

RAPPORT

POTENTIEL D'ADOPTION DE L'HYDROGÈNE VERT DANS LE TRANSPORT LOURD ET DE LONGUE DISTANCE AU QUÉBEC



À PROPOS DE CE RAPPORT

Le présent rapport a été préparé par WSP Canada inc. (WSP) pour le destinataire, Propulsion Québec, conformément à l'entente de services professionnels. La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport relève uniquement de la responsabilité du destinataire visé. Le contenu et les opinions se trouvant dans le présent rapport sont basés sur les observations et informations disponibles pour WSP au moment de sa préparation. Si un tiers utilise, se fie, ou prend des décisions ou des mesures basées sur ce rapport, ledit tiers en est le seul responsable. WSP n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages que pourrait subir un tiers en conséquence de l'utilisation de ce rapport ou à la suite d'une décision ou mesure prise basé sur le présent rapport. Ces limitations sont considérées comme faisant partie intégrante du présent rapport.

L'original du fichier technologique que nous vous transmettons sera conservé par WSP pour une période minimale de dix ans. Étant donné que le fichier transmis au destinataire n'est plus sous le contrôle de WSP, son intégrité n'est pas garantie. Ainsi, aucune garantie n'est donnée sur les modifications qui peuvent y être apportées ultérieurement à sa transmission au destinataire visé.

ÉQUIPE DE RÉALISATION

PROPULSION QUÉBEC

Cédrick Lalaizon, Directeur, Innovation et Expérimentation

INNOVÉÉ

Alex Champagne-Gélinas, Directeur, Développement Stratégique
Olivier Chaudret, Analyste énergie et transports électriques et intelligents

WSP CANADA INC. (WSP)

Romain Taillandier, Directeur Principal, Services-Conseils en Système de Mobilité

Michel Veilleux, Directeur Principal, Services-Conseils stratégiques – Transport et infrastructure

Camille Bandelier, Consultante principale, Transition énergétique

Shan Campeau, Consultant, Système de mobilité

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	6
1.1 Mise en contexte	6
1.2 Objectifs du mandat et méthodologie	7
1.3 Définition du transport lourd	7
1.4 Limites principales	8
2. CONSIDÉRATIONS AUTOUR DE L'HYDROGÈNE	9
2.1. Production d'hydrogène vert au Québec	9
2.2. Véhicules à hydrogène	10
2.3. Infrastructures de distribution et de ravitaillement en hydrogène	13
2.4. Coûts totaux de possession	15
3. ÉTUDES DE CAS	18
3.1. Projets canadiens	18
3.2. Projets internationaux	24
4. AJOUTER L'HYDROGÈNE AU MIX ÉNERGÉTIQUE DU QUÉBEC	28
4.1. Aspects techniques	29
4.2. Aspects économiques	33
4.3. Aspects sociaux	36
4.4. Aspects législatifs et gouvernementaux	38
5. MODÈLE D'AFFAIRES	40
6. CONCLUSION	43

TABLEAUX

TABLEAU 1 : COMPARAISON TECHNOLOGIQUE	11
TABLEAU 2 : PROJETS DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE IMPLANTÉS ET ENVISAGÉS AU QUÉBEC, OCTOBRE 2023	19
TABLEAU 3 : ÉLÉMENTS DU PROJET 117 ET STATUT	22

FIGURES

FIGURE 1 : TRAIN ÉLECTRIQUE DU VÉHICULE À BATTERIE	10
FIGURE 2 : ILLUSTRATION DU PROCESSUS DE DISTRIBUTION DE L'HYDROGÈNE DEPUIS UNE SOURCE GAZEUSE	14
FIGURE 3 : ILLUSTRATION DU PROCESSUS DE DISTRIBUTION DE L'HYDROGÈNE DEPUIS UNE SOURCE LIQUIDE	14
FIGURE 4 : COÛT TOTAL DE POSSESSION ACTUEL ET FUTUR DES CARBURANTS ET DES GROUPES MOTOPROPULSEURS	15
FIGURE 5 : FEUILLE DE ROUTE TECHNOLOGIQUE DE L'HYDROGÈNE	16
FIGURE 6 : STATIONS-SERVICE HYDROGÈNE ET USINES DE PRODUCTION EN SUISSE, JUIN 2023	25
FIGURE 7 : MODULE DE TRANSPORT DE L'HYDROGÈNE GAZEUX À 350 BARS	27
FIGURE 8 : EXEMPLE D'UN MODÈLE D'AFFAIRES ENVISAGEABLE POUR LE QUÉBEC	40

1.

INTRODUCTION

1.1. MISE EN CONTEXTE

Le gouvernement du Québec s'est engagé, par son plan pour une économie verte, à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) de la province de 37,5 % d'ici 2030. En 2020 le transport représentait 44 % des émissions totales, sans compter les polluants atmosphériques (oxydes d'azote et particules fines) émis. Les camions lourds comptaient pour 18 % de la consommation énergétique du secteur au Québec et 24 % au Canada^[1]. Le camionnage lourd représente ainsi un fort potentiel de décarbonation. La stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies, dévoilée par le gouvernement le 25 mai 2022, illustre que l'hydrogène vert^[2] peut être une alternative intéressante à considérer. Par ailleurs, la lettre ouverte^[3] soumise en janvier 2022 par Propulsion Québec – grappe industrielle des transports électriques et intelligents au Québec – et InnovÉÉ – plaque tournante de la recherche et développement collaboratif dans les secteurs de l'énergie et des transports électriques et intelligents – indique que l'hydrogène vert pourrait être pertinent pour le transport lourd et de longue distance. C'est dans ce contexte que les parties prenantes du secteur des transports électriques et intelligents se questionnent sur le positionnement à adopter vis-à-vis l'hydrogène vert et l'importance de la place à lui accorder pour le transport lourd et de longue distance.

Ainsi, Propulsion Québec et InnovÉÉ travaillent avec différents partenaires sur la création d'un livre blanc portant sur l'utilisation de l'hydrogène vert dans le transport lourd et de longue distance au Québec pour bien comprendre les opportunités et limites de l'hydrogène dans le secteur du transport. Ce livre est constitué de trois volets :

Le volet 1, complété par l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH), présente une revue de littérature sur le potentiel d'utilisation de la technologie des piles à combustible à hydrogène vert dans le transport lourd routier, en particulier au Québec. C'est dans ce volet que le secteur du camionnage lourd longue distance a été identifié comme l'un des secteurs du domaine des transports et de la logistique où l'hydrogène pourrait être le plus pertinent et avoir le plus grand impact pour lancer la filière de l'hydrogène au Québec.

Le volet 2, rédigé par Amp&Axle Consulting, présente les différentes technologies envisageables pour le secteur et leurs cas d'usage. Une synthèse de ces deux volets est présentée dans ce présent rapport.

Le volet 3, objet du présent rapport, présente la perception des usagers de l'industrie du camionnage lourd pour mieux cerner les besoins et préoccupations pour faire le choix du bon mix énergétique dans la décarbonation de leurs opérations et possiblement favoriser le développement de la filière de l'hydrogène vert au Québec.

[1] Whitmore, J. et P.-O. Pineau, 2023. État de l'énergie au Québec 2023, Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, préparé pour le gouvernement du Québec

[2] [L'International Renewable Energy Agency](#) définit l'hydrogène vert comme étant de l'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable

[3] [Avis dans le cadre de la consultation sur l'hydrogène vert et les bioénergies](#), Propulsion Québec et InnovÉÉ, 20 janvier 2022

1.2 OBJECTIFS DU MANDAT ET MÉTHODOLOGIE

Propulsion Québec et InnovÉÉ ont mandaté la firme d'ingénierie WSP afin de développer le 3e volet du livre blanc. Le mandat comprend la revue de cas d'études de projets à succès au Québec et en Europe.

L'objectif de ce rapport est notamment de comprendre les attentes et perceptions des parties prenantes, et la place que l'hydrogène pourrait jouer au sein de leur écosystème. Les discussions avec les parties prenantes ont permis d'identifier les obstacles existants et les conditions de succès à remplir. Ce rapport est ainsi le fruit d'une démarche de concertation avec les acteurs clés du marché, particulièrement les utilisateurs de véhicules lourds et de longues distances.

WSP a ainsi conduit des entrevues individuelles avec des parties prenantes^[4] afin d'identifier leurs enjeux et les besoins respectifs en termes d'opération, d'utilisation et de développement des véhicules lourds à hydrogène et de l'infrastructure associée. WSP s'est également appuyé sur son réseau afin de bénéficier d'expertise internationale du secteur, et sur la revue de littérature réalisée par l'Institut de Recherche en Hydrogène (IRH) pour compléter l'étude.

Par ailleurs, Propulsion Québec et InnovÉÉ ont désigné un comité de pilotage^[5] qui s'est réuni à plusieurs reprises au cours du mandat pour valider la liste des parties prenantes consultées, le guide d'entrevue ainsi que l'élaboration du présent rapport, du début à la fin.

1.3 DÉFINITION DU TRANSPORT LOURD

Au Québec, le transport ou camionnage lourd fait référence à l'acheminement de marchandises, de matériaux, de personnes ou d'équipements, par un véhicule dont le poids nominal brut dépasse les 26 000 lb (camions catégorisés de classe 7) ou 33 000 lb (camions catégorisés de classe 8). En plus du type et de la charge tractée par les véhicules considérés, la distance est également un facteur dimensionnant dans la planification des déplacements.

Dans le cadre de cette étude, il sera essentiellement question de transport par véhicules de classe 8, comprenant principalement les camions semi-remorques, camions-bennes et certains camions-boîtes à double essieu. À noter que certains véhicules-outils ou spécialisés, tels que les camions de pompiers et les camions à ramassage de rebuts, sont également inclus dans cette catégorie, mais ne sont pas étudiés dans le cadre de cette étude. Les véhicules lourds transportant des passagers (autobus, par exemple) sont également exclus de la présente étude, au vu de leur cas d'utilisation différents.

À noter qu'au sein de ce rapport, sauf indication contraire, le terme de « transport » fait référence au transport lourd et de longue distance. L'hydrogène dont le rapport fait référence est sauf indication contraire ou explicite de l'hydrogène vert produit à partir d'électricité de source renouvelable (ex. : hydraulique, éolien, solaire, etc.) ou de biomasse.

^[4] Une liste détaillée des parties prenantes est fournie à l'annexe A.

^[5] Une liste détaillée des participants du comité de pilotage est disponible à l'annexe B.

1.4 LIMITES PRINCIPALES

Ce rapport présente un travail qualitatif basé sur les informations recueillies lors des entrevues et sur des données publiques, site internet des entreprises, articles scientifiques, etc. Les informations mentionnées au sein de la section sur les véhicules à hydrogène et leur utilisation dans le transport lourd et de longue distance (Section 2) sont issues des volets 1 et 2 du livre blanc, respectivement écrit par l'IRH (en date de décembre 2022) et Amp&Axle (en date de mars 2023) et n'ont pas fait l'objet d'une revalidation exhaustive de la part de WSP (voir rapport en annexe).

Le secteur de l'hydrogène vert étant encore émergent, notamment pour une utilisation dans les transports lourds, les données et faits mentionnés dans le présent rapport sont à mettre en perspective; peu de données sont disponibles publiquement, en particulier pour le Québec, et les parties prenantes ne partagent pas toujours la totalité de leurs informations pour des raisons commerciales de confidentialité. À noter également que l'accès limité à l'information, ainsi que les incertitudes entourant la filière, limitent la capacité des opérateurs de parcs véhiculaires à se projeter avec de nouveaux modèles d'affaires.

Le contexte peut également changer rapidement. Des projets clés au Québec ont été annoncés au cours de ce mandat. L'acquisition de six camions à hydrogène par Harnois Énergie, le projet de démonstration du train Coradia iLint d'Alstom alimenté par de l'hydrogène vert et le projet Trans-Québec offrant un réseau structuré par sept stations de ravitaillements à hydrogène, par exemple, démontre le dynamisme et les changements rapides de ce secteur. Il est donc périlleux de prévoir avec certitude l'évolution du marché, les directions et les décisions que prendront les industries et gouvernements. Il est aussi important de noter que les technologies, leurs avantages, inconvénients et enjeux ont été étudiés en date de ce mandat (2023), et qu'une évolution rapide de ces technologies est possible.

Ce rapport présente des cas d'études québécois et suisse. Ces exemples ne sont pas exhaustifs et ne couvrent en aucun cas tous les projets développés mondialement; plusieurs initiatives sont présentement développées en Amérique du Nord, en Europe, en Australie, etc. Le rapport traite des cas qui semblent les plus adaptés au contexte québécois, avec la meilleure efficacité énergétique et le meilleur potentiel de décarbonation, dans la limite du temps imparti pour réaliser l'étude.

2.

CONSIDÉRATIONS AUTOUR DE L'HYDROGÈNE

2.1 PRODUCTION D'HYDROGÈNE VERT AU QUÉBEC

Il existe différentes techniques de production de l'hydrogène. Un système de couleur est souvent utilisé pour qualifier les différents types de production. On parle, par exemple d'hydrogène noir ou gris pour les hydrogènes produits à partir de pétrole et de gaz et d'hydrogène bleu lorsque la production est couplée à des systèmes de capture du carbone. L'hydrogène vert qualifie les méthodes de production utilisant des sources renouvelables.

La production d'hydrogène vert peut passer par un processus d'électrolyse, qui sépare les molécules d'eau (H₂O) en molécules hydrogène (H₂) et d'oxygène (O) grâce à l'électricité. Ce processus est énergivore, nécessitant entre 43 et 53 kWh pour chaque kilogramme d'hydrogène produit^[6], selon l'efficacité de l'électrolyseur, en plus d'utiliser plus de 18 litres d'eau. Si le courant utilisé provient d'une source d'énergie renouvelable (hydroélectricité, énergie éolienne ou solaire), tous les éléments du cycle de production sont alors à faible empreinte carbone, et l'hydrogène produit peut porter l'appellation d'hydrogène vert. Comme le Québec présente de l'électricité provenant d'un réseau à 95 % hydroélectrique, le procédé par électrolyse constitue un fort potentiel de production. Actuellement, l'hydrogène vert représente environ 2 % de la production mondiale et ses coûts de production sont plus élevés que ceux de l'hydrogène gris produit grâce au vaporeformage du gaz naturel^[7]. Il est à noter par ailleurs que la production d'hydrogène gris consomme plus d'eau que l'électrolyseur. Un bilan global des procédés de génération d'hydrogène permettrait de mieux mettre en perspective la consommation des ressources requises pour la production.

[6] Étude sur le potentiel technico-économique du développement de la filière de l'hydrogène au Québec et son potentiel pour la transition énergétique – Volet B

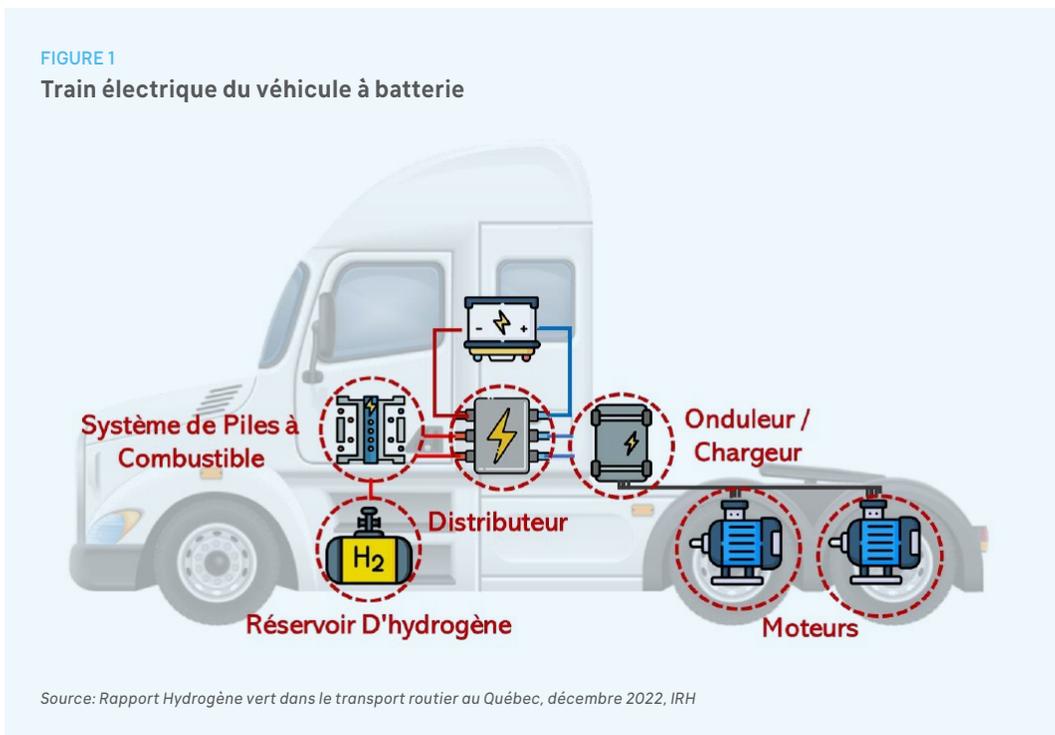
[7] <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/energie/production-approvisionnement-distribution/hydrogene-vert#:~:text=L'hydrog%C3%A8ne%20produit%20porte%20,ceux%20de%20l'hydrog%C3%A8ne%20gris>

Une autre option basse en carbone consiste à produire de l'hydrogène à partir de la gazéification de la biomasse, principalement dans les secteurs forestier, agricole et des matières résiduelles municipales, commerciales et industrielles, dont le Québec produit un potentiel technique de disponibilité calculé d'environ 19,2 millions de tonnes métriques anhydres^[8].

L'utilisation de l'hydrogène pour le transport lourd et de longue distance doit permettre une diminution drastique des émissions de GES pour s'inscrire dans les plans de transition du Québec. Dans ce contexte, il est impératif que l'hydrogène soit produit à partir de sources peu émettrices.

2.2 VÉHICULES À HYDROGÈNE

Le marché actuel se concentre sur deux technologies pour propulser les véhicules à l'aide d'hydrogène. La première technologie repose sur la pile à combustible. Elle est utilisée dans des véhicules entièrement électriques. Une pile à combustible est un dispositif qui convertit l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité par la réaction de l'hydrogène et de l'oxygène. Cette électricité est ensuite utilisée soit directement pour alimenter le moteur électrique, soit pour charger une batterie de faible capacité qui est connectée au moteur. Cette dernière configuration permet de maintenir un cycle d'opération optimal pour la pile à combustible et de récupérer l'énergie de freinage, ce qui augmente l'efficacité globale du véhicule. Le sous-produit de la réaction chimique n'est que de la vapeur d'eau. Ainsi, ce type de véhicule n'émet pas de gaz à effet de serre pendant la conduite.



[8] https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/economie/publications-adm/politique/PO_strategie_hydrogene-vert-bioenergies_version-ecran_MEIE.pdf

La deuxième technologie consiste à remplacer, ou adapter, le moteur diesel traditionnel par un moteur à combustion interne d'hydrogène, qui est alimenté par un réservoir d'hydrogène comprimé. Les autres composants principaux du groupe motopropulseur restent les mêmes que pour les véhicules diesel traditionnels. Cette technologie offre la possibilité de bénéficier des avancées technologiques des moteurs à combustion interne, telles que la fiabilité, la durabilité, la chaîne d'approvisionnement existante, les infrastructures de fabrication et de recyclage existantes, ainsi que l'accessibilité financière. Cependant, puisque l'hydrogène subit une combustion, des oxydes d'azote (NOx) sont émis pendant la conduite, ce qui signifie que ce véhicule ne peut pas être qualifié de zéro émission, et la pollution sonore demeure. L'efficacité énergétique, depuis la production de l'énergie jusqu'à la roue, des systèmes ou véhicules fonctionnant à l'hydrogène est également plus faible (30%) que lorsqu'utilisée dans des piles à combustibles (35%) et beaucoup moins que pour de l'électrique par batterie (70-90%).

Pour les deux technologies, lorsque l'hydrogène utilisé pour alimenter le système provient de sources renouvelables, ces technologies peuvent permettre une réduction significative des émissions.

Le **TABLEAU 1** ci-dessous présente les caractéristiques principales des deux technologies, comparées à la technologie des batteries seules, lors de leur intégration dans des camions lourds de classe 8, avec un poids nominal brut supérieur de près de 15 tonnes, soit la majorité des camions de livraison longue distance classiques.

TABLEAU 1
Comparaison technologique ^[9]

	PILE A COMBUSTIBLE	MOTEUR A HYDROGENE	BATTERIES SEULES	DIESEL
CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES	Groupe motopropulseur tout électrique, et donc zéro émission durant la conduite. Utilise l'hydrogène comme source première de carburant.	Groupe motopropulseur à combustion interne, émissions de NOx. Utilise l'hydrogène comme source première de carburant.	Groupe motopropulseur tout électrique, et donc zéro émission durant la conduite. Se décharge lors de la conduite et doit être rechargé régulièrement.	Technologie connue, et améliorée au fil de dizaines d'années.
IMPACT DE L'HIVER EN OPÉRATION	Les piles à combustible sont sensibles au gel ; cependant, le processus de génération d'électricité par les piles à combustible génère de la chaleur qui permet des opérations entre -30 °C et +45 °C sans impact sur les performances.	Peu d'informations disponibles, les caractéristiques de performance des moteurs à hydrogène sont similaires à celles du diesel	Les basses températures entraînent une surconsommation électrique (due au chauffage de la batterie et du véhicule), ce qui impacte la performance des batteries. Il est estimé que pour un camion de 31,9 tonnes, l'autonomie du véhicule diminuera graduellement de 35 % à -20°C. ^[10]	La performance des véhicules diesel en hiver diminue, surtout au démarrage, le temps que le moteur atteigne ses températures d'opération régulières.

[9] Les chiffres sont basés sur des estimations détaillées dans les revues de littérature effectuées dans le cadre des volets 1 et 2 du livre blanc. Ces informations, non vérifiées par WSP, doivent être utilisées en conséquence, dans le but de démontrer la complémentarité entre plusieurs technologies.

[10] <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ZETractorTrailers-Working-Paper042019.pdf>

TABLEAU 1

Comparaison technologique (suite)

	PILE À COMBUSTIBLE	MOTEUR À HYDROGÈNE	BATTERIES SEULES	DIESEL
AUTONOMIE ESTIMÉE DU VÉHICULE SOUS OPÉRATION RÉGULIÈRE	Varie entre 800 km et 1600 km.	Potentiellement moins que la pile à combustible car consommation d'hydrogène plus élevée par kilomètre.	Jusqu'à 850 km en conditions optimales avec 900 kWh (Tesla Semi)	Jusqu'à 3 000 km et plus.
QUANTITÉ D'HYDROGÈNE NÉCESSAIRE POUR SE DÉPLACER (KG)	40 kg à 60 kg d'hydrogène pour parcourir 800 km à 1 600 km	53 kg à 80 kg d'hydrogène pour parcourir 800 km à 1 600 km (~1/3 de plus d'hydrogène pour obtenir la même autonomie qu'avec une pile à combustible).	N/A	N/A
CONSUMMATION ÉNERGÉTIQUE ÉQUIVALENTE	3 ^[11] kWh/km	6 – 6.5 kWh/km	1.25 – 1.75 kWh/km Une batterie d'une capacité de stockage de 1000 kWh permet de parcourir ~800 km.	5.5 – 6 kWh/km
NIVEAU DE MATURITÉ TECHNOLOGIQUE^[12]	NMT 7	NMT 6	NMT 8	NMT 9
TEMPS DE REMPLISSAGE MOYEN POUR ATTEINDRE L'AUTONOMIE MAXIMALE	Entre 20 et 30 minutes	Entre 20 et 30 minutes	Plusieurs heures (en fonction de la batterie et de la puissance du chargeur)	10 minutes
DURÉE DE VIE MOYENNE	5 à 10 ans ^[13] (pile à combustible)	Non-disponible	6 ans (batterie)	10 à 15 ans (moteur)
POIDS DES COMPOSANTS CLÉS (PROJECTION 2030)	1860 kg (moteur, batterie, système pile à combustible et réservoir)	Non-disponible	3 570 kg (moteur et batterie)	1 000 kg (moteur)

[11] <https://theicct.org/publication/fuel-cell-tractor-trailer-tech-fuel-jul22/>

[12] <https://ised-isde.canada.ca/site/innovation-canada/fr/niveaux-maturite-technologique>

[13] <https://blog.ballard.com/benefits-of-fuel-cells>

Les informations présentées dans le **TABLEAU 1** ci-dessus dressent l'état actuel des technologies à hydrogène et permettent de montrer une complémentarité entre les batteries et l'hydrogène.

VÉHICULES – GRANDS CONSTATS :

- À la lumière de nos analyses, le choix de l'hydrogène avec la technologie de pile à combustible s'avère optimal dans le cas d'utilisation prolongée des véhicules, et lorsque les besoins en transport sont soumis à des contraintes de temps importantes, avec des origines et destinations variées, ne revenant pas systématiquement au même endroit. Un cas d'usage est le transport de marchandises longue distance, compte tenu des conditions de charge utile et d'autonomie pour la rentabilité des opérations de camionnage. Dans ces conditions, interrompre les trajets plus d'une heure toutes les deux à trois heures pour recharger les batteries à une station viendrait réduire l'efficacité opérationnelle du camionnage, un avantage déterminant de la technologie de l'hydrogène^[14] sur la batterie seule.
- La technologie des véhicules électriques à batterie s'avère davantage optimale pour les véhicules légers de type automobile, camionnettes ou fourgon de livraison, transportant des volumes de marchandise plutôt que de masse et dont les besoins en autonomie sont relativement faibles. Pour ces applications la technologie batterie offre une meilleure efficacité énergétique et un meilleur coût d'usage^[15].

2.3 INFRASTRUCTURES DE DISTRIBUTION ET DE RAVITAILLEMENT EN HYDROGÈNE

Il existe deux options principalement considérées et utilisées pour la distribution et le stockage de l'hydrogène aujourd'hui : le transport sous forme de gaz comprimé, et le transport sous forme liquide, grâce à des réservoirs cryogéniques à de très basses températures, soit -253°C. Cette dernière option implique des pertes par évaporation (jusqu'à 1% de l'hydrogène transporté^[16]) dans le réservoir d'hydrogène, en plus d'ajouter un processus de liquéfaction^[17]. Daimler Truck a par ailleurs récemment célébré le premier ravitaillement d'hydrogène liquide au sein d'un camion. Au cours du processus de ravitaillement, de l'hydrogène liquide cryogénique à -253°C fut transféré dans deux réservoirs de 40 kg à bord du véhicule. Grâce à l'isolation particulière des réservoirs, l'hydrogène a pu être maintenu à température pendant une période suffisamment longue, sans refroidissement actif^[18]. Le développement de cette technologie permettrait de réduire le prix des unités de stockage de 35% par rapport au stockage à 350 bars, mais les principaux défis de perte par évaporation demeurent présents.

