

La filière de l'hydrogène : un avantage stratégique pour le Québec

Jacques Roy, Ph. D.

Professeur titulaire
Département de gestion des opérations et de la logistique
HEC Montréal

Marie Demers, Ph. D.

Chercheure associée, CHUS
Université de Sherbrooke

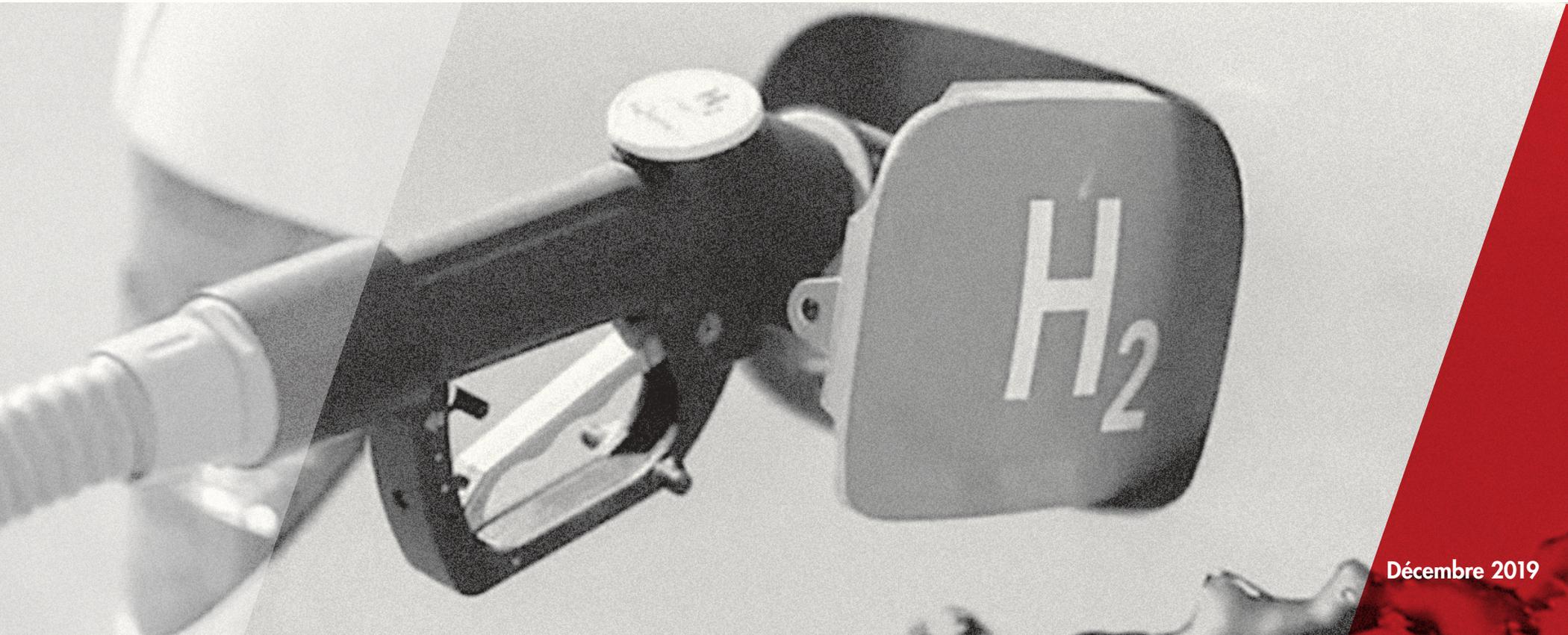


Table des matières

1. Sommaire exécutif.....	3	6. Marchés extérieurs florissants	29
2. Introduction	5	6.1 Californie	31
3. L'hydrogène: un vecteur d'énergie.....	7	6.2 Chine	32
3.1 Une source renouvelable et efficace d'énergie	7	6.3 Japon	34
3.2 Hydrogène et hydroélectricité: une combinaison gagnante.....	9	6.4 Allemagne.....	36
3.3 Levier de diminution des émissions de GES et d'accroissement de l'efficacité énergétique.....	10	7. Le portrait de la situation au Québec.....	39
4. Différentes utilisations de l'hydrogène comme source d'énergie.....	11	7.1 Les sources d'énergie utilisées au Québec	39
4.1 Véhicules électriques.....	11	7.2 L'énergie dédiée au secteur des transports	40
4.2 Autobus à pile à hydrogène.....	13	7.3 Les émissions de gaz à effet de serre.....	40
4.3 Transport de marchandises	14	7.4 L'avènement des véhicules électriques	41
4.4 Stations de recharge.....	15	7.5 Les mesures incitatives pour rouler à l'énergie propre.....	41
4.5 Autres applications possibles dans le secteur des transports	17	7.6 La réglementation actuelle pour limiter les émissions de CO ₂ et la dépendance aux hydrocarbures.....	43
4.6 Applications dans l'industrie	17	8. L'opportunité pour le développement de la filière hydrogène au Québec	44
4.7 Comparaison véhicules à batterie (BEV) et véhicules à pile à hydrogène (FCEV).....	18	8.1 La production d'hydrogène	44
5. Les technologies actuelles et en développement.....	19	8.2 Les différents segments de marché pour la conversion à l'hydrogène.....	46
5.1 La production de l'hydrogène	19	8.3 Les nouveaux projets d'infrastructures en transport.....	49
• Les modes de production actuels.....	19	9. Conclusion, conditions de faisabilité et recommandations	51
• Les modes de production en développement	21	9.1 Conclusion	51
5.2 Le stockage de l'hydrogène	23	9.2 Conditions de faisabilité et recommandations	51
5.3 La distribution de l'hydrogène	25	Références	53
5.4 L'hydrogène pour la propulsion des véhicules	27	Annexe 1 : Liste des membres de la coalition Hydrogène Québec	59

1. Sommaire exécutif

La transition énergétique vers des sources renouvelables et peu émettrices de gaz à effet de serre est amorcée dans plusieurs pays. Le développement des énergies solaire, éolienne et hydroélectrique est à l'ordre du jour mais leur caractère intermittent occasionne des difficultés d'ajustement de l'offre et de la demande. Les possibilités de transformation et de stockage des surplus hydroélectriques sous forme d'hydrogène offrent une nouvelle voie pour le recours à l'énergie propre.

