers prennent un risque élevé en se spécialisant dans une technologie de compression spécifique



Difficultés rencontrées

1. Modèle d'affaires à consolider



2. Durabilité des composants (valves et piston)



3. Choix d'une technologie de compression à produire à grande échelle



4. Capacité des joueurs de l'écosystème à passer à l'échelle



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, **seuls 3 acteurs balisés sont présents** au QC : Siemens, Linde et Atlas Copco avec des activités majoritairement hors-QC. Ce segment n'est pas spécifique à l'hydrogène et intervient dans des applications pour d'autres gaz également.



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec



Un équipement critique de la chaîne de valeur

Objectifs provinciaux de décarbonation

- > La filière de l'hydrogène connaît une évolution dynamique avec plusieurs projets qui s'annoncent
- > Les compresseurs sont essentiels à plusieurs applications sur l'ensemble de la chaîne de valeur allant de la production à l'utilisation



Bien que la R&D soit dynamique, peu d'acteurs manufacturiers

La compression électrochimique

- > Au QC, le CNRC se démarque dans la démonstration des technologies de compression électrochimique; des collaborations avec les manufacturiers permettraient de passer à l'état de commercialisation

Manufacturier

- > Peu/pas d'acteurs QC identifiés capable de produire des compresseurs à grande échelle

Importance relative des indicateurs





2.L. Robinetterie


Analyse de l'écosystème | Portrait global de la robinetterie

Le segment de la robinetterie regroupe plusieurs types d'équipements: **valves, raccords et joints, robinets, adaptateurs, clapets, brides et accessoires**, etc. Ce sont des équipements typiquement utilisés dans les procédés industriels conventionnels mais qui doivent être adaptés à l'hydrogène (très volatile et qui réagit avec les matériaux) en leur conférant une **meilleure étanchéité**. Dans la majorité des étapes de la chaîne de valeur, ces composants sont utilisés pour assurer la sécurité et la qualité des opérations. Les grands enjeux autour de ces équipements sont donc d'utiliser **des matériaux résistants aux effets de corrosions de l'H₂ et de réduire les fuites d'H₂**. Aujourd'hui, il n'existe pas de cadre global qui régit les certifications de ces équipements dans les applications à l'hydrogène.



Équipement	Utilité
Valves	Contrôler le débit d'hydrogène
Raccords	Connecter les tuyaux
Robinets	Couper le débit d'hydrogène
Joints	Assurer l'étanchéité
Clapets	S'opposer au passage de l'hydrogène dans un conduit

- Perspectives R&D
- > **Fabrication Additive: Réparabilité des systèmes INOX fragilisés** à des hautes pressions à cause de la corrosion et maîtrise des fuites et émissions fugitives
 - > **Robustesse des systèmes de sécurité:** R&D pour une conception au même niveau de sécurité que pour les autres applications industrielles
 - > **Résistance aux cycles de pression:** Développement pour améliorer la résistance aux cycles de pressions notamment pour les applications en canalisations



PERSPECTIVES DE MARCHÉ



Vision mondiale

\$5,6 milliards en 2027

Le marché de la robinetterie industrielle est en croissance due à une demande de plusieurs secteurs dont celui de l'hydrogène

Plusieurs marchés niches

Les manufacturiers de la robinetterie hydrogène ont de la difficulté à sélectionner un **segment d'application spécifique**
Le secteur d'application le plus desservi est celui du **transport**

Une attention particulière sur les valves


Des investissements d'un ordre de grandeur de centaines de millions de dollars sont prévus dans les valves pour des applications à l'hydrogène

Europe

Pionnier dans la standardisation; **Comité Européen pour la standardisation:** standards en développement pour les valves hydrogène

Une certification émergente

Plusieurs acteurs se dotent de la **certification FE «Fugitive Emissions»** au méthane ou à l'hydrogène



Vision Québec

Une réglementation à développer

Le développement d'un standard au QC pour permettre la **manufacture à grande échelle**. Le **BNQ et le CSA** travaillent actuellement à l'**élaboration de ces normes**

Équipements présents sur toute la chaîne

La robinetterie est utilisée à travers l'ensemble de la chaîne de valeur
Le développement de ce segment au Québec pourrait répondre aux besoins créés par les nouveaux projets annoncés et **solidifier la chaîne d'approvisionnement québécoise**

Expertise industrielle

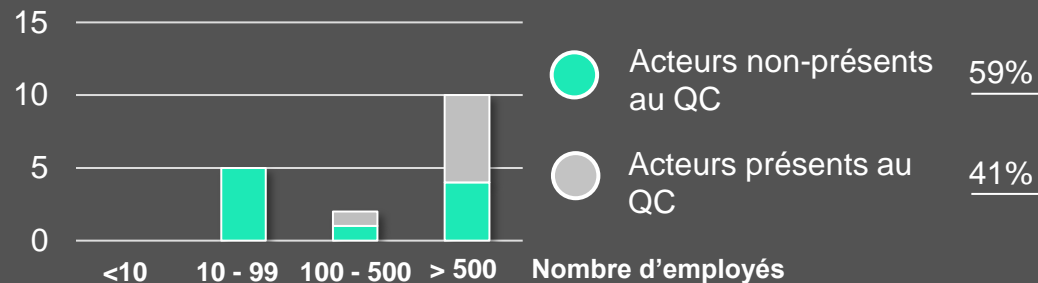
Expertise dans la robinetterie hydrogène détenue par **Velan, Swagelok, KSB et JC Valves**

Expertise R&D

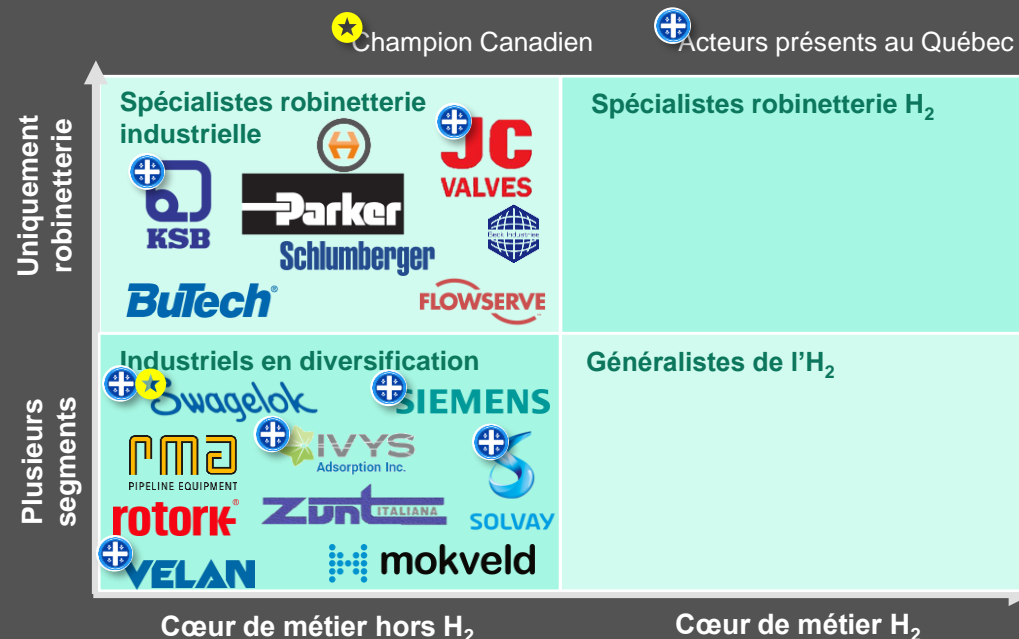
Expertise en **fabrication additive (CQFA)** et **plusieurs études** sur la corrosion par fragilisation de la robinetterie (ex: **IBECA, McGill & CMQ**),

Projets et acteurs en présence

Origine et taille des acteurs



Positionnement des manufacturiers



Robinetterie



Typologie d'acteurs en présence

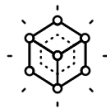
- 1. Typologie des acteurs**
 - > Les typologies d'acteurs que l'on retrouve majoritairement sur ce segment sont des **industriels en diversification dont le cœur de métier n'est pas l'hydrogène**; Les **capacités manufacturières en robinetterie spécifiques à l'hydrogène** des acteurs sont alors fortement liées à leurs capacités manufacturières pour d'autres gaz
- 2. Positionnement sur la chaîne de valeur H₂**
 - > La majorité des acteurs sont des **spécialistes de robinetterie hydrogène** qui ne développent pas d'autres solutions hydrogène (KSB, SLB, JC Valves, Mokveld Valves...)
 - > Lorsque les acteurs de la robinetterie se diversifient, ils se trouvent sur le segment d'instrumentation sur la chaîne de valeur de l'hydrogène (actuateurs, actionneurs, etc.)
 - > **La majorité des manufacturiers en robinetterie hydrogène se positionnent sur les valves (77%)** qui connaissent une demande importante dans ce segment grâce au développement de plusieurs applications où elles sont indispensables (ex: stockage stationnaire ou embarqué)
 - > Plusieurs acteurs fournissent des **services d'opération et maintenance pour la robinetterie** (KSB, SLB, Parker...)
 - > **Solvay a été identifié comme spécialiste dans les polymères pour les valves**
- 3. Partenariats typiques**
 - > La majorité des manufacturiers développent des **partenariats stratégiques avec les usagers finaux** (Rotork Motorisation & H2Gen; Swagelok & Everfuel)
 - > Des partenariats se forgent aussi pour **développer de nouvelles technologies pour l'hydrogène** (SLB en partenariat avec CEA ont développé Genvia pour la conception d'un électrolyseur SOEC)



Capacités manufacturières majeures

Schlumberger États-Unis, Norvège, Japon, Canada, Royaume-Uni, Chine Valves; Opération dans 120 pays	Swagelok +70 pays Valves et raccords; 20 sites manufacturiers; 5 centres technologiques	Flowserve + 50 pays Joints; 206 sites manufacturiers et de services	Ivys (Xebec) Québec Valves; 9 sites manufacturiers; 17 centres de services
--	--	--	---

Positionnement des acteurs & vision Québec | Robinetterie



Le passage à l'échelle dans ce segment est freiné par l'absence de standardisation qui crée une dynamique de marché sur-mesure. Il s'agit d'un segment facile à externaliser pour les acteurs sur la chaîne de l'hydrogène grâce aux capacités existantes qui répondent à leurs besoins. Le Québec est en position de répondre aux besoins actuels des manufacturiers **mais est limité par une demande encore relativement faible par rapport aux États-Unis qui se démarquent par les capacités manufacturières les plus élevées.**

Observations sur le segment de la robinetterie



Analyse des acteurs clés



Schlumberger | Valves

99 000 employés
Se développe en créant des partenariats pour consolider son expertise H₂



Swagelok | Valves et raccords

5 500 employés
Forte présence au QC
Brevets sur la conception des raccords FK compatibles H₂



Flowserve | Joints

16 000 employés
Se développe par acquisitions pour élargir son portfolio de produit et ses capacités manufacturières



Partenariats développés

Les manufacturiers se développent souvent grâce à des **projets de grande ampleur**

Schlumberger

Projet de production d'hydrogène par techno. SOEC



Swagelok

Everfuel
Fourniture de raccords
Projet HySynergy

FLOWERVE

AUDCO INDIA LIMITED
Acquisition
VELAN
Acquisition stoppée



Autres observations sur le segment

Certifications – Bien que le cadre normatif reste flou au niveau de ce segment, les acteurs se dotent de certifications comme avantage compétitif



Difficultés rencontrées

1. Durabilité des composants

2. Difficulté à anticiper la demande pour calibrer les capacités

3. Difficulté à sélectionner un segment particulier

4. Manufacture sur mesure et manque de standards

Acquisitions – Les acteurs se développent également par acquisitions pour élargir leur portfolio de produits en robinetterie H₂ et augmenter leurs capacités manufacturières (ex: Flowserve fait l'acquisition de Velan; acquisition stoppée par le gouvernement Français: valves critiques pour le secteur du nucléaire)



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, **plusieurs industriels opèrent au Québec: Swagelok, Siemens, Solvay, Velan et Ivys.** Il n'est pas clair si leurs activités manufacturières sont concentrées au QC. Les entretiens réalisés avec les industriels montrent l'importance de développer une **chaîne d'approvisionnement québécoise solide** au niveau des équipements secondaires et auxiliaires (dont la robinetterie).



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec



Répondre aux besoins et attirer les manufacturiers

- > Le développement d'un **écosystème manufacturier** au niveau de la robinetterie hydrogène permettrait de répondre aux besoins créés par les projets annoncés (TES, Greenfield Global, Hydrolux, etc.)
- > Par ailleurs, la présence de cette **chaîne d'approvisionnement** au QC pourrait attirer de nouveaux acteurs manufacturiers qui cherchent une bonne proximité avec les fournisseurs de composants



Un écosystème manufacturier dynamique

Expertise industrielle et technologique

- > Au QC, la **fabrication additive** peut répondre à l'enjeu de corrosion des composants de robinetterie
- > Plusieurs acteurs au QC identifiés capable de produire des équipements de robinetterie (JC Valves, Swagelok, Siemens...)
- > Des alliances entre chercheurs et industriels permettraient de développer l'écosystème manufacturier davantage

Importance relative des indicateurs

Faible



Élevé



2.M. Instrumentation

Analyse de l'écosystème | Portrait global de l'instrumentation

Pour **détecter les fuites d'hydrogène**, **automatiser les procédés de production** ou **s'assurer de la pureté du gaz**, les systèmes d'instrumentation sont nécessaires pour accompagner le développement de la filière H₂ en toute sécurité. Ils sont utilisés **pour améliorer l'efficacité des usines de production**, **réduire les coûts d'opération**, **prolonger la durée de vie** des usines et **garantir la qualité du produit fini**. Du fait de son inflammabilité, de son grand pouvoir de diffusion, qu'il soit inodore et sa flamme invisible, les procédés industriels utilisant l'H₂ doivent être particulièrement vigilants en termes de sécurité industrielle et donc s'appuyer sur des appareils fiables, robustes et adaptés aux spécificités de l'H₂.

MCS

Platine
Palladium
Graphène
Tungstène

Capteur

Actionneur

Analyseur

Équipements	Utilité	Exemples de techno.
Capteur	Détecter fuites, pressions ou températures trop élevées	Capteur optique Capteur électro-chimique
Actionneur	Ouvrir/fermer une valve ou un robinet à distance. Contrôler le débit	Valve pilotée par air (avec acier compatible H ₂)
Analyseur	Vérifier la qualité et les impuretés	Analyseur au plasma Chromatographie en phase gazeuse

> **Capteur** : diminuer coût et taille, améliorer précision et fiabilité, limite minimum de la concentration d'H₂ capable d'être détectée

> **Actionneur** : capacité à optimiser et automatiser complètement les procédés

> **Analyseur** : développer des solutions capables d'analyser la composition en temps réel

Technologies (Actuelles et futures)

Perspectives R&D

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$8,2 Mds en 2028

Le marché de l'instrumentation des gaz (pas uniquement H₂) devrait passer de \$6,3 Mds en 2023 à \$12 Mds à 2028 avec un TCAC de 5,6%

Principaux porteurs de croissance

Le développement de systèmes de sécurité plus performants, la prise de conscience croissante des impacts environnementaux des fuites de gaz (pouvoir réchauffement global du méthane et de l'H₂ très élevés) portent la dynamique de ce secteur

Point cruciale pour la sécurité

Le développement de canalisations 100% H₂, et d'utilisation/production d'H₂ en milieu confiné (voiture, usine, etc.) rend sa détection d'autant plus importante pour ne pas causer d'incidents industriels qui pourraient freiner la filière

L'Asie : principal marché potentiel

La croissance la plus importante se déroulera en Asie, portée notamment par l'industrialisation des pays et la mise en place de normes de sécurité internationales

Vision Québec

Une réglementation à développer

Le développement d'un standard au QC aiderait au déploiement de solutions à grande échelle. Le **BNQ** et le **CSA** travaillent actuellement à l'élaboration de ces normes

Équipements présents sur toute la chaîne

Les équipements d'instrumentation sont utilisés à travers l'ensemble de la chaîne de valeur
Le développement de ce segment au Québec pourrait répondre aux besoins créés par les nouveaux projets annoncés et **solidifier la chaîne d'approvisionnement québécoise**