À bord des véhicules lourds, l'hydrogène se présente plus souvent sous forme gazeuse et comprimée à une pression de 700 bars, correspondant à une densité volumétrique de 20 à 25 g d'H₂/L de réservoir. Cette pression permet de réduire la masse de 23%, lorsque comparé à sa forme gazeuse comprimée à une pression de 350 bars^[19]. Pour ravitailler le véhicule, l'hydrogène est distribué via une station de remplissage. Que l'hydrogène soit initialement sous forme gazeuse ou liquide, il doit être transformé en passant par plusieurs étapes de compression, voire d'évaporation, avant de pouvoir être distribué via des pistolets, tel que présenté par les **FIGURES 3 ET 4** ci-dessous.

[14] Livre blanc sur l'Hydrogène - Volet 2 - Intelligence véhiculaire, Amp&Axle

[15] Livre blanc sur l'Hydrogène - Volet 2 - Intelligence véhiculaire, Amp&Axle

[16] <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21156693#:~:text=Ceci%20se%20traduit%20par%20des,stockage%20utilis%C3%A9s%20en%20milieux%20confin%C3%A9s.>

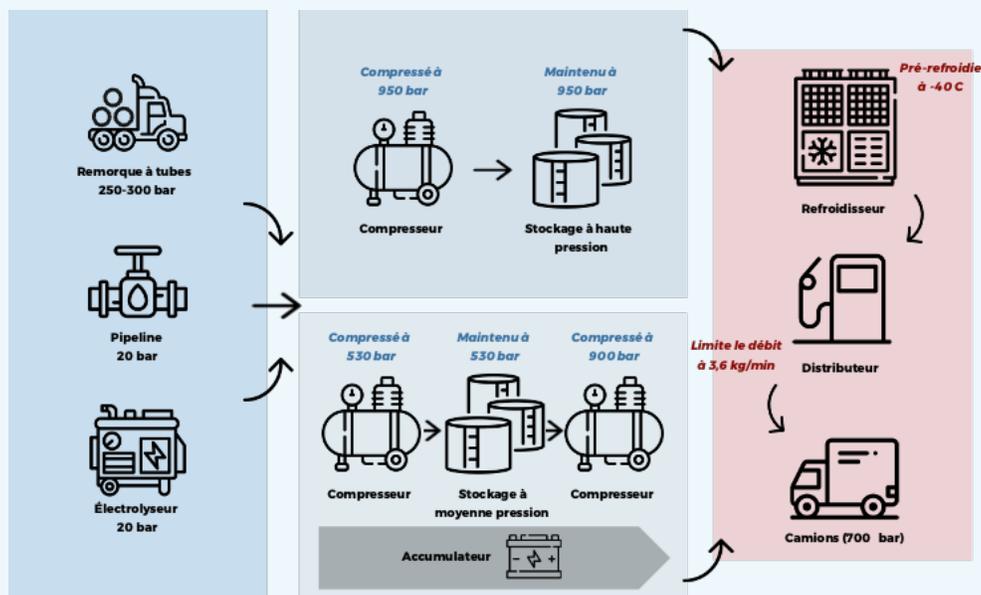
[17] <https://www.mdpi.com/2032-6653/12/3/136>

[18] <https://media.fr.daimlertruck.com/un-jalon-sur-la-route-du-developpement--daimler-truck-teste-un-camion-a-pile-a-combustible-avec-de-lhydrogene-liquide/>

[19] Livre blanc sur l'Hydrogène - Volet 2 - Intelligence véhiculaire, Amp&Axle

FIGURE 2

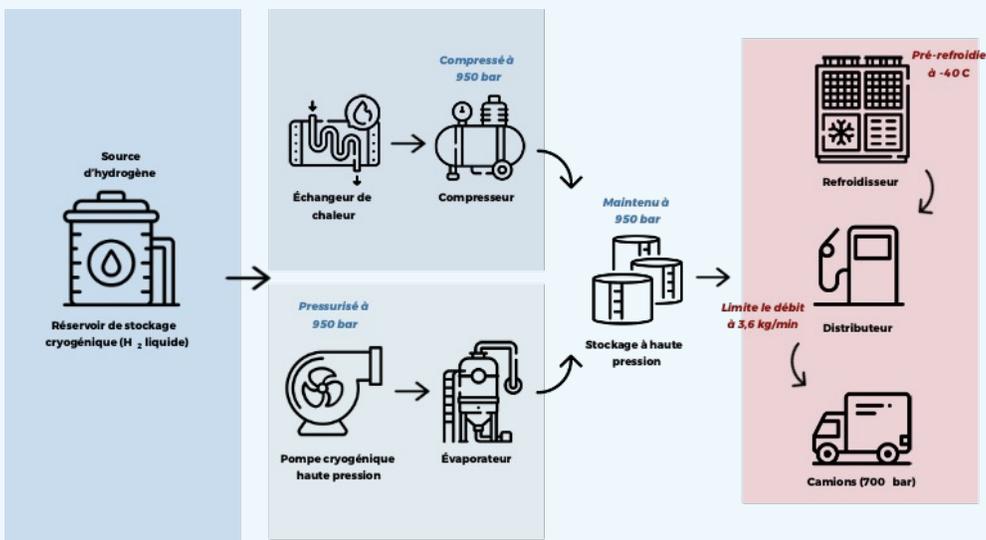
Illustration du processus de distribution de l'hydrogène depuis une source gazeuse



Source: Rapport Hydrogène vert dans le transport routier au Québec, décembre 2022, IRH

FIGURE 3

Illustration du processus de distribution de l'hydrogène depuis une source liquide



Source des Figures 3 et 4 : WSP, adaptée du Rapport Hydrogène vert dans le transport routier au Québec, décembre 2022, IRH

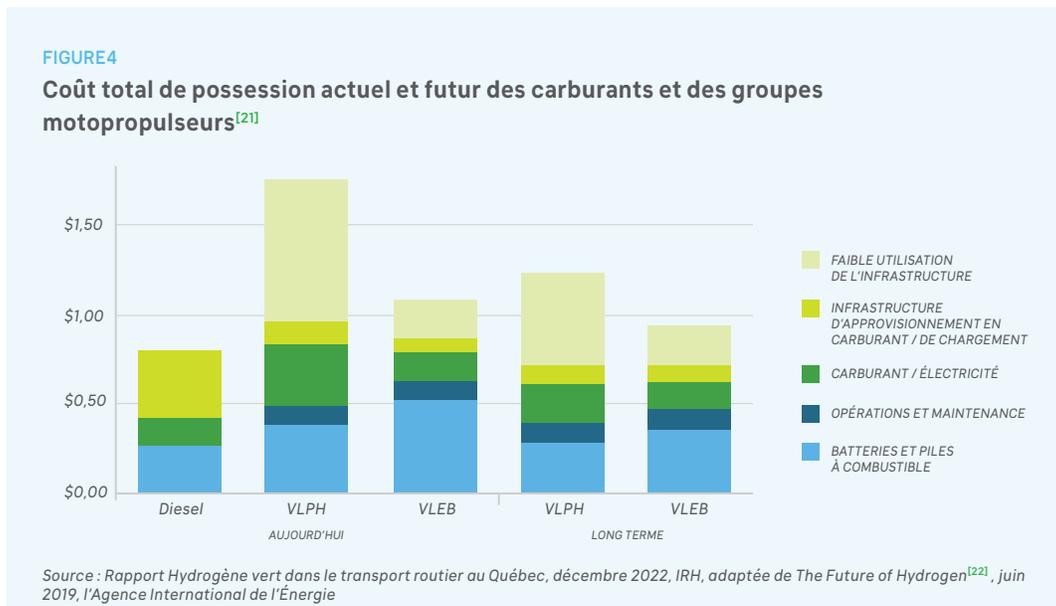
Les systèmes de ravitaillement en hydrogène comprimé à 350 bars et 700 bars sont déjà expérimentés pour les autobus et les automobiles. Le ravitaillement en hydrogène à 700 bars apporte cependant des défis supplémentaires liés aux nécessaires étapes de pré-refroidissement et au débit élevé requis pour une utilisation performante. Le laboratoire NREL, par exemple, a atteint un débit massique moyen de 14 kg/min (21 kg/min en pointe) ouvrant la possibilité d'un remplissage de 60 à 80 kg en moins de 10 minutes.^[20]

Des innovations sont attendues dans le stockage de l'hydrogène. Par exemple, l'hydrogène peut être convertie en ammoniac, lequel peut être utilisé comme vecteur énergétique pour faciliter le transport de l'hydrogène. À destination, l'ammoniac peut être décomposé via un catalyseur pour produire de l'hydrogène et de l'azote. Des recherches sont en cours pour développer des liquides organiques porteurs d'hydrogène qui permettent de stocker l'hydrogène sous forme liquide, avec une densité élevée. Cela faciliterait ainsi son transport et son stockage par rapport au gaz comprimé, tout en évitant les problèmes de toxicité que présente l'ammoniac. Ces procédés diminuent toutefois encore plus l'efficacité énergétique des systèmes fonctionnant à l'hydrogène et ne devrait être privilégiés que dans des circonstances où la densité énergétique relativement faible de l'hydrogène nuit à son utilisation (le transport maritime, notamment).

Par ailleurs, l'hydrogène s'avère être corrosif pour les métaux qui constituent les réservoirs de stockage. Des améliorations technologiques dans les prochaines années sont attendues. De nouveaux alliages de matériaux assurant une meilleure durabilité des réservoirs de stockages sont en voie d'être commercialisés.

2.4 COÛTS TOTAUX DE POSSESSION

Plusieurs facteurs impactent le coût total de possession des différentes technologies, parmi lesquelles la méthode de production d'hydrogène (notamment l'efficacité des électrolyseurs pour l'hydrogène vert), les distances parcourues par les véhicules, les coûts futurs du diesel et de l'électricité, etc. Un rapport préparé par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) a permis d'estimer les coûts totaux de possession pour les véhicules lourds à pile à hydrogène (noté VLPH dans la figure), les véhicules lourds électriques à batterie (noté VLEB dans la figure) et les véhicules diesel, dont les résultats sont présentés dans la FIGURE 5 ci-dessous.



[20] Livre blanc sur l'Hydrogène - Volet 2 - Intelligence véhiculaire, Amp&Axle

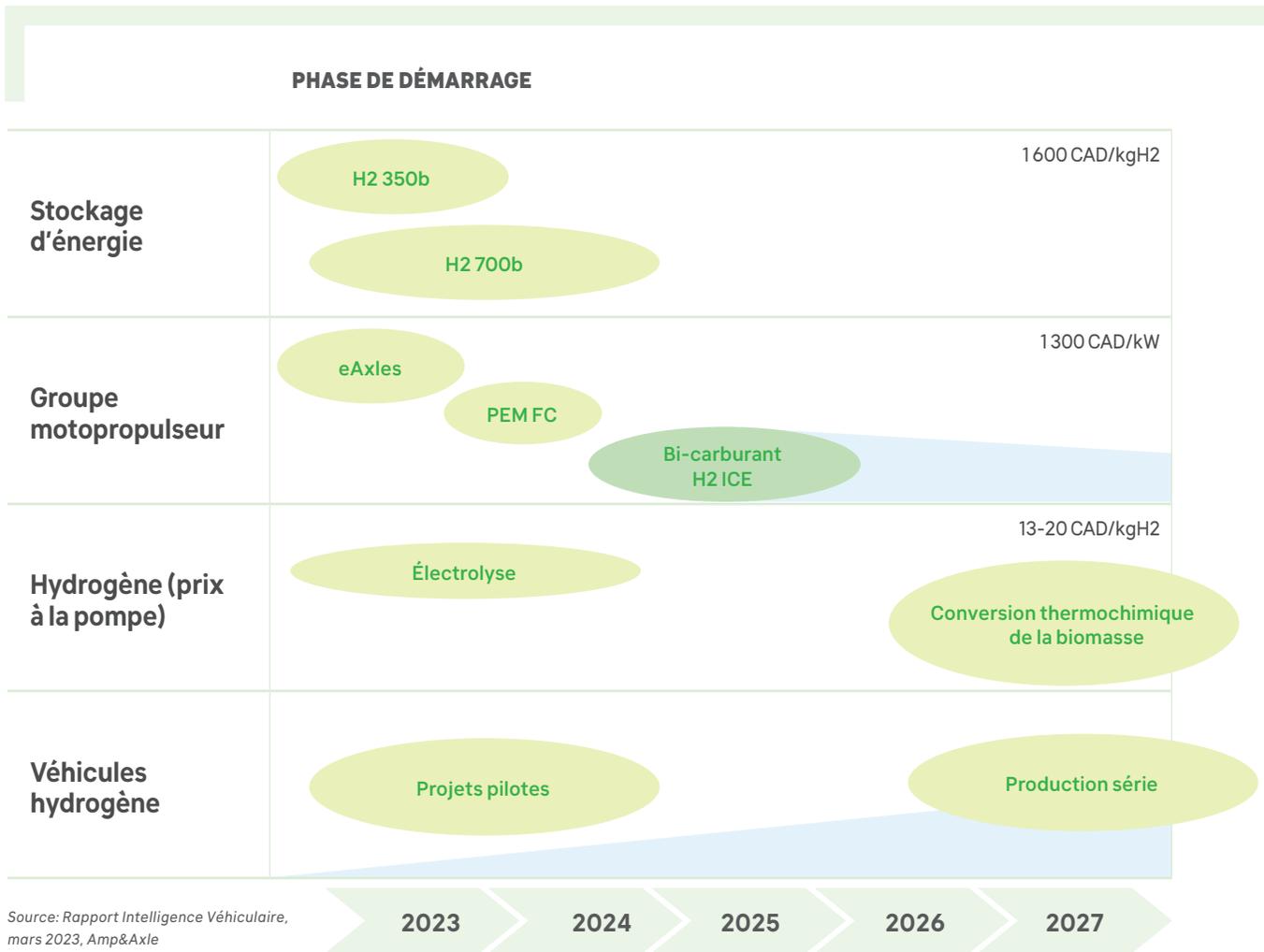
[21] Les véhicules à combustion interne de l'hydrogène présentent de nombreux avantages en matière de rétrofit et d'intégration de la demande dans le réseau actuel, mais puisque l'hydrogène subit une combustion, des oxydes d'azote (NOx) sont émis pendant la conduite, ne qualifiant donc pas cette technologie de zéro-émission, excluant donc cette technologie de l'analyse du coût total d'acquisition.

[22] https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

À court terme, le coût de possession de véhicules à hydrogène demeure élevé en comparaison aux autres options technologiques^[23]. Tel qu'avancé d'ailleurs par la Chaire l'évolution de la maturité de la technologie de l'hydrogène aura rapidement un impact positif sur le coût.

À l'échelle mondiale, on peut s'attendre à ce que le prix de l'hydrogène diminue grâce à d'importants investissements dans la production d'électrolyseurs dont le taux de croissance annuel moyen est estimé à 48 % sur la période 2021-2031^[24]. En effet, la volonté des gouvernements américains et canadiens servira de catalyseur à cette tendance déjà en place. Aux États-Unis, l'Inflation Reduction Act^[25] présente des incitatifs qui vont favoriser l'augmentation de l'offre de marché. Le Canada s'apprête également à établir des cibles de vente pour les véhicules lourds, sans compter la confirmation de l'interdiction d'acquérir des véhicules légers à combustion thermique à partir de 2035. L'effet recherché à travers ces mesures incitatives est de changer l'échelle de production de l'hydrogène pour en baisser le coût de production. Il s'agit de passer d'un processus de production de petits volumes à un processus industriel automatisé au fur et à mesure que la demande augmente.

FIGURE 5
Feuille de route technologique de l'hydrogène



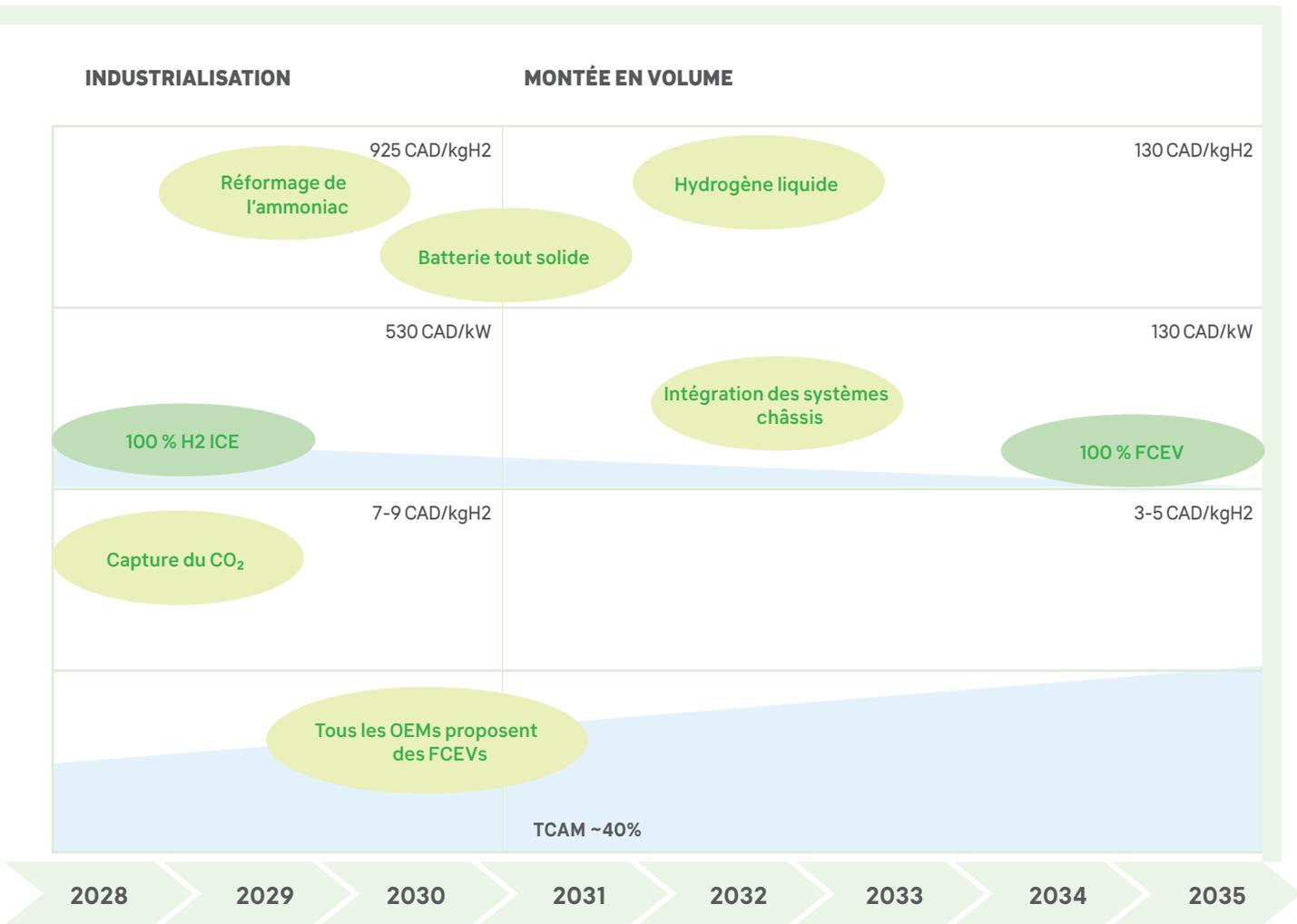
[23] <https://energie.hec.ca/decarbonizing-long-haul-trucking-in-eastern-canada/>

[24] IDTechEx - Green Hydrogen Production: Electrolyzer Markets 2021-2031 - <https://www.idtechex.com/en/research-report/green-hydrogen-production-electrolyzer-markets-2021-2031/807>

[25] La section 4.2.2 explique davantage les retombées positives de cette législation.

Le coût de possession dépend aussi des investissements dans la construction et l'amortissement des infrastructures de remplissage au fur et à mesure que leur usage se démocratise. Ainsi, à plus long terme, tel qu'illustré sur la **FIGURE 5** ci-dessus, l'écart entre le coût estimé d'utilisation par kilomètre pour les VLPH et les VLEB aura tendance à se réduire grâce à l'augmentation de la capacité de production des véhicules et de production d'hydrogène.

Si la **FIGURE 5** présente le coût total de possession par kilomètre parcouru, il est important de tenir compte toutefois du nombre de véhicules nécessaires pour subvenir aux besoins opérationnels d'un gestionnaire. Afin de maintenir un niveau de service équivalent, il peut être nécessaire de posséder davantage de véhicules électriques pour minimiser les contraintes sur l'autonomie et le temps de recharge par exemple, ce qui impliquerait davantage de chauffeurs, plus d'espace pour les garages, ainsi que des logiciels spécialisés pour gérer la recharge, les pointes de consommation, et les complexités opérationnelles supplémentaires, éléments qui ne sont pas représentés dans la **FIGURE** ci-dessus.



H2: Hydrogène
 OEM (Original Equipment Manufacturer): Fabricant d'équipement d'origine
 FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles): Véhicule électrique à pile à combustible (hydrogène)
 PEM FC (Proton-Exchange Membrane Fuel Cells): Pile à combustible à membrane échangeuse de protons
 ICE (Internal Combustion Engine): Véhicule à moteur à combustion interne

3.

ÉTUDES DE CAS

De nombreux projets axés sur l'utilisation de l'hydrogène sont à l'étude dans différents pays et plusieurs projets pilotes ont déjà été réalisés. Ceci démontre un engouement croissant pour l'hydrogène vert de manière générale, et une perspective d'application dans le transport lourd et de longue distance.

La section suivante rapporte quelques initiatives notables, autant au Canada qu'à l'international. Il ne s'agit pas ici de dresser une liste exhaustive des projets existants, mais plutôt de présenter les caractéristiques et conditions de succès au développement de ces projets à plus grande échelle, en s'inspirant de projets viables, avec des apprentissages et mesures transférables au contexte québécois.

3.1 PROJETS CANADIENS

Le Canada possède des atouts majeurs dans le domaine de l'hydrogène et une expertise reconnue sur les piles à combustible et les électrolyseurs.

Le Québec dispose d'un des plus gros électrolyseurs à membrane échangeuse de protons au monde, situé à Bécancour. La Chaire de recherche du Canada en production d'hydrogène vert^[26] mène actuellement des recherches de pointe dans le domaine des matériaux et de systèmes en relation avec la sonoélectroanalyse. Ces nouveaux matériaux et voies de traitement permettront de favoriser le développement de dispositifs et de technologies de stockage d'énergie à faibles coûts, performants et durables. De plus, plusieurs centres de recherche se concentrent présentement sur l'hydrogène vert, notamment l'IRH (UQTR), l'Institut national de la recherche scientifique (INRH) et la Chaire de recherche du Canada en catalyse verte et procédés sans métaux (ULaval).

[26] https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/gscw045a.afficher_detail_form_reponse?owa_no_site=1733&owa_bottin=&owa_no_fiche=3&owa_no_form_reponse=3160510&owa_aperçu=N&owa_imprimable=N&owa_brouillon=N&owa_fenetre_surqissante=N&owa_lettre=%25&owa_no_page=1



Le projet AZETEC (Alberta Zero Emission Truck Electrification Collaborative)^[27], lancé en 2019, est le premier projet directement lié à la conception, fabrication et tests de deux camions à pile à combustible de classe 8. Ce projet vise à fabriquer deux camions lourds à pile à combustible qui circuleront entre Edmonton et Calgary afin d'évaluer les performances de ces technologies dans des conditions réelles d'exploitation. Cependant, les véhicules étant encore en phase d'essai préliminaire, le suivi de la performance n'a pas débuté. Bien qu'il soit possible de tirer des enseignements des projets pilotes réalisés en Europe, il est crucial de pouvoir **expérimenter ces technologies et applications au Canada et au Québec** afin de comprendre l'impact des trajets longues distances et des conditions climatiques sur ces nouvelles technologies.

En juin 2023, Harnois Énergie^[28] a annoncé le premier projet officiel au Québec relatif à l'utilisation des camions à hydrogène vert, à la suite de la réservation de cinq camions de marque Peterbilt 579 dont la livraison est prévue pour début 2026. Par ailleurs, il est attendu que d'autres annonces liées à l'acquisition de véhicules à hydrogène soient rendues publiques, notamment en lien avec le Projet 117 d'Hydrolux présenté par la suite dans le rapport.

Le **TABLEAU 2** ci-dessous recense les projets connus, en développement et à venir, selon les informations les plus récentes rapportées dans l'édition 2023 de l'État de l'Énergie au Québec^[29], et mise à jour en date d'octobre 2023.

[27] <https://www.eralberta.ca/projects/details/alberta-zero-emissions-truck-electrification-collaboration-azetec/>

[28] <https://harnoisenergies.com/fr/harnois-energies-amorce-la-decarbonation-de-sa-flotte-de-transport/>

[29] https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2023/05/EEQ2023_WEB.pdf

TABLEAU 2

Projets de production d'hydrogène implantés et envisagés au Québec, octobre 2023

PROJETS ET LIEU	TECHNOLOGIE ET CAPACITÉ DE PRODUCTION	PUISSANCE DE L'ÉLECTROLYSEUR OU INTRANTS	STATUT ET DESCRIPTION
Hydrogène vert (électrolyse de l'eau à partir d'électricité 100 % renouvelable)			
STATION HARNOIS, QUÉBEC	Électrolyse de l'eau 200 kg/jour	0,5 MW	En exploitation. Alimente 50 véhicules loués par le gouvernement provincial et la Ville de Québec.
AIR LIQUIDE, BÉCANCOUR	Électrolyse de l'eau 8 200 kg/jour	20 MW	En exploitation. Hydrogène vendu pour commercialisation.
HY2GEN AG – PROJET COURANT, BAIE-COMEAU	Électrolyse de l'eau 237 000 t/an d'ammoniac	280 – 300 MW	À l'étude. Mise en service visée : T1 – T2 2025. Hydrogène vert pour la fabrication d'ammoniac. L'ammoniac sera transformé en nitrate d'ammonium pour le marché des explosifs (secteur minier).
RECYCLAGE CARBONE VARENNES (RCV), VARENNES	Électrolyse de l'eau 34 619 kg/jour	0,5 MW	En exploitation. Alimente 50 véhicules loués par le gouvernement provincial et la Ville de Québec.
GREENFIELD GLOBAL, VARENNES	Électrolyse de l'eau 26 000 kg/jour	60 MW	En développement. Mise en service prévue : 2025. Production d'H ₂ e-méthanol et gaz naturel renouvelables.
ÉVOLUGEN-GAZIFÈRE, GATINEAU	Électrolyse de l'eau 10 000 kg/jour.	20 MW	À l'étude. Hydrogène pour injection dans le réseau de distribution gazier de Gazifère.
HYDROLUX – PROJET 117, VAL D'OR / SAINT-JÉRÔME	Électrolyse de l'eau 2 150 kg/jour par station	5 MW/station	À l'étude. Mise en service visée : 2025. Deux stations de ravitaillement pour le transport lourd. Évaluation de plusieurs stations supplémentaires à travers le Québec
CHARBONE CORPORATION, SOREL-TRACY	Électrolyse de l'eau Phase 1 : 230 kg/jour À terme : 9 000 kg/jour	0,5 MW	À l'étude sur cinq phases La première phase sera de 0,5 MW. Le projet vise un total de 20 MW.
CHARBONE CORPORATION, BAIE COMEAU	Électrolyse de l'eau	0,5 MW	À l'étude. Signature d'un protocole d'entente avec le port et la Ville de Baie-Comeau pour le développement d'une usine de production d'une capacité initiale de 0,5 MW.