En tant que vecteur d'énergie pouvant être produit à partir de plusieurs sources, l'hydrogène fait actuellement l'objet de nombreuses recherches et de multiples projets de démonstration, à la fois stimulés par l'industrie, par les gouvernements et par les organismes directement dédiés à cette ressource à travers le monde. Mais qu'en est-il pour le Québec ?

Ce document présente un état de situation de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie dans le monde, en mettant l'accent sur ses différentes applications dans le secteur des transports mais aussi dans l'industrie.

Il fait ressortir les avantages liés à l'hydrogène et son rôle dans la lutte aux changements climatiques car son utilisation ne dégage aucune émission de gaz à effet de serre, ni aucun autre sous-produit nocif pour l'environnement.

Les avancées les plus récentes sur le plan des technologies liées à l'hydrogène sont mises en évidence, qu'il s'agisse de sa production, du stockage, de sa distribution ou de son rôle dans la propulsion des véhicules. La complémentarité des véhicules à batterie électrique et des véhicules à pile à hydrogène fait l'objet d'une attention particulière.

Quatre cas de pays ou d'État précurseurs de cette conversion sont ensuite examinés plus en détail : la Californie, la Chine, le Japon et l'Allemagne s'avèrent déjà des marchés florissants, que ce soit au chapitre de la mise en place de stations de recharge à l'hydrogène ou de la conversion des véhicules.

Enfin, afin de contribuer au positionnement du Québec sur la question, un portrait de la situation de l'énergie et des transports est tracé, et l'implication gouvernementale au regard des énergies propres est documentée.

Le Québec occupe une position éminemment favorable à l'intégration de l'hydrogène dans son système énergétique en raison de ses importantes ressources en hydroélectricité et des surplus non utilisés qui en découlent. Quelques entreprises multinationales ont d'ailleurs emboîté le pas pour la production d'hydrogène au Québec en vue de l'exportation.

Plusieurs mesures sont ici proposées dans le cadre d'une démarche d'intégration de l'hydrogène dans les transports au Québec. Elles visent aussi bien le secteur public que le secteur privé.

Pour le secteur public :

- Miser sur les plans d'action en vigueur pour élargir à l'hydrogène le recours aux énergies propres ;
- Se doter d'une feuille de route de l'hydrogène avec des objectifs et des cibles ;
- Encourager les initiatives de production d'hydrogène à partir des sources d'énergie renouvelable comme l'hydroélectricité, notamment dans les régions éloignées ;
- Stimuler la R&D sur les technologies relatives à l'hydrogène ;
- Mettre en place des incitatifs pour l'achat de véhicules à l'hydrogène, en particulier ceux des flottes captives comme les voitures taxis, les véhicules de livraison, les flottes gouvernementales, les véhicules d'urgence et les autobus ainsi que les camions lourds ;
- Contribuer avec le secteur privé au financement du déploiement graduel des stations de recharge à l'hydrogène ;
- Fournir un cadre réglementaire pour assurer l'utilisation sécuritaire de l'hydrogène ;
- Sensibiliser le public aux enjeux liés à l'hydrogène (sécurité, coûts, bénéfices pour l'environnement).

Pour le secteur privé :

- Collaborer avec le secteur public et d'autres intervenants à l'élaboration de politiques fructueuses ;
- Investir dans la production d'hydrogène à des fins d'utilisation au Québec et d'exportation ;
- Adopter une stratégie de conversion par étape :
 - Convertir d'abord les chariots élévateurs dans l'industrie puisque les bénéfices ont déjà été démontrés par des entreprises privées comme Walmart et Canadian Tire ;
 - Participer à la conversion de flottes captives de véhicules (taxis, véhicules de livraison, flottes gouvernementales, véhicules d'urgence et autobus) car elles peuvent être ravitaillées à leur station ou terminus ;
 - Mettre l'accent sur les camions lourds, grands générateurs de GES, en convertissant d'abord ceux qui retournent à leur terminal à chaque soir ;
 - Intégrer l'hydrogène dans les nouveaux projets d'infrastructure de transport comme les tramways et les trains de passagers ;
 - Participer à la construction d'un réseau de stations de recharge à l'hydrogène.