Expertise industrielle

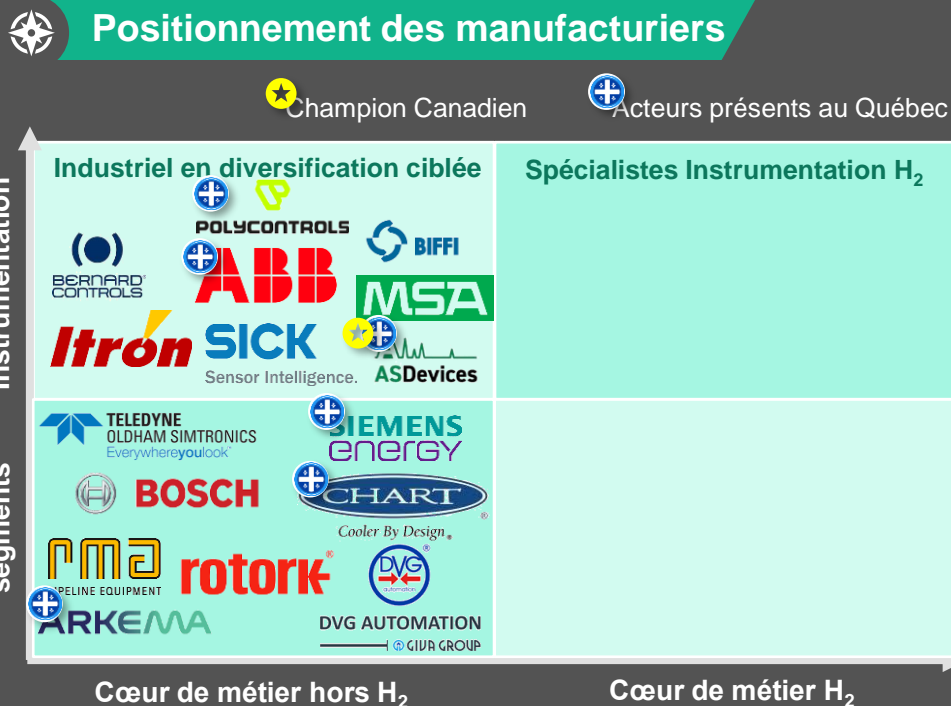
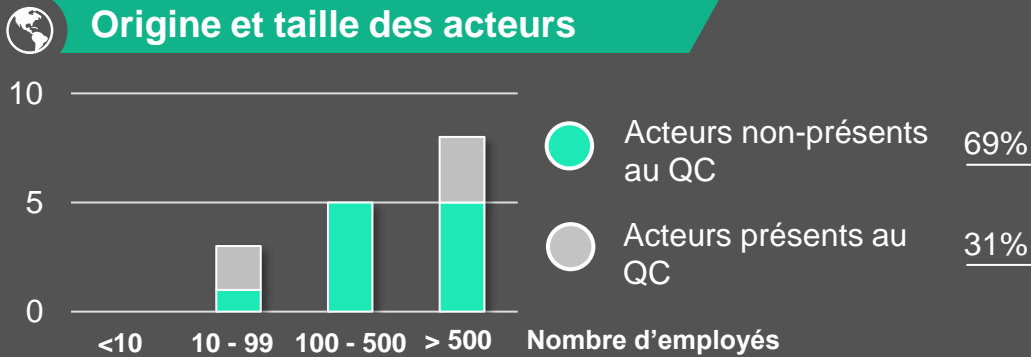
L'expertise dans l'instrumentation industrielle est détenue par Polycontrols, AS Devices et ABB au Québec

Expertise R&D

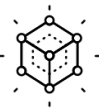
Expertise en détection de fuites H₂ à Polytechnique Montréal, et en capteurs à l'École de Technologie Supérieure et l'Université de Laval

Projets et acteurs en présence

Instrumentation



Positionnement des acteurs & vision Québec | Instrumentation



Le marché de l'instrumentation est tiré par la demande croissante au niveau de la **qualité et la sûreté des procédés à l'hydrogène**. Malgré le manque de standards, les acteurs se démarquent par la construction de modèles d'affaires solides en assurant une proximité avec les usagers finaux. Au QC, plusieurs acteurs sont présents mais la demande demeure faible et est très dépendante de la vitesse d'évolution de la filière hydrogène.

Observations sur le segment de l'instrumentation



Analyse des acteurs clés



ABB

105 000 employés

Se développe par des partenariats sur des projets d'hydrogène vert de grande échelle



Siemens Energy

92 000 employés

Propose des webinaires et études pour le partage d'expertise sur l'automatisation des procédés hydrogène



Chart

5 200 employés

Se développe en internalisant la fabrication d'instrumentation dans ses procédés de liquéfaction d'hydrogène



Partenariats développés

Les manufacturiers qui passent à l'échelle **sont ceux qui établissent des partenariats sur des projets de grande envergure sur l'hydrogène vert.**

ABB

Hydrogen Optimized
Green Hydrogen At Scale

SIEMENS energy

MUBADALA

CHART
Cooler By Design

8 RIVERS



Autres observations sur le segment

Tendance à la spécialisation— La spécificité technologique de ce segment fait que les acteurs ont peu tendance à se positionner sur d'autres segments de la chaîne manufacturière.



Difficultés rencontrées

1. Difficulté à anticiper la demande pour calibrer les capacités



2. Manque de standards et manufacture sur mesure



3. Course aux projets entre les acteurs clés



4. Mentalité à modifier au niveau du contrôle qualité



Des applications prioritaires — Une tendance observée dans la priorisation des applications de distribution et production d'hydrogène pour l'instrumentation qui portent la demande à ce jour.



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Sur les 5 acteurs balisés qui opèrent au QC, 3 possèdent une **chaîne manufacturière locale** (Arkema, Polycontrols et Siemens). Il s'agit d'un segment souvent externalisé par les manufacturiers de la filière. **AS Devices** au Québec se démarque dans son accompagnement de l'essor des stations hydrogène en offrant des analyseurs mobiles de pureté de l'hydrogène dans les stations d'avitaillement.



Intérêt pour le Québec



Capacité du Québec

Une demande encore faible pour justifier le développement d'un écosystème manufacturier

- > Les manufacturiers ont besoin d'une bonne visibilité sur la demande pour justifier l'implantation d'une usine de fabrication.
- > La demande demeure faible au QC et les acteurs clés sont capables de répondre aux besoins locaux en instrumentation à partir de leurs installations manufacturières hors-QC.
- > L'intérêt se justifierait avec une demande plus importante qui commence à se développer avec les nouveaux projets annoncés.

Capacité du Québec à répondre aux critères des manufacturiers

1. Nécessité d'une demande très forte localement	Faible
2. Présence d'infrastructures/espaces existants	Importante
3. Sous-traitants présents	Faible
4. Main-d'œuvre qualifiée	Moyenne

Importance relative des indicateurs

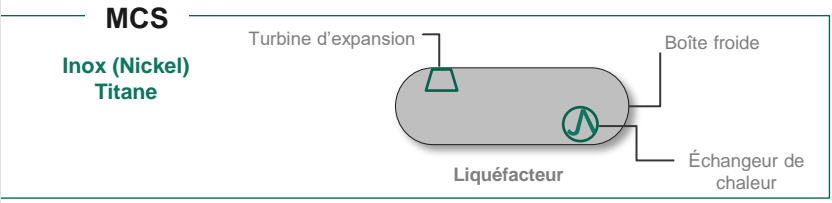




2.N. Liquéfacteurs H₂

Analyse de l'écosystème | Portrait global des liquéfacteurs H₂

Les liquéfacteurs sont des équipements qui permettent de **comprimer et refroidir l'hydrogène jusqu'à sa condensation** à un état liquide. Ils font partie des équipements **utilisés dans les procédés de liquéfaction** avec les compresseurs à piston, les unités de conditionnement et purification de l'hydrogène, les turbines d'expansion, et les réservoirs de stockage. L'hydrogène à l'état liquide a l'avantage d'être compact et plus facile à manipuler, il peut être stocké sans pressurisation avant son transport ou son utilisation. **L'ensemble de ces éléments poussent les manufacturiers à développer les technologies autour de l'hydrogène liquide** dont les liquéfacteurs pour des applications dans les véhicules à propulsion hydrogène, dans les stations hydrogène, et dans l'industrie aérospatiale. Cependant, **l'évaporation de l'H₂ liquide** pose des problèmes de **sécurité** et **rentabilité** des solutions reposant sur l'utilisation de l'H₂ sous forme liquide



Procédé	NMT	Barrières et besoins
Linde-Hampson	9	Efficacité faible Uniquement compatible avec des systèmes de petites capacités
Claude	9	Modification du procédé par ajout d'échangeurs de chaleur
Brayton	8	Adaptation pour des capacités plus élevées
Réfrigération magnétique	7	Procédé énergivore et performance à optimiser

- Perspectives R&D

> Équipements auxiliaires:

Développement nécessaire pour améliorer l'étanchéité des équipements auxiliaires tels que les pompes et compresseurs cryogéniques (pertes, fuites et évaporations importantes)

> Efficacité du procédé de liquéfaction:

R&D pour l'atteinte d'une efficacité d'au moins 60% dans le cycle de réfrigération

> Procédé énergivore:

10 kWh/kg d'hydrogène tandis que la cible du DOE est à 6 kWh/kg

PERSPECTIVES DE MARCHÉ

Vision mondiale

\$5 Mds en 2022

Le marché de la liquéfaction H₂ atteindra \$10 Mds en 2031 avec un TCAC de 7.88%

Une application dominante

Croissance principalement portée par la demande en hydrogène liquide issue du secteur du transport (avitaillement)

Amérique du Nord

Marché émergent, quelques projets annoncés: Saulsbury aux É.U pour une usine de liquéfaction d'hydrogène d'une capacité de 30 tonnes/jour

Europe

Projets majeurs autour de la liquéfaction: IDEALHY: optimiser l'efficacité et réduire les coûts (budget de 2M d'euros)
Hydrogène liquide: solution de choix pour l'approvisionnement des stations de grande capacité

Asie Pacifique

Contribution la plus importance à la croissance de ce segment: plusieurs projets autour de l'hydrogène liquide (Chine: 250 stations en opération; Corée du Sud: ambition de produire 5.3 M de tonnes d'hydrogène s'ici 2040)

Vision Québec

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies 2030

Le Québec positionne l'hydrogène comme une alternative prometteuse pour décarboner le secteur de la mobilité lourde et de longue distance

Une demande croissante pour l'H2 liquide

Plusieurs projets utilisent déjà de la liquéfaction à échelle industrielle au Québec (ex: Olin/Arkema/ Air Liquide à Bécancour) et la demande prévoit de continuer de croître.

Un frein causé par les besoins en R&D

Des applications envisagées ou commercialisées au QC sont freinées par les besoins en R&D des technologies de liquéfaction (stockage liquide, transport lourd de l'hydrogène)

Co-développement nécessaire

Segment qui pourrait se développer à condition que son développement se fasse en même temps que celui du transport et stockage de l'H₂ liquide

Positionnement des acteurs & vision Québec | Liquéfacteurs H₂



Malgré la présence de plusieurs manufacturiers capables de produire les liquéfacteurs à grande échelle et la demande croissante pour des solutions à H₂ liquide, **le développement de ce segment est limité par celui du transport et stockage liquide où les besoins en R&D demeurent importants**. Les acteurs qui s’y positionnent possèdent historiquement une expertise au niveau de la liquéfaction, constituant une barrière à l’entrée importante. Le Québec est en position de répondre aux **besoins R&D** de ce segment mais **l’expertise manufacturière reste moins développée que le reste du Canada**.



Observations sur le segment des liquéfacteurs H₂



Analyse des acteurs clés et années d’expérience



Linde

74 207 employés

Expertise forte en liquéfaction
Portfolio large autour des
liquéfacteurs (échangeurs,
turbines)



Air Liquide

67 100 employés

Liquéfacteurs qui se distinguent
par maintenance faible et
efficacité élevée
Plus grosse usine de liquéfaction



Plug Power

3 353 employés

Offre des solutions complètes
pour l’hydrogène liquide
(génération, liquéfaction et
distribution)



Points notables

Les acteurs les mieux
positionnés sur ce segment
s’impliquent dans des projets
de liquéfaction à grande
échelle pour démontrer
l’efficacité de leurs
équipements.

Linde

Usine de
liquéfaction à Leuna
Capacité de 10
tonnes par jour

Air Liquide

Plus grande usine
de liquéfaction dans
le monde en Corée
du Sud
Capacité de 90
tonnes par jour

PLUG POWER

Systèmes de
liquéfaction d’une
capacité de 30
tonnes par jour
NIKOLA
TC Energy



Autres observations sur le segment

Acquisitions – Les acteurs se
développent par acquisitions dans le
marché de l’H₂ liquide: Linde (acquisition
de Praxair); Plug (Joule Processing LLC)

Co-dépendance – Le développement de ce
segment est très dépendant de celui des
autres technologies d’hydrogène liquide
(stockage et transport)



Difficultés rencontrées

1. Consolidation des technologies à l’hydrogène liquide	● ● ● ●
2. Demande trop faible pour justifier la manuf. à grande échelle	● ● ● ●
3. Course aux projets et compétitivité entre manufacturiers	● ● ● ●
4. Dynamique de manufacture sur mesure	● ● ● ●



Zoom sur les capacités manufacturières québécoises

Du point de vue manufacturier, **plusieurs acteurs sont présents au QC** (Atlas Copco, Air Liquide, Chart Ind., Linde, Nikkiso, Air Products) mais leurs **activités manufacturières se font hors-QC**. La demande locale pour l’hydrogène liquide est prévue d’augmenter et les projets de liquéfaction suivront cette tendance engendrant une **demande au niveau des liquéfacteurs**. Les entretiens réalisés mettent l’accent sur le besoin en R&D sur les technologies liées à l’hydrogène liquide.



Intérêt pour le
Québec



Capacité du
Québec

Répondre aux besoins croissants en hydrogène liquide

- Le développement d’un **écosystème manufacturier** de liquéfacteurs H₂ permettrait de répondre aux besoins croissants en H₂ liquide
- La collaboration **entre chercheurs et industriels** servirait la création d’un pôle d’expertise ainsi à positionner le QC comme pionnier dans ces technologies. Certains autres segments, freinés par les besoins en R&D, **en bénéficieraient grandement** (stockage liquide et transport de longue distance)

Tisser des liens solides entre la recherche et les industriels

- Le QC possède l’expertise autour des procédés de liquéfaction; **détenue par les organismes de recherche** (CNRC, UQTR) et les **industriels expérimentés** (Air Liquide, Linde, Chart Ind.); des collaborations permettrait à ces technologies de passer de l’état prototype à l’état de commercialisation
- Plusieurs acteurs au QC identifiés comme capable de répondre à la demande actuelle en liquéfacteur malgré des activités manufacturières hors-QC

Importance relative des
indicateurs





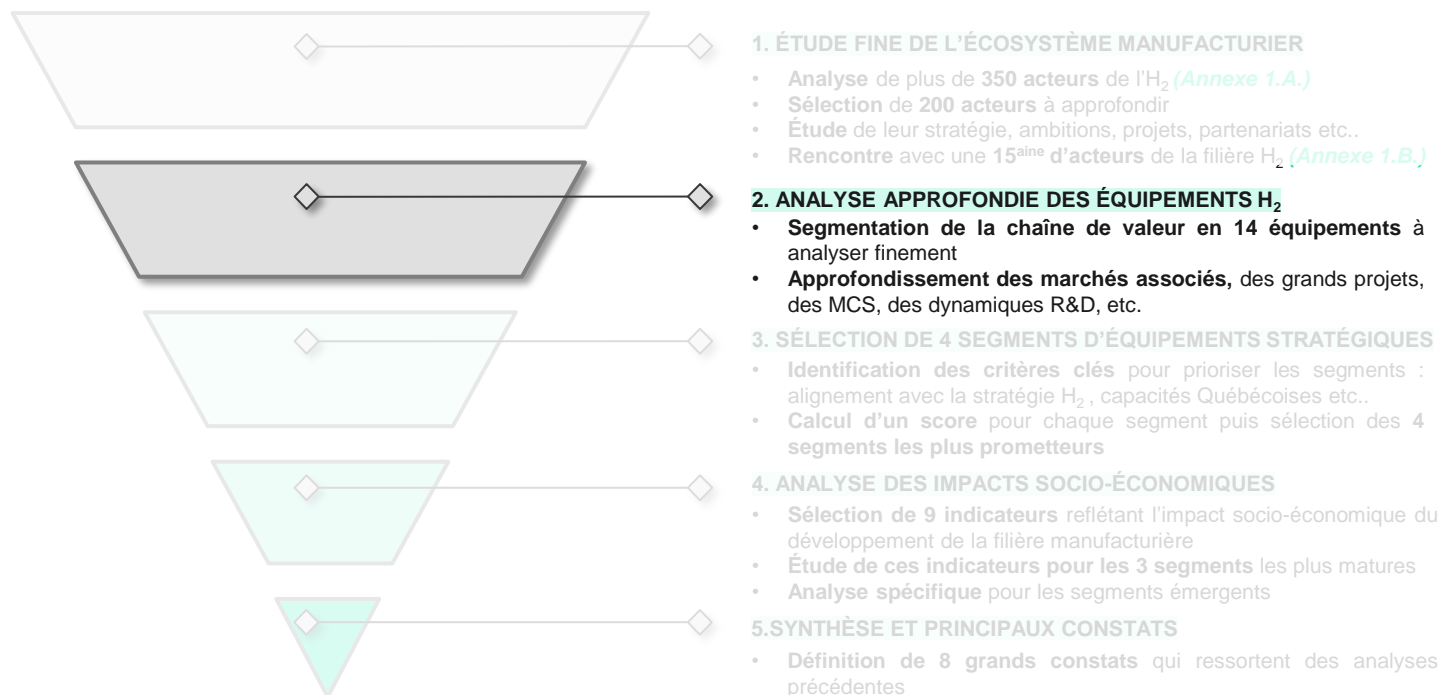
3. Analyse à haut niveau de la propriété intellectuelle

Analyse de la propriété intellectuelle | Rappel des enjeux et objectifs



Comprendre les dynamiques autour de la propriété intellectuelle dans le secteur de l'H₂: qui sont les joueurs les plus dynamiques dans les dépôts de brevets ? Dans quels secteurs ces brevets sont-ils déposés ? Sur quelles technologies ? De quelle nationalité sont ces joueurs ? L'objectif étant de situer le Canada et ses spécificités dans cet écosystème.