TABLEAU 2

Projets de production d'hydrogène implantés et envisagés au Québec, octobre 2023 (suite)

PROJETS ET LIEU	TECHNOLOGIE ET CAPACITÉ DE PRODUCTION	PUISSANCE DE L'ÉLECTROLYSEUR OU INTRANTS	STATUT ET DESCRIPTION
Hydrogène à partir de sous-produits et d'électricité 100% renouvelable			
AIR LIQUIDE (OLIN), BÉCANCOUR	Électrolyse 2 000 kg/jour	Intrants : chlore-alcali	En exploitation. La quantité d'hydrogène produite varie selon la charge électrique appliquée à l'ensemble du circuit électrolytique de l'usine de chlore-alcali de l'entreprise Olin. L'hydrogène est capté, acheminé et vendu à l'installation d'Air Liquide qui le purifie pour la vente
MESSER CANADA (NOURYON), MAGOG	Électrolyse 14 000 kg/jour	Intrants : chlorate de sodium	En exploitation. Nouryon produit de l'hydrogène gazeux comme sous-produit de l'électrolyse dans le procédé de chlorate de sodium et le vend à Messer qui le purifie et le liquéfie pour la vente. La capacité correspond à celle de Messer. Or, celle de Nouryon, qui n'est pas disponible, serait plus grande.
Hydrogène à partir de matières résiduelles (avec émissions de CO₂)			
H2V ÉNERGIES, BÉCANCOUR	Gazéification et raffinage du gaz de synthèse par torche à plasma 136 986 kg/jour	Matières résiduelles (rejets de bois de déconstruction, écorces, plastiques et papiers non recyclables, etc.)	Projet à l'étude. aMise en service visée : 2025. Production de gaz de synthèse (H ₂ +CO) avec réaction de gaz à l'eau pour produire de l'hydrogène pur. Le projet générera 960 000 tCO ₂ qui devront être revalorisées ou captées et stockées.

TRANS-QUÉBEC 1 PAR HYDROLUX ^[30]

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Le projet Trans-Québec 1 consiste à développer sept stations de ravitaillement en hydrogène vert, initialement sur le corridor de la Route 117, pour permettre de faire du transport interrégional sur un vaste territoire représentant près de 97% de la population québécoise. Ces stations seront situées dans les régions de Val-d'Or, Saint-Jérôme, Lévis, Saguenay, Rivière-du-Loup, Mont-Laurier et Coteau-du-Lac. Le projet est à un stade avancé, cependant, l'octroi des blocs d'énergies – intrant crucial au projet – n'est pas encore confirmé. Les éléments présentés dans le [TABLEAU 3](#) ci-dessous sont déjà sécurisés.

Ce projet utilisera la technologie d'optimisation de la production et distribution d'hydrogène d'Hydrolux, propulsée par l'intelligence artificielle, pour permettre aux stations d'anticiper la demande et de réagir rapidement lors d'événements de pointe de puissance. L'ambition d'Hydrolux est de pouvoir générer 25 % d'économies approximatives sur les coûts d'énergie par rapport au diesel^[31].

TABLEAU 3

Éléments du Projet 117 et statut

ÉLÉMENTS DU PROJET	ÉLÉMENTS DU PROJET
DÉVELOPPEUR	Hydrolux
INVESTISSEUR EN ÉQUITÉ	Chaque station sera sous un modèle de société en commandite
PRÉTEUR	En cours de finalisation
CONTRAT	Ingénierie, Approvisionnement et Construction (EPC)
ÉTUDES D'INGÉNIERIE (FEL 1-2-3)	Tetratec
LETTRES DE SUPPORT ET D'INTENTION	<ul style="list-style-type: none"> • Lettre de support des municipalités, démontrant une très forte acceptabilité sociale • Plus de lettres d'intention reçues que de capacité totale du projet • Lettre des transporteurs, assurant la viabilité du projet
STATIONS DE RAVITAILLEMENT	<ul style="list-style-type: none"> • Sites réservés et zonage en cours de finalisation pour les stations de Saint-Jérôme et Val d'Or • Pression de ravitaillement : 350 et 700 bars
CAMIONS	<ul style="list-style-type: none"> • 20 camions à pile à combustible réservés auprès de Peterbilt et Kenworth (filiales de PACCAR) • Modèle de location pour les clients (détails non communiqués)

Source : Hydrolux

LES STATIONS DE RAVITAILLEMENT

La mise en opération des sept stations de ravitaillement envisagées est prévue être complétée d'ici 2027. Les stations seront espacées, au maximum, de 300 km, ce qui permettra aux camions de se ravitailler bien avant d'atteindre la limite de leur autonomie, soit environ 700 km pour les camions Peterbilt et Kenworth, aussi bien en été qu'en hiver. Hydrolux procède présentement à l'évaluation de plusieurs stations supplémentaires à travers le Québec.

Hydrolux a mis en place une feuille de route de développement de ses stations qui est gouvernée notamment par la disponibilité de la demande énergétique. Les stations seront identiques et chacune sera équipée d'un électrolyseur d'une capacité initiale de 5 MW, puis de 10 MW, afin que la capacité maximale soit atteinte d'ici 2030. Près de 4 tonnes d'hydrogène seront produites quotidiennement à chaque station. Ce total journalier de 4 tonnes permettra de parcourir en moyenne 45 000 km par jour. En octobre 2023, ce projet a été évalué à plus de 350 millions de dollars^[32].

Les stations fonctionneront sur un système de franchise et seront détenues par des compagnies privées. Les stations seront accessibles au public, ainsi tout utilisateur d'un véhicule à hydrogène pourra les utiliser pour se ravitailler. Bien qu'aujourd'hui il n'y ait que peu de commandes officielles de camions à hydrogène, les récentes annonces publiques, dont Harnois Énergies, indiquent un certain engouement pour cette technologie. De plus, de nombreuses entreprises de transport du Québec et des partenaires industriels ont déjà manifesté leur intérêt auprès d'Hydrolux.

Le projet Trans-Québec 1 prévoit stocker sur le site de production une partie de l'hydrogène afin que les stations puissent continuer de répondre à la demande en cas d'urgence, une panne de courant ou des conditions climatiques extrêmes, par exemple. Également, ce projet assurera un prix de production compétitif en minimisant la production en période de pointe. Grâce au système d'optimisation de la production d'Hydrolux, les stations pourront tenir compte de la puissance disponible sur le réseau électrique, réduire le coût de production d'hydrogène et proposer une tarification dynamique selon le cours de l'énergie.

LES CAMIONS À HYDROGÈNE

Pour pallier l'enjeu d'accessibilité aux camions et s'assurer que ses clients auront des camions en temps opportun, Hydrolux a réservé 20 camions lourds à pile à combustible auprès de Peterbilt et Kenworth, et prévoit louer ces camions à ses clients. À noter que la compagnie a fait le choix de se tourner vers de plus importants manufacturiers du marché pour l'approvisionnement en camion afin de limiter les risques financiers.

Les camions réservés devront pouvoir parcourir 1,6 million de km en 3 ans. Il est prévu que la maintenance des camions soit gérée par les manufacturiers, permettant aux utilisateurs de bénéficier de leurs réseaux de concessionnaires déjà existants au Québec. À noter qu'aujourd'hui plusieurs composants du modèle demeurent à être précisés avec son application comme la fréquence, les délais et les coûts de maintenance des camions à hydrogène, mais l'hypothèse de base est que ceux-ci soient moindres que pour leurs homologues au diesel. Par ailleurs, ce sont également Peterbilt et Kenworth qui seront responsables des formations, tant au niveau des concessionnaires, des utilisateurs, que des opérateurs.

[30] À noter que cette section présente les informations disponibles au public, en date d'octobre 2023.

[31] <https://hydrolux.ca/>

[32] <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2015550/transport-hydrogene-environnement-valdor>

POUR ALLER PLUS LOIN

Au-delà des réductions de GES favorisées par ce projet, Hydrolux souhaite exercer un fort leadership technique au Québec en production d'hydrogène vert. En impliquant toutes les parties prenantes le long de la chaîne de valeur, ce projet a pour ambition de bâtir l'écosystème québécois requis pour le transport lourd tout en bénéficiant de transferts de technologie de partenaires internationaux impliqués pour développer l'expertise locale.

À ce stade, l'enjeu le plus important rencontré par Hydrolux est l'octroi des blocs d'électricité par le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie.

Comme Hydrolux a pour objectif de développer d'ici 2030 davantage de stations que celles déjà annoncées, des processus plus agiles seront nécessaires pour faciliter leur mise en place. Des progrès seraient notamment attendus au niveau des délais d'approbation des projets et de leur financement. Il est compréhensible que les délais actuels soient longs, car ce projet est novateur, mais l'entreprise souhaiterait qu'à terme, l'ensemble de la démarche soit facilité par la mise en place de programmes gouvernementaux, notamment pour soutenir la production d'hydrogène, le développement de stations de ravitaillement et l'achat de camions à hydrogène, en complément au programme Ecocamionnage existant par exemple.

3.2 PROJETS INTERNATIONAUX

HYDROSPIDER AG

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Hydrospider AG (Hydrospider) est le fruit d'une collaboration entre trois compagnies : l'entreprise est détenue majoritairement par Alpiq, l'un des principaux prestataires de services énergétiques et producteurs d'électricité, en particulier hydroélectricité, en Suisse, H₂ Energy, présente dans le domaine des solutions à base d'hydrogène et de piles à combustible, et Linde GmbH, leader mondial des gaz industriels et de l'ingénierie.

En juin 2019, la compagnie coréenne Hyundai Motor Company et la compagnie suisse H₂ Energy ont finalisé leur partenariat pour fonder Hyundai Hydrogen Mobility AG (HHM), basé en Suisse. HHM et Hydrospider travaillent aujourd'hui de concert pour développer l'offre de camion à hydrogène en Suisse. Elles ont comme objectif de mettre en circulation près de 1 600 camions à pile à combustible sur les routes suisses au cours des prochaines années.

L'une des raisons pour lesquelles Hyundai a choisi la Suisse pour lancer ce projet provient du contexte économique et réglementaire du pays. En effet, en Suisse, les carburants fossiles sont taxés à la pompe et sur une base annuelle, et ce pour tous les propriétaires de véhicules. Ce qui fait de la Suisse un des rares pays où le modèle économique d'un camion à hydrogène n'est pas tellement différent de celui d'un camion diesel. Tous les véhicules à moteur et remorques qui présentent un poids total de plus de 3,5 tonnes et qui sont utilisés pour le transport de marchandises doivent payer une redevance fédérale^[33]. Celle-ci est calculée en fonction du poids total du véhicule, de sa catégorie d'émission selon les normes d'émission-euro mises en place par l'Union européenne pour les véhicules lourds, et des kilomètres parcourus en Suisse.

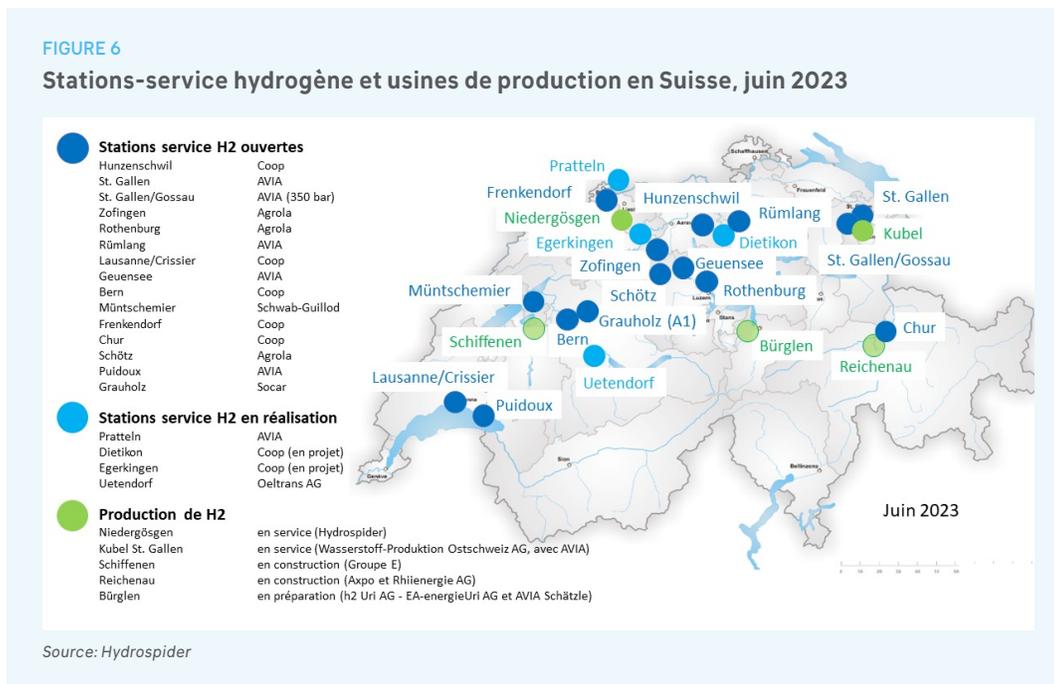
[33] https://www.bazg.admin.ch/bazg/fr/home/informationen-firmen/verkehrsabgaben-und-strassenverkehrsrecht/schwerverkehrsabgaben-lsva-und-psva/lsva_allgemeines_tarife.html

En Suisse, le prix du diesel en 2023 est d'environ 2.95 CAD/L^[34]. En supposant qu'un camion de classe 8 consomme en moyenne 34 L/100 km, parcourir 100 km coûte environs 100 dollars canadiens. Le coût de l'hydrogène, en Suisse, se situe actuellement à environ 16 CAD/kg^[35]. Sachant qu'il faudrait entre 40 et 60 kg d'hydrogène pour parcourir entre 800 et 1 600 km (voir Tableau 1: Comparaison technologique) avec un camion à pile à combustible, parcourir 100 km coûtera, en moyenne, 67 dollars canadiens, soit 33\$ de moins que le diesel.

LES STATIONS DE RAVITAILLEMENT

Les stations de ravitaillement sont exploitées par les partenaires de HHM et détenues par les propriétaires des stations de service traditionnelles existantes. Les stations traditionnelles existantes ont été adaptées pour y ajouter une unité pour le ravitaillement en hydrogène. Le plus gros enjeu rencontré pour rajouter cette unité a été l'espace disponible autour de la station. Une station a toutefois été construite spécifiquement pour distribuer l'hydrogène. Cette station a permis de réduire les contraintes d'espace, mais ajoute différents enjeux en lien avec la sécurité des installations et l'impact environnementale. Si les installations de stockage d'hydrogène ont une capacité supérieure à un certain seuil, dont le seuil est défini à 5 tonnes^[36], de nouvelles règles de sécurité s'appliquent et des études additionnelles sont nécessaires pour s'assurer que le projet présente un risque acceptable selon l'Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs^[37]. Les stations sont publiques et toutes les stations traditionnelles, sauf une, sont équipées d'au moins un pistolet pour les camions et les véhicules privés.

La FIGURE 6 ci-dessous montre les stations opérationnelles et celles à venir, ainsi que les projets de production d'hydrogène, en date de juin 2023. À l'heure actuelle les stations sont localisées le long des grands axes routiers, avec une concentration dans la partie nord de la Suisse, le long des autoroutes. Le réseau est en expansion avec l'objectif d'en avoir partout dans le pays. Les sites de production, en service et en développement, sont également dans le nord du pays et permettent d'approvisionner toutes les stations. À noter que compte tenu de la taille du pays, les sites de production et les stations sont séparés de fait d'au plus 80 km, ce qui facilite grandement la distribution de l'hydrogène.



[34] https://www.shell.ch/fr_ch/automobilistes/carburants-shell/prix-des-carburants-shell.html

[35] https://www.shell.ch/fr_ch/clients-commerciaux/shell-card/durabilite/hydrogene.html#:~:text=Les%20co%C3%BBts%20sont%20comparables%20%C3%A0,de%20couvrir%20environ%20100%20kilom%C3%A8tres

[36] <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/accidents-majeurs/publications-etudes/publications/seuils-quantitatifs-selon-l-ordonnance-sur-les-accidents-majeurs.html>

[37] <https://www.qe.ch/protection-contre-accidents-majeurs#:~:text=L'ordonnance%20sur%20la%20protection,cons%C3%A9quences%20r%C3%A9sultant%20d'accidents%20majeurs>

LES CAMIONS À HYDROGÈNE

HMM met à disposition un parc de camions à hydrogène porteurs qui peuvent être loués selon un modèle de paiement à l'utilisation, voir ci-dessous pour plus de détails. Comme perçue lors des entrevues effectuées au Canada dont il sera question plus loin, un frein majeur des propriétaires de parc de véhicules est la barrière financière à l'entrée. Ainsi avec cette option, les opérateurs de parc de véhicules n'ont pas d'investissement initial majeur et circonscrivent leur prise de risque sur l'exploitation. Les premiers camions ont été mis en circulation en 2019 et 47 roulent actuellement.

Pour un modèle de paiement à l'utilisation, les transporteurs louent les camions à HMM et paient un prix au kilomètre, incluant la valeur de la molécule d'hydrogène. Ils s'engagent sur la durée de location et la distance parcourue. La limite principale de ce système est que le transporteur doit payer les kilomètres sur lesquels il s'est engagé, même s'il ne les a pas parcourus. Les véhicules sont ainsi mis à disposition des transporteurs qui les louent selon l'engagement contractualisé. HMM prend en charge l'ensemble du service, en particulier l'entretien, ce qui décharge le client de toutes les responsabilités liées au matériel et des risques associés, pour se concentrer uniquement sur le transport.

HMM a choisi de proposer ce modèle notamment pour les raisons suivantes :

- N'ayant pas de recul sur la dépression de valeur d'un camion à hydrogène, les utilisateurs ne peuvent se projeter sur sa valeur dans plusieurs années. Le fait de le louer résout l'enjeu de l'investissement.
- Le gouvernement suisse supporte peu la filière hydrogène. Il y a peu de production d'hydrogène en Suisse et le coût reste élevé. Le fait de mettre des camions en location sur le marché permet de rompre l'effet d'attente que vivent les opérateurs, à savoir le fait d'attendre l'instauration d'infrastructures de recharge fiables et le fait d'avoir des camions utilisant ces infrastructures. Les stations se développent pour suivre la demande créée par la mise en circulation des camions. Les camions à leur tour se déploient, car l'infrastructure pour les ravitailler existe et croît.
- Finalement ce modèle permet d'offrir une solution clé en main impliquant l'ensemble des parties prenantes dès le départ. Il sécurise aussi grandement la chaîne de valeur et les investissements initiaux, en assurant l'utilisation des actifs : stations, infrastructures, camions. En priorisant ce modèle d'affaires, HMM sécurise ses opérations et crée sa propre demande.

PRODUCTION D'HYDROGÈNE VERT

Hydrospider produit l'hydrogène vert à partir des actifs hydrauliques de la société productrice d'électricité Alpiq et alimente ensuite les stations de remplissage. L'hydrogène utilisé provient entièrement d'Hydrospider. Cependant, il est également possible d'acheter l'hydrogène à d'autres producteurs, si nécessaire. Pour le moment, tout l'hydrogène est produit à partir d'une seule usine, équipée d'un électrolyseur de 2 MW et située à proximité de la centrale hydraulique de Gösgen. Les 300 tonnes d'hydrogène produites chaque année permettent d'alimenter environ 50 camions, ou 1 700 véhicules passagers. D'autres usines de production seront bientôt opérationnelles, détenues notamment par Hydrospider.

L'hydrogène produit est transporté à 350 bars entre l'usine de production et les stations de ravitaillement dans des modules comme ceux présentés sur la [FIGURE 7](#) ci-après.

FIGURE 7

Module de transport de l'hydrogène gazeux à 350 bars

Source: Hydrospider

SUPPORT GOUVERNEMENTAL

La Suisse n'offre actuellement pas de soutien particulier pour les projets d'hydrogène, en revanche les camions sont exempts de l'impôt et de la surtaxe sur les huiles minérales, appliquées entre autres aux carburants^[38]. Il n'y a pas de programme de subvention, mais des discussions sont en cours à ce niveau. Le gouvernement développe une stratégie sur l'hydrogène et a conscience de l'importance de soutenir les projets, cette stratégie permettra de proposer des mesures destinées à promouvoir le développement de l'hydrogène et à garantir l'approvisionnement de la Suisse en hydrogène, prenant la forme de contributions financières ou non financières encourageant la production, l'importation, le stockage ou la distribution d'hydrogène obtenu par des procédés de production neutres en carbone^[39].

[38] <https://www.bazg.admin.ch/bazg/fr/home/informationen-firmen/territoire-suisse/mineraloelsteuer.html>

[39] <https://www.parlament.ch/fr/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20223376>

4.

AJOUTER L'HYDROGÈNE AU MIX ÉNERGÉTIQUE DU QUÉBEC

Pour adopter l'hydrogène vert au Québec comme un carburant alternatif fiable et sans-émission, il est nécessaire de faire la démonstration de la pertinence de cette filière dans le secteur du transport lourd. La revue de littérature et les échanges avec les transporteurs ont permis de démontrer qu'il existe un potentiel pour le déploiement de cette énergie au Québec.

Toutefois, l'incertitude quant à plusieurs variables liées à la disponibilité des équipements, au prix de la molécule, l'adhésion de l'industrie ou du développement d'une offre de service adaptée, sont des facteurs qui peuvent être perçus comme des freins à plusieurs égards. Il est clair que les changements technologiques dans les autres méthodes d'alimentation des véhicules électriques telles que l'amélioration de la densité énergétique des batteries, le développement de corridors électriques par induction, rail ou caténaire, l'amélioration des biocarburants, les avancées en électronique de puissance sont tous des facteurs qui pourraient également laisser croire au peu d'intérêt de la filière de l'hydrogène au Québec.

Néanmoins, notre analyse démontre qu'à la lumière des performances technologiques grandissantes, des expériences étrangères et des initiatives lancées au Québec, un potentiel se définit clairement sur des marchés cibles pour le transport des marchandises. Ce constat se confirme avec l'évolution du contexte au Québec, avec les enjeux grandissants de croissance de la demande énergétique et de la disponibilité en électricité hors des grands centres, une ferme volonté des entreprises de transport de faire leur part dans la diminution des émissions des GES pourraient améliorer le potentiel d'application. Dans ce contexte, il est nécessaire pour le Québec de favoriser davantage les projets d'innovations sur une vaste gamme d'initiatives d'électrification dans laquelle l'hydrogène peut occuper une place.

Certes le déploiement d'initiatives et de projets ne peut se faire sans une solide volonté des opérateurs à y contribuer. La très grande majorité des transporteurs interrogés ont adopté un plan de réduction de leurs émissions et considèrent la décarbonation de leurs opérations comme une priorité pour la survie de leur entreprise.

Tel que présenté dans la prochaine section, le résultat des entrevues faites auprès des opérateurs démontre de façon claire et généralisée le manque de connaissances face à la technologie hydrogène, à contrario de la technologie batterie qui a bénéficié d'une large promotion par le gouvernement. Les prochaines sections portent donc sur les principaux aspects : technique, économique, social, législatif et gouvernemental, afin d'établir, en premier lieu, la **perception de l'hydrogène pour les utilisateurs, et en second lieu des pistes d'actions suggérées à mettre en place pour favoriser le déploiement de l'hydrogène au sein du transport lourd et de longue distance au Québec.**

4.1 ASPECTS TECHNIQUES

4.1.1 PERCEPTIONS DES TRANSPORTEURS SUR L'HYDROGÈNE

LIMITES

PERFORMANCE DES CAMIONS ET FIABILITÉ DE LA TECHNOLOGIE

Les rencontres avec les opérateurs ont permis de mieux connaître leurs enjeux. De façon générale, il ressort que la performance attendue des camions doit être équivalente ou meilleure à celle d'un camion diesel. Le profil des routes québécois est unique, et tant qu'il n'y a pas la certitude que les technologies développées soient adaptées au réseau routier, la transition vers cette technologie demeure risquée. Les transporteurs ont généralement une grande aversion au risque. Ils souhaitent planifier leur transition énergétique en simulant leurs opérations avec des données consolidées sur la performance des véhicules à hydrogène et à batterie pour déterminer l'autonomie et la technologie adéquate pour leurs opérations. Le manque d'accès aux données de consommation énergétiques dans un contexte québécois hivernal freine l'adoption des véhicules à hydrogène (et à batterie).

CONTRAINTES DE VOLUME ET DE POIDS

Les transporteurs cherchent à optimiser le chargement transporté, autant en termes de volume que de poids pour rentabiliser au maximum leurs opérations. Ils perçoivent que les camions avec des réservoirs à hydrogène altère l'espace disponible pour le transport de marchandises. Bien que ces réservoirs aient une emprise inférieure à celles des batteries des camions électriques, ils restent à date plus volumineux que les réservoirs à diesel, ce qui réduit l'espace restant pour les marchandises pour certains types de camions classe 8 (camions boîtes et camions utilitaires, notamment). Le poids des camions étant régulé sur les routes québécoises^[40], le poids supplémentaire de la batterie ou de la pile à combustible impacte la capacité de charge utile, et réduit donc la rentabilité des transports.

TRAVAIL EN ENVIRONNEMENT RECLÉ

Les entreprises ayant des activités dans des milieux très reculés, comme les mines dans le Grand Nord du Québec, rapportent que leur priorité est, avant tout, de décarboner leurs propres opérations et ensuite de se concentrer sur la partie transport dont l'empreinte carbone est moindre comparée au reste de leurs activités. L'énergie renouvelable, pouvant parfois être produite sur place, sera donc utilisée en priorité pour décarboner leurs opérations.

L'approvisionnement en hydrogène est un enjeu important pour les opérateurs se situant dans des régions plus reculées. Pour ceux-ci, l'option de produire de l'hydrogène localement est davantage considérée. Cependant, cette option comporte son lot d'enjeux, que ce soit au niveau de la production et du stockage par son exposition prolongée au grand froid, de l'acheminement de l'énergie renouvelable, des normes entourant la construction d'un poste de production et les délais connexes, etc.

[40] <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/charges-dimensions/Documents/Guide-normes-charges-dimensions.pdf>

UNE CONSOMMATION ÉLECTRIQUE À PRÉSERVER

Les transporteurs sont tout à fait conscients que l'électricité au Québec est une énergie dont la demande va croître significativement au cours des prochaines années avec l'électrification des transports. Leur approche stratégique consiste d'abord à optimiser leur consommation électrique et se disent prêts à favoriser des technologies qui maximisent l'efficacité énergétique de leurs opérations comme le véhicule à batterie. Certains misent davantage sur les progrès technologiques des batteries et l'émergence de modes de recharge dynamiques sur des axes routiers structurants (A20 au Québec et 401 en Ontario par exemple) comme la recharge par caténaire ou par induction pour atteindre leurs objectifs de décarbonation.