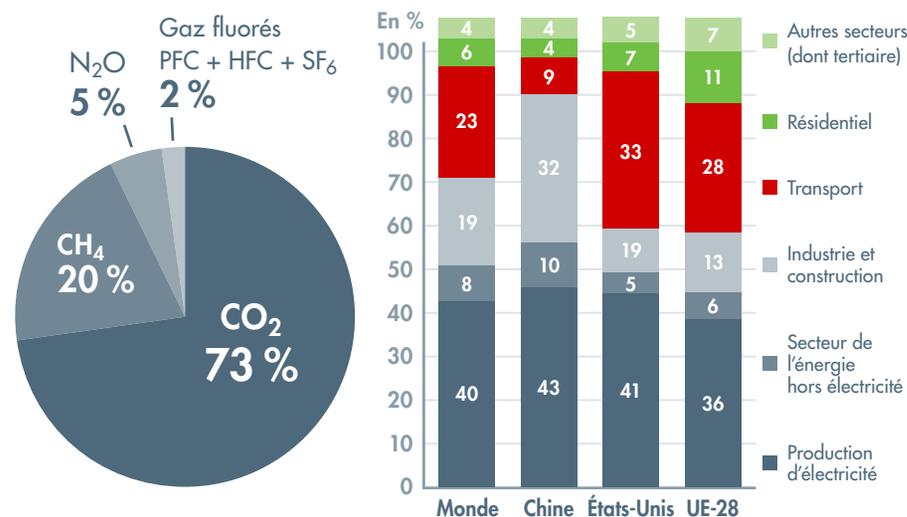
Les coûts liés à la transition énergétique vers l'hydrogène seront importants. Mais on peut s'attendre à ce que les bénéfices qui en découleront soient substantiels, tant pour les entreprises impliquées que pour l'environnement et la société québécoise dans son ensemble. Avec ses ressources renouvelables, le Québec est avantageusement placé pour amorcer cette transition et en bénéficier.

2. Introduction

Les carburants fossiles constituent 82% de la consommation d'énergie dans le monde (Hydrogen Council, 2017a) et ils sont en bonne partie responsables de la hausse des émissions de gaz à effet de serre qui viennent aggraver les effets des changements climatiques, tant sur l'environnement que sur la santé.

L'urgence d'agir pour contrecarrer l'impact des changements climatiques a rendu nécessaire l'examen des façons de faire dans divers domaines générateurs de gaz à effet de serre tel celui des transports. La décarbonisation du secteur des transports est désormais à l'ordre du jour pour atteindre les cibles souhaitées. Le CO₂ constitue la principale source d'émissions responsables du réchauffement global et le secteur des transports était responsable de 23% des émissions de CO₂ à l'échelle mondiale en 2014 (Horsin Molinaro et Multon, 2018). À l'impact délétère des carburants fossiles sur le climat s'ajoutent la dégradation de l'environnement et la pollution de l'air qui, à leur tour, ont des effets négatifs sur la santé de la population.

FIGURE 1
Émissions de CO₂ et contributions au réchauffement global en 2014



Source : Horsin Molinaro et Multon, 2018.

Lors de la Conférence de Paris sur le climat (COP 21) en décembre 2015, 195 pays ont adopté un accord qui les contraint à limiter les émissions polluantes contribuant aux changements climatiques. L'Accord de Paris sur le climat, signé en 2016, encourage la poursuite d'efforts visant à limiter la hausse des températures à 1,5 degré Celsius; il fait de plus la promotion d'un développement à faible émission de gaz à effet de serre et vise l'atteinte d'un monde sans carbone entre 2050 et 2100.

Les mesures d'efficacité énergétique, les changements comportementaux visant à réduire la consommation énergétique et les outils de tarification du carbone ne permettront pas à eux seuls d'atteindre les objectifs souhaités. Une transformation majeure du système énergétique s'impose afin de parvenir à de faibles émissions de carbone (Potvin et al., 2017; World Energy Council, 2018). La transition vers des sources d'énergie renouvelable et faibles en carbone est déjà entamée mais le rythme d'implantation dans le secteur des transports est plutôt mitigé.

Désireuse de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre, une coalition de 89 villes et régions européennes (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) s'inscrit dans ce courant depuis 2017 et prévoit réaliser des projets d'investissements de l'ordre de 1,8 milliard d'euros pour le déploiement des technologies de pile à l'hydrogène au cours des cinq prochaines années (Ruf et al., 2018).

Le Canada, et en particulier le Québec, occupe une position favorable pour le développement d'énergies faibles en carbone, à la fois en raison de ses ressources hydroélectriques et en biomasse mais aussi de ses exploitations de combustibles fossiles qui pourraient être équipées plus systématiquement en vue du captage et du stockage du carbone. Des projets d'expérimentation sont d'ailleurs en cours dans plusieurs provinces canadiennes.

L'objectif de cette étude est de faire le point sur l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie en se penchant plus particulièrement sur les applications dans le domaine des transports. L'étude a été réalisée à la demande de la coalition Hydrogène Québec qui vise à sensibiliser la population québécoise à l'hydrogène comme carburant pour faciliter la transition énergétique¹. L'étude fera valoir les avantages comparatifs de l'hydrogène sur l'environnement et l'économie en s'inspirant notamment de l'expérience récente observée dans d'autres pays. On se penchera plus particulièrement sur la situation au Québec qui profite d'un avantage stratégique en disposant de surplus hydroélectriques pouvant servir à la production d'hydrogène propre et bon marché. L'étude repose sur une analyse assez exhaustive de la documentation récente sur le sujet et sur des entrevues avec plusieurs intervenants et experts de l'industrie.

¹ La liste des membres de la coalition est à l'annexe 1.