Lien avec la méthodologie d'ensemble



Enjeux principaux

- **Trouver de la donnée fiable et pertinente** à une maille géographique assez fine pour faire des analyses par nationalité.
- **Mettre en perspective ces informations avec l'analyse de l'écosystème** détaillée dans la section précédente.



Périmètre d'analyse

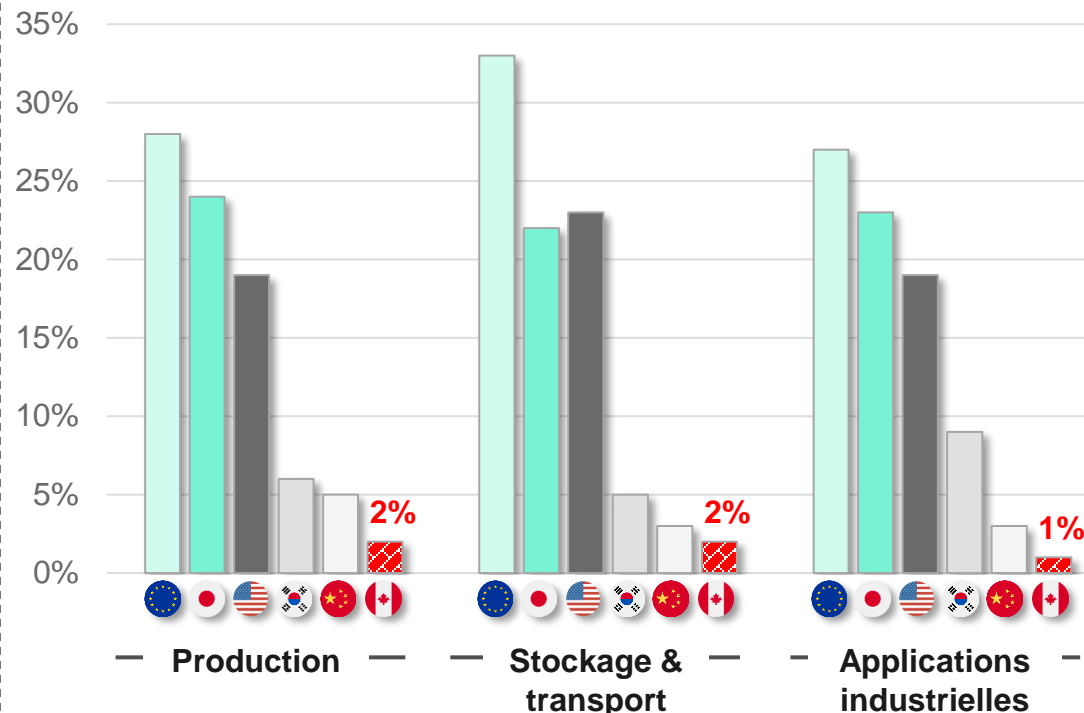
- **L'ensemble de la filière manufacturière H₂** avec une attention particulière sur les **14 segments d'équipements priorisés**

Analyse de la propriété intellectuelle | Vue d'ensemble



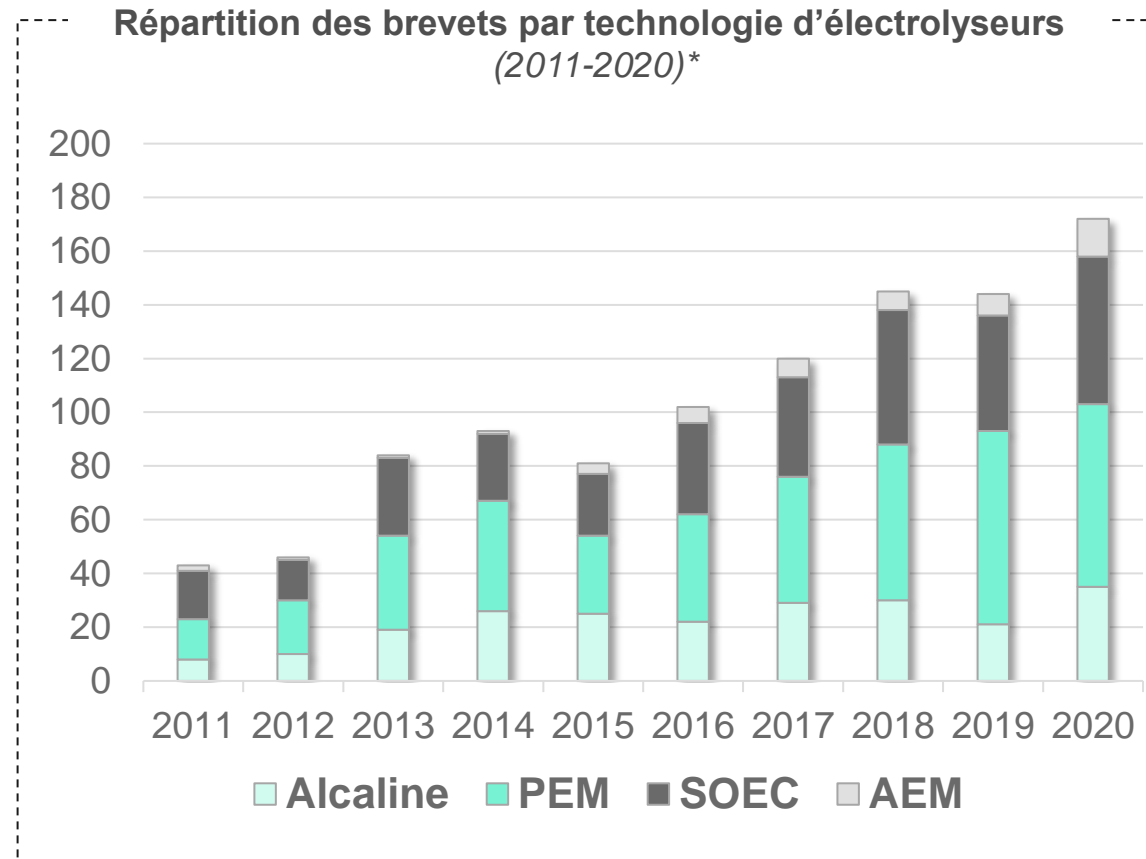
Portés par l'engouement lié à la croissance anticipée de l'H₂ vert, **l'Europe, les É-U. et le Japon se sont positionnés en chefs de file de l'innovation** dans ce secteur. L'écosystème – encore émergent – **laisse toute sa place à la recherche et au développement** sur toute la chaîne de valeur : production, transport, distribution, stockage et usages.

Répartition géographique de l'ensemble des brevets déposés sur l'H₂ (2011-2020)*



- Sur la dernière décennie, les **régions les plus dynamiques sont l'Europe** (Allemagne, France et Pays-Bas) et le **Japon**.
- Bien que représentant 20% des brevets, les **É-U. sont la seule zone d'innovations majeures dont les dépôts de brevets ont diminué sur les 10 dernières années**.
- Les joueurs qui développent en majorité ces brevets sont **des industriels de la chimie et des gaz** (Air Liquide, Linde, BASF, etc.) et **des acteurs du secteur de l'automobile** (Toyota, Hyundai, etc.).
- Parmi les brevets déposés ces 10 dernières années, **près de 80% d'entre eux concernent des technologies liées à l'H₂ vert, le 20 % restant se concentrant sur des technologies existantes**.
- Quelques pays en dehors des 5 principaux (EU, Japon, É.U., Corée, et Chine) **sont particulièrement dynamiques**: le Royaume-Uni, la Suisse, et le **Canada**.

Analyse de la propriété intellectuelle | Production par électrolyse



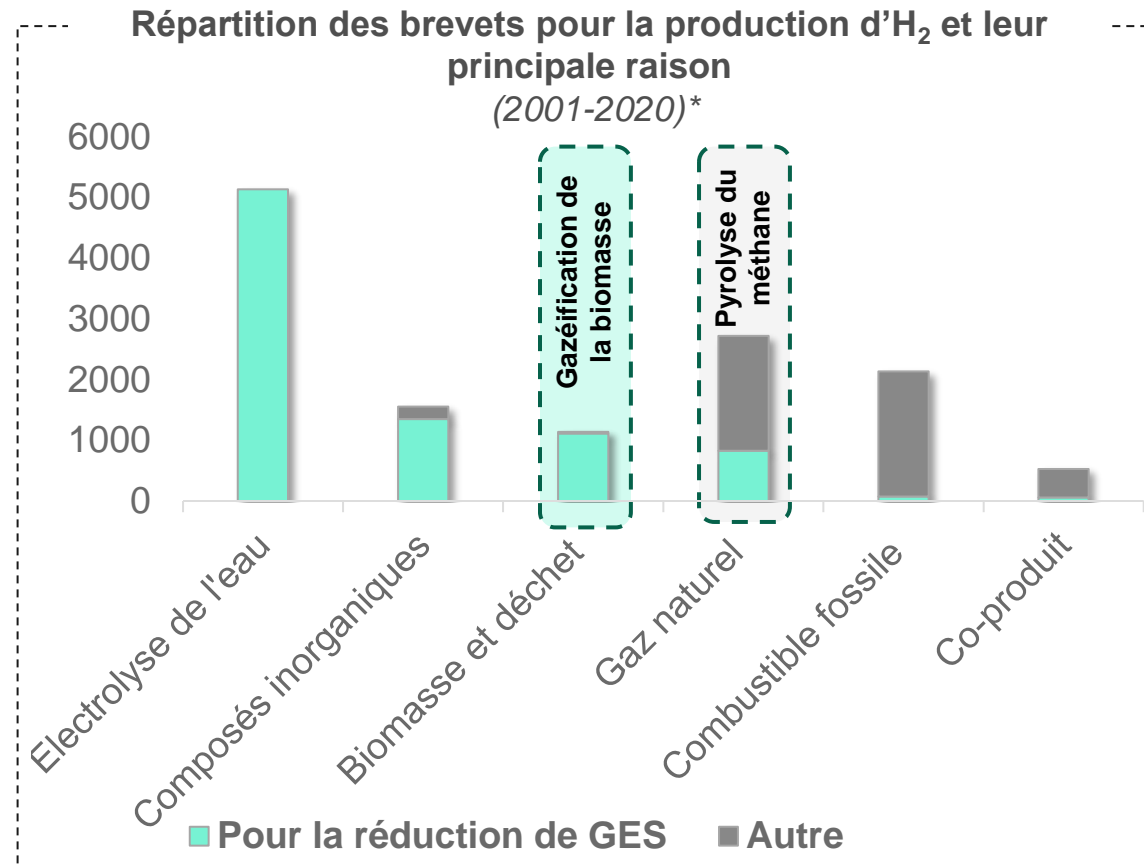
- Il est intéressant de noter **les différences de dynamiques entre les capacités de production des pays et leurs dépôts de brevets**. Sur les 10 dernières années, **le Japon a été le pays le plus prolifique en termes de dépôt**, mais **les capacités manufacturières ne suivent pas**. À l'inverse, **la Chine dépose peu de brevets, mais investit largement dans ses chaînes manufacturières locales**.
- Des **orientations technologiques se dessinent également par région** :
 - **les É.-U.** sont très présents sur les innovations dans la **technologie PEM**;
 - **l'Europe** dépose la majorité des brevets sur les **électrolyseurs SOEC**;
 - **La Chine** développe peu de brevets, mais en majorité sur la **technologie alcaline**.
- **Aucune technologie ne domine le marché** comme le montre la pluralité des brevets déposés. Alcaline est la technologie la plus vieille, PEM dans laquelle il y a le plus d'innovation, SOEC et AEM cherchent à passer à l'échelle.

*Source : *Hydrogen Patents for a Clean Energy Future*, IEA, 2023



Le Canada a développé de la propriété intellectuelle sur plusieurs de ces technologies avec des entreprises qui se sont créées dans ces domaines. Par exemple, **Hydrogen Optimized** a développé une **technologie brevetée d'électrolyseurs alcalins** pour des usages à échelle industrielle (12,5 MW à 50MW) et **Cipher Neutron** a **déposé 5 brevets** dans **des technologies AEM**.

Analyse de la propriété intellectuelle | Autres moyens de production



- Les dépôts de brevets dans le domaine de la production d'hydrogène **à partir de la biomasse ou de déchets** (par gazéification ou pyrolyse) ont fortement augmenté entre 2007 et 2011, **mais ont considérablement diminué depuis**.
- **Plusieurs défis sont en train d'être relevés** pour la production d'hydrogène par **pyrolyse du méthane** :
 - La température d'opération;
 - Le passage à l'échelle industrielle;
 - Les réactions auxiliaires qui diminuent les rendements;
 - La possibilité de produire du graphite au lieu du noir de carbone en sortie;
 - etc.
- **Thyssenkrup, SABIC et Exxonmobil** sont les joueurs ayant **déposé le plus de demandes de brevets sur la pyrolyse du méthane**.
- L'obtention d'un brevet aide significativement le passage à l'échelle et l'obtention de financements par les **jeunes entreprises** se positionnant sur la **gazéification de la biomasse et la pyrolyse du méthane**.

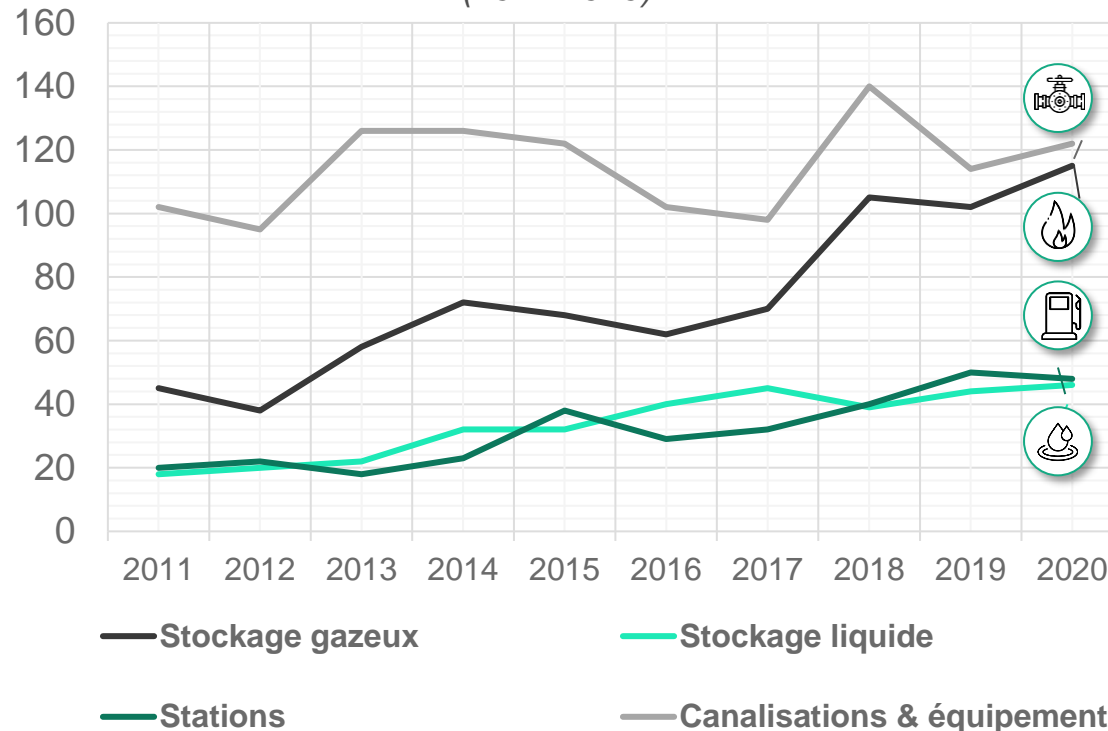
*Source : *Hydrogen Patents for a Clean Energy Future*, IEA, 2023



Au Canada, **ces deux secteurs sont particulièrement dynamiques**. Des entreprises comme Pyrogenesis, Aurora Hydrogen, Innova Hydrogen, Plasco Energy, Omni conversion, Nu:ionic **possèdent toutes des brevets d'intérêt sur ces technologies**.