La production d'hydrogène est effectivement énergivore. En 2023, le rendement énergétique de la technologie de camion à pile combustible est estimé à 31 %, contre 73 % pour la technologie de camion électrique à batterie (21 % pour un camion diesel). Du fait des quantités limitées d'électricité disponibles aujourd'hui pour de nouveaux projets et usages au Québec, l'octroi des blocs d'électricité est encadré par le gouvernement provincial. Selon la loi du 15 février 2023 visant notamment à plafonner le taux d'indexation des prix des tarifs domestiques de distribution d'Hydro-Québec et à accroître l'encadrement de l'obligation de distribuer de l'électricité, les nouveaux projets d'une puissance égale ou supérieure à 5 MW et les projets visant l'ajout d'une charge de 5 MW et plus à une installation existante, doivent faire l'objet d'une procédure de demande d'autorisation, évaluée selon les critères suivants^[41]:

- Capacités techniques et incidences sur le réseau électrique du Québec
- Retombées économiques
- Impacts environnementaux
- Impacts sociaux
- Développement régional
- Cohérence gouvernementale

Il est à noter que le gouvernement a mis en place des critères spécifiques applicables aux projets d'hydrogène. Celui-ci doit être vert, appliqué à des secteurs jugés prioritaires dont le transport lourd et utilisés localement^[42].

Ainsi, bien qu'il soit techniquement possible de produire de l'hydrogène vert à grande échelle aujourd'hui au Québec, cela reste difficile en pratique du fait de la situation réglementaire actuelle. Il est donc nécessaire de choisir comment allouer l'électricité que possède les opérateurs, entre une électrification directe de leurs actifs ou la production d'hydrogène. À noter qu'il existe d'autres méthodes de production d'hydrogène financièrement plus avantageuses, notamment l'hydrogène gris - représentant environ 95 % de la production mondiale - issus de source fossile. Toutefois, leur pertinence en matière de décarbonation nécessite la capture du carbone émis par le procédé.

MANQUE D'INFRASTRUCTURES DE RAVITAILLEMENT

Au-delà des freins associés à l'efficacité énergétique et les autres limites techniques de l'hydrogène, le manque d'infrastructures et d'accès à des véhicules disponibles commercialement reste un frein majeur au développement de la filière. Pour un opérateur, il est difficile de se projeter sur l'achat de camions à hydrogène sans savoir où, ni comment les ravitailler. Certains transporteurs souhaitent maîtriser la production de l'hydrogène en développant une capacité de ravitaillement et une expertise d'entretien au sein de leurs sites. D'autres préfèrent externaliser ce service et établir des partenariats avec des spécialistes en production et transport d'hydrogène pour se concentrer sur leur métier de logistique. Ces différents points de vue s'expliquent aussi par la nature de leurs opérations (itinéraires entre deux plateformes logistiques internes ou chez des tiers), la taille de la flotte de leurs véhicules (impact de la maîtrise de l'approvisionnement en énergie proportionnel avec la taille du parc) et l'état des infrastructures qu'ils possèdent ou non.

[41] <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/conformite/autorisation-projet-electrique>

[42] <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/conformite/autorisation-projet-electrique/criteres-hydrogene>

ATOUTS

PLUS GRANDE AUTONOMIE DES CAMIONS

L'autonomie des camions à hydrogène est perçue par les transporteurs comme largement supérieure à celle des camions électriques à batterie et leur temps de remplissage est beaucoup plus rapide. Il est attendu que les camions à hydrogène puissent répondre à des besoins différents que ceux électriques à batterie, notamment pour tout ce qui est de longues distances ou des véhicules qui doivent fonctionner en continu. Il est d'ailleurs admis d'envisager le camion à hydrogène pour le grand transport routier, et les camions à l'électricité pour les derniers kilomètres. Certains transporteurs relativisent toutefois l'autonomie restreinte des véhicules à batterie et envisagent d'adapter leurs modes opératoires autour de la recharge des véhicules et du report modal vers le rail pour de la longue distance. Ainsi, un chauffeur pourrait effectuer davantage de trajets en boucle vers des terminaux ferrés et rentrer chez lui le soir, ce qui réduit la pénibilité du métier dans un contexte de pénurie de main d'œuvre.

FACILITÉ DE RAVITAILLEMENT

Bien que les réservoirs des véhicules puissent parfois demander des pressions différentes, à l'instar d'une station essence, une station de ravitaillement pour l'hydrogène est perçue comme relativement simple et flexible, ce qui présente un avantage important lorsque les camions ne peuvent rester stationnés trop longtemps.

Tout comme les véhicules électriques à batterie, des normes entourant les spécificités de ravitaillement doivent émerger. Cette standardisation permettra à terme de réduire les coûts d'infrastructure associés.

4.1.2 ACCOMPAGNER L'ÉMERGENCE DE LA FILIÈRE

DÉVELOPPER DE NOUVEAUX BLOCS ÉNERGÉTIQUES ET CLARIFIER LES INTENTIONS RELATIVES À LA GESTION DE L'ÉNERGIE

Le Québec présente l'avantage distinctif de disposer à date d'abondantes ressources en électricité verte (hydraulique, solaire, éolien) et parmi les coûts d'électricité les plus bas en Amérique du Nord. Il serait donc a priori possible de produire de l'électricité renouvelable à bas coût. Comme le paramètre influençant le plus le coût de production de l'hydrogène est le prix de l'électricité, cela rendrait la production économiquement intéressante. Il sera cependant nécessaire de développer davantage de projets d'énergies renouvelables, et ce à prix compétitifs afin de maintenir les prix de l'hydrogène raisonnables. Le dernier appel d'offre d'Hydro-Québec pour 1,5 GW d'énergie éolienne^[43] semble aller dans ce sens, cependant, les projets pour lesquels l'électricité produite sera allouée restent encore à confirmer. Le Québec devra se positionner sur l'utilisation de ces nouveaux blocs d'électricité. Il s'agit ici d'un vrai enjeu de société, des décisions stratégiques quant à l'utilisation de ces blocs seront au cœur des enjeux futurs.

L'octroi des blocs d'énergie est un frein pour plusieurs projets de production d'hydrogène. Le projet Trans-Québec 1 a été annoncé il y a déjà plus d'un an, et est toujours en attente d'approbation par Hydro-Québec et le ministère de l'Énergie. Malgré tout, le projet continue ses développements, mais cette attente face à l'octroi de l'énergie ralentit, voire freine, la mise en place de projets similaires.

Hydro-Québec a partagé son plan d'approvisionnement 2023-2032, présentant les stratégies qui seront mises en place pour répondre à la demande croissante en électricité. Hydro-Québec prévoit une croissance de la demande électrique de plus de 8,9 TWh pour ce qui est des secteurs émergents dont 2,3 TWh pour la production d'hydrogène vert. L'énergie étant la clé de la transition énergétique dans le transport lourd et de longue distance, et ce autant pour les alternatives électriques à batterie que pour l'hydrogène, il sera impératif de s'assurer qu'Hydro-Québec soit en mesure de développer l'offre, et d'octroyer la capacité nécessaire au développement de la filière.

[43] <https://www.hydroquebec.com/achats-electricite-quebec/appels-propositions/2023-01.html>

Il apparaît clair que le gouvernement doit augmenter les allocations à la production d'hydrogène vert, d'abord pour permettre le remplacement des usages industriels et ensuite pour permettre un approvisionnement pour d'autres secteurs de l'économie.

DÉVELOPPER UN RÉSEAU DE STATIONS DE RAVITAILLEMENT

L'approvisionnement en hydrogène présente de enjeux importants, car toute la logistique autour de la production et de la livraison est à retravailler. Quelques utilisateurs ont mentionné le besoin d'avoir des stations de ravitaillement pour leurs besoins individuels, cependant le message général reste la nécessité de développer un réseau de ravitaillement commun pour tous. Le réseau envisagé inclura à terme des stations régulières le long des grands axes routiers, couvrant notamment la région du grand Montréal, de la Ville de Québec et du Saguenay. Ces stations accessibles par les grands axes routiers éviteront les détours, et devront inclure des alternatives géographiques.

L'avantage de mettre en commun les infrastructures plutôt que de les développer sur les terrains privés des entreprises repose dans la mutualisation des coûts, limitant ainsi les investissements initiaux. La distribution de ces stations de ravitaillement devra tenir compte des conclusions de l'analyse du réseau de distribution électrique. En effet, il sera intéressant d'évaluer dans quelle mesure des stations de recharge puissantes pour véhicules lourds à batterie peuvent être installées, notamment dans les régions isolées. Si la faisabilité technique et économique de ces stations n'est pas avérée – renforcer le réseau de distribution électrique pour supporter les méga-chargeurs pourrait être très cher – alors une station de ravitaillement par hydrogène peut constituer une alternative très crédible.

Il faudra également clarifier l'organisation globale de ces stations, autant au niveau du développement qu'au niveau de la gestion des infrastructures de ravitaillement, entre les entités privées, le gouvernement ou les propriétaires des stations-service existantes. La solution pourrait être une combinaison de multiples organisations capables d'investir dans de telles infrastructures. La gestion des délais sera très importante. En effet, comme les premiers camions sont attendus sur les routes du Québec pour 2025-2026 (HydroLux, Harnois Énergies), il est nécessaire de planifier un réseau de stations dès que possible.

Par l'entremise du Clean Transportation Program^[44], la California Energy Commission investit près de 135 millions de dollars canadiens dans un large portefeuille de projets entourant le transport et les carburants. C'est notamment à travers ce programme que la California Energy Commission a pu investir dans un réseau de stations de ravitaillement publiques. Il y a présentement 54 stations de ravitaillement à hydrogène en Californie, avec plus de 113 stations en développement, toutes à des stades différents, offrant du carburant alternatif à plus de 17 000 véhicules et 66 autobus. La stratégie gouvernementale derrière ce déploiement vient miser sur l'ajout de carburant à hydrogène dans les stations-service existantes, couvrant premièrement les régions du nord, près de San Francisco, et du sud de la Californie près de Los Angeles et San Diego, avec une station entre ces deux régions, afin d'assurer le ravitaillement en chemin. En commençant par ces deux régions, le gouvernement a pu créer un écosystème autour de l'hydrogène, permettant aux utilisateurs de cette technologie de conduire normalement dans ces régions.

Plus la demande et l'intérêt pour cette technologie augmenteront, et plus la capacité et le volume de production des sites augmenteront, baissant ainsi les coûts de production.

DÉVELOPPER UN RÉSEAU DE CONCESSIONNAIRES ET DES OPTIONS CLÉS EN MAIN

La production d'un camion à hydrogène par un manufacturier connu, ayant des concessionnaires au sein de la province et apte à fournir un service après-vente en cas de besoin, augmentera la fiabilité des camions pour les différents opérateurs. Présentement, trop d'inconnus entourent la maintenance des camions à hydrogène.

[44] https://www.apec.uci.edu/PDF_White_Papers/Roadmap_Renewable_Hydrogen_Production-UCL_APEP-CEC.pdf

Pour pallier cet enjeu, le projet **Trans-Québec 1** offre un **service clé-en-main** de location de 20 camions par des manufacturiers connus : Kenworth et Peterbilt. Ces camions seront opérés par les différentes compagnies de transporteurs, mais ceux-ci auront **accès à un service de professionnels** à travers la province, gérant ainsi la **maintenance** et diminuant les risques pour les opérateurs.

Le maillon entre le fabricant et l'utilisateur – le concessionnaire en l'occurrence – est souvent oublié et peu supporté. Les concessionnaires font face à des enjeux de main-d'œuvre qualifiée et ne sont pas éligibles aux subventions pour des camions démonstrateurs ou des infrastructures de recharge (pour les véhicules électriques à batterie). Ultimement, puisque c'est le concessionnaire qui vendra le camion aux utilisateurs et qui sera responsable du service après-vente, il est nécessaire de les supporter et de les former sur ces nouvelles technologies.

Dans ce contexte, **les modèles d'affaires basés sur des offres clés-en-main et de locations** sont, présentement, les modèles d'affaires les plus attrayants. Deux options sont possibles, une première serait que les distributeurs louent les camions, offrant un support au long de la chaîne de valeur, dont la maintenance notamment. Une deuxième option serait que l'achat du véhicule inclurait l'approvisionnement. Variantes qui permettraient aux opérateurs d'apprivoiser la technologie et le réseau avant de prendre le risque d'acquiescer les véhicules à grands frais.

4.2 ASPECTS ÉCONOMIQUES

4.2.1 PERCEPTIONS DES TRANSPORTEURS SUR L'HYDROGÈNE

LIMITES

LE COÛT ÉLEVÉ DES CAMIONS LIMITE LA COMPÉTITIVITÉ, PRIORITÉ DES OPÉRATEURS DE FLOTTES

La volonté de décarboner les activités est présente dans l'industrie du camionnage, mais ultimement c'est l'aspect économique qui prévaut lorsque les compagnies doivent prendre des décisions. Les arguments évoqués reviennent à la règle du plus bas soumissionnaire et des marges de profit déjà minces. Le coût élevé des camions représente l'une des limites majeures actuelles au développement de la filière. Le coût d'acquisition des camions à pile à combustible a été évalué, en 2022, à 2,5 fois plus élevé que son homologue au diesel^[45]. Ainsi, tant que l'utilisation du diesel demeurera moins chère que l'hydrogène, la transition vers des camions à faibles émissions, et l'hydrogène en particulier, restera un enjeu pour des raisons de compétitivité.

CONTEXTE ÉCONOMIQUE DÉFAVORABLE ET PAS ENCORE D'ÉCONOMIE DE COÛTS

Les coûts, notamment ceux associés au transport, ayant déjà significativement augmenté avec la pandémie et l'inflation, il est difficile pour les utilisateurs de camions lourds de justifier de nouvelles augmentations des prix par une baisse de réduction des émissions de GES. Par ailleurs, le marché étant encore jeune et peu mature, les coûts demeurent très élevés.

ATOUS

Des compagnies se spécialisant dans la rénovation d'équipements (retrofit) des camions actuels vers un hybride hydrogène-diesel – moteur à combustion double hydrogène-diesel, ou hydrogen-diesel dual fuel engine (H2DF) – gagnent en popularité sur le marché. Ces compagnies présentent l'option de modifier les moteurs des véhicules présents actuellement au sein du parc, pour y ajouter un moteur à combustion hydrogène. Les coûts initiaux d'investissement sont bas, cet ajout permet de s'initier aux modèles d'opérations du camion à hydrogène. Les transporteurs n'avaient pour la plupart pas connaissance de cette alternative.

[45] IFPEN, ADEME, « Tranphlyl » Transport lourds fonctionnant à l'hydrogène, 2022.

4.2.2 ASSURER LA PÉRÉNITÉ ÉCONOMIQUE ET FINANCIÈRE DE LA FILIÈRE

METTRE EN PLACE UN SUPPORT FINANCIER DURABLE

Afin que la filière de l'hydrogène dans le transport lourd et de longue distance puisse se développer, il sera nécessaire de mettre en place un support financier, et ce, jusqu'à ce que le volume d'offres et de demandes croisse et qu'il soit possible de réaliser des économies d'échelle. Les premiers opérateurs qui adopteront cette technologie nécessiteront davantage de support pour contrer un manque de fiabilité inhérent aux premières itérations de la technologie.

À L'ACHAT DES CAMIONS

La différence de coût entre un camion à hydrogène et un camion diesel est importante; rendant cette différence difficilement supportable par les opérateurs de parc de véhicules. Cette différence est encore plus importante pour les petites entreprises de transports, qui auront plus de difficultés à supporter le coût d'investissement^[46]. Davantage de subventions gouvernementales seront donc nécessaires afin que le système proposé soit équitable pour toutes les compagnies. Selon la banque de données des statistiques officielles sur le Québec, près de 170 000 camions ou tracteurs routiers pour une utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale étaient en circulation 2021^[47], chiffre en constante augmentation au cours des dix dernières années.

Il est également primordial de revoir la durée des subventions afin qu'elles puissent couvrir la période de transition jusqu'à la matérialisation des économies opérationnelles. Sans quoi, le jour où les subventions cesseront, la perte de compétitivité résultante pour les camions à hydrogène fera en sorte que les transporteurs devront transférer ce coût à leurs clients. L'aide financière mise en place devra donc être disponible à long terme.

Le programme gouvernemental Écocamionnage propose notamment une aide financière représentant 50 % des dépenses admissibles et pouvant atteindre un montant maximal de 175 000 \$ pour un véhicule lourd. Cette aide financière est basée sur le surcoût que représente l'achat de ce type de véhicule par rapport au coût d'un véhicule conventionnel. Bien que ce programme puisse aider à diminuer les barrières à l'entrée financière de la transition, les modalités, soit 50% des dépenses admissibles jusqu'à concurrence de 175 000\$, sont trop contraignantes pour favoriser l'adoption de cette technologie par les opérateurs. Sans mentionner le fait que le budget total du programme est limité et donc, rapidement utilisé.

SUR LE COÛT DE LA MOLÉCULE D'HYDROGÈNE

Il existe à date seulement une station de remplissage à hydrogène dans la province, opérée par Harnois Énergie à Québec. Les médias rapportent que le prix de vente du kilogramme d'hydrogène serait de 10 CAD^[48] pour ravitailler des véhicules légers à l'inauguration du site en 2019. En septembre 2023, le kilogramme d'hydrogène était vendu à 19 CAD. Ce prix est toutefois à relativiser car selon le seuil de production minimal, la tarification de l'électricité pourrait décroître (tarif Hydro-Québec M vers tarif L). La capacité de stockage, opposable au coût de transport, est également un effet de levier pour optimiser le coût de production.

Bien que l'électricité au Québec soit parmi les moins chères en Amérique du Nord, le coût de production de l'hydrogène reste élevé, 40l de diesel équivaut à 8.5kg d'hydrogène pour un semi-remorque à pile à combustible effectuant 100km^[49], un litre de diesel est évalué à environ 2\$^[50] en 2023. On peut estimer que le coût de production de l'hydrogène se situe autour de 10 CAD/kg pour que la filière soit compétitive. Il faudrait ainsi qu'une partie subséquente du coût de la molécule soit subventionnée pour pallier la différence avec le diesel.

[46] Le top 10 des plus grandes entreprises de camionnage au Québec présente entre 1 000 et 12 000 camions motorisés (tracteurs et camions). Ensuite, le nombre de véhicules au sein du parc descend sous les 1 000 véhicules. <https://www.transportroutier.ca/top-25-quebec/>

[47] <https://bdso.gouv.qc.ca>

[48] <https://www.lesoleil.com/2019/01/17/une-premiere-station-de-ravitaillement-a-hydrogene-au-quebec-dici-trois-semaines-8a60bb093d5652fe5ef9697910378a80/#:~:text=Harnois,naturelles%20-Canada%C2%BB%2C%20explique%20M>

[49] Livre blanc sur l'Hydrogène – Volet 2 – Intelligence véhiculaire, Amp&Axle

[50] https://fr.globalpetrolprices.com/Canada/Quebec/diesel_prices/

Un programme d'aide gouvernemental sous forme de prêt favorisant l'adoption de la technologie hydrogène devrait considérer l'ensemble du coût de possession du véhicule : le surcoût à l'achat du véhicule à hydrogène et le surcoût de carburant hydrogène. En misant sur l'accompagnement du développement de la production d'hydrogène, une industrialisation de la production des véhicules et du carburant fera chuter les coûts au fur et à mesure que la demande croît. Avec l'augmentation attendue du prix du diesel, il y aura éventuellement un point de bascule à partir duquel l'hydrogène sera économiquement plus intéressant. C'est à ce moment-là que le prêt commencerait à être remboursé.

La banque d'infrastructure du Canada propose ce type de prêt pour l'électrification des autobus en soutenant le surcoût à l'achat du véhicule^[51] et le coût de l'infrastructure de recharge. L'avantage toutefois avec cette technologie est que les coûts opérationnels sont de 40% à 50% inférieurs à ceux d'un véhicule thermique, ce qui permet de se projeter immédiatement sur un plan de financement soutenable dans le temps.

À titre d'exemple, l'Inflation Reduction Act, officialisée par le gouvernement américain en 2022, est l'investissement climatique le plus important de l'histoire des États-Unis, conçu pour mobiliser des capitaux privés afin d'atteindre les objectifs fixés en matière de climat et de renforcer la croissance à long terme. Le crédit d'impôt 45V touchant la production d'hydrogène a été introduit par cette loi. Il accorde jusqu'à **4 CAD\$/kg d'H₂** produit aux projets dont l'intensité carbone sur le cycle de vie est inférieure à 0,45 kgCO₂e/kg H₂. Cette loi est particulièrement importante dans le contexte américain, où plus de 12 millions de tonnes d'hydrogène sont produites chaque année, avec une intensité carbone d'environ 10 kgCO₂e/kg H₂. Ce crédit d'impôt permet non seulement de réduire les émissions provenant de l'hydrogène produit, mais également de diminuer les risques financiers des nouveaux projets et de développer de nouvelles façons de produire de l'hydrogène propre en réduisant leur taxe carbone^[52].

Une autre option complémentaire serait d'avoir des tarifs préférentiels dans les stations, similaires au modèle d'affaires actuel pour les grands consommateurs de carburants fossiles, bénéficiant de rabais à la pompe.

Le succès des schémas d'aide passe résolument par la stimulation de la demande avec le postulat que l'offre suivra. Il est dans la très grande majorité des cas recommandé de financer l'utilisateur plutôt que le producteur. L'utilisateur va ultimement favoriser le développement de tout le reste de la chaîne de valeur.

POUR LE DÉVELOPPEMENT D'INFRASTRUCTURES ET DE STATIONS DE RAVITAILLEMENT

Les investissements initiaux pour développer de nouvelles stations sont conséquents. Plusieurs facteurs peuvent impacter les coûts initiaux pour les stations; il est cependant estimé qu'une station produisant plus de 1 500 kg d'hydrogène par jour nécessite plus de 6,9 millions de dollars canadiens en investissement^[53]. En fonction de la nature des projets, la construction d'une nouvelle station n'est pas forcément la meilleure option et parfois, l'ajout d'une unité d'hydrogène à une station existante est une option intéressante. C'est également le cas pour les infrastructures de maintenances existantes, qui devront être adaptées à ces nouvelles technologies.

C'est notamment le modèle priorisé par Hydros spider AG, qui propose des unités pour le ravitaillement en hydrogène adjacent aux stations de ravitaillement traditionnels, exploités par leurs partenaires. Des stations de productions sont situées de façon centrale pour subvenir aux besoins en hydrogène aux stations.

Par ailleurs, si le support financier de la filière de l'hydrogène présente certaines limites, une autre option serait de pénaliser le diesel par la mise en place de taxes, de quotas, ou encore la nécessité d'aller chercher des crédits-carbone.

[51] <https://cdn.cib-bic.ca/files/Investment/FR/Initiative-AZE-06-2022.pdf>

[52] <https://breakthroughenergy.org/news/45v-tax-credit/>

[53] [Melania, Penev, National Renewable Energy Laboratory, 2013 "Hydrogen Station Cost Estimates"](#)

4.3 ASPECTS SOCIAUX

4.3.1 PERCEPTIONS DES TRANSPORTEURS SUR L'HYDROGÈNE

LIMITES

MYTHES ENTOURANT LA SÉCURITÉ

L'hydrogène est encore méconnu du grand public, parfois même rattaché au désastre d'Hindenburg de 1937. En effet, nombre d'utilisateurs de camions soulèvent que cette option n'est pas sécuritaire, en partie du fait des risques d'inflammabilité.

L'hydrogène est inflammable, cependant cette technologie demeure sécuritaire lorsqu'utilisée et manipulée adéquatement. Ses propriétés chimiques la rendent même plus sécuritaire que les carburants usuels, notamment, l'hydrogène est quatorze fois plus léger que l'air, lui permettant de se disperser rapidement. À titre comparatif, le propane et les vapeurs d'essence sont plus lourds que l'air et s'ils sont libérés, ils s'accumulent au niveau du sol, où toute ignition présente un danger évident^[54]. Par ailleurs, le lithium utilisé pour les batteries électriques est également inflammable et risque de provoquer des feux explosifs, dont une réaction en chaîne où une cellule en combustion entraîne la combustion de la cellule voisine. Finalement, les camions sont aujourd'hui construits avec des matériaux difficilement inflammables, et des mesures de sécurité appropriées, dont de la ventilation et des détecteurs de fuites, sont mises en place.

RESPONSABILITÉS SUPPLÉMENTAIRES

L'adoption de la technologie à hydrogène créera davantage de responsabilités pour les opérateurs, qui devront maîtriser cette nouvelle technologie tout en maintenant les opérations conventionnelles. Par ailleurs, les contremaîtres chargés de la répartition des trajets pour les camions devront inclure des paramètres de localisation des stations de ravitaillement. Ces ajouts complexifient les modèles existants et présentent de nouveaux enjeux d'optimisation de la logistique.

4.3.2 SUPPORTER LA RÉUSSITE DE LA FILIÈRE

ENCOURAGER LA COLLABORATION ENTRE LES PARTIES PRENANTES

La clé du succès d'un projet réside en grande partie dans la collaboration entre les parties prenantes impliquées au projet. Il est primordial qu'elles travaillent ensemble au développement du projet afin de partager le risque, et qu'il ne soit pas entièrement porté par l'utilisateur des camions. Ces discussions doivent regrouper toutes les parties de la chaîne de valeur, incluant les fournisseurs d'hydrogène, manufacturiers, utilisateurs, concessionnaires, et gestionnaires des infrastructures de ravitaillement. Sans une action concertée, un acteur isolé aura beaucoup de mal à franchir les différents obstacles qui se dressent devant lui.

A titre d'exemple, le projet de démonstration du train à Hydrogène à Charlevoix à l'été 2023 a été le fruit d'une étroite collaboration entre le manufacturier du train Alstom, le producteur d'hydrogène Harnois, l'opérateur du chemin de fer de Charlevoix Groupe le Massif et le gouvernement du Québec. En établissant dès le départ les conditions du déploiement de ce projet de démonstration, les parties prenantes rassemblées ont pu convenir de leur intérêt dans le projet et de leur exposition au risque avant de se lancer dans l'aventure.

Le rassemblement de l'industrie composant toute la chaîne de valeur du camionnage lourd autour de pôles de développements et d'expérimentation est ainsi déterminante pour transformer ces initiatives à plus grande échelle, objectif recherché pour pérenniser le développement d'une nouvelle filière sur l'hydrogène pour le camionnage.

[54] <https://blog.ballard.com/hydrogen-safety-myths>

De plus, ces initiatives espérées devront s'étendre au-delà du Québec et les parties prenantes devront se concerter avec d'autres provinces canadiennes et états américains afin que les utilisateurs de camions qui font des trajets hors de la province ne soient pas restreints au Québec. Le gouvernement pourrait amorcer les conversations et faire évoluer ces discussions par phase selon les avancements respectifs de chaque province et état.