3. L'hydrogène : un vecteur d'énergie

3.1 Une source renouvelable et efficace d'énergie

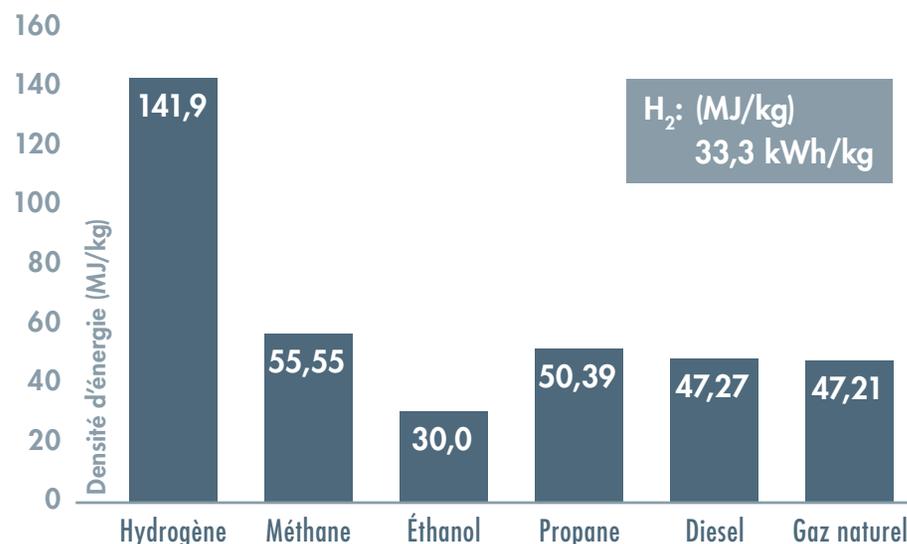
L'hydrogène est l'élément le plus simple, le plus petit et le plus léger du tableau périodique ainsi que l'élément le plus abondant de l'univers. Il se trouve cependant rarement à l'état pur mais est presque toujours lié à d'autres éléments (comme l'oxygène par exemple pour former l'eau H_2O), ce qui nécessite l'utilisation de procédés techniques pour les séparer. Habituellement rencontré sous forme gazeuse, l'hydrogène se liquéfie à très basse température (-253 Celsius). En raison de sa faible densité, il est habituellement mis sous pression ou liquéfié pour le stockage et le transport. Sa liquéfaction augmente de 800 fois sa densité (Shell, 2017).

Doté d'un *plus fort potentiel énergétique que l'essence et les autres carburants* (Jain, 2009; Sinigaglia et al., 2017; Tarascon, 2011), l'hydrogène peut être produit à partir de nombreuses sources d'énergie telles que la biomasse, l'énergie éolienne, solaire, hydroélectrique ou nucléaire et les carburants fossiles décarbonisés; cette polyvalence lui confère un avantage indéniable. Sans odeur, sans couleur et non toxique, ce gaz dont la combustion n'entraîne aucune émission de carbone est considéré par plusieurs comme le vecteur d'énergie le plus prometteur pour le futur, d'autant plus qu'il est inépuisable.

Parmi les autres avantages de l'hydrogène, mentionnons qu'il est facilement stockable et que ses utilisations possibles sont multiples (Terlouw et al., 2019; IRENA, 2018). Il peut servir entre autres pour le chauffage industriel, le transport, l'alimentation d'appareils de manutention comme les chariots élévateurs dans l'industrie, etc.

L'hydrogène est *omniprésent dans les sources d'énergie fossile* sous forme de composés carbone-hydrogène (hydrocarbures). Plus la source contient d'atomes d'hydrogène par rapport au nombre d'atomes de carbone (comme dans le méthane CH_4 , principal composé du gaz naturel), plus faible sera la quantité de CO_2 produite lors de la combustion et conséquemment plus faibles seront les émissions de GES dans l'atmosphère; dans le cas du pétrole et du gaz diesel, la proportion d'atomes d'hydrogène est plus petite, ce qui entraînera plus de GES lors de la combustion (Shell, 2017).

FIGURE 2
Énergie spécifique de différents carburants



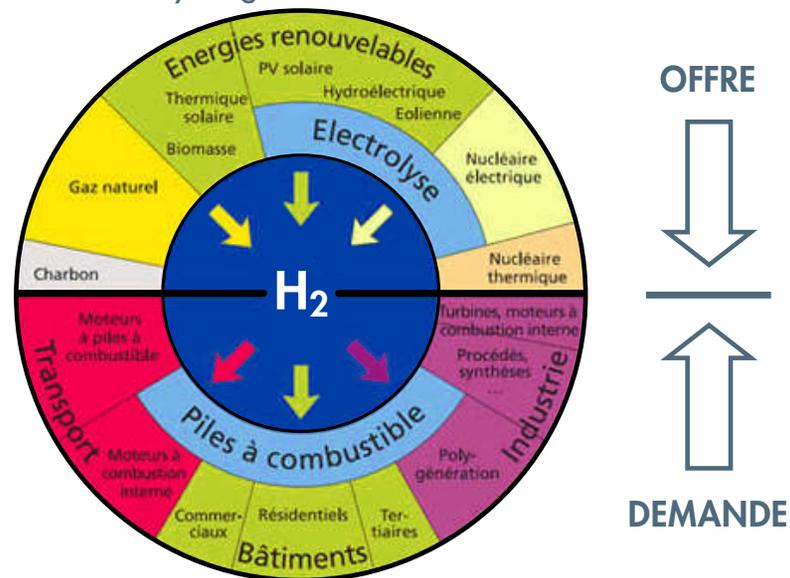
Source: Tarascon, 2011.

L'hydrogène offre aussi une *solution flexible intéressante* face au caractère intermittent inhérent à des sources d'énergie renouvelable comme l'éolien et le photovoltaïque (Brandon et Kurban, 2017) car on peut le stocker facilement pour une utilisation ultérieure.

Les *capacités de stockage à long-terme de l'hydrogène sont supérieures* à celles d'autres sources ce qui en fait un atout lorsque la demande énergétique varie dans le temps (par exemple lorsque la demande est plus grande en hiver qu'en été).