Analyse de la propriété intellectuelle | Transport, distribution, stockage

Évolution des dépôts de brevets suivant les technologies de transport, distribution, stockage (2011-2020)*



- L'H₂ se transporte soit par canalisations/remorques sous forme gazeuse, soit sous forme liquide dans des conteneurs cryogéniques.
- L'analyse des brevets montre que des innovations sont faites sur toute la chaîne de valeur : transport, stockage, distribution de l'H₂ et sur toutes les technologies – avec une dynamique toute particulière néanmoins sur les réservoirs embarqués pour permettre la commercialisation des véhicules H₂.
- Pour le moment, l'innovation sur le stockage stationnaire se concentre principalement sur les applications actuelles : **sous forme de gaz comprimé sur site industriel et pour les stations d'avitaillement.**
- Néanmoins, dans des régions où la demande d'H₂ est particulièrement importante (Europe du Nord, Texas), **des efforts d'innovation** sont en cours pour **stocker l'H₂ en sous-sol** à grande échelle dans des cavités salines et **transporter de grandes quantités d'H₂ par canalisations.**

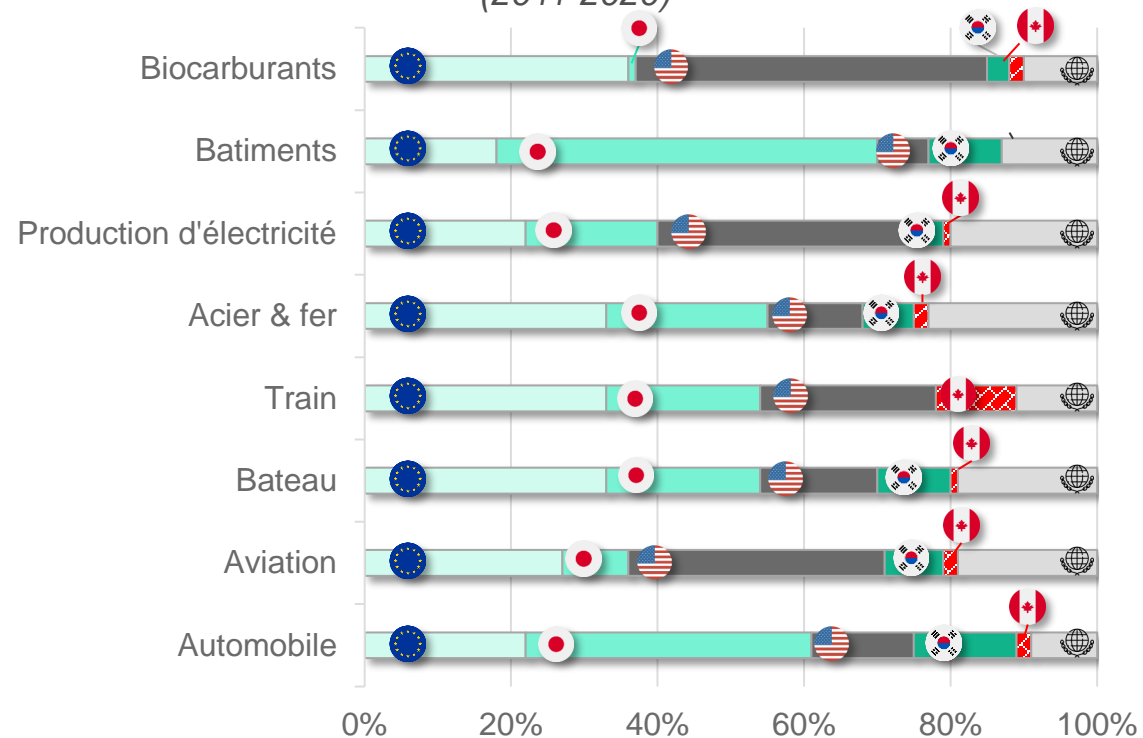
*Source : Hydrogen Patents for a Clean Energy Future, IEA, 2023



Au Canada, **plusieurs joueurs se positionnent de manière innovante sur ces maillons.** Vessel Energy par exemple propose des **solutions de stockage H₂ à micro-canaux permettant de diminuer par 2 le poids des réservoirs.** Par ailleurs, les laboratoires de Powertech en Colombie Britannique sont uniques en Amérique du Nord et **très prisés par les manufacturiers** pour tester les composantes de leurs stations H₂.

Analyse de la propriété intellectuelle | Applications industrielles

Répartition de l'ensemble des brevets déposés sur les applications industrielles de l'H₂ (2011-2020)*



- **Dominées par le Japon** dans la majorité des applications liées aux piles à combustible, **ce sont les joueurs de l'industrie automobile** qui sont les plus dynamiques sur ce segment.
- Il apparaît que les innovations dans les PAC génèrent des **synergies** avec les **électrolyseurs PEM** notamment autour :
 - des polymères qui séparent les membranes
 - des catalyseurs
 - des procédés d'empilement des cellules
- Récemment (après 2016), le nombre de brevets déposés pour la **décarbonation de l'acier par l'H₂** a **significativement augmenté**, avec une **grosse concentration de la propriété intellectuelle** dans un nombre restreint de joueurs – **plutôt d'origine européenne**.
- La majorité des avancées sur les PACs concernent des applications dans le **transport routier** (légers et lourd) et, dans une certaine mesure, **l'aviation légère** (drone) et le **transport maritime**.

*Source : Hydrogen Patents for a Clean Energy Future, IEA, 2023



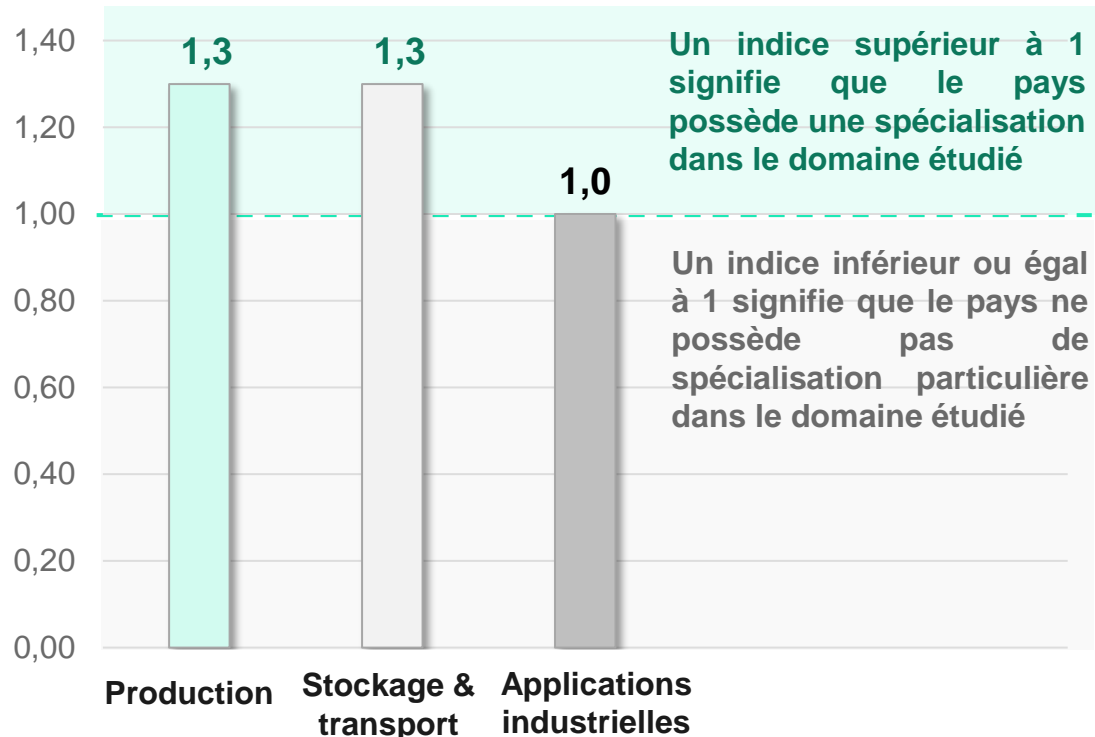
Ce qui n'est pas visible dans ces graphiques est que **les joueurs bien établis dans les PACs et dont c'est le cœur de métier** - comme **Ballard au Canada** – ont déposé moins de brevets dans ces domaines mais **possèdent néanmoins beaucoup de propriété intellectuelle sur des PACs plus génériques** (non reliées à des applications spécifiques automobiles – qui prennent beaucoup de place sur ces graphiques)

Analyse de la propriété intellectuelle | Synthèse du positionnement du Canada



Bien que devancé par les principales nations motrices de l'écosystème H₂ : Europe, Japon, É.-U., Chine et Corée; le Canada est identifié au niveau international comme **un pôle dynamique et émergent de dépôt de brevets** dans le secteur de l'H₂, au même titre que la Suisse ou le Royaume-Uni.

Indice d'avantage technologique du Canada sur l'H₂
(2011-2020)*



- L'indice d'avantage technologique est un indicateur développé par l'OCDE pour identifier les spécialisations technologiques d'un pays.
- Il se calcule comme le rapport entre la part des brevets déposés par un pays dans un domaine particulier sur la part des brevets déposés dans tous les domaines. **Lorsqu'il est supérieur à 1, cela signifie une concentration technologique dans le domaine étudié.**
- L'analyse de cet indicateur permet de **démontrer la place importante que l'H₂ joue dans l'innovation au Canada puisqu'il est supérieur ou égal à 1 sur tous les maillons de la chaîne de valeur.**
- L'indice d'avantage technologique illustre également le fait que le **Canada se spécialise en partie du côté amont de la chaîne de valeur : production et stockage, transport, distribution.**

*Source : Hydrogen Patents for a Clean Energy Future, IEA, 2023



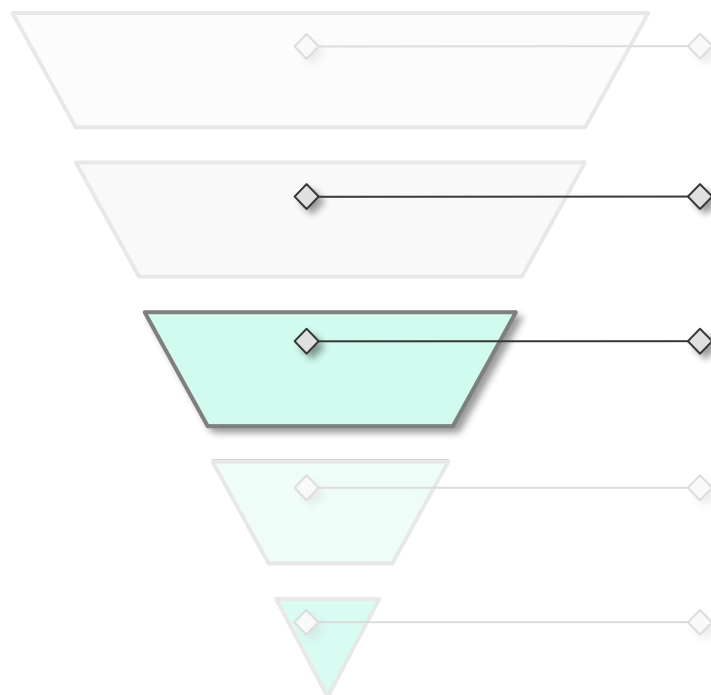
4. Sélection des segments stratégiques

Sélection des segments stratégiques | Rappel des enjeux et objectifs



L'objectif principal de cette étape est de **sélectionner** - parmi les 14 segments manufacturiers précédemment présentés - **les 4 segments les plus stratégiques** pour le Québec. Cette sélection se base sur une **étude fine de la capacité et de l'intérêt du Québec à développer chacun de ces segments**.

Lien avec la méthodologie d'ensemble



1. ÉTUDE FINE DE L'ÉCOSYSTÈME MANUFACTURIER

- Analyse de plus de 350 acteurs de l'H₂ (*Annexe 1.A.*)
- Sélection de 200 acteurs à approfondir
- Étude de leur stratégie, ambitions, projets, partenariats etc..
- Rencontre avec une 15^{aine} d'acteurs de la filière H₂ (*Annexe 1.B.*)

2. ANALYSE APPROFONDIE DES ÉQUIPEMENTS H₂

- Segmentation de la chaîne de valeur en 14 équipements à analyser finement
- Approfondissement des marchés associés, des grands projets, des MCS, des dynamiques R&D etc...

3. SÉLECTION DE 4 SEGMENTS D'ÉQUIPEMENTS STRATÉGIQUES

- Identification des critères clés pour prioriser les segments : alignement avec la stratégie H₂, capacités québécoises etc..
- Calcul d'un score pour chaque segment puis sélection des 4 segments les plus prometteurs

4. ANALYSE DES IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES

- Sélection de 9 indicateurs reflétant l'impact socio-économique du développement de la filière manufacturière
- Étude de ces indicateurs pour les 3 segments les plus matures
- Analyse spécifique pour les segments émergents

5. SYNTHÈSE ET PRINCIPAUX CONSTATS

- Définition de 8 grands constats qui ressortent des analyses précédentes



Enjeux principaux

- **Élaborer un outil d'aide à la décision objectif**, basé sur des critères reflétant la **capacité et l'intérêt du Québec** pour chaque segment d'équipements
- **Travailler en collaboration** avec les acteurs du milieu sur ces critères pour **ajouter de l'intelligence et prendre en compte la réalité de la filière H₂ au Québec**



Périmètre d'analyse

- **Les 14 segments de production d'équipements H₂** (*présentés en p.11*)

Sélection des segments stratégiques | Méthodologie de sélection



Afin de sélectionner les **4 segments stratégiques pour le Québec**, deux critères ont été retenus: **Intérêt** et **Capacité**. Des scores associés à chacun de ces deux critères ont été évalués. Ces scores correspondent à la moyenne pondérée des notes attribuées à chacun des sous-critères établis. **Les pondérations des sous-critères ainsi que l'assignation des notes ont été élaborées en atelier avec PRIMA et le MEIE.**

Sous-critères - Pondération

Notes attribuées par sous-critère

1 2 3 4 5

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies - 50%

Hors-périmètre

Application moyennement prioritaire

Application hautement prioritaire

Criticité- 20%

Présent sur peu de segments et facile d'appro.

Présent dans peu de segments et difficile d'appro/Présent dans plusieurs segment et facile d'appro

Présent sur plusieurs segments et difficulté d'appro

Facilité à entrer sur le segment- 15%

Barrière à l'entrée forte

Barrière à l'entrée moyenne

Barrière à l'entrée faible

Valeur ajoutée – 15%

Bas contenu technologique et R&D

Moyen contenu technologique et R&D

Haut contenu technologique et R&D

Capacité manufacturière – 25%

Aucun acteur manufacturier

Manufacturier intéressé/présent

Au moins 1 manufacturier

Capacité R&D – 25%

Aucun organisme de R&D.

Quelques travaux et acteurs R&D

Expertise R&D forte et beaucoup d'acteurs

Dépendance aux MCS présents au Québec – 25%

Peu de MCS et aucun présent au QC

Au moins 3 MCS présents au QC

5+ MCS présents au QC

Maturité pondérée du segment* – 25%

Maturité faible

Maturité moyenne

Maturité élevée

Sélection des segments stratégiques | Matrice de priorisation

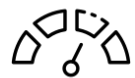


L'attribution de notes à chacun des sous-critères et le calcul des scores **Intérêt** et **Capacité** permettent d'obtenir un score moyen servant à **classer les segments**. Cet **outil d'aide à la décision** a été travaillé pour **sélectionner les 4 segments prioritaires** en atelier avec PRIMA et le MEIE. La sélection repose à la fois sur **l'analyse des scores et des discussions avec les experts du MEIE**; permettant de donner **une profondeur** à cet outil objectif.

	Intérêt				Score Intérêt	Capacité					Score Capacité	Total
Segments	Stratégie H ₂	Criticité	Facilité à entrer sur le segment	Valeur ajoutée		Capacité manuf.	Capacité R&D	Dépendance aux MCS QC	Maturité pondérée*			Score moyen
Électrolyseurs	5	3	5	5	4.6	3	5	5	3	3.8	4.2	4.4
Équipements industriels	5	3	5	5	4.6	5	3	3	2	3.8	3.7	4.2
Réacteurs H ₂	4	3	4	5	4.0	3	5	5	2	4.2	4.3	4.1
Piles à combustible	4	5	5	5	4.5	3	5	3	4	3.4	3.6	4.1
Compresseurs	4	5	5	5	4.5	3	5	2	3	3.8	3.5	4.0
Liquéfacteur	4	5	4	4	4.2	3	5	2	4	3.4	3.4	3.8
Équipements auxiliaires	4.5	3	4	3	3.9	5	2	1	4	4.4	3.1	3.5
Bus et camions H ₂	4	1	2	2	2.8	5	2	5	4	4.4	4.1	3.5
Stations H ₂	4	3	4	3.5	3.7	3	2	5	3	2.6	3.2	3.4
Mobilité lourde H ₂	3	3	3	3	3.0	3	5	3	3	3.8	3.7	3.4
Instrumentation	3.5	3	3	2	3.1	3	5	3	4	3.4	3.6	3.4
Réservoirs stationnaires	4	4	3	3.5	3.8	1	5	3	3	2.6	2.9	3.3
Réservoirs embarqués	4	3	3	3.5	3.6	1	5	3	4	1.8	2.7	3.1
Robinetterie	3.5	3	1	2	2.8	3	5	2	5	3	3.3	3.0

*Sous-critère calculé en pondérant la capacité manufacturière et la capacité R&D: $\frac{5 - \text{maturité}}{5} \times \text{Capacité R\&D} + \frac{\text{maturité}}{5} \times \text{Capacité manufacturière}$

Sélection des segments stratégiques | Les 4 segments retenus



Les segments avec le score moyen le plus élevé ont été sélectionnés (**électrolyseurs, PAC, réacteurs H₂**) à l'exception des **équipements industriels** qui ont été éliminés à cause de leur faible spécificité à la filière hydrogène.