ACCROITRE LA TRANSPARENCE ET RENFORCER LA COMMUNICATION

L'hydrogène souffre encore d'un certain scepticisme général, notamment dû à la déperdition énergétique dans la chaîne de production depuis la source électrique jusqu'à la roue. Cette technologie présente beaucoup d'appréhension et sa nouveauté technologique peut impacter la perception de sécurité. La filière étant peu mature, peu d'informations et de retours d'expérience sont actuellement disponibles publiquement. Pour contribuer à l'adoption de cette nouvelle technologie, mieux informer la prise de décision et diminuer le risque face à l'inconnu, il est impératif d'aider l'accès aux comparatifs et aux retours d'expérience.

La mise en place d'un forum de discussion qui permettrait aux différentes parties prenantes, et en particulier aux utilisateurs de camions, d'interagir entre eux et de partager leurs expériences aiderait grandement l'écosystème.

DÉVELOPPER DES FORMATIONS STANDARDISÉES

À ce jour, il n'y a pas de formation proposée au Québec sur l'opération de camions à hydrogène, que ce soit la conduite, la maintenance et la gestion de parc de véhicules. La réglementation actuelle ne fournit pas de directives quant à la formation requise pour les employés conduisant un camion à hydrogène ou en charge du ravitaillement. Il est donc nécessaire de mettre en place des formations, répondant aux standards de l'industrie, et permettant aux employés d'avoir un cadre sur l'utilisation des nouvelles technologies et de travailler de façon sécuritaire. Des séances d'informations, plus spécialisées pour les opérateurs de parcs de véhicules, mais aussi générales à destination du grand public devront aussi être fournies pour pallier les enjeux d'acceptabilité sociale.

Des relations avec des centres collégiaux de transfert technologique, par exemple l'Institut du Véhicule Innovant, qui réalise de la conversion de véhicules, dont à hydrogène, pourrait constituer un partenariat stratégique intéressant pour établir ce genre de formation.

Les formations pourront être dispensées par des organismes externes aux opérateurs de parc de véhicules et aux concessionnaires, servant de lien entre les opérateurs et les manufacturiers, avec du contenu fourni par ces derniers. Le gouvernement, ou des associations comme l'association du camionnage seraient des parties prenantes nécessaire.

4.4 ASPECTS LÉGISLATIFS ET GOUVERNEMENTAUX

4.4.1 PERCEPTIONS DES TRANSPORTEURS SUR L'HYDROGÈNE

LIMITES

ADAPTER LES INFRASTRUCTURES AUX NOUVELLES NORMES ET RÉGLEMENTATIONS

Les infrastructures existantes, notamment les garages de maintenance, doivent être adaptées pour respecter les nouvelles normes gouvernementales, notamment les réglementations entourant les risques élevés d'incendie et d'explosion, les réglementations dans le domaine des installations sous pression, qui ne sont pas adaptées à ce jour aux particularités des installations à hydrogène, le Code canadien d'installation de l'hydrogène (CCIH)^[56], etc. Le risque d'apparition de nouvelles législations spécifiques à l'hydrogène pourrait engendrer des coûts supplémentaires pour les transporteurs, si ceux-ci ont déjà procédé à des changements sur leurs infrastructures avant l'adoption de ces normes.

POSITIONNEMENT GOUVERNEMENTAL

Bien que le Québec soit enclin à stimuler des projets de démonstration sur la décarbonation du transport lourd, l'image renvoyée par le gouvernement n'indique pas un contexte politique favorable à l'hydrogène selon les opérateurs. Devant cette position gouvernementale incertaine, les entreprises de camionnage n'osent pas s'engager. Le retard face à ces nouvelles technologies que prend le Québec ne permet pas le climat d'adoption que souhaite les opérateurs.

4.4.2 STRUCTURER LA FILIÈRE

ENCOURAGER LES PROJETS PILOTES ET FACILITER LE DÉVELOPPEMENT DE PROJETS

Pour assurer un développement confiant de la filière, il sera nécessaire de mettre en place un financement gouvernemental pour faciliter les projets pilotes. La création de ces projets et zones de tests provoquera un effet accélérateur et aidera à créer la demande, permettant d'élaborer davantage le réseau de ravitaillement, tout en permettant aux manufacturiers de tester la technologie dans différentes conditions, sur différents trajets et types de véhicules.

Des procédures devront aussi être mises en place pour accélérer les processus de développement des projets, que ce soit au niveau de l'octroi des permis ou des autorisations gouvernementales. Les processus à couvrir incluent les usines de production d'hydrogène, mais également les stations-service. Le cadre réglementaire devra aussi être adapté pour s'assurer qu'il couvre bien toutes les spécificités des projets d'hydrogène pour le transport lourd et de longue distance.

CLARIFIER LE MESSAGE GOUVERNEMENTAL ET SE COORDONNER AVEC D'AUTRES PAYS

Si l'hydrogène devait se développer dans le secteur du transport, il serait impératif que le gouvernement se positionne clairement sur ses ambitions et démontre une stratégie gouvernementale allant dans ce sens, incluant des actions et des engagements précis.

Il est nécessaire d'instaurer une feuille de route de développement de l'hydrogène, en incluant des cibles précises, les moyens pour s'y rendre, les parties prenantes responsables et un horizon temporel. Ce plan devrait courir au-delà de 5 ans afin d'attirer et de conforter les investisseurs.

En observant les gouvernements européens ou le gouvernement américain, avec la mise en vigueur de l'Inflation Reduction Act en 2022, par exemple, il est évident que des politiques favorisant l'adoption des camions à hydrogène

[56] <https://www.rbq.gouv.qc.ca/domaines-d'intervention/gaz/les-exigences-de-qualite-et-de-securite/reglementation-applicable-a-lhydrogene/>

pour le transport lourd et de longues distances sont déjà adoptées, faisant de ces endroits des marchés intéressants pour les manufacturiers. Ceux-ci ont notamment besoin d'une masse critique pour se lancer dans un marché; faute de positionnement clair, le Québec passera après la Californie, qui présente déjà des objectifs agressifs pour décarboner le transport lourd et de longue distance^[57]. Il est donc urgent que la province renforce l'adoption de la transition énergétique via des normes ou réglementations qui renforceront sa position et accéléreront le mouvement.

INSTAURER DES NORMES POUR LE DÉVELOPPEMENT DES PROJETS À HYDROGÈNE

Les normes mises en place dans d'autres juridictions avec lesquelles le Québec a des échanges commerciaux impacteront les pratiques en vigueur dans la province. Le Pacte vert de l'Union Européenne, par exemple, visant l'écologisation du transport de marchandises^[58] implique que les ports devront proposer des installations répondant aux besoins des camions lourds et bateaux. Les ports de destination devront suivre le mouvement et mettre en place le nécessaire pour répondre aux besoins de leurs clients s'ils ne veulent pas les perdre.

Des normes devront être mises à jour concernant la sécurité des installations, l'aspect environnemental, l'aspect technique, comme la distance entre les différents carburants entreposés et/ou les limites du terrain par exemple, ainsi qu'au niveau de l'offre dont le débit et la pression. Ces normes devront également être unifiées, tant au niveau canadien qu'américain, afin de faciliter les processus de conformité pour les utilisateurs ayant des opérations dans différentes provinces et états.

À la suite des projets d'implantation de l'hydrogène en Suisse (**Hydrospider AG**, notamment) il a été demandé au gouvernement de travailler sur l'**harmonisation des cantons**, afin d'**uniformiser** les stratégies différentes pour en faire une vision commune, facilitant l'implantation des projets d'hydrogène. Cette situation est applicable au Canada, où les différentes provinces développent leur propre stratégie et leur projet de façon autonome et indépendante, et où des **normes communes à l'échelle nationale, et internationale** seraient bénéfique pour la mise en place de projets.

[57] Advanced Clean Fleets Regulation (ACF) approuvé par le CARB (California Air Resources Board): *Drayage trucks will be required to start transitioning to zero-emission technology beginning in 2024, with full implementation by 2035*

[58] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP_23_3767

5. MODÈLE D'AFFAIRES

Le modèle d'affaires présenté dans cette section repose sur les aspects à considérer pour assurer le développement de la filière. Celui-ci s'inspire également de projets canadiens et internationaux pertinent dans un contexte québécois.

FIGURE 8

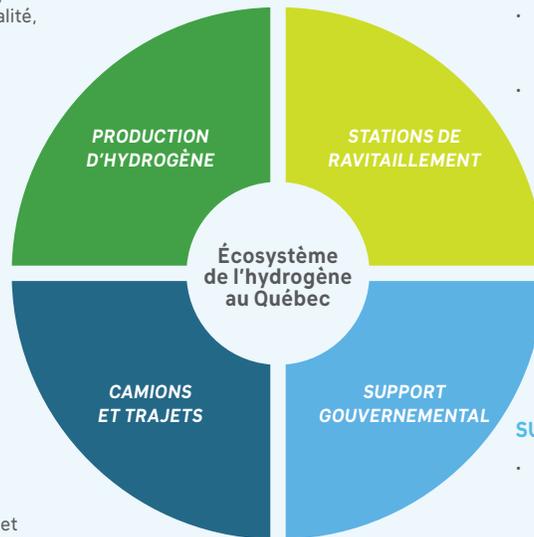
Exemple d'un modèle d'affaires envisageable pour le Québec

PRODUCTION D'HYDROGÈNE

- Définir le modèle de production, privé ou publique.
- Baliser l'octroi des blocs énergétiques et considérer des critères de capacité, additionnalité, simultanéité et géographie.

STATIONS DE RAVITAILLEMENT

- D'abord concentrer l'offre de service en hubs de ravitaillement pour ensuite l'élargir le long de villes importantes pour le transport lourd.
- Développer un réseau de stations le long de corridors routier à grande densité.
- Travailler avec les provinces et les états voisins pour permettre des déplacements en dehors du Québec



CAMIONS ET TRAJETS

- Cibler les camions de Classe 8 (33 tonnes et plus)
- Définir des trajets cibles, longs et récurrents, facilitant le choix du positionnement des stations de ravitaillement.
- Étudier la possibilité d'un modèle de location de camions de type «clé-en-main», pour réduire les barrières à l'entrée.

SUPPORT GOUVERNEMENTAL

- Mettre en place des normes pour favoriser la transition vers une mobilité durable.
- Supporter financièrement toute la filière de l'hydrogène, par des subventions ou des crédits d'impôts.

PRODUCTION D'HYDROGÈNE

Les retours d'expériences en Europe indiquent que le modèle d'affaires le plus pertinent aujourd'hui d'un point de vue économique, qui s'applique aux juridictions européennes et répond aux attentes locales, est un modèle centralisé. Dans ce modèle, les usines de production d'hydrogène alimentent plusieurs stations de ravitaillement, contrairement au modèle décentralisé où les électrolyseurs sont construits directement sur le site des stations. La situation au Québec étant différente, il se peut qu'un modèle décentralisé soit plus économique, notamment pour des petites capacités de production. Il sera aussi nécessaire d'aborder la question à savoir s'il est privilégié d'avoir des sites de production seulement pour le transport lourd, ou si la production pouvant avoir plusieurs utilisations (stockage d'énergie, utilisation industrielle, etc.) permettrait de diversifier les champs d'action de l'hydrogène.

L'accès à de l'énergie renouvelable restera au cœur des enjeux pour la transition et l'avenir de l'hydrogène vert repose en grande partie sur ce point. En l'absence d'électricité disponible au Québec, un modèle s'inspirant de ce qui se fait en Europe^[59] peut être envisagé, où le bloc est octroyé sous réserve que certains critères soient satisfaits, notamment:

- Additionalité : utiliser des capacités nouvellement installées et non les capacités existantes;
- Corrélation géographique : l'électricité est produite dans une zone géographique proche, qui peut être définie comme le Québec, pour éviter le recours à des contrats d'achat étranger (Power Purchase Agreement).

Il faut ici mentionner que ce modèle est pertinent dans le cadre européen, mais que d'autres modèles, non étudiés dans ce rapport, pourraient être plus adaptés pour le Québec.

STATIONS DE RAVITAILLEMENT

En se basant sur les modèles américains, européens, comme la Californie et la Suisse, et sur le projet Trans-Québec 1, soutenu par les discussions entretenues auprès des opérateurs, il serait intéressant de prioriser d'abord les stations de ravitaillement au sein des grandes villes du Québec, et lier ces villes par des stations de ravitaillement le long de la route les connectant. Dans un second temps, le gouvernement pourrait imposer le développement d'un réseau de stations le long de corridors routiers structurants, avec une station tous les 200 km par exemple, tel que pratiqué en Europe. Les utilisateurs seraient ainsi rassurés par la présence de stations disponibles le long des routes qu'ils planifient d'emprunter. Les axes Gatineau-Montréal-Québec-Saguenay; Montréal-Val d'Or et Québec-Rimouski permettraient de couvrir une bonne partie de la province et de rejoindre l'Ontario. Parallèlement, le Québec devra travailler avec les provinces et les états voisins pour ne pas limiter les trajets à la province et permettre des déplacements en dehors du Québec.

Développer des stations de ravitaillement sur les sites des utilisateurs nécessite en revanche un investissement initial en capital élevé, et est donc moins intéressant économiquement. Comme ce modèle ne répondrait qu'aux besoins d'un nombre limité d'utilisateurs, cette option n'est pas recommandée avant qu'un réseau de stations communes ne soit développé. Dans le cas de la Californie, les stations de ravitaillement en hydrogène sont ajoutées aux stations existantes, plutôt que d'en développer de nouvelles.

CAMIONS ET TRAJETS VISÉS

Les camions de classe 8 (plus de 33 tonnes, charge incluse) seraient la cible idéale pour l'hydrogène. D'autres classes pourraient aussi être intégrées afin d'augmenter le volume de véhicules et la demande en hydrogène, par exemple:

[59] [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI\(2023\)747085_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI(2023)747085_EN.pdf)

- Camions de classe 2, pour lesquelles l'autonomie de la batterie ne suffit pas, cet ajout augmenterait significativement le volume de véhicules vendus utilisant les bornes de recharge;
- Les véhicules adaptés roulant continuellement, l'électrification n'est donc pas une solution envisageable dû au temps de recharge.

Les camions visés auront des trajets ciblés et récurrents afin que les parcours soient prévisibles et qu'il soit plus facile de développer des stations de ravitaillement sur leur route. De plus, la priorité sera mise sur les longs trajets, là où le camion électrique ne peut répondre au besoin.

Pour les opérateurs présentant des activités dans des secteurs isolés, il serait pertinent d'envisager des technologies transitoires (retrofit des camions diesels) afin de mitiger le risque associé à l'approvisionnement. Il serait également intéressant, lorsque possible, d'envisager la valorisation des ressources produites (fibre de bois, par exemple), afin de produire leur propre hydrogène vert, par biomasse.

Le prix à l'achat des camions est encore trop élevé pour que les utilisateurs, notamment les plus petites entreprises de transport, en fassent l'acquisition. Un modèle de location de camions de type « clé-en-main », incluant la maintenance et le service après-vente, serait une bonne solution pour permettre à la filière de se développer et permettre aux utilisateurs de tester leurs produits. Les camions seraient possédés par des entreprises privées, par exemple des manufacturiers, et leur utilisation pourrait être facturée sur la base des distances parcourues, en plus d'un frais annuel d'inscription.

SUPPORT GOUVERNEMENTAL

Le gouvernement devra mettre en place des normes pour forcer la transition vers une mobilité plus durable pour le transport lourd et de longue distance. Ces normes devront être accompagnées d'un plan de mise en œuvre, autant temporel, que géographique et financier.

En Europe, par exemple, l'hydrogène a été introduit au sein du règlement AFIR^[60] (Regulation for the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure). Ce règlement, adopté en juillet 2023, impose le déploiement de stations tous les 200 km le long d'un réseau central européen d'ici fin 2030^[61]. Il encadre aussi les appels d'offres nécessaires et propose un système de financement. Compte tenu des coûts actuels, la mise en place de tels normes et règlements doit être financièrement supportée par le gouvernement. En parallèle, des subventions ou des crédits d'impôt sur le prix d'achat de l'hydrogène devront être proposés pour supporter la filière.

RÔLE DE L'ÉCOSYSTÈME

Les différentes parties prenantes de la chaîne de valeur devront collaborer sur un plus grand nombre de projets afin de démontrer les possibilités de la technologie et sa fiabilité. Cela renforcera également l'acceptabilité sociale.

Cela peut passer par des projets pilotes impliquant utilisateurs, manufacturiers et spécialistes des stations-service, mais aussi par des groupes de travail et des comités opérationnels. Ces rencontres devront regrouper des entreprises et organismes de toute la chaîne de valeur afin qu'ils puissent échanger sur leurs expériences, leurs bonnes pratiques et leurs défis. Des enjeux de confidentialité freinent aujourd'hui les parties prenantes à communiquer, mais l'implantation d'un groupe d'échange ouvert contribuera grandement au développement de la filière. Des organismes à but non lucratif, tel que Propulsion Québec peuvent aider de ce côté, en facilitant les rencontres et les mises en relation.

[60] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1867

[61] [pdf.europa.eu](#)

6.

CONCLUSION

La stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies, publiée en 2022, souligne l'alternative prometteuse que peut présenter l'utilisation de l'hydrogène vert afin de décarboner le secteur du transport lourd et de longue distance. Une alternative qui ne se place pas en compétition avec la filière de la batterie, mais plutôt dans des créneaux complémentaires moins pertinents pour la batterie et où le diesel domine. L'absence de solutions technologiques matures pour le transport lourd et de longue distance contribue notamment à la pertinence de la démonstration de la filière à hydrogène; la revue littéraire et les discussions avec les transporteurs ont permis de démontrer qu'il existe un potentiel pour le déploiement de cette technologie au Québec. Cependant, le manque de connaissances face à cette technologie demeure.

LES CAMIONS À HYDROGÈNE NE DOIVENT PAS ÊTRE VUS COMME UNE ALTERNATIVE AUX CAMIONS ÉLECTRIQUES, MAIS PLUTÔT COMME UNE OPTION COMPLÉMENTAIRE.

Les véhicules à hydrogène sont souvent comparés aux véhicules électriques à batterie, créant une compétition entre ces deux technologies. Sachant que la consommation énergétique de véhicules à batterie est sensible aux écarts de température et au dénivelé des routes (contexte particulièrement applicable au Québec), la planification des itinéraires de longue distance représente un enjeu d'autonomie avec la capacité actuelle des véhicules à batterie. L'hydrogène devrait être privilégié pour les trajets longues distances, lorsque l'autonomie des camions électriques n'est pas suffisante. De plus, l'implantation de stations de ravitaillement en hydrogène dans les régions isolées et proches des grands axes est une option envisageable quand la puissance électrique locale ne peut répondre à la demande requise par des mégas chargeurs, ou que le temps de recharge constitue un enjeu pour les opérations. Dès lors, l'hydrogène apparaît comme une alternative au véhicule à batterie pour la décarbonation du camionnage lourd quand les trajets opérés dépassent les conditions techniques d'électrification (autonomie, puissance de recharge requise et temps de recharge).

LA PERFORMANCE ET LA FIABILITÉ DES CAMIONS DANS UN CONTEXTE DE MARCHÉ COMPÉTITIF DES TRANSPORTEURS RETARDENT LA TRANSITION.

La compétition entre les transporteurs les pousse à optimiser constamment les charges et trajets de leurs camions pour maintenir la viabilité financière de leur entreprise. Il est ainsi primordial que les camions à hydrogène présentent une performance équivalente aux camions diesel et que la technologie soit fiable. Bien que la volonté de décarboner les activités fassent l'objet de stratégies affirmées par les dirigeants des compagnies de transport, la dimension économique demeure prépondérante dans la prise de décisions. Ainsi, tant que l'utilisation du diesel sera moins chère que l'hydrogène, la transition vers le zéro-émission, et l'hydrogène en particulier, restera un enjeu, car les compagnies s'exposent à une perte de compétitivité et hypothèque leur avenir à court terme.

LE MANQUE D'ÉNERGIE, DE CAMIONS ET DE STATIONS DE RAVITAILLEMENT ET LES COÛTS ÉLEVÉS PEUVENT DISSUADER LES INVESTISSEURS.

Les quantités limitées d'énergie disponibles pour de nouveaux projets créent une incertitude face à l'octroi d'un bloc d'électricité pour un projet d'hydrogène. De plus, les camions à hydrogène sont encore peu disponibles sur le marché. Les utilisateurs doivent ainsi passer commande entre 2 et 3 ans avant la livraison du véhicule et la capacité de production de ces véhicules est très limitée. Les conditions économiques autour de l'adoption de l'hydrogène sont également une limite majeure au développement de la filière. En effet, le coût à l'achat d'un camion à hydrogène est supérieur à celui d'un camion diesel ou électrique à batterie, le coût actuel de l'hydrogène est lui le double du diesel. Dans un contexte aussi compétitif que le transport de marchandise, une action gouvernementale est donc attendue pour lever ces barrières à l'adoption en favorisant des prêts financiers permettant de compenser les écarts de coûts avec le camionnage diesel actuel. Dès lors qu'une masse critique de véhicules à hydrogène en opération sera atteinte pour pérenniser une demande en hydrogène, les coûts d'acquisition et d'opération deviendront soutenables sans intervention du gouvernement. L'atteinte de cette masse critique demeure toutefois dépendante du coût du carburant diesel et de celui de l'électricité.

DÉVELOPPER DES PROJETS PILOTES, FACILITER L'OCTROI DE PERMIS ET BÉNÉFICIER D'UN SOUTIEN AFFIRMÉ DU GOUVERNEMENT POUR STRUCTURER LA FILIÈRE.

Les utilisateurs ont besoin de tester la technologie, mais aussi d'identifier ce qui répond le mieux à leurs besoins avant d'investir dans des flottes. De nombreuses compagnies ont mentionné leur appétit à tester et se faire leur propre opinion à la lumière de la variété de leurs opérations. Les projets pilotes constituent des tremplins efficaces vers l'adoption de la technologie. En dépit des stratégies et programmes en place au Québec, le positionnement gouvernemental vis-à-vis de la filière reste relativement flou pour les parties prenantes, ce qui crée une certaine réticence à l'investissement. Il est important que le gouvernement clarifie ses ambitions sur le développement de la filière, de la production à l'utilisation. L'octroi de blocs électriques pour la production de l'hydrogène est une condition nécessaire à la production. Ceci implique une vision consolidée du gouvernement sur la demande totale en électricité requise pour contribuer à décarboner l'économie québécoise. Par ailleurs, le développement des projets d'hydrogène est long et souvent en décalage avec les enjeux de décarbonation et les objectifs des entreprises. L'élément le plus chronophage concerne généralement les permis de construction. Il est donc important d'accélérer les processus d'octroi des permis, que ce soit pour le développement des stations de ravitaillement ou le développement d'usines de production d'hydrogène, afin que toute la chaîne de valeur puisse avancer de concert.

Il est également pertinent de noter que la présente analyse se concentre sur l'applicabilité de l'hydrogène dans le domaine du transport. Il est important de soutenir les utilisations dans les autres domaines que le transport, de manière à ne pas favoriser ce secteur au détriment des autres. Davantage d'études pour cibler les domaines connexes seront nécessaires.

DES MODÈLES D'AFFAIRES À ESSAYER AVEC LA PLANIFICATION DES INFRASTRUCTURES DE PRODUCTION, STOCKAGE ET DISTRIBUTION

Les camions de classe 8 constituent une cible idéale, avec des trajets ciblés, conséquents et récurrents afin que les parcours génèrent une demande prévisible, ce qui facilitera le déploiement des premières stations de ravitaillement sur les axes routiers achalandés au Québec.

Un système de location, rendant le camion à hydrogène financièrement plus accessible aux opérateurs devrait être encouragé pour favoriser son adoption.

En parallèle, un modèle décentralisé de production d'hydrogène, avec des électrolyseurs directement sur le site des stations, apparaît comme plus adapté au Québec. Des analyses plus approfondies devront toutefois confirmer cette direction, au fur et à mesure que la production croît et que le coût associé diminue.

Dans tous les cas, le réseau de stations devra être développé le long de corridors routiers structurants, avec une station tous les 200 km, comme on le voit en Europe par exemple. Les axes Gatineau-Montréal-Québec-Saguenay; Montréal-Val d'Or et Québec-Rimouski permettraient de couvrir une bonne partie de la province et de rejoindre l'Ontario. Parallèlement, le Québec devra travailler avec les provinces et états voisins pour permettre des déplacements propulsés à l'hydrogène vert hors Québec.

ANNEXES

PARTIES PRENANTES CONSULTÉES -
ENTREVUES TÉLÉPHONIQUES

Canadian Tire
 Glencore Canada
 Groupe Bellemare
 Groupe Gilbert
 Groupe Morneau
 Groupe Robert
 Groupe Somavrac
 Harnois Énergies
 HTEC
 Hydrolux
 Hydro-Québec
 Hydrospider
 Lhyfe
 Loblaw
 Metro
 Nouveau Monde Graphite
 PACCAR
 Port de Montréal
 Produits Forestier Résolu
 Purolator
 SAQ
 TFI International

PARTIES PRENANTES CONSULTÉES -
PRIORISATION DES CRITÈRES DE DÉVELOPPEMENT

Ballard
 Charbone
 Énergie Sonic
 Energir
 First Hydrogène
 Glencore Canada
 Groupe Bellemare
 Groupe Morneau
 Groupe Somavrac
 Harnois Énergies
 HTEC
 Hydrogène Québec
 Hydrolux
 Hydro-Québec
 Hydrospider
 Hyzon Motors
 Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH)
 Institut du véhicule innovant (IVI)
 Metro
 Nouveau Monde Graphite
 PACCAR
 Produits Forestier Résolu
 Purolator
 SAQ
 Toyota

MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE

Cédric Lalaizon – Propulsion Québec

Alex Champagne-Gélinas – InnovÉE

Olivier Chaudret – InnovÉE

Loïc Boulon – Université du Québec à Trois-Rivières

Sébastien Comazzi – Bureau du développement de l'hydrogène vert et des bioénergies (BDHVB), Ministère de l'économie, de l'innovation et de l'énergie (MEIE)

Mathieu Payeur – Bureau du développement de l'hydrogène vert et des bioénergies (BDHVB), Ministère de l'économie, de l'innovation et de l'énergie (MEIE)

Philippe Tanguy – HTEC

Ivette Vera Perez – The Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association

LIVRE BLANC
VOLET 2
INTELLIGENCE
VÉHICULAIRE



Rapport d'études sur l'Hydrogène Volet 2 – Intelligence véhiculaire

Table des matières

Abbréviations	3
Résumé – Conclusion	4
Première partie	5
Introduction.....	5
Les technologies	5
Les piles à combustible.....	5
Les moteurs à combustion interne bi-carburant.....	6
Les moteurs à combustion interne 100% H2	7
Le stockage embarqué de l’hydrogène	7
Les stations de remplissage.....	8
Le déploiement des FCEV	8
Les modèles d’affaire	9
Synthèse de l’offre existante.....	10
Seconde partie.....	13
Analyse des différents cas d’usage.....	13
Cas d’usage majoritairement favorables à l’hydrogène.....	13
Cas d’usage majoritairement favorables aux véhicules électriques à batterie.....	14
Cas d’usage intermédiaires	14
Comparaison de l’efficacité énergétique des solutions de propulsion.....	14
Evolution des technologies de batteries et de chargeurs	15
Le transport collectif urbain	15
La livraison urbaine au Québec	16
Les véhicules de secours d’urgence :	16
Filière Ammoniac et autres LOHC	17
Feuille de route technologique de l’hydrogène – horizon 2035	18
Troisième partie	20
Le rôle de l’hydrogène au Canada.....	20

Le mix énergétique renouvelable du Québec	20
Le Québec, terre d'électrification	21
Les contraintes climatiques au Québec.....	22
Décentralisation de la production et écosystèmes régionaux.....	22
Conclusions et facteurs clés de succès.....	23
Annexe 1 : Contenu en énergie et carbone des différents carburants	24
Annexe 2 : Tableaux inventaire des véhicules de transport de marchandises et de transport de personnes	24

Abbréviations

BEV	Battery Electric Vehicle – Véhicule électrique à batterie
BRT	Bus Rapid Transit – Service rapide par bus (SRB)
EU	European Union – Union Européenne
FC	Fuel Cell – Pile à Combustible
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle – Véhicule électrique à pile à combustible (hydrogène)
FWD	Front Wheel Drive – Traction avant
GCW	Gross Combined Weight – Masse totale en charge (incluant remorque)
GVW	Gross Vehicle Weight – Masse totale en charge
H2	Molécule de di-hydrogène
ICE	Internal Combustion Engine – Moteur à combustion interne
LH2	Liquid hydrogen – Hydrogène liquide
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier - Liquides organiques porteurs d'hydrogène
OBC	On-Board-Charger – Chargeur embarqué
PEM	Proton Exchange Membrane – Membrane échangeuse de proton
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell - Piles à combustibles à oxyde solide

Résumé – Conclusion

La société Amp&Axle Consulting¹ a été mandatée par Propulsion Québec et Innovéé pour mener une étude visant à inventorier les véhicules à hydrogène existant ou annoncés afin d'illustrer les différents cas d'usage de l'hydrogène dans les transports.