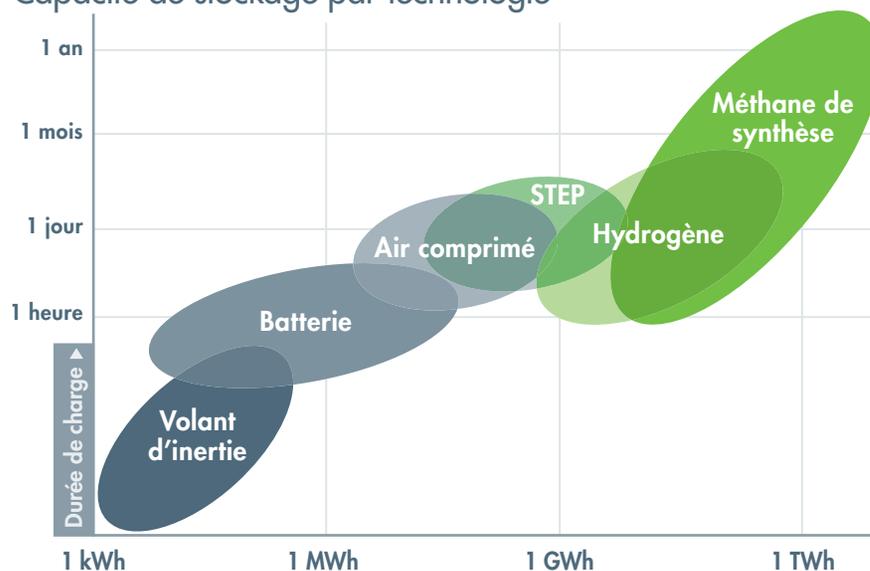
L'hydrogène transporté par pipeline sur de longues distances est *peu sujet aux pertes d'énergie* lors du transport contrairement à l'électricité, ce qui en fait une option attrayante sur le plan économique (Hydrogen Council, 2017a).

FIGURE 3
La chaîne hydrogène



Source : Connaissance des énergies, 2015.

FIGURE 4
Capacité de stockage par technologie

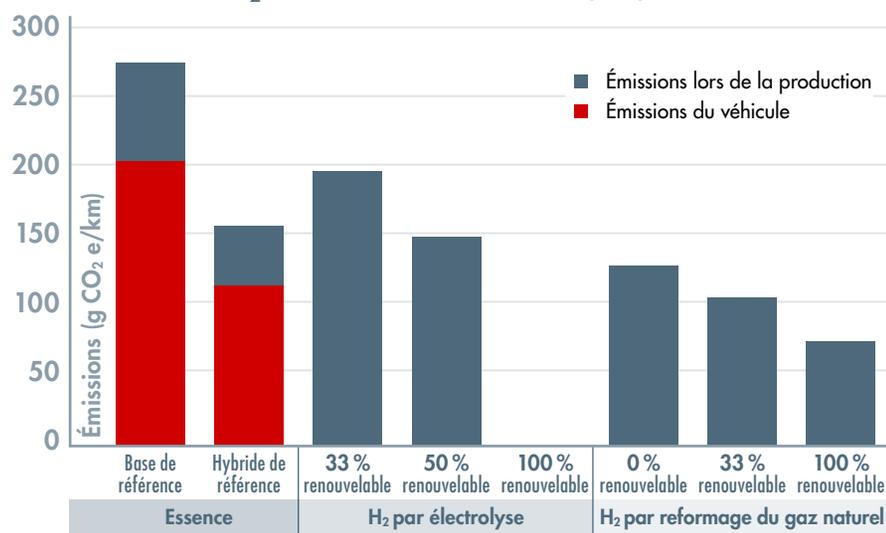


Source : Wilkin, 2017.

3.2 Hydrogène et hydroélectricité : une combinaison gagnante

Actuellement, la majeure partie de l'hydrogène produit dans le monde (70 %) l'est à partir du gaz naturel par un procédé de reformage à la vapeur du méthane (Shell, 2017), ce qui entraîne des émissions de GES. L'hydrogène produit par électrolyse à partir de sources d'énergie renouvelable comme l'hydroélectricité génère quant à lui peu ou pas de GES. Mais l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène requiert beaucoup d'électricité, ce dont le Québec dispose à un coût raisonnable. L'utilisation des installations hydroélectriques afin de produire de l'hydrogène permettra donc de contribuer à la réduction des effets négatifs des émissions de GES sur le climat.

FIGURE 5
Émissions de CO₂ selon la source d'énergie pour les véhicules



Source : Isenstadt et Lutsey, 2017.

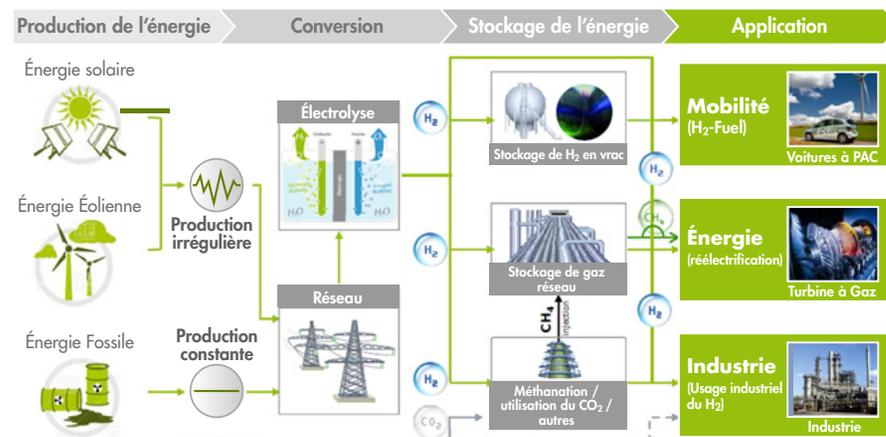
En Suisse, la mise en place d'une usine de production d'hydrogène par électrolyse à l'installation hydroélectrique de Aarau permettra de fournir la consommation annuelle de carburant de 170 véhicules à pile à hydrogène.