	ÉLECTROLYSEURS	PILES À COMBUSTIBLES	RÉACTEURS H ₂	RÉSERVOIRS STATIONNAIRES
INTÉRÊT	<ul style="list-style-type: none">• Alignement fort avec la stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies• Présence d'hydrogène vert bénéficierait à plusieurs secteurs complémentaires (raffineries, sidérurgie..etc)	<ul style="list-style-type: none">• Plusieurs applications des PAC identifiées comme prioritaires: stockage saisonnier et gestion de pointe hivernale, camionnage de longue distance (classe 8)• Haut contenu technologique transposable au segment des électrolyseurs	<ul style="list-style-type: none">• Réduction des émissions issues de procédés de production d'H₂ conventionnels (SMR)• Technologie de l'avenir avec des besoins croissants à venir et un marché qui résonne fortement avec les forces du QC	<ul style="list-style-type: none">• Consolidation de la chaîne d'approvisionnement au QC possible par la fabrication des réservoirs localement• Spécificité à la filière hydrogène élevée et réponse aux besoins des utilisateurs et les producteurs de l'hydrogène
CAPACITÉ	<ul style="list-style-type: none">• Le QC répond à plusieurs des besoins exprimés par les manufacturiers: demande forte localement, proximité avec le transport en eau profonde, présence d'infrastructures, main-d'œuvre qualifiée et volonté politique de soutenir les manufacturiers	<ul style="list-style-type: none">• Expertise R&D forte détenue par les universités et CCTT qui cible des problématiques au niveau de l'efficacité et les alternatives aux PFAS• Manufacturiers présents au Canada dont Ballard qui se dit intéressé de s'installer au QC si la demande importante le justifiait	<ul style="list-style-type: none">• Expertise et propriété intellectuelle forte au QC autour des technologies de pyrolyse de plasma et gazéification biomasse/déchets• Complémentarité forte avec les compétences existantes au niveau de la fabrication de torches à plasma	<ul style="list-style-type: none">• Expertise R&D forte où il reste beaucoup de place à l'innovation au niveau des systèmes de sécurité et les différents modes de stockage• Plusieurs usages qui vont se développer au niveau du stockage de l'hydrogène permettant de sécuriser la demande pour cet équipement

- > Dans une perspective de développer des marchés stratégiques **résonnant fortement avec les atouts du Québec** et **en alignement fort avec les applications prioritaires par la stratégie sur l'H₂ vert** et les bioénergies, le segment des **réservoirs stationnaires** a également été retenu.
- > Des applications en lien avec ce dernier telles que **la gestion de pointe hivernale** sont ciblées et sa priorisation permettrait de **sécuriser un maillon important de la chaîne d'approvisionnement locale** pour répondre aux besoins à la fois des utilisateurs et des producteurs d'hydrogène.



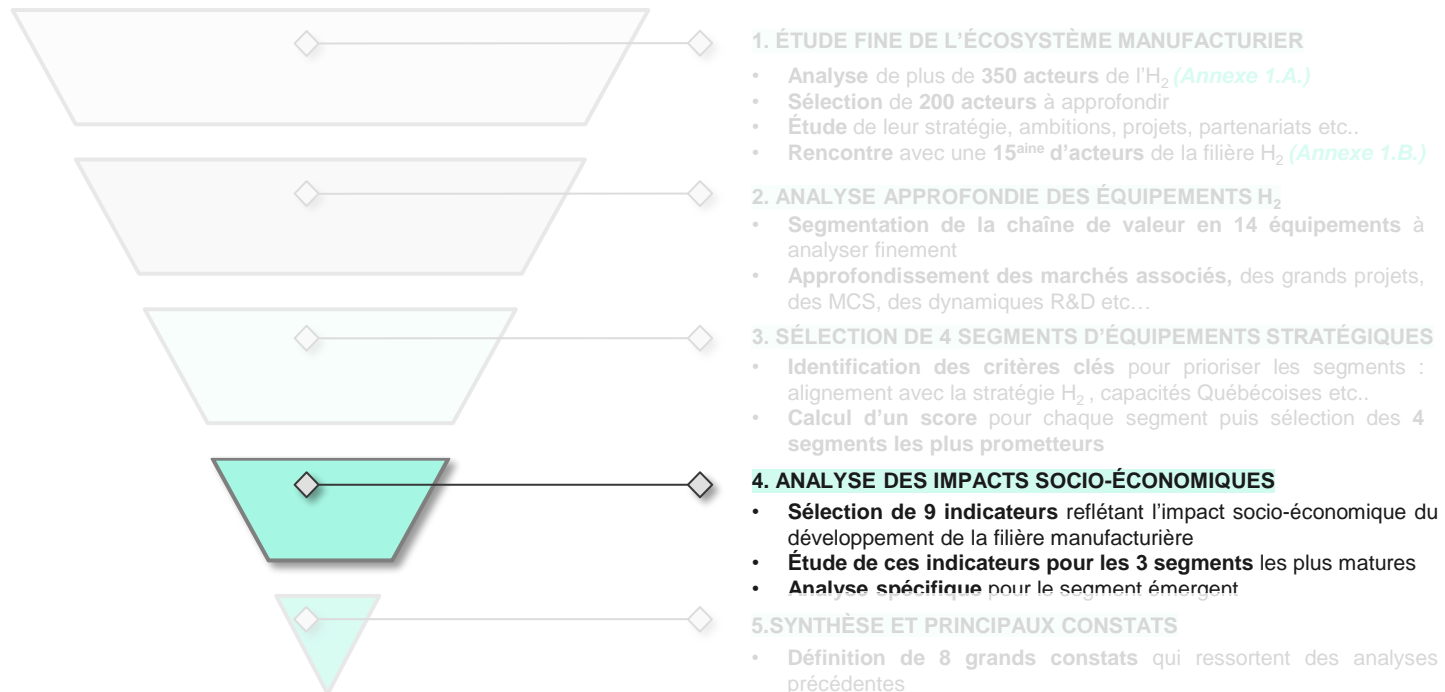
5. Étude socio-économique du développement de la filière

Étude socio-économique | Rappel des enjeux et objectifs



L'objectif principal de cette étape est d'étudier les **externalités liées au développement des filières manufacturières des 4 segments d'équipements stratégiques retenus**. Une **analyse quantitative** des impacts socio-économiques a été réalisée pour les segments matures (électrolyseurs, piles à combustible et réservoirs stationnaires) et une **approche qualitative** pour le segment émergent des réacteurs H₂.

Lien avec la méthodologie d'ensemble



Enjeux principaux

- Sélectionner des indicateurs socio-économiques qui permettent de **cerner l'ensemble des externalités liées au développement de la filière**
- Confronter les données à des études de référence et aux retours des manufacturiers** afin d'évaluer leur fiabilité et leurs limites



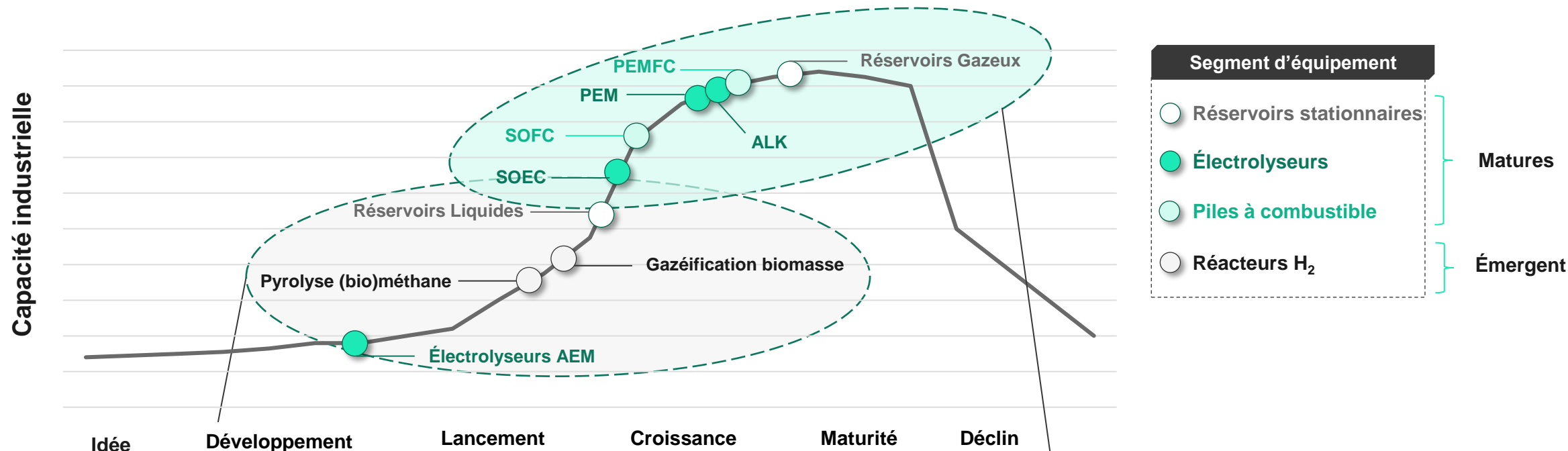
Périmètre d'analyse

- Les 4 segments d'équipements stratégiques retenus**
- La filière batterie** (technologie Lithium-ion)

Méthodologie | Axe d'analyse selon le degré de maturité technologique



Le **degré de maturité des technologies** associés aux 4 segments d'équipements stratégiques retenus ne permet pas le même niveau d'analyse sur les indicateurs socio-économico-environnementaux. **Les externalités des segments matures ont été définies avec des indicateurs quantitatifs** et **celles reliées au segment émergent des réacteurs H₂ sont définies à plus haut niveau**, de manière qualitative. Le graphique ci-dessous permet de classer les technologies selon les capacités industrielles correspondantes.












Marché industriel en développement

- Absence de manufacturiers avec des capacités de production importantes
- Les porteurs de projets pilotes sont confondus avec les porteurs de solutions technologiques et les manufacturiers
- **Ne permet pas une analyse socio-économique environnementale du développement de la filière**
- Ceci concerne le segment émergent des réacteurs H₂

Capacités industrielles suffisamment matures

- **Permet une analyse socio-économico-environnementale du développement de la filière**
- Ceci concerne les 3 segments matures des électrolyseurs, piles à combustible et réservoirs stationnaires

Étude socio-économique du développement de la filière | Description détaillée

INDICATEURS		QUESTIONNEMENT ASSOCIÉ
	◆ — ◆ Besoin de financement	> Quels sont les investissements initiaux (M\$) pour développer une usine de production pour une capacité donnée?
	◆ — ◆ Besoin en électricité	> Pour la production d'une certaine capacité par an, quelle est la capacité électrique nécessaire à l'usine? <i>NB : Ces données sont issues de la littérature scientifique essentiellement</i>
	◆ — ◆ Emplois créés	> Pour une usine de production de capacité typique (1GW ou 1GWh), combien d'emplois sont créés?
	◆ — ◆ Salaire moyen	> En moyenne, quel est le salaire annuel des salariés employés par l'industriel ?
	◆ — ◆ Type d'emplois	> Quelle est la répartition des emplois créés ? Ingénieurs, doctorants, techniciens, support, vente, etc.?
	◆ — ◆ Revenus gouvernement Québec	> Quels sont les revenus générés par le gouvernement pour la mise en place d'une usine d'1GW? <i>NB : Basé sur la méthodologie de l'ISQ et la prise en compte de deux composantes – Taxes sur les produits et les salaires</i>
	◆ — ◆ Valeur ajoutée	> Quelle est la valeur ajoutée de ce segment ? <i>NB : Cet indicateur est qualitatif: dynamiques d'intégration dans économie québécoise, synergies avec la filière batterie et les régions voisines, de priorité dans la stratégie H₂, etc.</i>
	◆ — ◆ Émissions GES	> Quelles sont les émissions GES annuelles associées au déploiement d'une usine d'1GW/GWh? <i>NB : Ces données sont évaluées à partir d'ACV sur toute la phase de fabrication des équipements</i>
	◆ — ◆ MCS	> Un indice de criticité a été calculé (détail en p.102). Ce dernier correspond à la moyenne des tensions des MCS qui composent la technologie et qui sont inscrits dans la stratégie provinciale. La tension sur les MCS a été évaluée en atelier en collaboration avec le MRNF.

Étude socio-économique | Collecte des données



Afin d'effectuer l'analyse des impacts socio-économiques, deux méthodologies ont été employées au niveau de la recherche/collecte de la donnée: une première méthode qualifiée de « **descendante** » qui consiste à utiliser la valeur la plus fiable et valider son ordre de grandeur par le recensement de plusieurs projets et une deuxième qualifiée de « **ascendante** » qui consiste à recenser le maximum de projets et les homogénéiser en calculant une moyenne qui exclut les données aberrantes.

Méthode #1 : Descendante

Utilisation de la valeur la plus fiable dans les études de références, puis recensement de plusieurs projets pour valider l'ordre de grandeur.

Méthode privilégiée lorsque l'information est disponible

1. **Revue de littérature** des études fiables sur le sujet : IEA, IRENA, branche énergie de gouvernements, fédération d'acteurs industriels autour de l'H2 (Ex: France hydrogène, Hydrogen Council, etc.)
↓
2. **Collecte de la donnée la plus fiable/documentée**
↓
3. **Revue de projets** manufacturiers majeurs puis moyenne des données par projet
↓
4. **Vérification de la cohérence** entre la donnée issue de l'étude et celle issue de la revue des projets

Méthode #2 : Ascendante

Recensement d'un maximum de projets, homogénéisation des unités puis moyenne des valeurs rencontrées après exclusion des données « aberrantes » .

Méthode utilisée si aucune étude de référence n'est trouvée

1. **Revue de littérature** d'un grand nombre de projets industriels hydrogène
↓
2. **Travail d'homogénéisation des unités** (nombre d'unités produites vs puissance totale de l'usine, etc.)
↓
3. Étude des données « aberrantes » - localisation, technologie, fiabilité, etc.
↓
4. Moyenne des données fiables

Étude socio-économique | Fiabilité des données










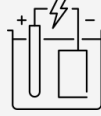





La filière manufacturière liée à l'H₂ vert est très sensible aux effets d'annonces, ce qui crée un **enjeu au niveau de la fiabilité et la limite des données recensées**. Deux échelles de fiabilité ont donc été établies afin de juger de la fiabilité de la donnée récoltée. La **première s'applique à la donnée primaire** à l'étape de collecte. La **deuxième échelle correspond à l'agrégation de ces données primaires**.

Degré de fiabilité				
	I	II	III	IV
#1. Fiabilité des « données primaires » <i>Issue d'un projet, d'une étude ou d'un manufacturier.</i>	Données issues d'une étude de référence clé et/ou échanges avec manufacturiers	Données issues de publications scientifiques et/ou de revues de projets	Données issues de publications scientifiques et/ou de revues de projets	Données peu documentées dans la littérature, issues d'études moins fiables/non vérifiables
#2. Fiabilité des « valeurs retenues » pour le segment – <i>Utilisée pour la suite de l'analyse*.</i>	Valeur issue d'une donnée de fiabilité I ou de 5+ données de fiabilité II	Valeur issue de 3+ données de fiabilité II	Valeur issue de 3- données de fiabilité II	Valeur issue uniquement de données de fiabilité III ou moins

*Cette deuxième échelle est celle qui est utilisée pour la suite de l'analyse p.92 à p.97





Étude socio-économique | Synthèse sur les 3 segments matures

											
	Besoin de financement	Besoin en électricité	Emplois créés	Salaire moyen	Type d'emplois	Revenus gouv. Québec	Valeur ajoutée*	Émissions GES**	MCS (Sans unité)		
1	Électrolyseurs <i>Analyse par indicateur</i>	142 M\$/GW	35 MW/GW	450 ETP/GW	66 000\$/an	73% - Technicien 15% - Ingénieur 11% - Support 1% - Vente	90 M\$/an	-	108 000 ktCO2eq/GW	ALK – 3,2 PEM – 3,3 AEM – 3,1 SOEC – 2,9	
2	PAC <i>Analyse par indicateur</i>	162 M\$/GW	5 MW/GW	323 ETP/GW	72 615\$/an	73% - Tech./sup. 22% - Ingénieur 4% - Doctorant	41 M\$/an	-	24 000 ktCO2eq/GW	PEMFC 3,5	
3	Réservoirs stationnaires <i>Analyse par indicateur</i>	16 M\$/GWh	0,16 MW/GWh	9 ETP/1000 réservoirs	-	-	-	-	18 224 ktCO2eq/GWh	Gazeux – 3,3 Liquide – 2,7	
	Batteries <i>Analyse par indicateur</i>	144 M\$/GWh	7 MW/GWh	154 ETP/GWh	63 255\$/an	50% - Opérateur 15-25% - Ingénieur 10-20% - Tech./sup. 5-15% - Support	-	-	13 083 ktCO2eq/GWh	Lithium-ion 3,4	





*L'indicateur autour de la valeur ajoutée est un indicateur qualitatif qui a été intégré dans la section suivante du rapport **Synthèse et principaux constats**. Il prend en compte des éléments tels que les dynamiques d'intégration dans l'économie québécoise, les synergies avec la filière batterie et les régions voisines, la priorité dans la stratégie H₂, etc.