L'étude s'est déroulée entre Novembre 2022 et Mars 2023.

Le présent rapport décrit les différentes technologies liées à la propulsion hydrogène, procède à un inventaire des différents véhicules hydrogène annoncés à ce jour par les constructeurs et passe en revue les cas d'usage pertinents. Une feuille de route technologique est proposée afin de tenir compte des technologies en cours de développement. Enfin dans la dernière partie, l'auteur revient sur les caractéristiques du contexte Québécois dont il faut tenir compte pour bien apprécier les avantages de la technologie.

En conclusion, l'hydrogène vert représente une alternative réelle aux carburants fossiles dans le transport lourd, à mi-chemin entre la technologie batterie pour l'automobile et l'ammoniac pour le maritime.

Son aptitude à alimenter les véhicules par grand froid et sa capacité à stocker l'énergie en font une solution intéressante et prometteuse pour le transport lourd au Québec.

Les progrès technologiques et l'industrialisation de la production des piles, réservoirs et électrolyseurs devraient permettre de rendre cette technologie plus compétitive dans la prochaine décennie.

Plusieurs facteurs clés de succès restent nécessaires, tels que :

- Accompagner l'industrie en ce qui concerne la standardisation des technologies, la réglementation en matière de sécurité des véhicules, ateliers de maintenance et stations de ravitaillement et la mise à disposition d'aides financières équilibrées par rapport aux autres solutions de transport zéro-émissions.
- Mettre en place une dynamique de déploiement visible de l'infrastructure de ravitaillement, afin de donner confiance aux utilisateurs de véhicules sur la couverture géographique de la distribution du carburant.
- Former les chauffeurs et équipes de maintenance sur l'utilisation des véhicules afin de les rassurer en matière de sécurité de la technologie.

¹ Société de conseil en électrification des transports et projets de véhicules zéro-émission fondée en 2021. Son fondateur, Frédéric Delrieu, cumule une expérience professionnelle dans l'électrification des automobiles, autobus, camions et dans la conception de véhicules à pile à combustible hydrogène.

Première partie

Introduction

L'hydrogène est un vecteur d'énergie pratique pour le stockage. Pour certaines applications de mobilité, il est possible de démontrer que l'hydrogène présente des avantages supérieurs par rapport aux batteries, même s'il est moins efficace énergétiquement. Même si l'hydrogène n'est pas aussi pratique que le pétrole, il représente une voie pour capter l'énergie renouvelable et réduire la consommation de combustibles fossiles.²

L'industrie du transport considère ce vecteur d'énergie avec attention compte tenu de résultats d'analyses de prix de revient qui montrent que l'hydrogène devrait être équivalent au Diesel avant la fin de la décennie³, se basant sur une décroissance des prix des composants avec l'augmentation des volumes ainsi que sur la baisse des prix du carburant avec une cible de 1 \$USD du kilogramme sur 10 ans⁴.

Les technologies

Les piles à combustible

L'intégration d'une motorisation pile à combustible hydrogène est plus complexe que celle d'une motorisation électrique batterie. L'architecture de contrôle s'apparente à celle d'un véhicule hybride, avec une puissance délivrée par le moteur provenant soit directement de la pile à combustible, soit de la batterie, elle-même capable de stocker l'énergie produite en excès par la pile ou provenant du freinage régénératif du véhicule.⁵

Certains véhicules proposent une architecture analogue au concept de l'hybride rechargeable, avec une alimentation bi-énergie hydrogène et électricité, dont l'objectif est de combiner une plus longue autonomie offerte par l'hydrogène en complément de la recharge électrique, donnant une autonomie limitée mais censée réduire le coût d'utilisation et préserver la durée de vie de la pile à combustible.⁶

Parmi les différents types de piles à combustibles, la pile PEM (Proton Exchange Membrane) est le type le plus commercialisé aujourd'hui, en raison de sa faible température de fonctionnement (50-100°C), de son temps de démarrage court et de la facilité d'utilisation de son comburant (air atmosphérique). Ces caractéristiques rendent la pile PEM idéale pour les solutions de mobilité.⁷

² "Hydrogen Storage for Mobility: A Review", Etienne Rivard, Michel Trudeau and Karim Zaghbi, 19 June 2019.

³ Roland Berger – Fuel Cell Hydrogen Trucks – dec 2020 - https://fuelcelltrucks.eu/wp-content/uploads/2021/03/roland_berger_fuel_cells_hydrogen_trucks.pdf

⁴ Department Of Energy – projet 111 - <https://www.anl.gov/hydrogen>

⁵ Fuel cell electric tractor-trailers, technology overview and fuel economy – ICCT – juillet 2022 - <https://theicct.org/publication/fuel-cell-tractor-trailer-tech-fuel-jul22/>

⁶ Concept Dual Power de Hyvia (<https://www.hyvia.eu/en/our-hydrogen-vehicles/>)

⁷ Fueling the Future of Mobility, Hydrogen and fuel cell solutions for transportation – Deloitte / Ballard – 2020 - <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/finance/deloitte-cn-fueling-the-future-of-mobility-en-200101.pdf>

Les piles à combustible proposent une large étendue de densités de puissance, selon le type de pile à combustible et la taille de la pile. Généralement, une pile à combustible aura une densité de puissance volumique d'environ 100 à 300 W/litre et une densité de puissance massique de 200 à 600 W/kg.

Une pile à combustible hydrogène est capable de convertir environ 40 à 60% de l'énergie contenue dans l'hydrogène en électricité utilisable. C'est beaucoup plus élevé que l'efficacité des moteurs à combustion traditionnels qui ne convertissent généralement qu'environ 20 à 30% de l'énergie de leur carburant en énergie utile.

En général, les piles à combustible ont une durée de vie relativement longue et peuvent fonctionner selon leur conception entre 8,000 et 20,000 heures⁸ avant de devoir être remplacées. Cependant, il faut noter que la durabilité d'une pile à combustible peut être affectée par des facteurs tels que la température, l'humidité et la présence de contaminants dans l'hydrogène. Il est important d'entretenir correctement le système pour obtenir les meilleures performances et la meilleure longévité.

Les moteurs à combustion interne bi-carburant

La technologie consiste à remplacer une partie du carburant Diesel par de l'hydrogène renouvelable afin de réduire les émissions de CO₂.

Sur l'exemple du moteur D8 de Volvo Penta, un moteur Diesel 6 cylindres en ligne de 7,7L (mise en production attendue en 2023), le constructeur annonce une réduction de 80% des émissions de CO₂ en gardant les mêmes performances de couple et de puissance⁹ mais les informations sur la consommation d'hydrogène en remplacement du Diesel ne sont pas communiquées.

L'exemple d'Hydra Energy permet de construire quelques estimations : Leur kit de conversion à destination des véhicules lourds consiste en l'installation de réservoirs d'hydrogène, jusqu'à 40kg par véhicule qui se substituent à 133 litres de Diesel, soit 40% de la consommation de Diesel, permettant d'économiser 67 tonnes de CO₂ par an¹⁰. En considérant la consommation moyenne d'un semi-remorque à 40 litres aux 100km, ce sont 16 litres de Diesel qui sont remplacés par 4,8kg d'hydrogène tous les 100km, avec une autonomie à émissions réduites de 830km avant remplissage des réservoirs d'hydrogène. Si on compare avec la consommation des semi-remorques à pile à combustible qui substituent en moyenne 40 litres de Diesel par 8,5kg d'hydrogène tous les 100 km, le procédé Hydra consommerait 40% de plus d'hydrogène par litre de Diesel remplacé qu'une solution à pile à combustible.

Il faut noter que l'injection d'hydrogène dans le moteur Diesel a également un effet bénéfique sur les émissions d'oxydes d'azote (NOx), même si les chiffres ne sont pas précisément communiqués.¹¹

⁸ DOE Hydrogen and Fuel Cell Technologies Program Record - On-Road Transit Bus Fuel Cell Stack Durability – April 14 2021 - <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/20008-fuel-cell-bus-durability.pdf>

⁹ Volvo Penta dual-fuel hydrogen engine unveiled – October 26 2022 -

<https://www.dieselprogress.com/news/volvo-penta-dual-fuel-hydrogen-engine-unveiled/8024315.article>

¹⁰ Hydra Energy delivers on low-emission hydrogen trucking - 5 may 2022 - <https://resourceworld.com/hydra-energy-delivers-on-low-emission-hydrogen-trucking/>

¹¹ Mixing diesel and hydrogen provides big cuts in emissions – Ars Technica – 7 décembre 2022 -

<https://arstechnica.com/science/2022/12/mixing-diesel-and-hydrogen-provides-big-cuts-in-emissions/>

Les moteurs à combustion interne 100% H2

La technologie du moteur à combustion interne hydrogène présente l'avantage d'une technologie maîtrisée avec un impact moindre sur l'architecture du véhicule. S'il est vrai qu'on ne peut pas lui attribuer le qualificatif zero-émission compte tenu des émissions de bruit et d'oxyde d'azote qui restent présents, il s'agit d'une solution efficace pour décarboner le transport. Le principal impact sur le véhicule concerne le stockage de l'hydrogène, alourdi par une efficacité énergétique moindre des moteurs par rapport aux piles à combustible, nécessitant d'embarquer plus de carburant pour parcourir la même distance. Néanmoins les résultats encourageants concernant cette efficacité énergétique permettent de considérer l'application de cette technologie dans les cas d'usage favorables.¹²

La solution semble particulièrement intéresser les constructeurs d'équipements et de machinerie lourde, qui trouvent là une solution permettant de délivrer directement de la puissance. Le constructeur JCB explique garder la partie basse et le turbo à géométrie variable, mais modifie la partie haute du moteur, avec une nouvelle culasse, un nouveau système d'injection, et un système d'allumage remplaçant l'allumage par compression.¹³

Un exemple de consommation d'hydrogène est mentionné sur la fiche technique d'un Genset commercialisé par la société CMB Tech¹⁴. Ce Genset produit 45kW en continu avec une consommation de 3.8kgH2/hr, soit une production d'énergie de 11,8kWh/kg, ce qui représente un quart de moins qu'avec la plupart des piles à combustibles. On peut estimer par conséquent qu'il faudrait un tiers de plus d'hydrogène à bord pour obtenir la même autonomie qu'un véhicule à pile à combustible.

Le stockage embarqué de l'hydrogène

En matière de système de stockage d'hydrogène, la technique la plus courante dans le transport est le gaz comprimé à 350 bar ou 700 bar. Initialement utilisé dans l'automobile de par les contraintes d'espace limité, le stockage à 700 bar a progressivement gagné le camionnage longue-distance qui utilisait initialement la pression 350 bars comme sur les premiers autobus. En effet, avec une densité volumétrique de 20 à 25g H2 par litre de réservoir, le stockage à 700 bars réduit le volume de réservoir de 28% par rapport à un stockage à 350 bar et ses 15 à 18g H2 par litre de réservoir. Le stockage à 700 bar nécessitant des réservoirs renforcés permet néanmoins une réduction de masse de 23%.¹⁵

Le stockage d'hydrogène liquide (LH2) nécessite des températures atteignant -253°C, entraînant des contraintes supplémentaires de résistance des matériaux à températures cryogéniques. Cette voie est néanmoins testée par Daimler Trucks sur son Mercedes-Benz GenH2 afin d'atteindre 1000 km d'autonomie grâce à une capacité quasiment doublée en masse et en volume du stockage LH2 par rapport au stockage à 350 ou 700 bar.¹⁶ Cette technologie permettrait en outre de réduire le prix des unités de stockage de 35% par rapport au stockage 350 bars mais les principaux défis résident dans les

¹² Westport and Scania announce impressive test results of H2 HDPI fuel system for Heavy-Duty transport – Westport FS – Octobre 2022 - <https://investors.wfsinc.com/news/news-details/2022/Westport-and-Scania-Announce-Impressive-Test-Results-of-H-HPDI-Fuel-System-for-Heavy-Duty-Transport/default.aspx>

¹³ JCB is exploring hydrogen combustion engines for construction machinery - November 30, 2022 <https://hackaday.com/2022/11/30/jcb-is-exploring-hydrogen-combustion-engines-for-construction-machinery/>

¹⁴ Mono Fuel Genset – CMB Tech - <https://cmb.tech/divisions/industry/gensets>

¹⁵ Analyses de marché Amp&Axle Consulting.

¹⁶ Chart Industries Newsletter (p3) - Oct 2021 - https://files.chartindustries.com/October_Energy.pdf

pertes par évaporation de l'hydrogène liquide et la consommation énergétique de la liquéfaction de l'hydrogène.¹⁷

Une solution hybride est le stockage cryo-comprimé où l'hydrogène est comprimé à 300 bar et stocké entre -150°C et -240°C, promettant d'augmenter encore la densité volumétrique, de réduire le coût et d'améliorer la sécurité.

Les stations de remplissage

Les systèmes de ravitaillement en hydrogène comprimé à 350 bars et 700 bars sont déjà utilisés pour les bus et les automobiles, ce qui en fait une technologie mature et prête pour le déploiement commercial.

Il faut noter toutefois que le ravitaillement en hydrogène à 700 bars apporte des défis supplémentaires liés aux nécessaires pré-refroidissement et débit élevé requis pour une utilisation performante. Les perspectives sont cependant prometteuses. En effet, le laboratoire NREL a atteint un débit massique moyen de 14 kg/min (21 kg/min en pointe) ouvrant la possibilité d'un remplissage de 60 à 80 kg en moins de 10 minutes.¹⁸ A titre de comparaison, cette vitesse de ravitaillement est équivalente à une recharge de véhicule à batterie à 13 MW de moyenne sur une installation de 18MW, bien au-delà d'un mégachargeur de 1 à 3 MW.

Les stations de ravitaillement en hydrogène liquide ou cryo-compressé sont encore en cours de développement et d'expérimentation.

Le déploiement des FCEV

Proposant une meilleure densité d'énergie embarquée et une meilleure vitesse de ravitaillement que les véhicules à batterie, les véhicules à propulsion hydrogène permettent d'allonger l'autonomie des véhicules et leur disponibilité en opérations, évitant les temps d'immobilisation de chauffeurs ou le surinvestissement en nombre de véhicules pour couvrir les temps de recharge.

Par conséquent, ces véhicules sont particulièrement indiqués dans le transport de marchandises ou de passagers longue distance ainsi que les cas d'usage utilisés en 24/7.

Les projets de démonstration comme celui mené au port de Los Angeles ou le projet AZETEC, mené en Alberta, permettent d'évaluer les performances de ces technologies en condition réelle et expliquent le regain d'intérêt des industriels dans la production de ces véhicules et de leur infrastructure de remplissage.

Cependant, pour accélérer l'adoption de cette technologie et l'atteinte de coûts soutenables pour les entreprises, l'atteinte rapide de forts volumes de production est nécessaire aussi bien sur les véhicules que sur les électrolyseurs, afin de proposer des véhicules et du carburant au meilleur prix. L'offre et la demande en carburant doivent être déployés de façon coordonnée afin de déployer largement les stations couvrant les différents corridors d'utilisation, mais aussi d'atteindre rapidement la pleine

¹⁷ Fuel cell electric tractor-trailers, technology overview and fuel economy – ICCT – juillet 2022 - <https://theicct.org/publication/fuel-cell-tractor-trailer-tech-fuel-jul22/>

¹⁸ NREL Research Demonstrates Higher Flow Rate for Hydrogen Fueling for Heavy-Duty EVs – ngtnews.com – juin 2022 <https://ngtnews.com/nrel-research-demonstrates-higher-flow-rate-for-hydrogen-fueling-for-heavy-duty-evs>

capacité d'utilisation de ces stations par la mise en service de nombreux véhicules. Le transport longue distance et son important volume de véhicule est tout indiqué pour mener la transition vers l'hydrogène et ouvrir la voie aux autres applications.

Les modèles d'affaire

Le véhicule électrique s'est largement déployé sur la base d'une infrastructure de recharge privée, installée au dépôt, directement alimentée par le réseau, et complétée par une infrastructure de recharge publique se limitant à une utilisation exceptionnelle, de dépannage ou de réassurance. Ce mode de ravitaillement convient bien au profil d'utilisation du véhicule à batterie, opérant dans un rayon d'action limité autour de son principal point de charge sécurisé.

Compte tenu de ses temps de ravitaillement réduits, la filière hydrogène propose un schéma plus classique de distribution de carburant en stations publiques, avec la possibilité pour les grosses flottes d'installer une infrastructure au dépôt, l'hydrogène étant soit produit localement, soit alimenté par remorque ou pipeline. Ces véhicules opérant sur de longues distances doivent pouvoir disposer de points de ravitaillement répartis sur les principaux axes d'opération, chacun offrant un remplissage rapide et sans temps d'attente.

Dans la phase d'introduction sur le marché de la propulsion hydrogène, les véhicules et les stations de ravitaillement doivent donc apparaître de façon synchronisée afin de rassurer les utilisateurs sur la fourniture d'une offre complète. Plusieurs acteurs proposent une offre intégrée « véhicule et carburant », comme par exemple First Hydrogène qui a annoncé son implantation à Shawinigan, Québec, en proposant une « offre produit holistique » véhicule et hydrogène vert.¹⁹

Il faut citer également le cas de Hydra Energy qui propose un modèle de conversion de véhicule dont les coûts sont « prix en charge gratuitement en échange d'un contrat d'approvisionnement en hydrogène bas carbone au prix prévu du Diesel remplacé »²⁰

Cependant il faut garder à l'esprit que l'industrie du camionnage a besoin de fournisseurs performants que la mise en concurrence permet de constamment stimuler. Ce modèle d'offre groupée donne l'avantage à l'utilisateur de pouvoir négocier en amont un coût complet véhicule et carburant sur lequel le fournisseur doit s'engager. Cependant si ce dernier ne s'engage pas sur un coût complet à long terme, ceci pourrait désavantager l'utilisateur sans autre alternative qu'une offre non concurrentielle.

D'autre part, les transporteurs ont besoin d'une infrastructure de remplissage couvrant largement le territoire sur l'ensemble des corridors connectant les différentes zones géographiques. Par conséquent l'utilisateur final a besoin de complémentarité des offres de véhicules et carburant, toute forme d'exclusivité étant contre-productive pour ses opérations, et les autorités doivent inciter au maximum cette complémentarité d'offre qui permettra par ailleurs de sécuriser la disponibilité du carburant et de permettre l'élargissement géographique des opérations de transport zéro-émission.

¹⁹ First Hydrogen selects Quebec for first green hydrogen system – Novembre 2022 -

<https://www.renewableenergymagazine.com/hydrogen/first-hydrogen-selects-quebec-for-first-green-20221128>

²⁰ Hydra Energy delivers on low-emission hydrogen trucking - 5 may 2022 - <https://resourceworld.com/hydra-energy-delivers-on-low-emission-hydrogen-trucking/>

Synthèse de l'offre existante

Conscients que la technologie FCEV a le potentiel de présenter une alternative efficace pour la décarbonation du transport, de nombreux manufacturiers se sont engagé dans le développement de modèles de véhicules sur tous les segments de véhicules commerciaux.

Alors que les modèles les plus répandus de véhicules hydrogène faisaient partie jusqu'à présent du segment automobile (Toyota Mirai, Hyundai Nexa) et que la technologie de véhicules à batterie semble convenir aux besoins de la livraison urbaine, les manufacturiers de véhicules commerciaux hydrogène mettent l'accent en priorité sur les véhicules lourds, dans le secteur du transport de marchandises.

De nombreux projets pilotes ont été lancés en Californie, en Alberta, en Europe, qui ont permis aux manufacturiers de proposer différents modèles dont certains arrivent en phase de production série en réponse à l'accueil enthousiaste de la part des opérateurs de flotte qui ont pu tester la technologie.

Les tableaux présentés en annexe listent, du plus léger au plus lourd, les modèles présentés par les constructeurs avec leurs principales caractéristiques. Un premier tableau regroupe les véhicules de transport de marchandises et le second tableau les véhicules de transport de personnes. L'inventaire, non exhaustif, a été réalisé en se concentrant sur l'Amérique du Nord. Les modèles listés en Europe et en Asie sont fournis pour illustrer les différents cas d'usage possibles.



Figure 1 – Panorama du marché des véhicules commerciaux à hydrogène

Il ressort de cet inventaire plusieurs constats :

- L'Europe voit l'apparition de camionnettes de livraison urbaine ou de navettes passagers, avec une autonomie de 400km, dont certains propose une technologie hybride rechargeable bi-carburant (hydrogène et électricité). Cette floraison d'offre traduit un appétit des opérateurs de livraison pour cette technologie offrant une autonomie supérieure aux modèles équivalents à batterie. Le Québec verra sous peu ce type de véhicule avec l'annonce de First Hydrogène d'une production de ces véhicules à Shawinigan.

- Sur le segment des Medium-duty, les constructeurs proposent des autonomies similaires de 400km. Cette autonomie sur un camion de classe 6 équipé d'une pile de 90kW et d'un réservoir de 20kg d'H2 à 700bars entrainerait un poids total de composants, hors moteur électrique, autour de 580kg là où une batterie d'autonomie équivalente pèse plus de 2 tonnes. Les utilisateurs transportant de fortes charges seront sensibles à cet argument.
- Le premier véhicule à moteur H2ICE est proposé par Keyou sur un porteur de 18t. Notons que ces véhicules présentent un coût d'acquisition inférieur pour une consommation de carburant accrue. Il faudra considérer les performances relatives en consommation pour établir le coût total d'usage et déterminer les segments sur lesquels la technologie présente le plus d'intérêt pour les opérateurs.
- Du côté des véhicules vocationnels, on retrouve sans surprise des modèles de camions benne et camions de ramassage de vidange proposés en Asie et en Europe avec des autonomies supérieures à ce que proposent les modèles équivalents à batterie.
- Le segment le plus représenté est celui des semi-remorques, avec des puissances de pile autour de 200kW et des autonomies au-delà de 500km. La figure ci-dessous compare les performances d'autonomie, de charge utile et de disponibilité entre différentes configurations de semi-remorques zéro-émissions. En général, les semi-remorques à batterie proposent des autonomies limitées qui permettent de préserver une bonne partie de la charge utile mais qui nécessitent des temps de recharge élevés réduisant le temps de disponibilité des véhicules. Dans le cas du Tesla Semi, le constructeur propose une autonomie impressionnante au prix d'une quantité de batterie qui d'une part, avec l'utilisation de mégachargeurs, permet de ramener le temps de recharge à une fraction du temps de roulage, mais en contrepartie diminue significativement la charge utile du véhicule. La propulsion hydrogène permet de maintenir l'ensemble des paramètres au niveau des besoins opérationnels. Notons sur ce segment l'arrivée de véhicules 60t qui sont absents dans l'offre des véhicules à batterie.

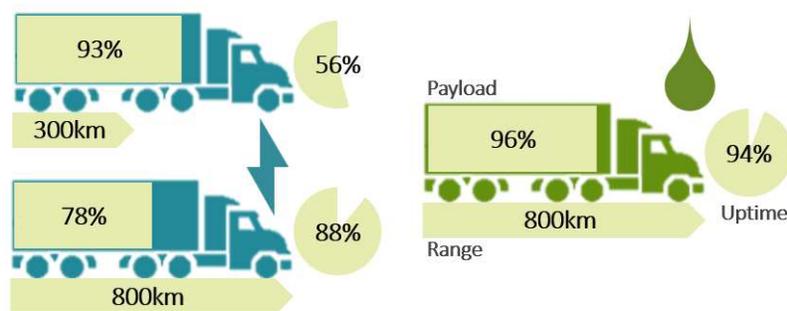


Figure 2 – Performance des semi-remorques zéro-émission

- Du côté du transport de personnes, de nombreux modèles d'autobus ont été testés depuis 2018, y compris en Amérique du Nord (New Flyer, El Dorado, Van Hool) et des versions d'autocars longue distance sont en préparation. Ces autobus ont en général une pile à combustible d'une

puissance d'environ 80kW, ce qui peut sembler faible pour un véhicule de cette taille, mais qui s'explique du fait des nombreux arrêts qui font bénéficier le véhicule de la récupération d'énergie au freinage, avec des batteries qui contribuent significativement à la traction des véhicules.

On retrouvera également dans cette catégorie les véhicules lourds de livraison urbaine (type classe 8 double essieu pour transport de boissons, camion-benne de transport de matériau de construction ou de déneigement, camion benne à ciment...) pour lesquels les besoins en charge utile et en énergie justifient le recours à l'hydrogène.

Cas d'usage majoritairement favorables aux véhicules électriques à batterie

A l'opposé de la catégorie précédente, on retrouve les véhicules légers de type automobile, camion pick-up ou fourgon de livraison, transportant du volume plutôt que de la masse, et dont les besoins en autonomie sont couverts par la technologie batterie avec une meilleure efficacité énergétique et un meilleur coût d'usage.

On pourra trouver des exceptions où certains utilisateurs voudront disposer de la flexibilité en matière d'autonomie proposée par l'hydrogène.