(Frangoul, 2017)

La production d'hydrogène à partir des ressources hydroélectriques renouvelables et propres comme celles dont dispose le Québec permet aussi d'optimiser l'utilisation de la production excédentaire d'électricité propre en offrant la possibilité de stocker les surplus en période de faible consommation pour les rendre disponibles ensuite en période de pointe et pour les exporter (Hydrogen Council, 2017a ; Toyota, 2016), notamment aux États-Unis où l'hydrogène est principalement généré à partir du gaz naturel à l'heure actuelle (Leblanc, 2018). Si la production d'électricité générée par les installations hydroélectriques excède la demande, on assiste à des pertes importantes. La production d'hydrogène permet d'éviter ces pertes. L'hydrogène et l'électricité sont vus comme des vecteurs d'énergie complémentaires : l'hydrogène peut être converti en électricité et vice versa (IEA, 2017).

L'hydrogène peut également être produit par de petites installations hydroélectriques situées en régions éloignées en profitant des périodes de surplus d'énergie, ce qui permet d'éviter le transport de l'hydrogène sur de longues distances (Yumurtaci et Bilgen, 2004).

FIGURE 6
L'hydrogène : de la production à l'utilisation

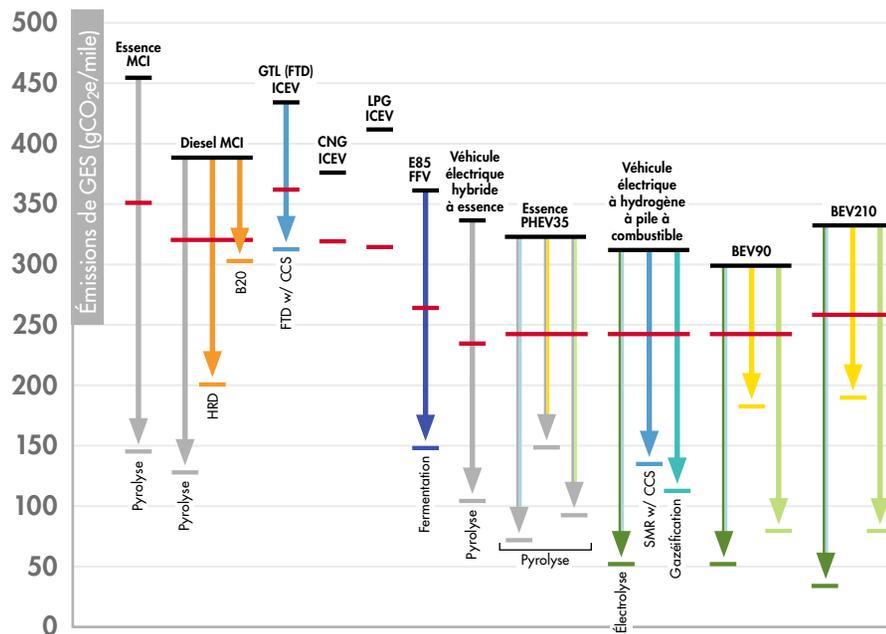


Source : Boucly, 2015.

3.3 Levier de diminution des émissions de GES et d'accroissement de l'efficacité

Les véhicules électriques à pile à combustible présentent une des meilleures alternatives en termes de technologie propre. Lorsque généré à partir de sources d'énergie renouvelable (énergie éolienne, solaire ou hydroélectrique), l'hydrogène servant à alimenter les véhicules à pile ne produit aucune émission de gaz à effet de serre. Même lorsque l'hydrogène qui les alimente est produit à partir du gaz naturel sans captage de carbone, les véhicules à pile à combustible génèrent jusqu'à 30% moins d'émissions que les véhicules conventionnels (Hydrogen Council 2017b).

FIGURE 7
Réduction potentielle des émissions de GES en fonction de la source d'énergie



Réductions potentielles des émissions de GES.

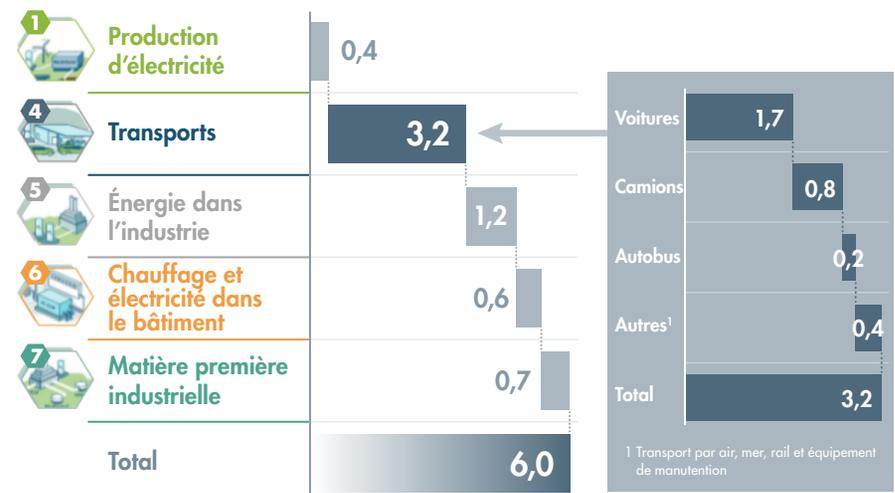
Cradle-to-Grave Lifecycle Analysis of U.S. Light-Duty Vehicle-Fuel Pathways: A Greenhouse Gas Emissions and Economic Assessment of Current (2015) and Future (2025-2030) Technologies, Laboratoire national d'Argonne, juin 2016.