**Les émissions GES proviennent d'analyses de cycle de vie réalisées sur toute la phase de fabrication des équipements (extraction et transformation des minéraux, assemblage etc.)

Analyse des indicateurs socio-économiques | Électrolyseurs

INDICATEURS	VALEUR	OBSERVATIONS
 Besoin de financement (M\$/GW)	142 M\$/GW III* Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de 10 projets (technologies différentes) et vérifiée par les retours des manufacturiers et études de référence	<ul style="list-style-type: none">> En ordre croissant de CAPEX: ALK < PEM> Les technologies les moins matures sont associées à des CAPEX plus élevés> Les coûts de main-d'œuvre poussent les manufacturiers à se tourner vers l'automatisation> Valeur fortement influencée par les cibles techniques définies par le DOE
 Besoin en électricité (MW/GW)	35 MW/GW IV Donnée issue d'une moyenne calculée à partir des flux électriques pris en compte dans plusieurs ACV	<ul style="list-style-type: none">> Procédés de manufacture moins électro-intensifs que l'utilisation des électrolyseurs> Incidence importante sur l'empreinte environnementale des procédés de manufacture lorsque le mix énergétique est non-décarboné
 Emplois créés (ETP/GW)	304 ETP/GW II Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de 10 projets et vérifiée par des études de référence	<ul style="list-style-type: none">> Relation non linéaire entre le nombre d'emplois et la capacité manufacturière> Projets de taille intermédiaire (quelques dizaines de MW): impact le plus positif en termes de création d'emplois
 Salaire moyen (\$/an)	66 000\$/an III Donnée calculée en se basant sur la typologie d'emplois et le salaire moyen par emploi; vérifiée par les retours des manufacturiers et études de référence	<ul style="list-style-type: none">> Valeur qui risque d'évoluer à la hausse avec l'acquisition d'expertise nichée dans les procédés manufacturiers reliés aux électrolyseurs

Analyse des indicateurs socio-économiques | Électrolyseurs

INDICATEURS		VALEUR	OBSERVATIONS
	◆ — ◆	Type d'emplois (%) 73% - Tech./sup. 22% - Ingénieur 5% - Doctorant Valeur provenant des travaux de France Hydrogène	II <ul style="list-style-type: none">> Typologie qui change de manière importante dans la phase d'exploitation> Synergie importante avec les PAC au niveau de la typologie des métiers> Adaptation de l'appareil de formation nécessaire> Synergies avec les compétences requises dans la filière batterie
	◆ — ◆	Revenus gouvernement Québec (M\$/GW) 90 M\$/an Valeur calculée en suivant la méthodologie de l'ISQ	IV <ul style="list-style-type: none">> Prise en compte des taxes sur les produits (TVQ et TPS) et sur les salaires (selon l'échelon salariale)> La taxe sur les produits représente environ 94% des revenus générés pour le gouvernement du Québec
	◆ — ◆	Émissions GES (tCO2eq/GW) 108 000 ktCO2eq/GW Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de plusieurs ACV	III <ul style="list-style-type: none">> Les acheteurs regardent de plus en plus pour des électrolyseurs verts> Donnée utilisée comme intrant pour évaluer l'empreinte carbone de la production d'hydrogène> Si le mix énergétique est non-décarboné, ceci a une incidence importante sur les émissions GES
	◆ — ◆	MCS* (Sans unité) ALK – 3,2 PEM – 3,3 AEM – 3,1 SOEC – 2,9	II <ul style="list-style-type: none">> La technologie PEM est la plus intensive en termes de MCS> Quelques MCS en tension moyenne à élevée avec la filière batterie> Avancées technologiques qui permettent la substitution ou le recyclage des MCS

Analyse des indicateurs socio-économiques | Piles à combustible

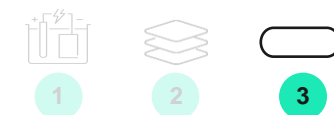














INDICATEURS	VALEUR	OBSERVATIONS
  Besoin de financement (M\$/GW)	162 M\$/GW II Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de 5 projets (technologies différentes) et vérifiée par les retours des manufacturiers et études de référence	<ul style="list-style-type: none">> Valeur qui évoluerait à la baisse avec l'augmentation des capacités manufacturières dans les prochaines années; possible grâce à des améliorations dans les procédés de manufacture et l'automatisation de certaines phases de manufacture> Contrairement à la batterie, le coût de manufacture d'une PAC résulte de la fabrication de cette dernière et non pas des matériaux qui la composent
  Besoin en électricité (MW/GW)	5 MW/GW IV Donnée issue d'une moyenne calculée à partir des flux électriques pris en compte dans plusieurs ACV	<ul style="list-style-type: none">> Cette valeur prend son sens lorsque le mix énergétique n'est pas décarboné> Elle a une incidence importante sur l'empreinte environnementale d'une PAC sur son cycle de vie dans lequel la phase de manufacture est souvent prise en compte
  Emplois créés (ETP/GW)	323 ETP/GW I Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de 5 projets et vérifiée par des études de référence	<ul style="list-style-type: none">> L'évolution de la filière manufacturière des PAC résultera en des pics de recrutement qui risquent de coïncider avec ceux d'autres segments ou secteurs (mobilité)> L'estimation de la demande en emplois à long-terme permet de mieux planifier les besoins en main-d'œuvre
  Salaire moyen (\$/an)	72 615\$/an III Donnée calculée en se basant sur la typologie d'emplois et le salaire moyen par emploi; vérifiée par les retours des manufacturiers et études de référence	<ul style="list-style-type: none">> Salaire moyen qui pourrait évoluer à la hausse avec l'acquisition de compétences pointues> Demande croissante en emplois générée par le développement de la filière manufacturière hydrogène et celle de la batterie; valeur qui évoluerait à la hausse à court-terme: demande plus forte que l'offre

Analyse des indicateurs socio-économiques | Piles à combustible

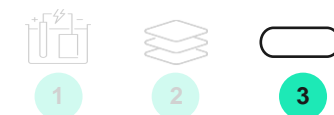
INDICATEURS		VALEUR	OBSERVATIONS
	◆ — ◆	Type d'emplois (%) 73% - Tech./sup. 22% - Ingénieur 4% - Doctorant Valeur basée sur un projet réalisé par Symbio	II <ul style="list-style-type: none">> Typologie d'emploi similaire à celle observée sur le segment des électrolyseurs> Similarité technologique forte dans les procédés d'assemblage de piles à combustibles et les procédés d'assemblage de cellules d'électrolyseurs
	◆ — ◆	Revenus gouvernement Québec (M\$/GW) 41 M\$/an Valeur calculée en suivant la méthodologie de l'ISQ	II <ul style="list-style-type: none">> Similairement au segment des électrolyseurs, la part la plus importante dans les revenus générés pour le gouvernement est due aux taxes sur les produits (90%)
	◆ — ◆	Émissions GES (tCO2eq/GW) 24 000ktCO2eq/GW Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de 2 ACV	III <ul style="list-style-type: none">> D'autres impacts environnementaux autour des PAC doivent être considérés notamment autour des PFAS qui contaminent l'eau et les sols> Si le mix énergétique est non-décarboné, ceci a une incidence importante sur les émissions GES
	◆ — ◆	MCS* (Sans unité) PEMFC – 3,5	II <ul style="list-style-type: none">> Plusieurs travaux en R&D en cours afin de trouver des catalyseurs alternatifs au Platine qui permettrait de réduire la criticité des MCS dans la technologie PEM





Analyse des indicateurs socio-économiques | Réservoirs stationnaires



INDICATEURS	VALEUR	OBSERVATIONS
  —  Besoin de financement (\$/kWh)	16 M\$/GWh III Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de 7 projets (pression et type différents)	<ul style="list-style-type: none">> Différence de coût significative selon le type de réservoir: réservoirs de type IV environ 300% plus coûteux que les type I> C'est la tendance inverse qui est observée au niveau du poids par volume de gaz stocké> Contrairement au segment des électrolyseurs, le coût des matériaux a une incidence importante sur le coût de manufacture des réservoirs
  —  Besoin en électricité (kWh/kgH ₂)	0,16 MW/GWh IV Donnée issue d'une moyenne calculée à partir des flux électriques pris en compte dans plusieurs ACV	<ul style="list-style-type: none">> Les procédés de fabrication des réservoirs sont supposés électro-intensifs dans la littérature: besoins de chauffage à haute température des polymères composant les liners internes avant leur emballage
  —  Emplois créés (ETP/réservoir)	9 ETP/1000réservoir IV Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de 2 projets	<ul style="list-style-type: none">> Emplois créés pourraient être comblés à court-terme avec des ressources du secteur de l'aéronautique où les procédés de manufacture utilisés sont similaires surtout au niveau de l'enroulement filamentaire
  —  Salaire moyen (\$/an)	- Donnée impossible à calculer: typologie d'emplois non disponible dans la littérature ou auprès des manufacturiers	<ul style="list-style-type: none">> La main-d'œuvre représente une part d'environ 9% du coût total de manufacture de réservoirs> L'augmentation significative du salaire moyen serait un élément déclencheur d'une orientation vers l'automatisation des procédés de manufacture

Analyse des indicateurs socio-économiques | Réservoirs stationnaires



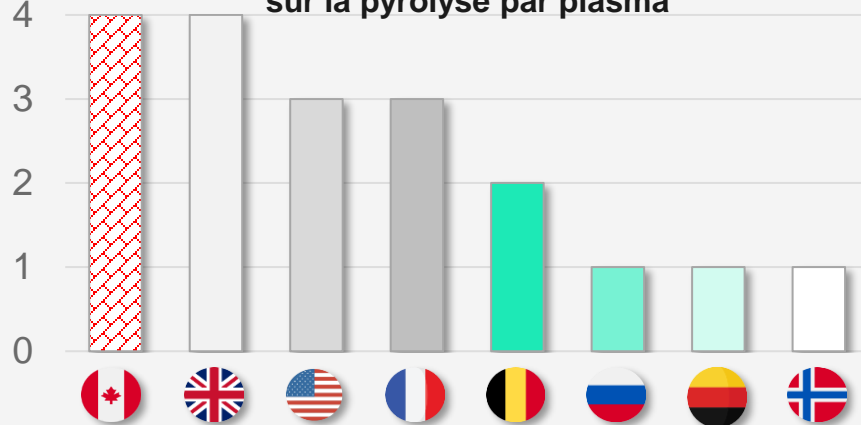
INDICATEURS		VALEUR	OBSERVATIONS		
	◆ — ◆	Type d'emplois (%)	-	Donnée impossible à calculer: typologie d'emplois non disponible dans la littérature ou auprès des manufacturiers	<ul style="list-style-type: none">> Emplois créés demandent une bonne connaissance des procédés compris dans la manufacture des réservoirs (ex: enroulement des filaments de fibre de carbone pour produire le liner interne) et un contrôle qualité adéquat> Typologie d'emplois différente selon le type de réservoirs: Type I et II surtout de la forgerie, Type III: surtout de l'assemblage et de l'enveloppement, Type IV: expérience en extrusion polymérique
	◆ — ◆	Revenus gouvernement Québec (M\$/GW)	-	Donnée impossible à calculer: valeur du salaire moyen requis	<ul style="list-style-type: none">> Malgré qu'une estimation de la demande en réservoirs demeure nécessaire, certaines applications ciblées par la stratégie sur l'H₂ vert et les bioénergies tels que le stockage saisonnier résulteront en une demande croissante en ces équipements attirant alors des manufacturiers à long-terme> La part reliée à la taxe sur les produits générés par les manufacturiers pourrait représenter la part la plus importante des revenus générés (à l'image des autres segments)
	◆ — ◆	Émissions GES (ktCO₂eq/kgH₂)	18224 ktCO₂eq/GWh IV	Donnée issue d'une moyenne calculée à partir de plusieurs ACV	<ul style="list-style-type: none">> Certains procédés de fabrication des réservoirs se déroulent à haute température nécessitant donc un apport en énergie important> Si le mix énergétique est non-décarboné, ceci a une incidence importante sur les émissions GES
	◆ — ◆	MCS* (Sans unité)	Gazeux – 3,3 Liquide – 2,7 II		<ul style="list-style-type: none">> MCS en tension avec la filière batterie: aluminium, carbone, chrome, fer, nickel, titane> Des efforts R&D existent autour la substitution des MCS présents dans les réservoirs mais se concentrent surtout sur les systèmes de sécurité

Analyse réacteurs H₂ | Étude des joueurs qui se positionnent



Pyrolyse par plasma

Nationalité des 19 entreprises étudiées se positionnant sur la pyrolyse par plasma

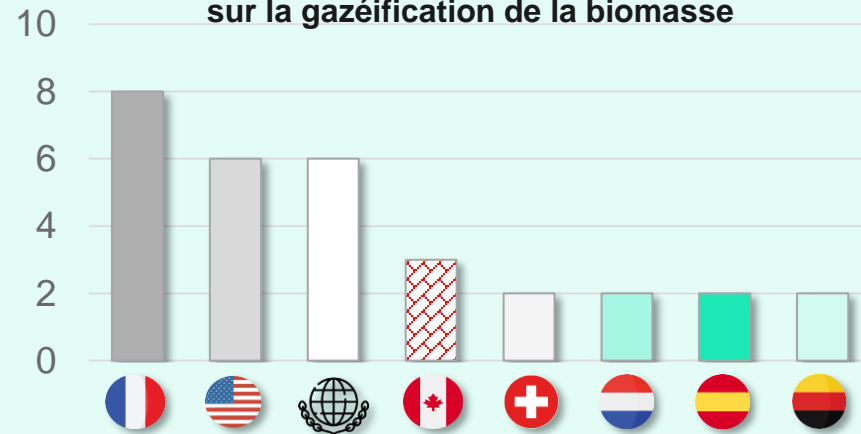


- Sur la pyrolyse par plasma, le Canada est un acteur particulièrement dynamique avec 4 entreprises sur 19 balisées.
- Ces joueurs sont majoritairement des entreprises qui ont **développé des procédés plasma pour d'autres applications** (séparation de métaux, gestion des déchets, fabrication additive, etc.; **ou des jeunes pousses issues d'universités** (6K – Université d'Alberta; Cambridge Nanosystem – Cambridge, etc.).
- Les entreprises **sont particulièrement jeunes**, elles ont été créées en majorité entre 2008 et 2012; ou après 2021. **Ce sont de petites et moyennes entreprises aux TRL faibles**. Seul Monolith a passé l'échelle industrielle avec son expansion d'usine à Olive Creek (É.-U.) prévue pour 2025.



Gazéification biomasse/déchet

Nationalité des 31 entreprises étudiées se positionnant sur la gazéification de la biomasse



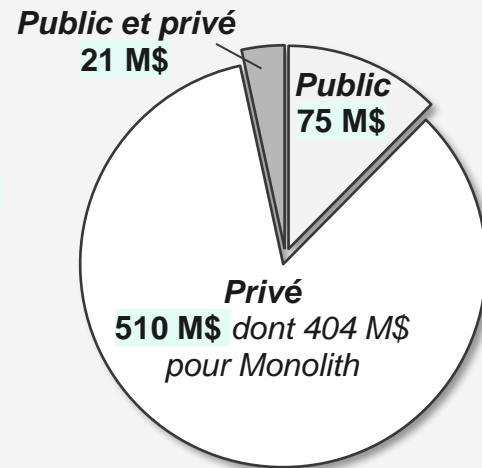
- Sur la gazéification de la biomasse, 3 entreprises sur les 31 balisées sont de nationalité canadienne. **La France et les É.-U. se démarquent** sur ce segment.
- **La majorité des acteurs sont des spécialistes des réacteurs H₂** qui se développent uniquement sur ce créneau.
- **Au moins 9 des 43 projets de développement de ces réacteurs sont en collaboration avec des instituts de recherche.**
- Sur les 31 entreprises, **3 ont fermé par manque de modèle d'affaires rentable, incapacité financière et/ou incapacité à se fournir en intrants.**

Analyse réacteurs H₂ | Financement et partenariat



Pyrolyse par plasma

Au total ce sont
606 M\$
d'investissement
dans la filière
pyrolyse du
méthane qui ont
été balisés

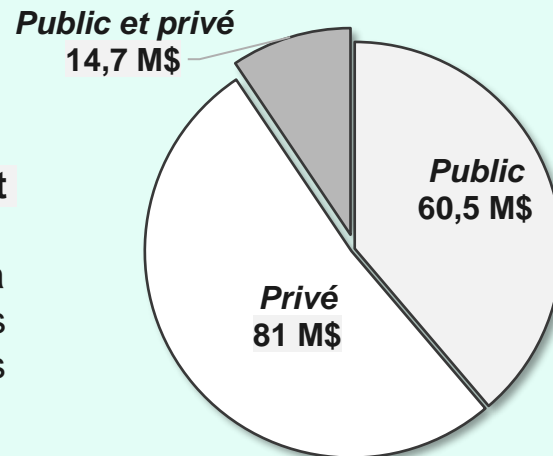


- Des partenariats se forgent **entre les fournisseurs de solutions technologiques** et les industriels pour développer des **réacteurs produisant des extrants carbonés personnalisés** :
 - Production de noir carbone pour les pneus**: Monolith et Good Year
 - Études en cours pour développer des solutions **produisant du graphite pour la filière batterie** – Aurora Hydrogen
- La majorité des fonds de Monolith proviennent d'une levée de fond faite en 2022. **Une aide de 1,35 Mds \$ a également été accordée par le Department of Energy**, mais n'est pas représentée dans le graphique ci-contre car elle prend la forme d'un prêt.