Cas d'usage intermédiaires

Ces cas d'usage sont aujourd'hui en partie couverts par les véhicules à batterie mais ont des limites d'utilisation qui freinent leur déploiement et qui peuvent justifier de tester des versions hydrogène :

- Le transport urbain par autobus, dont les versions électriques couvrent une grande majorité des distances requises mais qui présentent des variations saisonnières d'autonomie (justifiant d'équiper les autobus de chauffage Diesel pour assurer le service en hiver) et dont le déploiement est ralenti par l'enjeu de l'électrification des garages.
- Les camions de collecte de vidange et les camions de livraison urbaine, dont les versions électriques, alourdies par le poids des batteries, ne permettent pas toujours d'atteindre les besoins de charge utile et d'autonomie.
- Les tracteurs de cour ou les automobiles-taxis, qui peuvent parfois être utilisés sur plusieurs équipes et ne peuvent se satisfaire d'une recharge nocturne et d'une autonomie limitée.

Comparaison de l'efficacité énergétique des solutions de propulsion

La figure ci-dessous compare les émissions et consommations des différentes solutions de propulsion d'un semi-remorque (en considérant le carburant Diesel, l'hydrogène vert et l'électricité produits au Québec).

Il est intéressant de constater que, même si l'hydrogène vert n'atteint pas l'efficacité énergétique du véhicule à batterie, il reste inférieur ou égal à la solution Diesel, que ce soit en mode pile à combustible ou en mode combustion interne monocarburant, tout en offrant une véritable solution de décarbonation.

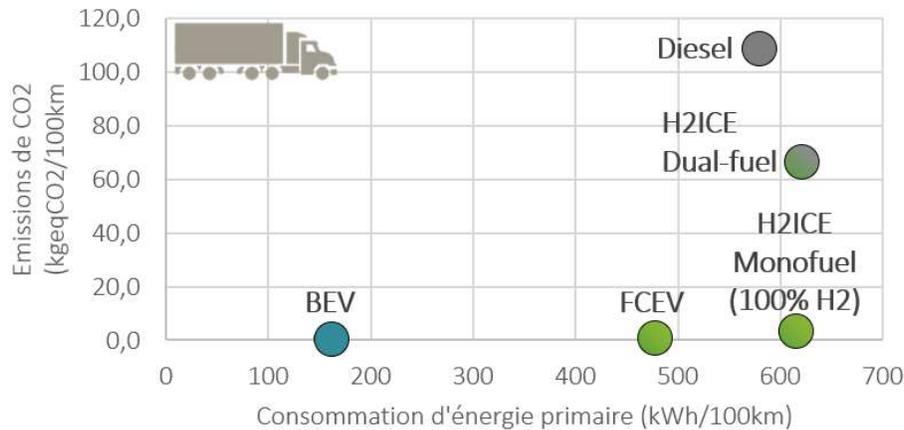


Figure 4 – Comparaison des consommations et émissions des moteurs Diesel, dual-fuel hydrogène, monofuel hydrogène, piles à combustible et électrique batterie

Evolution des technologies de batteries et de chargeurs

Les performances des batteries lithium-ion se sont considérablement améliorées au cours des dernières décennies. Ces améliorations ont été rendues possibles par le développement de nouveaux matériaux et procédés de fabrication augmentant les densités d'énergie, rallongeant les durées de vie et améliorant les temps de charge.

Les chimies de batterie les plus prometteuses sont les batteries lithium-soufre, les batteries solid-state et les batteries métal-air, offrant un potentiel accru en matière de densités d'énergie, des durées de vie et des temps de charge. On estime que ces technologies permettront de doubler la densité d'énergie et la vitesse de recharge des batteries²¹. Cependant, ces améliorations notables ne permettront pas d'égaliser la densité énergétique et la rapidité de ravitaillement du véhicule à hydrogène.

Afin de recharger rapidement les batteries de forte capacité, on utilise des mégachargeurs qui sont un nouveau type de bornes de recharge affichant jusqu'à 3 MW de puissance. Ces mégachargeurs, prévus pour être installés sur autoroute afin de prolonger l'autonomie des véhicules électriques, demandent un coût élevé d'installation et d'exploitation, causé d'une part par les coûts d'investissement important en infrastructure, mais aussi causé par les très forts appels de puissance sur le réseau. Ces facteurs limitent la capacité à couvrir le territoire et à assurer un bon niveau de service.

Le transport collectif urbain

Parmi les cas d'usage complémentaires qui restent à évaluer, le transport collectif urbain est un cas intéressant où les bus à hydrogène peuvent avoir un rôle à jouer pour répondre au problème d'autonomie que les bus électriques à batterie continuent d'avoir. A ce jour, seulement 3% des autobus zéro-émission

²¹ Delivering on the promise of solid-state technology – Quantumscape - <https://www.quantumscape.com/technology/>

testés aux États-Unis sont à hydrogène, les autres étant des autobus à batterie²², mais les sociétés de transport envisagent cette technologie pour fournir un service zéro émission sur certains de leurs très longs trajets, en particulier en climat nordique où les autobus à batterie subissent une perte d'autonomie significative et utilisent généralement des chauffages d'appoint au Diesel.

Les bus à hydrogène affichent une autonomie allant jusqu'à 500 km avant ravitaillement. En comparaison, les bus électriques à batterie parcourent en moyenne 220 km avant recharge avec un maximum de 400km, et une autonomie sévèrement diminuée par temps froid lorsque les systèmes de chauffage électriques sont utilisés.

Les principaux obstacles restent le prix du véhicule, autour de 1,5 million de dollars contre 1 million de dollars pour un bus électrique à batterie, ainsi que la disponibilité des installations de remplissage.

Car c'est aussi du côté des infrastructures que se situe l'enjeu. Les bus électriques nécessitent de renforcer le réseau pour délivrer la recharge, avec des investissements très importants dans les dépôts, dont une partie couvre d'imposants générateurs au Diesel pour prendre le relai en cas de panne du réseau.

L'infrastructure de remplissage hydrogène, avec production locale ou non, devrait être plus résiliente dans ces cas de panne et fournir une solution de remplissage pour la flotte entière.²³

Il faudra tirer les conclusions technico-économiques des projets d'installation d'infrastructure et de déploiement de véhicules afin d'évaluer laquelle des solutions est la plus intéressante pour chacune des sociétés de transport, mais nul doute que le déploiement massif des infrastructures hydrogène pour le camionnage ouvrira de nouvelles perspectives pour le transport collectif urbain.

La livraison urbaine au Québec

Un autre cas d'usage complémentaire pour l'hydrogène est celui de la livraison urbaine pour lequel de nombreux véhicules à batterie sont en cours de test, pouvant opérer sur des distances appréciables avant de rentrer à la base pour une recharge nocturne. Les basses températures observées au Québec compliquent cette tâche avec des autonomies fortement réduites en hiver à moins de surdimensionner les batteries et d'amputer la charge utile des véhicules. C'est pourquoi on peut s'attendre à ce que, à mesure que les stations-service hydrogène seront disponibles, de plus en plus de constructeurs s'intéressent à ce segment de marché de la livraison urbaine en offrant des camionnettes légères et des camions de livraison propulsés à l'hydrogène.

Les véhicules de secours d'urgence :

Une autre application à venir de l'hydrogène concerne les véhicules de secours d'urgence, où la rapidité de remplissage du réservoir permet de garantir que le véhicule soit toujours prêt à intervenir, que ce soit

²² Why some say hydrogen buses could be N.J.'s eco-friendly transit solution – Novembre 2022 - <https://www.masstransitmag.com/bus/vehicles/hybrid-hydrogen-electric-vehicles/news/21288531/nj-why-some-say-hydrogen-buses-could-be-njs-ecofriendly-transit-solution>

²³ How to Scale Up Your Zero Emission Bus Fleet – Ballard blog – Février 2019 - <https://blog.ballard.com/zero-emission-bus-scalability>

en configuration biénergie avec recharge batterie et pile à combustible²⁴ ou en configuration 100% hydrogène.

Filière Ammoniac et autres LOHC

L'industrie maritime considère avec intérêt l'ammoniac comme carburant compte tenu de sa forte densité énergétique. L'ammoniac peut être utilisé dans des moteurs à combustion interne où il faut lui adjoindre un « carburant pilote » plus facilement inflammable, qui peut être de l'hydrogène simplement extrait de l'ammoniac à bord du navire. D'autre part, l'ammoniac peut lui-même servir de catalyseur dans le système de dépollution afin de limiter l'émission des Nox. Au final, le même produit sert de carburant principal, de carburant pilote, et de réducteur de NOx.²⁵

Il peut également être utilisé dans des piles à combustibles à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cell ou SOFC) qui présentent le meilleur potentiel pour alimenter des navires zéro émission longue distance. Leur avantage est d'utiliser des matériaux relativement peu coûteux et abondants et d'atteindre les rendements les plus élevés (>80%) en recyclant la chaleur émise pour alimenter la haute température de 800C nécessaire à leur fonctionnement. Les longs temps de démarrage et la mauvaise réponse dynamique sont souvent cités comme des inconvénients, mais cela est gérable dans le cas d'utilisation de longs voyages en mer. Le principal inconvénient est simplement que la technologie SOFC et l'ammoniac vert comme carburant ne sont pas facilement disponibles - il existe peu de fournisseurs de FC et les projets d'application de l'ammoniac vert en sont au stade du démonstrateur technologique.²⁶

D'autres solutions existent parmi les liquides organiques porteurs d'hydrogène (LOHC) qui permettent de stocker l'hydrogène sous forme liquide, avec une densité élevée facilitant ainsi son transport et son stockage par rapport au gaz comprimé et en évitant les problèmes de toxicité de l'ammoniac. Ces liquides ont l'avantage de présenter un processus réversible, ce qui signifie que l'hydrogène peut être libéré du liquide en appliquant de la chaleur ou un catalyseur. Parmi eux, le Dibenzyltoluène (DBT) ou le Perhydro-Dibenzyltoluène (PDBT) sont des LOHC qui sont stables à température ambiante et peuvent stocker jusqu'à 14% d'hydrogène en masse.

Leur inconvénient est que ces LOHC nécessitent un apport d'énergie pour libérer l'hydrogène (jusqu'à 10kWh par kg d'hydrogène, à comparer aux 14kWh/kg nécessaires pour liquéfier l'hydrogène) qui contribue à l'alourdissement du bilan énergétique.

L'ammoniac vert et les LOHC ne constituent donc pas réellement une alternative à l'hydrogène vert pour le transport routier zéro-émission et devraient être réservés aux applications maritimes longue distance.

²⁴ ULEMCo to develop zero-emission fire engine – Mai 2022 - <https://www.fleetpoint.org/hydrogen-vehicles/ulemco-to-develop-zero-emission-fire-engine/>

²⁵ Des cargos écolos grâce à l'ammoniac vert – Mars 2021 - <https://www.revolution-energetique.com/des-cargos-ecolos-grace-a-lammoniac-vert/>

²⁶ IDTechEx - Fuel Cell Boats & Ships 2023-2033: PEMFC, SOFC, Hydrogen, Ammonia, LNG - <https://www.idtechex.com/en/research-report/fuel-cell-boats-and-ships-2023-2033-pemfc-sofc-hydrogen-ammonia-lng/907>

Feuille de route technologique de l'hydrogène – horizon 2035

Le schéma ci-dessous regroupe en synthèse les principales étapes à venir sur la période 2023-2035 concernant l'évolution des technologies liées à la mobilité hydrogène.

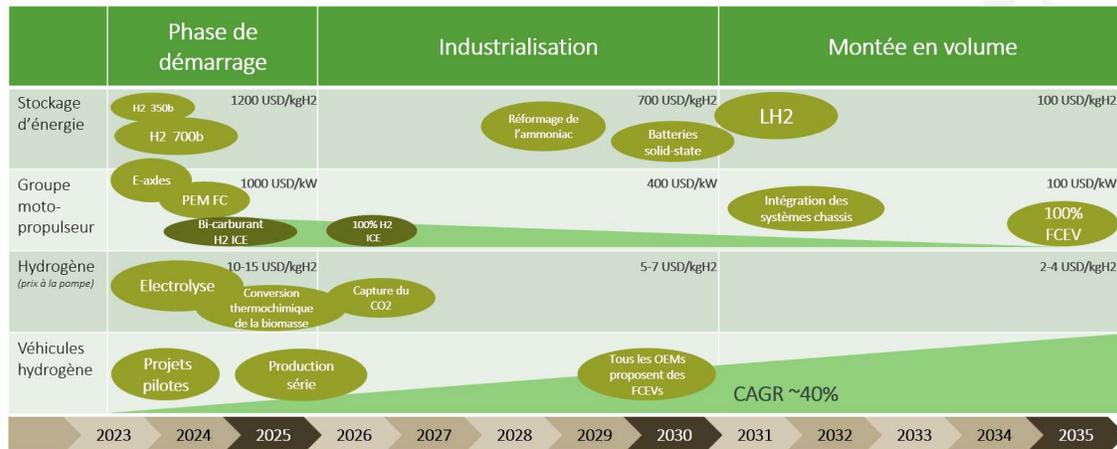


Figure 5 – Feuille de route technologique de l'hydrogène

Les principaux facteurs d'influence considérés dans l'établissement de cette feuille de route sont les suivants :

- Innovations attendues dans le stockage du carburant (hydrogène liquide, réformage de l'ammoniac) et la génération de puissance (rôle transitoire du moteur à combustion interne hydrogène)
- Réduction du prix de l'hydrogène compte tenu de larges investissements dans la production d'électrolyseurs (CAGR 48% sur la période 2021-2031)²⁷
- Croissance du marché des véhicules à hydrogène avec un CAGR de 40%^{28,29}
- Croissance significative du marché principalement en Chine et Europe avant l'Amérique du Nord³⁰
- Croissance du marché des véhicules à hydrogène dépendant du déploiement simultané de l'infrastructure de ravitaillement avec la bonne couverture géographique.

²⁷ IDTechEx - Green Hydrogen Production: Electrolyzer Markets 2021-2031 -

<https://www.idtechex.com/en/research-report/green-hydrogen-production-electrolyzer-markets-2021-2031/807>

²⁸ IDTechEx - Materials for PEM Fuel Cells 2023-2033 - <https://www.idtechex.com/en/research-report/materials-for-pem-fuel-cells-2023-2033/899>

²⁹ IDTechEx - Electric and Fuel Cell Trucks 2023-2043 - <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-and-fuel-cell-trucks-2023-2043/877>

³⁰ Le marché de l'hydrogène en transport routier décollera dès 2027, dit Interact Analysis – janvier 2023 - <https://www.transportroutier.ca/nouvelles/le-marche-de-lhydrogene-en-transport-routier-decollera-des-2027-dit-interact-analysis/>

- Canada : Interdiction des véhicules light-duty à combustion interne en 2035³¹
- US : Fin des achats de véhicules à combustion interne en 2035³²

³¹ Transport Canada - "Building a green economy: Government of Canada to require 100% of car and passenger truck sales be zero-emission by 2035 in Canada" – 30 juin 2021 - <https://www.canada.ca/en/transport-canada/news/2021/06/building-a-green-economy-government-of-canada-to-require-100-of-car-and-passenger-truck-sales-be-zero-emission-by-2035-in-canada.html>

³² David Shepardson and Ben Klayman (9 June 2021). "U.S. government to end gas-powered vehicle purchases by 2035 under Biden order". - 30 June 2022 - <https://www.reuters.com/world/us/biden-pledges-end-gas-powered-federal-vehicle-purchases-by-2035-2021-12-08/>

Troisième partie

Le rôle de l'hydrogène au Canada

L'origine de l'hydrogène est cruciale dans sa capacité à décarboner le secteur du transport et le Canada dispose d'avantages stratégiques dans la production d'hydrogène vert à partir d'énergie renouvelable permettant d'envisager un rôle décisif de l'hydrogène dans la décarbonation de l'économie Canadienne.³³

Du point de vue opérationnel, les basses températures au Canada peuvent présenter des risques de gel de l'eau produite par les piles à combustibles. Cependant les températures générées lors de la production d'électricité permettent d'opérer entre -30degC et +45degC sans impact sur les performances. Les fournisseurs de piles intègrent des systèmes de réchauffage permettant le démarrage à froid et leurs développements en cours visent atteindre les -40degC.³⁴

Le mix énergétique renouvelable du Québec

Le Québec se distingue entre autres par l'importance de sa filière hydroélectrique qui compte pour près de 97% de toute l'électricité consommée au Québec. Des discussions sont en cours pour accroître la production dans le contexte de l'électrification des transport et de la production d'hydrogène vert qui représente la moitié des nouveaux besoins en Energie³⁵

On estime les besoins additionnels du Québec en électricité à 100 térawattheures d'ici 2050 et à 25 térawattheures d'ici 10 ans. Des appels d'offre en cours pour de l'énergie éolienne et renouvelable représentent couvrent les deux tiers des besoins et d'autres mesures sont à l'étude telles que l'augmentation de puissance des moyens existants ou la construction de nouveaux barrages hydro-électriques. Le solaire reste marginal et représente moins de 1 térawattheure mais plusieurs expérimentations sont à l'œuvre avec des unités de stockage par batteries fournies par EVLO.³⁶

Dans ce contexte, l'hydrogène peut être utilisé pour stocker l'électricité, permettant de pallier la surproduction d'électricité renouvelable (solaire, éolien, etc.) à certains moments. En effet, la production d'énergie solaire ou éolienne ne pouvant pas être pilotée en fonction de la consommation, contrairement à la production hydroélectrique, il est nécessaire de pouvoir stocker le surplus d'électricité quand la production est supérieure à la consommation. L'électricité ne pouvant être stockée

³³ Pembina Institute – Hydrogen on the path to net-zero-emissions – July 2020

<https://www.pembina.org/reports/hydrogen-climate-primer-2020.pdf>

³⁴ Survey of Heavy-Duty Hydrogen Fuel cell electric vehicles – Transition Accelerator – July 2020

<https://www.cesarnet.ca/publications/transition-accelerator-reports/survey-heavy-duty-hydrogen-fuel-cell-electric-vehicles>

³⁵ Hydro-Québec revoit encore à la hausse ses besoins en électricité – Hélène Baril – La Presse – nov 2022 -

<https://www.lapresse.ca/affaires/entreprises/2022-11-03/hydro-quebec-revoit-encore-a-la-hausse-ses-besoins-en-electricite.php#:~:text=L'augmentation%20de%20la%20demande,industrielles%20et%20l'%C3%A9nergie%20disponible.>

³⁶ Nos Projets – EVLO Hydro-Québec - <https://www.evloenergie.com/fr/projets/>

en grande quantité sur une longue période, la solution est de la convertir en hydrogène pour les usages de mobilité ou les usages industriels.

Le Québec, terre d'électrification

Cette solution est d'autant plus intéressante que le Québec est engagé massivement sur la voie de l'électrification des transports, avec un objectif affiché de 1,6 millions de véhicules électriques d'ici 2030³⁷ appuyé par le déploiement d'une infrastructure recharge publique avec un objectif de 2500 bornes de recharge rapide en 2030³⁸. Le Circuit Electrique, par Hydro-Québec, déploie depuis 10 ans des bornes de recharge standard et rapide et déploie depuis 2022 des bornes de recharge pour véhicules lourds³⁹ dont un exemplaire vient d'être installée à Laval avec une puissance de 350kW⁴⁰ et se prépare à l'arrivée des mégachargeurs 1 à 3 MW⁴¹.

Or l'installation de toutes ces bornes de recharge forte puissance va être coûteux en matière de connection au réseau électrique de bornes dont les taux d'utilisation moyens avoisinent les 5 à 15%. Une étude de HEC Montréal cite pour 2019 une centaine de recharges par mois d'une durée moyenne de 25 minutes pour les BRCC du Circuit Electrique, soit un taux d'utilisation moyen de 6,5%⁴². D'autre part il subsiste le risque des pannes électriques qui tendent à augmenter au Canada⁴³ et qui poussent les opérateurs de flottes de véhicules électriques à investir dans des générateurs Diesel et du stockage local par batterie assurant la résilience du système⁴⁴. Il faut noter que le stockage local d'énergie est également utilisé pour diminuer l'appel de puissance des systèmes de recharge en lissant la consommation à un maximum de 10-20% de la consommation pointe⁴⁵ ce qui sera particulièrement recommandé pour les installations de forte puissance dans le domaine du transport lourd.

Cet impératif de résilience du réseau est assuré plus directement par l'utilisation de l'hydrogène qui présente une capacité intrinsèque de stockage de l'énergie et permet de limiter le déploiement massif et

³⁷ Le gouvernement modifie sa réglementation dans le but d'augmenter les ventes de véhicules électriques – 2 juin 2022 - <https://www.environnement.gouv.qc.ca/infuseur/communiqu.asp?no=4758>

³⁸ Electrification des transports – site du Gouvernement du Québec - <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/electrification-des-transports>

³⁹ D'idée visionnaire à service essentiel : le Circuit électrique a 10 ans - 2022 - <https://lecircuitelectrique.com/fr/a-propos/>

⁴⁰ Station de recharge pour camions électriques dans le parc industriel de Laval – Octobre 2022 - <https://www.transportroutier.ca/nouvelles/station-de-recharge-pour-camions-electriques-dans-le-parc-industriel-de-laval/>

⁴¹ Parlons d'infrastructure de recharge pour les camions lourds – Juin 2020 - <https://www.aveq.ca/actualiteacutes/parlons-dinfrastructure-de-recharge-pour-les-camions-lourds>

⁴² Déploiement des bornes de recharge rapide au Québec., état des lieux et enjeux – HEC Montréal - 2021 - https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2021/02/HEC-RAPPORT_BornesRapidesQc_web.pdf

⁴³ Baisse marquée de la fiabilité du service offert par Hydro-Québec, rapporte la VG – Décembre 2022 - <https://www.lesoleil.com/2022/12/07/baisse-marquee-de-la-fiabilite-du-service-offert-par-hydro-quebec-rapporte-la-vg-d5708014768cd4b09340cc0f2de497e3>

⁴⁴ Resiliency for Battery Electric Buses, Best practices & future strategies – APTA – 2020 - <https://www.apta.com/wp-content/uploads/ELP-Presentation-Electric-Bus-Resiliency.pdf>

⁴⁵ Shell va tester une station de recharge avec stockage d'énergie – 20 mars 2021 - <https://www.moteurnature.com/30844-shell-va-tester-station-recharge-avec-stockage-energie>

coûteux de ces connections haute puissance, des générateurs de secours et des systèmes de stockage stationnaire associés à la recharge des poids-lourds, tout en apportant une plus grande flexibilité et un plus grand rayon d'action que les solutions à recharge de batterie.

Les contraintes climatiques au Québec

Le Québec connaît un climat froid et humide, en grande partie déterminé par sa position nordique et maritime. Si la moyenne des températures en hiver se situe entre -10 et -5°C, le mercure peut baisser fréquemment sous les -30°C.

Or il est à présent bien connu que le temps froid réduit considérablement l'autonomie d'un véhicule électrique. L'Association des véhicules électriques du Québec (AVÉQ) illustre le phénomène en prenant l'exemple d'une Nissan Leaf avec une batterie de 40 kWh : si « votre style de conduite vous permet normalement d'effectuer environ 200 km par charge en été, vous pouvez vous attendre à parcourir entre 140 et 160 km dans des températures hivernales normales » avec une dégradation beaucoup plus importante en cas de températures « extrêmes » (inférieures à -25°C). Rappelons que la température idéale d'une batterie pour préserver son autonomie et sa durabilité est de 20°C et qu'une partie de son énergie est en général utilisée pour maintenir ce niveau de température en hiver.

On retrouve ce phénomène de dégradation d'autonomie dans les véhicules électriques commerciaux de livraison urbaine, ce qui oblige les opérateurs à affecter les véhicules sur des routes plus courtes en gardant une marge de sécurité pour éviter la « range anxiety », en particulier en hiver où l'autonomie peut être réduite de 10 à 40% et peut pousser les opérateurs à garder des véhicules à essence pour les journées les plus extrêmes⁴⁶.

Quant à eux, les véhicules à pile à combustible sont moins sensibles aux dispersions d'autonomie liées au climat froid compte tenu de la chaleur générée à bord et des moindres besoins de réchauffage batterie. D'autre part, le démarrage à très basse température, critique sur les premières générations de piles à combustible, a été amélioré avec des températures de démarrage à froid possible à -25°C.

Cette dispersion saisonnière réduite de l'autonomie des véhicules à hydrogène est un élément rassurant pour les transporteurs Québécois qui doivent assurer leurs livraisons avec fiabilité quelle que soit la saison.

Décentralisation de la production et écosystèmes régionaux

Une stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies a été publiée en 2022 afin de créer un cadre cohérent et un environnement favorable pour accélérer la production, la distribution et l'utilisation de l'hydrogène vert et des bioénergies.⁴⁷

⁴⁶ Guide pour l'électrification d'une flotte de véhicules – Institut du Véhicule Innovant – Nov 2019 - <https://www.ivisolutions.ca/wp-content/uploads/2020/07/annexe-du-guide-delectrification-dune-flotte.pdf>

⁴⁷ Stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies – Gouvernement du Québec – 2022 - <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/strategie-hydrogene-vert-bioenergies>

Cinq principes directeurs ont été définis :

- Contribuer à la décarbonation du Québec en misant sur la complémentarité des deux filières avec la réduction de la consommation (sobriété et efficacité énergétiques) et l'électrification directe;
- Valoriser durablement les ressources naturelles et des matières résiduelles en inscrivant les principes de l'économie circulaire et l'analyse du cycle de vie au cœur des projets d'hydrogène vert et de bioénergies;
- Favoriser la collaboration et la participation des communautés régionales, locales et autochtones au déploiement des filières de l'hydrogène vert et des bioénergies;
- Attirer les investissements et exporter le savoir-faire du Québec;
- Contribuer à l'autonomie énergétique du Québec en substituant des énergies renouvelables produites ici aux énergies fossiles importées.

Un appel d'intérêt à destination des producteurs, distributeurs et consommateurs d'hydrogène et de bioénergies a été mené en septembre 2022 afin d'inviter les acteurs à manifester leur intérêt pour la création d'écosystèmes énergétiques régionaux.

Il faut souligner l'importance capitale des programmes de soutien au déploiement de l'infrastructure de ravitaillement hydrogène pour garantir le succès du déploiement de la filière de transport hydrogène. Tout blocage ou retard dans ce déploiement enverrait un signal au marché qui ralentirait significativement l'adoption de ces technologies par les opérateurs de transport.

Conclusions et facteurs clés de succès

L'hydrogène vert représente donc une alternative réelle aux carburants fossiles dans le transport lourd, à mi-chemin entre la technologie batterie pour l'automobile et l'ammoniac pour le maritime.

Son aptitude à alimenter les véhicules par grand froid et sa capacité à stocker l'énergie en font une solution intéressante et prometteuse pour le transport lourd au Québec.

Les progrès technologiques et l'industrialisation de la production des piles, réservoirs et électrolyseurs devraient permettre de rendre cette technologie plus compétitive dans la prochaine décennie.