- Technologie actuelle
- Gain d'efficacité du véhicule
- Résidus forestiers
- Fèves de soya
- Gaz naturel
- Tiges de maïs
- Peuplier
- Électricité solaire/éolienne
- Résidus forestiers + électricité solaire/éolienne
- Résidus forestiers + ACC électricité
- Résidus forestiers + ACC électricité avec CCS
- ACC électricité
- ACC électricité avec CCS

Source: Toyota, 2016.

L'Hydrogen Council (2017b) prévoit que les émissions de CO₂ attribuables au secteur du transport pourraient être réduites de 3,2 Gt d'ici 2050 si des mesures appropriées étaient adoptées pour promouvoir la transition vers des véhicules à pile à combustible.

FIGURE 8
Les émissions annuelles de CO₂ pourraient être réduites de 6 Gt en 2050



Source: Hydrogen Council, 2017b.

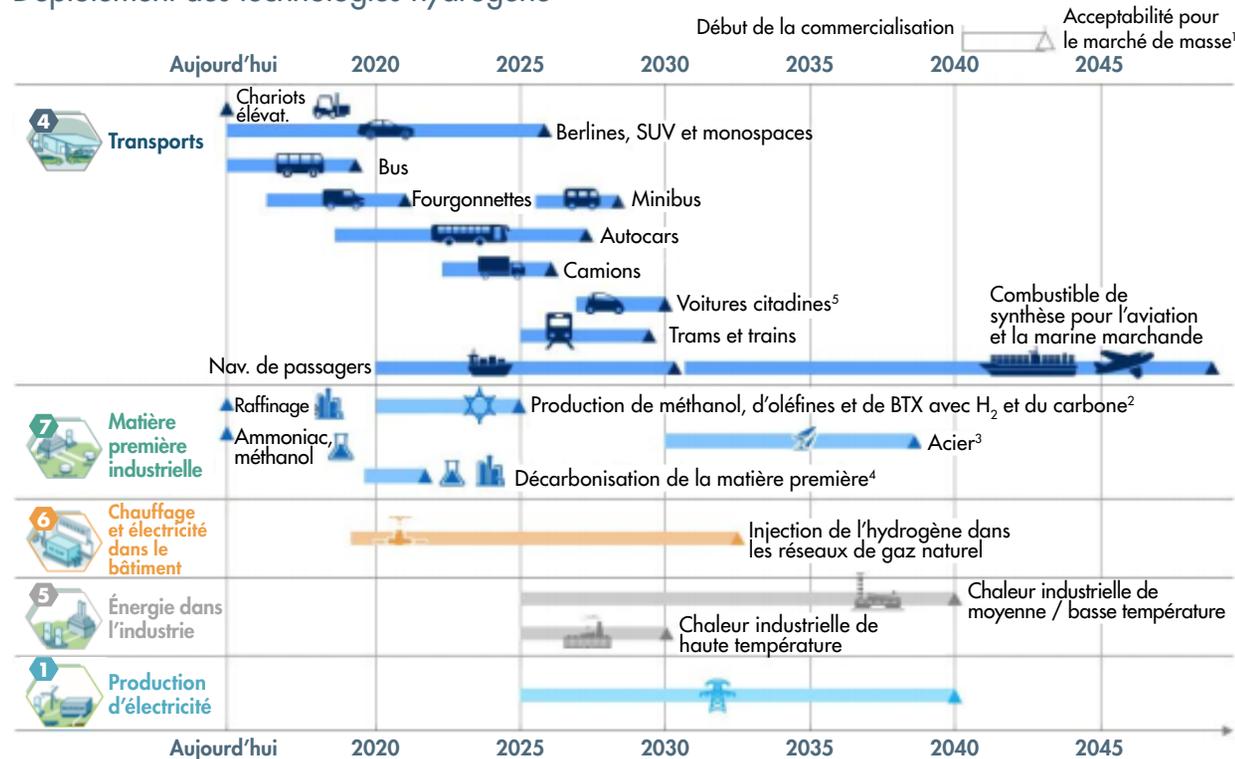
4. Différentes utilisations de l'hydrogène comme source d'énergie

4.1 Véhicules électriques

Les véhicules à pile à hydrogène peuvent jouer un rôle important dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre puisqu'ils ne produisent pas d'émissions lors de la combustion, contrairement aux véhicules à essence conventionnelle ou au diesel. Le déploiement de ces véhicules s'inscrit en synergie avec celui des véhicules à batterie électrique car les deux types possèdent des avantages et des inconvénients différents et peuvent s'avérer complémentaires.

La pile à combustible convertit l'hydrogène en électricité qui servira à propulser le véhicule. La pile fonctionne continuellement en présence d'hydrogène et d'oxygène.