Gazéification biomasse/déchets

Au total ce sont
156 M\$
d'investissement
dans la filière
gazéification de la
biomasse/déchets
qui ont été balisés







- Les porteurs de solutions technologiques développent des partenariats stratégiques avec des organismes de recherche et développement** (InEnTec – MIT, Materia Nova - l'Université de Mons, etc.) **pour optimiser les performances de leurs technologies.**
- Des partenariats **se forgent également en collaboration avec les fournisseurs d'intrants potentiels** tels que les associations agricoles et/ou industrie pâtes et papier pour récupérer les résidus agricoles et municipalités pour collecter les déchets municipaux (Mote – Municipalité de Sacramento)

Analyse réacteurs H₂ | Valeur ajoutée pour l'économie québécoise



Pyrolyse par plasma

Exemple d'entreprises canadiennes

Joueurs	Province	Éléments distinctifs
 AURORA HYDROGEN	Alberta	Pourrait produire du graphite de qualité batterie
 innovahydrogen	Alberta	Nommée parmi les 15 jeunes entreprises les plus innovantes du Canada en 2023
 NU:IONIC TECHNOLOGIES	Nouveau Brunswick	A annoncé un projet de 2400 kg H₂/j d'ici 2025 au Nouveau Brunswick
 PYROGENESIS	Québec	Entreprise mature (51-200 employés) avec technologie éprouvée sur marchés hors H ₂



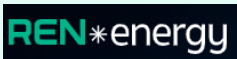

Interactions intéressantes de la pyrolyse du méthane dans l'économie québécoise

- Les **co-produits potentiels de la production d'H₂ ont des synergies fortes avec l'économie québécoise** : graphite pour l'utilisation dans les usines de production de batterie et/ou d'électrolyseurs (en cas de soutien de la filière).
- **Moins de congestion sur les capacités électriques** : jusqu'à **7x moins d'électricité** nécessaire pour la production d'H₂ que par les électrolyseurs en théorie.
- **Synergie avec le développement de la filière GNR** : En cas d'utilisation de GNR en intrant, l'H₂ produit séquestre du CO₂.



Gazéification biomasse/déchet

Exemple d'entreprises canadiennes

Joueurs	Province	Éléments distinctifs
 OMNI CONVERSION TECHNOLOGIES	Ontario	Usines déjà en opération en Californie
 MINNOVA CORP.	Ontario	Usine pilote planifiée au Manitoba
 REN*energy	Colombie Britannique	Usine pilote planifiée en Colombie Britannique
 PYROGENESIS	Québec	L'expertise plasma est également utilisée pour produire un gaz de synthèse à partir de déchets

Interactions intéressantes de la gazéification dans l'économie québécoise

- Les **gisements de biomasse forestière, agricole et municipale sont importants** – dans sa stratégie sur l'H₂ vert et les bioénergies pour 2030 le Québec identifie 19,2 Mt anhydre de biomasse ou 326 PJ en équivalent énergétique en 2019.
- **80% des minéraux qui composent ces réacteurs** sont identifiés comme des MCS par la stratégie provinciale.
- Les **procédés sont versatiles** et pourraient prendre en intrant des déchets municipaux, hospitaliers, etc.

Étude socio-économique du développement de la filière | Interactions filière batterie



L'étude socio-économique du développement de la filière a permis d'identifier des observations qui ont servi à alimenter l'**analyse des interactions à haut-niveau entre la filière hydrogène et la filière batterie**. Ces interactions sont étudiées sous 4 axes: **MCS, technologies, main-d'œuvre et politiques**.

Technologies



DES SYNERGIES TECHNOLOGIQUES FORTES EXISTENT ENTRE LES DEUX FILIÈRES

Cette synergie technologique est surtout observée au niveau des batteries et des électrolyseurs qui sont deux **technologies modulaires** bien adaptées à une manufacture à grande échelle. Les progrès technologiques observés au niveau des batteries sont plus avancés que ceux des électrolyseurs avec les coûts des batteries lithium-ion qui se voient diminuer de manière significative grâce au passage à l'échelle des procédés de manufacture. Le passage à l'échelle au niveau des électrolyseurs est à un stade plus précoce mais les réductions au niveau des coûts évoluent de manière importante avec plusieurs objectifs établis par le Department of Energy aux États-Unis. **Les synergies technologiques entre les deux filières se déclinent en 3 éléments:**



Procédés similaires

Les batteries et les électrolyseurs sont **basés sur les mêmes principes électrochimiques** permettant à la filière hydrogène de profiter des connaissances et de l'expertise générées pour réduire les cycles de passage à l'échelle et les coûts associés.

Ces deux filières partagent plusieurs composantes tels que les électrolytes, les matériaux composant les membranes et les procédés de manufacture. C'est ce qui explique le fait que certains manufacturiers comme Toray ou BASF proposent les deux solutions.



Applications complémentaires prometteuses

Les efforts actuels en termes d'application de l'électrolyse sont concentrés autour de procédés basés sur les énergies renouvelables tels que le solaire ou l'éolien qui sont des **sources intermittentes** ne permettant pas une production stable. **L'intégration d'une batterie** qui permet le stockage de l'énergie en amont permet de générer une source d'alimentation stable aux électrolyseurs soulignant un exemple de la **complémentarité de ces deux technologies** qui peut exister. Ce scénario d'application est de plus en plus fréquent grâce à la réduction des coûts des batteries.



Enjeux de recherche et développement communs

Malgré la maturité élevée de la filière batterie, quelques enjeux R&D demeurent à maîtriser et plusieurs d'entre eux sont complémentaires aux enjeux ciblés pour la filière hydrogène:

- **Substitution des MCS:** nécessité de remplacer les MCS composants les technologies par la découverte de nouveaux matériaux grâce à l'IA
- **Recyclage des MCS:** nécessité de trouver des moyens de récupérer les métaux qui composent les technologies
- **Amélioration de la durabilité des matériaux catalytiques et des membranes**

Étude socio-économique du développement de la filière | Interactions filière batterie

MCS



DES INTERACTIONS EXISTENT SUR QUELQUES MCS ENTRE LES DEUX FILIÈRES  Zoom à la p. 102

L'identification de MCS communs aux technologies de la filière hydrogène et la filière batterie permet d'estimer la **tension** et la **criticité** qui se crée autour de ces derniers par le développement des deux filières respectives. Cette réflexion est en alignement avec le **Plan québécois pour la valorisation des minéraux critiques et stratégiques** qui vise à faire du Québec un chef de file de la production, de la transformation et du recyclage des minéraux critiques et stratégiques en partenariat avec les milieux régionaux et autochtones. L'importance de ce Plan est illustrée par les **tensions géopolitiques** récemment observées tels que les restrictions chinoises sur l'export du gallium, germanium et du graphite. L'installation de ce contexte rend la **cartographie des MCS** de plus en plus nécessaire afin d'identifier les **risques liés à la chaîne d'approvisionnement** et les **moys de mitiger les goulots d'étranglements futurs**. Notre analyse se limite à l'identification des MCS en tension et l'évaluation de la criticité de ces derniers.



Identification des MCS en tension

Les MCS présents dans chacune des technologies reliées aux équipements étudiés (batterie, électrolyseurs, PAC, réservoirs stationnaires et réacteurs H₂) ont été recensés et un score de tension a été déterminé pour chaque MCS en atelier avec le MRNF. Une échelle de tension croissante de 1 à 5 a été établie. Les MCS possédant une tension de 4 ou plus sont les suivants:

Carbone – en tension avec la filière batterie mais synergie possible (graphite issu de la pyrolyse du méthane)

Cobalt – en tension car disponible en petite quantité, concentration des mines au Congo

Iridium – en tension car produit en petite quantité

Lithium – A long terme, 95% de la demande au niveau de la filière batterie (actuellement plutôt de l'ordre de 80-90%)

Nickel – en moins forte tension que les autres MCS mais concentration des mines en Indonésie

Ces tensions concernent majoritairement les technologies d'électrolyse et les batteries lithium-ion.



Évaluation de la criticité des MCS en tension

Dans une perspective d'étudier la tension sur les MCS communs entre la technologie étudiée et le Québec, un **indice de criticité** (présenté en S102) a été calculé. Ce dernier correspond à la moyenne des tensions des MCS **qui composent la technologie et** qui sont **inscrits dans le plan provincial**. Par segment d'équipements, les technologies avec les indices de criticité les plus élevés sont les suivantes:

Batteries lithium-ion: 100%*

Électrolyseurs ALK: 67%

Piles à combustible PEM: 75%

Réservoirs gazeux: 80%

Réacteurs de pyrolyse par plasma: 80%

**%des MCS composants la technologie listés dans le plan provincial*

Étude socio-économique du développement de la filière | Zoom sur les MCS



Un **indice de criticité** a été calculé. Ce dernier correspond à la moyenne des tensions des MCS **qui composent la technologie et** qui sont **inscrits dans le plan provincial**. La tension sur les MCS a été évaluée en atelier en collaboration avec le MRNF.

Minéraux	MCS Québec?	Tension	Batterie	Électrolyseurs				PAC	Réservoirs stationnaires		Réacteurs H2	
			Li-ion	ALK	PEM	AEM	SOEC	PEMFC	Gazeux	Liquide	Gazéification biomasse	Pyrolyse méthane
Aluminium	Oui	2	1	1	1				1	1	1	1
Argent	Non	1			1	1						
Carbone	Oui	4	1	1	1	1			1			
Cerium	Oui	2				1	1					
Chrome	Non	-		1	1	1	1	1	1	1		1
Cobalt	Oui	4	1	1		1	1					
Cuivre	Oui	3	1		1	1	1				1	1
Fer	Oui	-	1	1	1	1	1		1	1		1
Gadolinium	Non	-					1	1				
Iridium	Oui	4			1	1						
Lanthanum	Oui	2				1	1					
Manganèse	Oui	3	1				1					
Molybdène	Non	-		1		1						
Lithium	Oui	4	1									
Nickel	Oui	4	1	1	1	1	1	1	1	1		1
Or	Non	1			1							
Platine	Oui	3			1	1		1				
Ruthénium	Oui	3			1	1						
Scandium	Oui	1					1					
Silicium	Oui	1	1									
Titane	Oui	2		1	1	1	1			1		
Yttrium	Oui	3					1					
Zirconium	Non	-		1			1					
Indice de criticité des MCS Québec		-	3.43	3.20	3.30	3.10	2.7	3.50	3.33	2.67	2.50	3.00

Criticité (faible à élevée) 0 1 2 3 4 5

Étude socio-économique du développement de la filière | Interactions filière batterie



Main-d'œuvre

UNE TYPOLOGIE D'EMPLOIS SIMILAIRES

L'étude de l'indicateur socio-économique sur la typologie des emplois permet de **caractériser à haut-niveau les compétences qui seront requises à la suite du développement de la filière** hydrogène. Certaines typologies d'emplois sont similaires à celles retrouvées dans la filière batterie. Une étude sur les besoins en main-d'œuvre permettrait de mieux planifier la formation professionnelle, de garantir une croissance économique équilibrée et de répondre aux besoins du marché du travail. Notre analyse se limite à l'étude des typologies d'emplois à haut-niveau.

Politiques



DES TECHNOLOGIES COMPLÉMENTAIRES

Les **politiques locales** ont une incidence importante sur le **développement des filières industrielles et l'adoption des technologies** qui en font partie. Au Québec, le **PEV 2030** ainsi que la **Stratégie sur l'H₂ vert et les bioénergies** présentent respectivement la batterie et les technologies hydrogène comme des piliers clés de la décarbonation. Ces politiques positionnent ces filières et les technologies qui en font partie comme deux débouchés complémentaires pour un avenir énergétique propre.



Typologie d'emplois et formation

Une typologie d'emplois similaire entre les deux filières: des similarités dans les typologies d'emplois entre les électrolyseurs et piles à combustibles et la filière batterie; une majorité de profil techniciens et ingénieurs. Au niveau des compétences, le besoin est présent à la fois sur des compétences transverses (sécurité et réglementation) que sur des besoins d'expertises pointues (système H₂).

Une offre de formation qui est dans une dynamique de construction: différentes universités au Québec forment une main-d'œuvre qualifiée et les zones d'innovation de la VTÉ se penchent sur le développement de compétences spécifiques aux deux filières.



Politiques soutenant les deux filières

PEV 2030: Ce plan fait référence à la fois à la filière batterie avec des applications qui ciblent notamment le secteur du transport et le stockage d'énergie et la filière hydrogène comme solution complémentaire à l'électricité lorsque cette dernière n'est pas une solution économiquement rentable ou possible pour remplacer les énergies fossiles.

Stratégie sur l'hydrogène vert et les bioénergies: Cette stratégie priorise plusieurs applications de la filière hydrogène pour lesquelles la demande en énergie sera desservie par Hydro-Québec en complémentarité avec d'autres filières dont celle de la batterie.



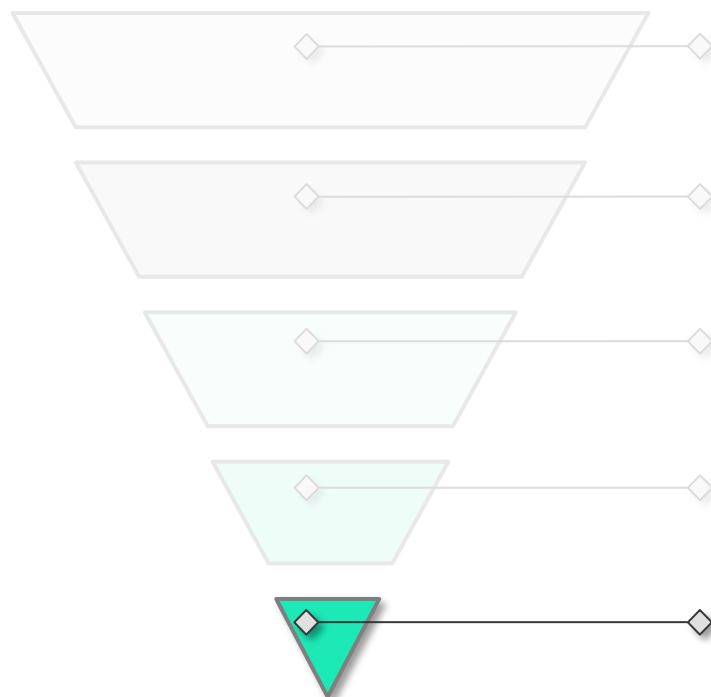
6. Synthèse et principaux constats

Synthèse et principaux constats | Rappel des enjeux et objectifs



Synthétiser les forces, faiblesses, menaces et opportunités pour la filière manufacturière H₂ au Québec. Puis, à **partir des analyses, résultats et conclusions des étapes précédentes, établir un ensemble de constats** soutenus par un **argumentaire étayé et objectif**.

Lien avec la méthodologie d'ensemble



1. ÉTUDE FINE DE L'ÉCOSYSTÈME MANUFACTURIER

- Analyse de plus de 350 acteurs de l'H₂ (*Annexe 1.A.*)
- Sélection de 200 acteurs à approfondir
- Étude de leur stratégie, ambitions, projets, partenariats etc..
- Rencontre avec une 15^{aine} d'acteurs de la filière H₂ (*Annexe 1.B.*)

2. ANALYSE APPROFONDIE DES ÉQUIPEMENTS H₂

- Segmentation de la chaîne de valeur en 14 équipements à analyser finement
- Approfondissement des marchés associés, des grands projets, des MCS, des dynamiques R&D etc...