Plusieurs facteurs clés de succès restent nécessaires, tels que :

- Accompagner l'industrie en ce qui concerne la standardisation des technologies, la réglementation en matière de sécurité des véhicules, ateliers de maintenance et stations de ravitaillement et la mise à disposition d'aides financières équilibrées par rapport aux autres solutions de transport zéro-émissions.
- Mettre en place une dynamique de déploiement visible de l'infrastructure de ravitaillement, afin de donner confiance aux utilisateurs de véhicules sur la couverture géographique de la distribution du carburant.
- Former les chauffeurs et équipes de maintenance sur l'utilisation des véhicules afin de les rassurer en matière de sécurité de la technologie.

Annexe 1 : Contenu en énergie et carbone des différents carburants

Type de carburant	kWh	kgCO2
1 litre d'essence	9,61 kWh	2,3 kgeqCO2
1 litre de Diesel	10,96 kWh	2,7 kgeqCO2
1 kg d'Hydrogène vert	33 kWh	0,075 kgeqCO2 ⁴⁸
1 kg d'hydrogène gris	33 kWh	10 kgeqCO2
1 kg d'ammoniac gris	5,3 kWh	1,5 kgeqCO2

Annexe 2 : Tableaux inventaire des véhicules de transport de marchandises et de transport de personnes

Voir pages suivantes

x : en opération

(x) : en développement

⁴⁸ Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre – Gouvernement du Québec – Décembre 2022 - <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/guide-quantification/guide-quantification-ges.pdf>

Transport de marchandises / véhicules commerciaux légers

Marque / modèle	AN	EU	Asie	Application	Type véh	Annonce	Source
 <p>H2X / Warrego</p>		(x)		urban delivery	pickup-truck	<p><u>Oct 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 60kW fuel cell, 30kWh battery (and supercaps), 260kW motor • 450km range (6kgH2 @ 700bar) • Base vehicle Ford Ranger • Production in 2023 (EU) 	<p>https://www.pv-magazine.com/2022/10/03/h2x-launches-warrego-hydrogen-powered-pickup-truck/</p> <p>https://h2xglobal.com/products/the-warrego/</p>
 <p>Toyota / Hilux FC</p>		(x)		urban delivery	pickup-truck	<p><u>Dec 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Toyota fuel cell • Prototyping in 2023 in UK, prior to small serie production 	<p>https://newsroom.toyota.eu/development-starts-on-prototype-hydrogen-fuel-cell-toyota-hilux/</p>
 <p>Peugeot / e-Expert Hydrogen</p>		x		urban delivery	van	<p><u>Dec 21</u></p> <p><u>Jul 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 45kW fuel cell, 10.5kWh battery, 100kW emotor (FWD) • 400km range (4.4kgH2 @ 700b) • 3 min refueling time • Bi-energy (11kW OBC) • Payload 1100kg • Start of production in 2022 	<p>https://europe.autonews.com/automakers/peugeot-citroen-opel-start-production-hydrogen-vans</p> <p>https://insideevs.com/news/597206/peugeot-e-expert-hydrogen-van-launched/</p>
 <p>Hyvia / Master van H2 tech</p>		x		urban delivery	van	<p><u>Oct 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 30kW fuel cell, 33kWh battery, 57kW emotor (FWD) • 400km range (6,4kgH2 @ 700b) • 5 min refueling time • Bi-energy (7kW OBC) • Payload 1086kg (6,1m3) • Base vehicle Renault Master ZE • Start of production in 2022 	<p>https://www.greencarcongress.com/2022/10/20221017-hyvia.html</p>
 <p>GCK / Master EVO H2</p>		(x)		urban delivery	van	<p><u>Jan 23</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 40kW fuel cell (Symbio), 26kWh battery, 96kW emotor • 400km range (5kg @ 700b, Forvia) • 5 min refueling time • Conversion kit for base vehicle Renault Master • Production 2024 	<p>https://www.h2-mobile.fr/actus/utilitaire-hydrogene-renault-master-evo-h2-gck-detail/</p> <p>https://www.gck.co/actualite-green-corp-konnection/gck-elargit-sa-gamme-vehicules-retrofites/</p>
 <p>First Hydrogen / FC van</p>	(x)	x		urban delivery	van	<p><u>Nov 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • AVL PWT, Ballard fuel cell • 400-600km range • 5 min refueling time • Base vehicle Man eTGE van • Operations will start Jan 23 in UK • The vehicle will come to US and Canada 	<p>https://www.renewableenergy-magazine.com/hydrogen/first-hydrogen-unveils-inaugural-green-hydrogen-vans-20221115</p>

Transport de marchandises / medium-duty

Marque / modèle	AN	EU	Asie	Application	Type véh	Annonce	Source
Quantron / QLI FCEV 		x		urban delivery	box truck	<u>Jan 23</u> • 45kW fuel cell, 37kWh battery, 100kW motor • 450km range (8,2kg H2) • Base vehicle IVECO Daily (GVW 4,2 ton)	https://www.quantron.net/en/q-truck/q-light/qli-fcev/
Plug Power Fedex / stepvan FC 	x			urban delivery	van	<u>Oct 18</u> • PlugPower 20kW fuel cell • 250km (11kg H2 @ 350b) • Base vehicle Workhorse stepvan	https://www.act-news.com/webinar/plug-power-oct-18-webinar/
Mistubishi Fuso / eCanter FC 			x	urban delivery	box truck	<u>July 20</u> • Refire 75kW fuel cell, battery 13.8 to 40 kWh • 270-300km (5-10g H2 @ 700b) • Base vehicle Mitsubishi Fuso eCanter	https://transitionaccelerator.ca/wp-content/uploads/2020/07/HFCV-vehicles-scenario-r2-1.pdf
IVECO / eDaily FC 		x		urban delivery	box truck	<u>Sep 22</u> • Hyundai 90kW fuel cell, 120kW motor • 350km range (12kg H2) • 15 min refueling time • Base vehicle IVECO eDaily (GVW 7.2 ton)	https://www.hyundai-motorgroup.com/news/CONT0000000000054722
Tevva / 7,5t 		x		urban delivery	box truck	<u>Sep 22</u> • Loop 120kW (60% peak efficiency) • bi-energy concept • 440km range (9kg @350b) instead of 180km in BEV version • 10min refueling time • GVW 7,5t/16,000lbs	https://www.tevva.com/en/trucks/7-5t-hydrogen-electric
JCB / MB 7,5t FC 		(x)		urban delivery	box truck	<u>Fev 23</u> • H2 ICE engine by JCB • Base vehicle Mercedes-Benz 7,5t truck	https://forecourtrader.co.uk/latest-news/jcb-proves-appeal-of-hydrogen-combustion-technology-with-retrofit-truck-installation/676228.article

<p>Qingling / M600 FC</p> 		x	urban delivery	box truck	<p><u>Aug 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Bosch FC • 500km range (13kg H2) • 3 min refueling time • designed for a -30degC cold start • Base vehicle Isuzu M-series 	<p>https://www.youtube.com/watch?v=GtcRGN1PhdM</p>
<p>Plug Power / Class6 truck</p> 	(x)		urban delivery	box truck	<p><u>Feb 20</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • PlugPower 90kW FC • 320-640km range (20-40kgH2) • GVW 12t (class6) • Based on Lightning eMotors chassis 	<p>https://lightningemotors.com/plug-power-partners-with-lightning-systems-to-build-zero-emission-middle-mile-delivery-solution/</p>
<p>Hyzon / FCET6</p> 	(x)		urban delivery	box truck	<p><u>Jan 23</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 100kW FC (Horizon FC), 55kWh battery, 320kW emotor • 560km range (40kgH2 @ 350b) • GCW 30,000lbs • Based on the Freightliner M2 • Coming soon (2023?) 	<p>https://static1.squarespace.com/static/6196c5eca85b4234c65526ca/t/629f90d2b7bcdc31d2341773/1654624467341/Hyzon_SellSheetUpdated_v2_0622.pdf</p>

Transport de marchandises / Porteurs lourds et vocationnels

Marque / modèle	AN	EU	Asie	Application	Type véh	Annonce	Source
Qingling 			x	urban delivery	box truck	<u>Aug 22</u> • Bosch 2x70kW, 170kW Jingjin motors • designed for a -30degC cold start • GVW 18t/40,000lbs	https://www.ichongqing.info/2022/08/02/hydrogen-energy-vehicles-join-urban-distribution-and-trunk-logistics-in-sw-chinas-chongqing/
Keyou / 18t truck H2 ICE 		(x)		urban Delivery	box truck	<u>Avr 22</u> • Keyou 100% H2 IC engine (210kW) • 500km range • Production 2024	https://www.h2-mobile.fr/actus/keyou-presente-premiers-vehicules-moteur-hydrogene/
Tevva / 19t 		(x)		urban delivery	box truck	<u>Sep 22</u> • Loop 120kW (60% peak efficiency) • 500km range • 10min refueling time • GVW 19t/42,000lbs	https://www.forbes.com/sites/davidblekman/2022/09/23/class-8-hydrogen-truck-competition-disrupted-by-a-canada-united-kingdom-partnership/?sh=10d22ed04de4 https://www.electrive.com/2022/09/20/tevva-reveals-strategy-to-enter-europe-with-19t-electric-truck/
Hyzon / FC Garbage truck 		(x)		municipal	refuse truck	<u>Jan 23</u> • 110kW FC (Horizon FC), 55kWh battery, 240kW emotor • 200km range - 1500 collecting cycles (25kgH2 @ 350b) • GCW 64,000lbs (Payload 2,000lbs) • Based on the Freightliner Econic	https://static1.squarespace.com/static/6196c5eca85b4234c65526ca/t/629f90d2b7bc31d2341773/1654624467341/Hyzon_SellSheetUpdated_v2_0622.pdf
Sany / 420 HF 			x	construction	dump truck	<u>Jun 22</u> • Refire 111kW FC, CATL 127kWh battery, 355kW emotor • 300-400km range (1680lit/40kgH2 @ 350b)	https://www.theautopian.com/a-deep-dive-into-why-china-still-believes-in-hydrogen-powered-vehicles/
King Long / KD810 FC 			x	construction	dump truck	<u>Jun 22</u> • 101kWh battery, 200kW emotor • 280km range • Curb weight 17.3-18t - GCW 31t • Start of production 2021	https://www.king-long.com/kd810-8x4-fuel-cell-dump-truck_p43.html

Transport de marchandises / semi-remorques

Marque / modèle	AN	EU	Asie	Application	Type véh	Annonce	Source
King Long / KT610 FC 			x	long haul	highway tract	Jun 22 <ul style="list-style-type: none"> • 141kWh battery, 200kW emotor • 300km range • Curb weight 11.3-12t - GCW 49t • Start of production 2021 	https://www.theautopian.com/a-deep-dive-into-why-china-still-believes-in-hydrogen-powered-vehicles/ https://www.king-long.com/kt610-6x4-fuel-cell-semi-tractor_p42.html
Sinotruk Yellow River / X7 FCEV 			x	long haul	highway tract	Jun 22 <ul style="list-style-type: none"> • 162kW FC (Weichai), 240kW emotor • 600km range (48kgH2) • Based on the X7 Diesel version 	https://www.theautopian.com/a-deep-dive-into-why-china-still-believes-in-hydrogen-powered-vehicles/ https://www.electrive.com/2022/09/19/sinotruk-weichai-take-order-for-1100-fcevs-in-china/
Hyzon / Hymax 24t 		x		long haul	highway tract	Jan 23 <ul style="list-style-type: none"> • 80kW FC (Horizon FC), 80kWh battery, 160kW emotor • 400km range (30kgH2 @ 350b) • GCW 24t • Based on the DAF LF 290 FAP 	https://static1.squarespace.com/static/6196c5eca85b4234c65526ca/t/629f90d2b7bcdc31d2341773/1654624467341/Hyzon_SellSheetUpdated_v2_0622.pdf
Hyzon / Hymax 46t 		x		long haul	highway tract	Jan 23 <ul style="list-style-type: none"> • 240kW FC (Horizon FC), 140kWh battery, 450kW emotor • 680km range (70kgH2 @ 350b) • GCW 46t • Based on the DAF CF 530 FTT 6x4 	https://static1.squarespace.com/static/6196c5eca85b4234c65526ca/t/629f90d2b7bcdc31d2341773/1654624467341/Hyzon_SellSheetUpdated_v2_0622.pdf
Hyzon / FCET8 	x			long haul	highway tract	Jan 23 <ul style="list-style-type: none"> • 110kW FC (Horizon FC), 110kWh battery, 320kW emotor • 560-800km range (50-70kgH2 @ 350b) • 15min refueling time • GCW 82,000lbs • Based on the Freightliner Cascadia • Produced since 2022 	https://www.hyzonmotors.com/vehicles/hyzon-class-8 https://static1.squarespace.com/static/6196c5eca85b4234c65526ca/t/629f90d2b7bcdc31d2341773/1654624467341/Hyzon_SellSheetUpdated_v2_0622.pdf

<p>Nikola / Tre FCEV</p> 	x		long haul	highway tract	<p>Sep 21</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bosch fuel cell 200 to 300kW <p>Sep 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • 800km range (70kg H2 @ 700b) • <20 min refueling time • Base vehicle Iveco • Launch Q3 23 in NA 	<p>https://nikolamotor.com/press-releases/nikola-announces-strategic-agreements-with-bosch-for-fuel-cell-manufacturing-130</p> <p>https://nikolamotor.com/press-releases/iaa-2022-nikola-and-iveco-begin-taking-orders-on-the-european-nikola-tre-bev-heavy-duty-truck-with-best-in-class-range-198</p>
<p>Hyundai / Xcient</p> 	(x)	x	long haul	highway tract	<p>Sep 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hyundai 2x90kW fuel cell, emotor 350kW, 72kWh battery • 750km range (67kg H2 @ 700b) • GCW 82,000lbs • Operations Q2 2023 in California 	<p>https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/newsroom/hyundai-motor-puts-xcient-fuel-cell-electric-trucks-into-commercial-fleet-operation-in-california-0000016883</p>
<p>Kenworth-Toyota / T680 FC</p> 	x		long haul	highway tract	<p>Aug 21</p> <ul style="list-style-type: none"> • Toyota 2x90kW fuel cell, 420kW motor, 12kWh battery • 500km range (60kg H2 @ 700b) • 15 min refueling time • Base vehicle Kenworth T680ev • Demo in Port of Los Angeles 	<p>https://www.kenworth.com/media/voffdzok/ata-fuel-cell-flyer-08-25-2021-v2.pdf</p>
<p>Navistar-International / RH Series FC</p> 	x		long haul	highway tract	<p>Oct 21</p> <ul style="list-style-type: none"> • GM fuel cell • Range 800km / refueling time 15min (targets) • Production target MY2024 <p>Nov 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • GM fuel cell • 500+km range • 15 min refueling time 	<p>https://www.forbes.com/wh/eels/news/gm-enters-fuel-cell-business-power-navistar-trucks/</p> <p>https://www.navistar.com/our-path-forward/hydrogen-fuel-cell</p>
<p>Freightliner / Cascadia FC</p> 	(x)		long haul	highway tract	<p>May 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cummins fuel cell • Base vehicle e-Cascadia • Production target MY2024 	<p>https://www.fleetowner.com/emissions-efficiency/article/21241589/cummins-freightliner-partner-on-hydrogen-fuel-cell-truck</p>
<p>Quantron / QHM FCEV 44-1000</p> 		(x)	long haul	highway tract	<p>Sep 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • 240kW Ballard fuel cell, 118kWh battery, Allison transmission 130D 450kW e-axle • 700km range (54kg @ 700b) • Based on the MAN TG3 (EU) • Production Q3 2023 (EU) 	<p>https://www.prnewswire.com/news-releases/iaa-transportation-world-premieres-quantron-unveils-longest-range-hydrogen-and-electric-trucks-based-on-newly-developed-platforms-301627016.html</p>

<p>Quantron / QHM FCEV 44-2000</p> 		(x)	long haul	highway tract	<p>Sep 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • 240kW Ballard fuel cell, 118kWh battery, Allison transmission 130D 450kW e-axle • 1500km range (116-122kg @ 770b) • Production Q3 2023 (EU) 	<p>https://www.prnewswire.com/news-releases/iaa-transportation-world-premieres-quantron-unveils-longest-range-hydrogen-and-electric-trucks-based-on-newly-developed-platforms-301627016.html</p> <p>https://www.quantron.net/en/q-truck/q-heavy/qhm-fcev/</p>	
<p>Quantron NA</p> 		(x)	long haul	highway tract	<p>Sep 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quantron-as-a-service business model • Starting 2024 in the US 	<p>https://hydrogen-central.com/up-500-quantron-class-8-fuel-cell-trucks-us-based-tmp-logistics-group-ltd/</p>	
<p>Cenentro / LMH864</p> 		(x)	(x)	long haul	highway tract	<p>Dec 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • 8x210Lit H2 tanks (Note: equivalent to 40kgH2@350b or 67kgH2@700b) • 6x4 tractor • Starting Q3 2023 in EU and US 	<p>https://www.businesswire.com/news/home/20221207005503/en/Cenentro-Electric-Group-to-Unveil-Logimax-864-Hydrogen-Powered-Semi-Tractor-at-CES</p>
<p>Keyou / Volvo HyCET tractor</p> 		(x)	long haul	highway tract	<p>Sep 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyou 100% H2 retrofit of the Volvo 13lit IC engine 	<p>https://www.h2-mobile.fr/actus/keyou-presente-premiers-vehicules-moteur-hydrogene/</p>	
<p>Mercedes-Benz / GenH2</p> 		(x)	long haul	highway tract	<p>Sep 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2x150kW fuel cell, 70kWh battery providing up to 400kW peak power • 1000+ km range (target) based on 2x40kg liquid hydrogen tanks • No impact on payload 	<p>https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Mercedes-Benz-Trucks-provides-outlook-on-hydrogen-based-GenH2-Truck-at-IAA-Transportation-2022-in-Hanover.xhtml?oid=52032506&ls=L2VuL2luc3RhbmNlL2tvlNhodG1sP29pZD05MjY2MDU1JnJlbElkPTYwODI5JmZyb21PaWQ9OTI2NjA1NSZyZlXN1bHRJbmZvVHlwZUIkPTQwNjI2JnZpZXdeXBlPXRodW1icyZzb3JORGVmaW5pdGlvb21QVUJMSVNIURfQVQzMjZ0aHVtYlNjYVx1SW5kZXg9MSZyb3dDb3VudHNIbmRleD01JmZyb21JbmZvVHlwZUIkPTQwNjI4&rs=4</p>	

<p>Tata Motors / Prima E55.S</p> 		(x)	long haul	highway tract	<p>Jan 23</p> <ul style="list-style-type: none"> • 220-270kW FC, 470kW motor (RAE 110-eaxle 2 speed transmission) • 350-500km range (350b type III tanks) • 20min refueling time • GCW 55t 	<p>https://autoexpo.tatamotors.com/pdf/commercial/Product-Note-Tata-Prima-E.55S.pdf</p>
<p>Tata Motors / Prima H55.S</p> 		(x)	long haul	highway tract	<p>Jan 23</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cummins 6.7lit H2 IC engine (290hp, 1200Nm) • 350-500km range (350b tanks) • GCW 55t 	<p>https://autoexpo.tatamotors.com/pdf/commercial/Product-Note-Tata-Prima-H.55S.pdf</p>
<p>Volvo / FC truck</p> 		(x)	long haul	highway tract	<p>Jun 22</p> <ul style="list-style-type: none"> • 300kW Cellcentric fuel cell • 1000 km range (target) • Refuelling time under 15min • Base vehicle 65t or higher • Production end of decade 	<p>https://thedriven.io/2022/06/21/volvo-unveils-hydrogen-powered-truck-with-1000km-range/</p>
<p>Hyzon / Hymax 70t</p> 		x	long haul	highway tract	<p>Jan 23</p> <ul style="list-style-type: none"> • 240kW FC (Horizon FC), 140kWh battery, 450kW emotor • 600km range (95kgH2 @ 700b) • GCW 70t • Based on the DAF CF 530 FTT 6x4 	<p>https://static1.squarespace.com/static/6196c5eca85b4234c65526ca/t/629f90d2b7bcdc31d2341773/1654624467341/Hyzon_SellSheetUpdated_v2_0622.pdf</p>

Transport de personnes / navettes, autobus, autocars

Marque / modèle	AN	EU	Asie	Application	Type véh	Annonce	Source
SAIC Maxus / FCV80 			x	passenger transportation	shuttle bus	<u>Jun 22</u> • 30kW fuel cell, 14.33kWh battery, 100kW emotor • 305km range (4,4kgH2 @ 350b) • 14 passengers • Start of production in 2018	https://www.theautopian.com/a-deep-dive-into-why-china-still-believes-in-hydrogen-powered-vehicles/
Hyvia / Master citybus H2 tech 		x		passenger transportation	shuttle bus	<u>Oct 22</u> • 30kW fuel cell, 33kWh battery, 57kW emotor (FWD) • 300km range (4,5kgH2 @ 350b) • 5min refueling time • Bi-energy (7kW OBC) • 15 passengers • Base vehicle Renault Master ZE • Start of production in 2022	https://www.hyvia.eu/en/vehicle/master-city-bus-h2-tech/
Letenda / Electrip FC 	(x)			passenger transportation	shuttle bus	<u>Avr 22</u> • FC version under development • 24 seats and 21 standees (BEV version) • Base vehicle Letenda Electrip produced in Quebec • Commissioning in 2024 at Edmonton Airport (Canada)	https://letenda.com/wp-content/uploads/2022/04/AIE-autobus-hydrogene.pdf
Tata / Starbus FC 			x	passenger transportation	bus	<u>2017</u> • 85kW fuel cell, 186kW emotor • 14,4kg H2 • 30 passengers seats • Start of production in 2012	https://www.buses.tatamotors.com/wp-content/uploads/2017/11/Starbus-Fuel-Cell-30-BS-IV.pdf
Yutong / ZK6126FCEVG 			x	passenger transportation	bus	<u>Sep 18</u> • 500km range (8x140lit H2) • 10-15min refueling time <u>Jun 22</u> • 80kW fuel cell, 105kWh battery, 120kW emotor (FWD) • 41 passengers • Start of production in 2018	https://www.greencarcongress.com/2018/09/20180901-yutong.html https://www.theautopian.com/a-deep-dive-into-why-china-still-believes-in-hydrogen-powered-vehicles/
Geely Farizon / C12F 			x	passenger transportation	bus	<u>Jun 22</u> • 80kW fuel cell, 121kWh battery, 120kW emotor (FWD) • 44 passengers • Start of production in 2022	https://www.theautopian.com/a-deep-dive-into-why-china-still-believes-in-hydrogen-powered-vehicles/

<p>Safra / HyCity</p> 		(x)	passenger transportation	bus	<p><u>Jun 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 45kW FC (Symbio), 130kWh battery (Microvast), 2x125kW emotor (ZF AVE 130) • 350+km range (35kg H2 @ 350b) • 33 passengers seats • Production mi-2023 	<p>https://www.h2-mobile.fr/actus/safra-hycity-nouveau-bus-hydrogene-detail/ https://www.transbus.org/construc/safra_hycity-12.html https://safra.fr/constructeur/</p>
<p>Safra / H2-Pack retrofit</p> 		(x)	passenger transportation	bus	<p><u>Jan 23</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 70kW FC (Plastic Omnium), 71kWh battery (Microvast), 350kW emotor (Dana TM4) • 500km range (35kg H2 @ 350b) • Base vehicule Mercedes-Benz Intouro • Available in 2023 	<p>https://safra.fr/retrofit/</p>
<p>New Flyer / Xcelsior Charge FC 40ft</p> 	x		passenger transportation	bus	<p><u>Sep 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ballard 85kW HD+ FC, 150kWh battery, 160kW emotor Siemens ELFA3 • 600km range • 6-20min refueling • 40ft bus Xcelsior 	<p>https://www.sustainable-bus.com/news/new-flyer-xcelsior-charge-fc-hydrogen-bus/</p>
<p>VanHool / A330 FC</p> 	x		passenger transportation	bus	<p><u>2019</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 85kW FC (12,000+h durability), 24-36kWh battery • Range 350+km (35-40kgH2) • 44 seated passengers • In operations in Cologne, Wuppertal in 2019 	<p>https://www.sustainable-bus.com/news/van-hool-launch-new-a330-fc-and-exqui-fuel-cell-future/ https://fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/final1-hvlo-final-report.pdf</p>
<p>El Dorado ENC / Axess EVO-FC</p> 	x		passenger transportation	bus	<p><u>Oct 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • PlugPower Progen 125kW FC integrated with BAE Systems drive • 640km range • 43 seated passengers • 35ft or 40ft bus 	<p>https://www.eldorado-ca.com/axess-evo-fc https://www.sustainable-bus.com/components/bae-systems-enc-buses-drive/</p>
<p>Hyzon / Passenger Coach</p> 		x	passenger transportation	bus	<p><u>Jan 23</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 80kW FC (Horizon FC), 141kWh battery, 195kW emotor • 400km range (35kgH2 @ 350b) • Based on the President 2 1400 • Produced since 2022 	<p>https://www.hyzonmotors.com/vehicles/hyzon-high-floor-coach https://static1.squarespace.com/static/6196c5eca85b4234c65526ca/t/629f90d2b7bc31d2341773/1654624467341/Hyzon_SellSheetUpdated_v2_0622.pdf</p>

<p>Keyou / Bus H2 ICE</p> 		(x)	passenger transportation	bus	<p><u>Avr 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Keyou 100% H2 IC engine (210kW) • 500km range • Production 2024 	<p>https://www.h2-mobile.fr/actus/keyou-presente-premiers-vehicules-moteur-hydrogene/</p>
<p>Wrightbus / Streetdeck FCEV</p> 		x	passenger transportation	bus	<p><u>Dec 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ballard 85kW FC, 27.4kWh LTO battery (Forsee) • 450km range (27kgH2/1120lit @ 350b) • 8min refueling time • 86 passengers (65 seated), GVW 18,5t 	
<p>New Flyer / Xcelsior Charge FC 60ft</p> 	x		passenger transportation	bus	<p><u>Sep 22</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ballard 85kW HD+ FC, 150kWh battery, 210kW emotor Siemens • 600km range • 6-20min refueling • 60ft bus Xcelsior 	<p>https://www.sustainable-bus.com/news/new-flyer-xcelsior-charge-fc-hydrogen-bus/</p>
<p>VanHool / Exquicity 18 FC</p> 	x		passenger transportation	bus	<p><u>2019</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 100kW FC (Ballard FCVelocity-HD) • Range 300km • 125 passengers (BRT configuration) • In operations in Cologne, Wuppertal in 2019 	<p>https://www.sustainable-bus.com/news/van-hool-launch-new-a330-fc-and-exqui-fuel-cell-future/</p>

AUTEUR

Frédéric Delrieu - Amp&Axe Consulting - ampaxle.com



frederic@ampaxle.com



<https://www.linkedin.com/company/amp-axle-consulting/>

<https://www.linkedin.com/in/fredericdelrieu/>



@FredericDelrieu

propulsion
Québec