3. SÉLECTION DE 4 SEGMENTS D'ÉQUIPEMENTS STRATÉGIQUES

- Identification des critères clés pour prioriser les segments : alignement avec la stratégie H₂, capacités Québécoises etc..
- Calcul d'un score pour chaque segment puis sélection des 4 segments les plus prometteurs

4. ANALYSE DES IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES

- Sélection de 9 indicateurs reflétant l'impact socio-économique du développement de la filière manufacturière
- Étude de ces indicateurs pour les 3 segments les plus matures
- Analyse spécifique pour les segments émergents

5. SYNTHÈSE ET PRINCIPAUX CONSTATS

- Définition de 8 grands constats qui ressortent des analyses précédentes
- Élaboration d'argumentaires associés à ces constats



Enjeux principaux

- **Synthétiser une grande quantité d'information** pour en retirer des analyses à haut niveau sur le développement de la filière
- **Traduire cette synthèse en un ensemble de constats factuels, clairs, objectifs et pragmatiques**



Périmètre d'analyse

- **Les 4 segments stratégiques : électrolyseurs, piles à combustibles, réservoirs stationnaires et réacteurs H₂**

Synthèse et principaux constats | Aide à la lecture des constats



Dans un objectif de neutralité et d'objectivité, chaque constat présenté ci-après est étayé par un argumentaire factuel et basé sur l'analyse de l'écosystème et les retours des acteurs interrogés.

CONSTAT

Les constats sont des observations objectives qui ressortent de l'analyse ou des entretiens avec les manufacturiers

ARGUMENTAIRE

L'argumentaire appuie et illustre le constat. Il permet de donner de la profondeur à l'analyse

Constat #1 | Le contexte réglementaire actuel favorise le développement de manufacturiers aux É.-U.

-  Les É.-U. ont mis en place des politiques qui incitent largement les manufacturiers à s'installer localement —
 - Historiquement, une majorité de la production industrielle a été délocalisée en Asie pour minimiser les coûts de production. Récemment, les activités manufacturières ont été ramenées aux É.-U. à la suite de réglementations et politiques favorables
 - Le Buy American Act oblige les entités fédérales à s'approvisionner en biens produits aux É.-U. et qui possèdent leurs chaînes d'assemblage sur place
 - **Effet négatif sur les potentiels marchés d'exportations** de joueurs qui s'implanteraient au Québec qui comptent sur l'approvisionnement des entités fédérales des É.-U.
 - L'Inflation Reduction Act favorise la multiplication des projets de production H₂ aux É.-U. – ce qui tire la demande – et le Bipartisan Infrastructure Law finance les activités manufacturières à travers la création de HUBs H₂
 - L'IRA offre des crédits de taxe pour la production d'hydrogène (jusqu'à 3\$ par kg de H₂ produit)
 - \$7 Mds ont également été investis pour le développement des HUBs H₂ aux É.-U.
-  Une bonne compréhension de ces politiques et de leurs limites permettrait d'enclencher les leviers les plus pertinents
 - Le Québec peut identifier les lacunes dans le secteur manufacturier des É.-U. et dans ces textes pour être en mesure de les combler avec ses différentiateurs
 - **Certaines réticences se font ressentir** du côté des É.-U. face au Buy American Act par exemple : impossibilité de mise en œuvre, augmentation des coûts des projets etc..
 - Exemple de la capacité du QC dans les batteries : 28% des cathodes en Amérique du Nord seront produites à Bécancour d'ici 2030

Constat #1 | Le contexte réglementaire actuel favorise le développement de manufacturiers aux É.-U.



— Les É.-U. ont mis en place des politiques qui incitent largement les manufacturiers à s'installer localement —

- Historiquement, **une majorité de la production industrielle a été délocalisée en Asie** pour minimiser les coûts de production. Récemment, les **activités manufacturières ont été ramenées aux É.-U.** à la suite de réglementations et politiques favorables
- Le Buy American Act **oblige les entités fédérales à s'approvisionner en biens produits aux É.-U.** et qui possèdent leurs chaînes d'assemblage sur place
 - **Effet négatif sur les potentiels marchés d'exportations** de joueurs qui s'implanteraient au Québec qui comptent sur l'approvisionnement des entités fédérales des É.-U.
- L'Inflation Reduction Act **favorise la multiplication des projets de production H₂ aux É.-U.** – ce qui tire la demande – et le Bipartisan Infrastructure Law **finance les activités manufacturières** à travers la création de HUBs H₂
 - L'IRA offre des crédits de taxe pour la production d'hydrogène (jusqu'à 3\$ par kg de H₂ produit)
 - \$7 Mds ont également été investis pour le développement des HUBS H₂ aux É.-U.



— Une bonne compréhension de ces politiques et de leurs limites permettrait d'enclencher les leviers les plus pertinents

- Le Québec peut identifier **les lacunes dans le secteur manufacturier des É.-U. et dans ces textes** pour être en mesure de les combler avec ses différentiateurs
 - **Certaines réticences se font ressentir** du côté des É.-U. face au Buy American Act par exemple : impossibilité de mise en œuvre, augmentation des coûts des projets, etc.
 - Exemple de la capacité du QC dans les batteries : 28% des cathodes en Amérique du Nord seront produites à Bécancour d'ici 2030

Constat #2 | Le Québec a la particularité de pouvoir récupérer de la valeur sur toute la chaîne d'approvisionnement

— La présence de MCS contenus dans les technologies H₂ est un avantage stratégique important pour le Québec —

- Chacune des 9 technologies qui composent les 4 segments d'équipements stratégiques **sont composées d'au moins 50% de MCS** qui sont identifiés par la stratégie provinciale - **dont 7 technologies à plus de 75% de MCS communs avec la vision Québec.**
- **Les MCS sont identifiés comme un enjeu clé par les manufacturiers.** Le marché des MCS est particulièrement **volatil et sensible** aux effets d'annonces des projets.
 - À titre d'exemple, plus de 60% du coût d'une cellule de PEMFC est lié au platine

— La main-d'œuvre du Québec est qualifiée et capable d'assumer les phases à haut contenu technologique —

- Lors de l'implantation d'un manufacturier, **une analyse poussée est élaborée pour identifier les composants à importer ou produire sur place.** Le Québec a une main-d'œuvre capable **d'assumer la majorité des étapes manufacturières**, notamment celles les plus complexes.

— Une attention toute particulière est nécessaire pour récupérer de la valeur sur toutes les étapes de production —

- Lors de l'implantation d'un manufacturier, **une analyse fine de ses chaînes d'approvisionnement** permettra de s'assurer de ne pas positionner uniquement le Québec en tant que territoire où **l'on extrait les minerais puis on assemble des solutions technologiques finies** mais encourager au **maximum le développement des étapes intermédiaires** (transformation des minerais, production de sous-composants, etc.)

Constat #3 | Les choix technologiques sont clés dans un écosystème manufacturier en développement

— — Dans un contexte d'innovations rapides et changeantes, tout miser sur une seule technologie serait très risqué —

- À l'instar de ce qu'il se produit dans la filière batterie, **certaines technologies qui dominent le marché actuellement** (électrolyseurs alcalins, stockage gazeux, etc.) pourraient **se voir remplacer progressivement par des technologies plus efficaces/adaptées** aux besoins du marché. Pour faire face à ce défi, certains manufacturiers développent des usines adaptables pouvant faire la transition d'une technologie à une autre rapidement.

— — L'innovation collaborative comme levier de développement de technologies nouvelles —

- **Renforcer le maillage recherche/industrie et offrir un soutien financier** permettent de dé-risquer la démarche d'innovation.
 - Il pourrait être intéressant pour cela de s'appuyer sur les **regroupements sectoriels de recherche industrielle**: PRIMA, InnovÉE, etc. et le **pôle d'innovation Hydrogène de la VTÉ**.
- **Faciliter la transition des échelles de laboratoires à projets pilotes**, notamment pour les segments stratégiques moins matures (électrolyseurs AEM, réacteurs H2, stockage liquide).
 - Certains programmes d'innovation d'Investissements Québec permettent d'aider à la maturation de technologies (Programme Innovation, Productivité innovation, etc.).

— — L'innovation doit se déployer rapidement pour profiter de la fenêtre d'opportunité actuelle —

- Dans une optique de délivrer des solutions dans des temps cohérents avec les besoins du marché, **le secteur de la R&D profiterait de l'expérience et de l'expertise en gestion de projet d'innovation de certains joueurs industriels**

Constat #4 | Le risque d'inadéquation technologique entre les solutions de l'offre et de la demande est fort

— — Les innovations sont très présentes sur les segments étudiés et dans la filière H₂ de manière générale —

- La diversité des solutions H₂ mises au point dans les laboratoires et, plus récemment, dans les unités de taille commerciale, **a créé une dynamique d'innovation dans toutes les directions** - soutenue par la concurrence économique entre les entreprises et les régions. Cela soutient **une économie fragmentée** dans laquelle **les besoins et les innovations technologiques ne se rencontrent pas toujours**.

— — Il est nécessaire d'orienter et prioriser les développements pour s'assurer que les solutions trouvent un marché dans un horizon temporel aligné avec les besoins des industriels —

- Les régions ont tout intérêt **à orienter l'innovation** vers de nouvelles techniques de fabrication, une moindre dépendance à l'égard de certains minéraux critiques ou l'utilisation d'intrants souhaitables (saumure ou l'eau contaminée pour les électrolyseurs par exemple). Cependant il est nécessaire de **définir des objectifs et priorités par technologies pour rationaliser les efforts et ne pas se disperser**.
 - *Ex : les électrolyseurs alcalins rencontrent des difficultés lorsque la source d'énergie est intermittente, dans le cas où les projets hors réseaux tels que TES Canada se développent au Québec, faut-il prioriser la R&D dans cette technologie?*
- Un développement trop diversifié de technologies peut **compliquer les efforts de standardisation et les initiatives autour de la fin de vie**. Avec trop de formes différentes de composants, le recyclage des minéraux précieux sera un défi.
 - *Des initiatives de priorisation de la R&D existent aux É.-U. avec les jalons fixés par le DOE pour chaque technologie. De même, en Europe, les « Strategic Innovation Milestone » ancrent une vision commune pour la recherche.*

Constat #5 | Il existe plusieurs synergies technico-économiques entre les segments et la filière batterie.



Certains procédés de fabrication sont très similaires et demandent les mêmes composants

- **Soutenir les technologies/procédés similaires permet de faire rayonner plusieurs segments avec le même investissement**
 - ***Il existe des complémentarités fortes entre les procédés de fabrication des PEMFC et les électrolyseurs PEM par exemple.** Ceci est dû à la réversibilité des piles à combustible PEM, qui peuvent être utilisées en sens inverse pour l'électrolyse, et permet donc d'importantes synergies entre les efforts d'innovation des deux technologies.*



Du point de vue des MCS et de la main-d'œuvre des synergies avec la filière batterie sont également observées

- **De nombreux MCS sont contenus dans les technologies H₂ et dans les batteries lithium-ion développées au Québec** : aluminium, carbone, cobalt, cuivre, fer, manganèse, nickel. Il existe alors des complémentarités dans **la filière de recyclage, la R&D**, et pour **assurer une demande locale importante**.
- **Les typologies de métiers** développés par l'implantation des usines sont également **similaires** : techniciens, ingénieurs, support, vente, etc. Une analyse plus approfondie des besoins de main-d'œuvre permettrait de qualifier les ponts de main-d'œuvre entre les deux filières.



La limite est fine entre synergies et compétitions inter-filières

- Dans le cas où la main-d'œuvre et les MCS **se retrouvent en tension, ces synergies se transforment alors en compétition** (c.-à-d., un bassin de main-d'œuvre insuffisant pour les deux filières, et un approvisionnement de MCS trop faible pour soutenir les deux filières). Il serait alors intéressant de **quantifier précisément ces deux points pour caractériser les interactions entre les filières**.

Constat #6 | La capacité et la volonté d'accompagnement des autorités locales sont regardées de près par les manufacturiers



Les financements aident l'implantation des manufacturiers mais ne sont pas les seuls leviers d'actions

- L'ensemble des mesures ci-après **soutiennent activement l'implantation de manufacturiers** sur le territoire :
 - **Simplification des procédures d'implantation**
 - **Standardisation et certification des technologies**, élaboration de normes
 - **Positionnement du QC en tant qu'acheteur** d'une partie de la production
 - **Mise en contact avec l'écosystème industriel et académique local** et **aidez au développement de potentiels sous-traitants**



Le Québec profiterait de l'élaboration d'une vision commune sur les investissements directs étrangers

- **L'uniformisation du message** porté par le Québec et de « son image de marque » ainsi que **la mise en commun des efforts pour attirer des manufacturiers étrangers** amélioreraient l'efficacité des actions portées dans ce domaine

Constat #7 | La course est lancée et le Québec dispose d'atouts stratégiques pour se positionner.



Les capacités industrielles sont déjà bien développées sur les segments stratégiques les plus matures

- Sur ces marchés, **le rapport de force actuel est plutôt du côté des manufacturiers**. La majorité des acteurs internationaux sont des manufacturiers bien établis, de grandes tailles, et qui se diversifient avec l'H₂ et cherchent la localisation la plus intéressante pour eux.
- Ces joueurs recherchent en priorité **une demande locale pour leurs équipements, de la main-d'œuvre qualifiée, du soutien et des relais locaux, une électricité peu chère et décarbonée, des MCS en lien avec les technologies H₂, etc.**
- **De larges investissements ont déjà été observés** sur les marchés des électrolyseurs, des piles à combustible et des réservoirs, mais aucun au Québec. Cependant, la majorité des besoins des manufacturiers sont similaires avec ce que propose le territoire – **le Québec est donc en posture favorable pour accueillir de prochains investissements.**



Certains marchés stratégiques émergents résonnent fortement avec les atouts du Québec

- Les acteurs qui prennent des risques en se lançant sur les marchés encore en développement des **réacteurs H₂** ou des **électrolyseurs AEM, récupèrent des parts de marché et des retours d'expériences précieux**
- **Des expertises sur les procédés de gazéification et pyrolyse par plasma** sont détenues par les universités McGill, Polytechnique, INRS, UQTR, Concordia, Sherbrooke, etc. Des entreprises comme **Pyrogenesis** au Québec, ou **Cypher Neutron** en Ontario sont également prometteuses sur ces marchés émergents.

Constat #8 | L'absence de signal clair des politiques actuelles freine l'implantation des manufacturiers H₂



— Le développement d'une politique industrielle chiffrée permet de réduire le risque et l'incertitude des joueurs —

- Le **rationnel principal** dans le choix d'implantation d'un manufacturier réside dans **sa confiance envers la demande locale**. Le déploiement d'une **politique industrielle manufacturière donnerait de la visibilité** et permettrait **de réduire le risque prévisionnel des investisseurs et promoteurs**.
- Plusieurs annonces de projets de grande envergure au Québec (TES, Greenfield, etc.) sont regardées de près par les manufacturiers, mais **la peur des effets d'annonces dans un écosystème H₂ très volatil freine les investissements**
- Une politique industrielle manufacturière chiffrée **compléterait la vision existante** développée dans Stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies qui fixe le cap jusqu'à 2030. Elle pourrait détailler – entre autres - **les orientations R&D, l'implication du milieu universitaire, la part des équipements pour le marché local et pour l'exportation, la demande en MCS**, etc.



— Clarifier les technologies à prioriser et les standards à utiliser faciliteraient le passage à l'échelle —

- Il est **difficile de naviguer dans l'univers manufacturier H₂** du fait du caractère changeant de l'écosystème : **innovations régulières, standards qui varient selon les géographies, les projets, etc.** Une politique industrielle manufacturière donnerait **les orientations et une vision claire** pour les équipementiers.



ANNEXES



ANNEXE.1 Méthodologie détaillée

ANNEXE 1.A. | Base de données et type d'informations recherchées



L'analyse se base **sur une étude fine des joueurs** constituant l'écosystème manufacturier. Pour ce faire, **une revue complète des manufacturiers québécois et internationaux a été réalisée**, balisant au total plus de 300 acteurs de l'écosystème.

Processus d'analyse de l'écosystème

Liste consolidée | 312 acteurs



Critères d'élimination | Ex : taille de l'entreprise, secteur activité, etc.

Liste préliminaire | 156 manufacturiers



Critères d'analyse haut niveau | Ex : Ambitions H₂, Influence, etc.

Liste travaillée | 156 manufacturiers triés et analysés



Analyse écosystème approfondie | Ex : Voir ci-contre

Livrable analyse écosystème | 14 Segments de production d'équipement

Zoom sur l'analyse de l'écosystème

- **1 | Caractérisation fine de l'acteur** : taille, présence au Qc, géographie, etc.
- **2 | Identification du segment de production d'équipements**
- **3 | Analyse des technologies utilisées et de la propriété intellectuelle**
- **4 | Analyse des capacités de production** : nombre d'installations, capacités installées, commandes, etc.
- **5 | Partenariats stratégiques/technologiques** : rachats, joint-venture, implémentation dans pays étrangers, partenariats fournisseurs techno., etc.
- **6 | Autres informations utiles** : ambitions, positionnement concurrentiel, projets clés, applications des technologies, etc.

[illegible]

312 acteurs
Haut niveau

156 manufacturers
Analyse fine

+800 sources
Utilisées

ANNEXE 1.B. | Entretien avec les acteurs de la filière H₂



En parallèle de cette analyse de l'écosystème, **les joueurs de la filière H₂ ont été rencontrés individuellement** pour comprendre leurs besoins et attentes. Par ailleurs, le comité de pilotage du projet se composait de **plusieurs institutions gouvernementales** et les résultats ont été présentés plusieurs fois à un panel d'experts du milieu de l'H₂.

Joueurs rencontrés individuellement



Comité de pilotage



Experts du milieu