FIGURE 9
Déploiement des technologies hydrogène



- 1 Défini comme représentant plus de 1 % des ventes sur le segment
- 2 La part de marché correspond au volume de production qui utilise de l'hydrogène et du carbone capturé pour remplacer la matière première
- 3 Minéral pré-réduit avec réduction écologique via le H₂, en haut fourneau et autres procédés faiblement intensifs en carbone utilisant du H₂ pour l'élaboration de l'acier
- 4 La part de marché correspond au volume de matière première produit à partir de sources faiblement intensives en carbone
- 5 La date de commercialisation, pour la France, a été réajustée en fonction de la feuille de route globale et en cohérence avec la date de la montée en puissance

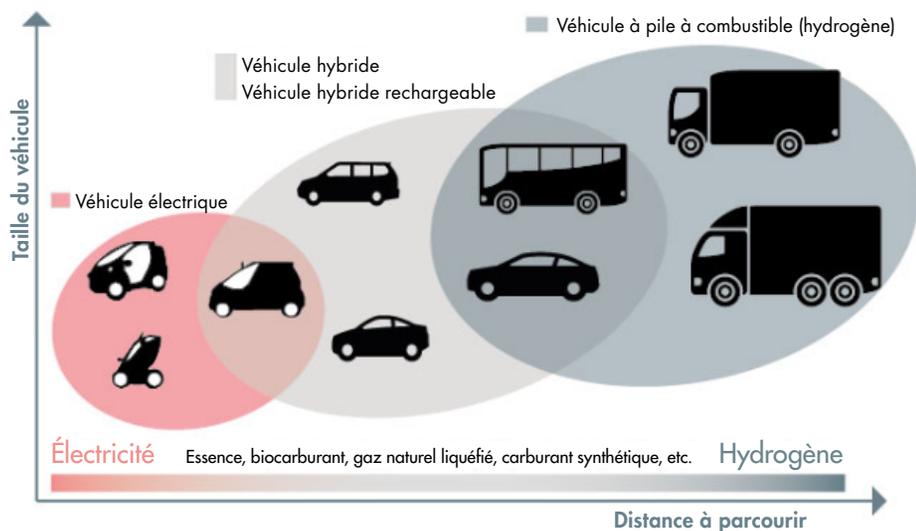
Source: Hydrogen Council, 2017b.

Une des premières tentatives d'utiliser l'hydrogène comme carburant au Canada fut lors des Jeux Olympiques de Vancouver en 2010 où 20 autobus ont été alimentés par de l'hydrogène produit au Québec à partir de l'énergie hydroélectrique et transporté par camion jusqu'à la station de recharge de Whistler (Natural Resources Canada, 2019). Ce projet pilote a pris fin en 2014.

Depuis, plusieurs constructeurs se sont impliqués dans la fabrication de véhicules à pile à hydrogène: parmi les chefs de file, mentionnons les constructeurs Toyota, avec le modèle Mirai, Hyundai avec le modèle Nexo et Honda, avec le modèle Clarity. Selon le modèle, l'autonomie du véhicule atteint entre 500 et 600 km (Vorano, 2019). Les automobiles constituent la majeure partie des véhicules à pile à hydrogène déployés sur la route actuellement (IEA, 2019).

Selon l'International Energy Agency (IEA, 2019), il y avait 11 200 véhicules de types automobile et camion léger à pile à hydrogène sur la route dans le monde à la fin de 2018, principalement aux États-Unis (Californie) avec environ la moitié des véhicules, suivi du Japon avec le quart et l'Europe avec 11 %, principalement en Allemagne et en France.

FIGURE 10
Principaux types de véhicule que l'on devrait avoir dans le futur



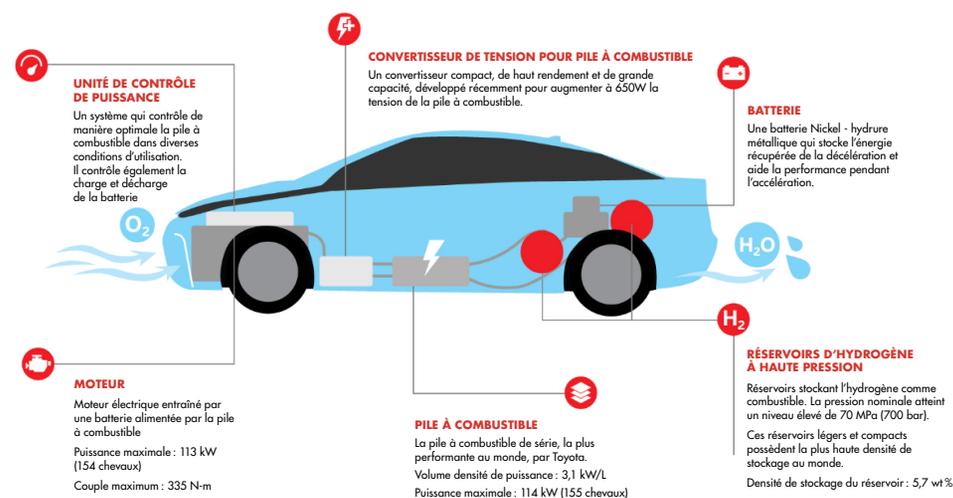
Source : Institut de recherche sur l'hydrogène, Trois-Rivières.

ZEFER, une initiative européenne pour le déploiement de véhicules à pile à hydrogène, en cours dans trois villes (Paris, Londres et Bruxelles), teste actuellement cette technologie afin de démontrer la viabilité de cette option pour les flottes captives de véhicules comme des taxis, un service de location d'automobiles et des voitures de police (Green Car Congress, 2018).

Après le Japon et la Californie, Toyota teste maintenant sa voiture Mirai à Québec en équipant la flotte gouvernementale de 50 véhicules à pile à combustible alimentée par hydrogène renouvelable produit sur le site par électrolyse de l'eau.

La technologie à pile serait particulièrement appropriée actuellement pour les flottes captives de véhicules à haute utilisation comme les taxis, les services de location d'automobiles, les services de livraison, les voitures de police et les autobus, qui pourraient bénéficier d'une recharge sur leur propre site ou aux stations de transit dans le cas des bus.

FIGURE 11
Fonctionnement des piles à combustible



Source : Toyota, 2016.

4.2 Autobus à pile à hydrogène

Le premier bus à pile à hydrogène est entré en fonction en Belgique en 1994 et la ville de Chicago a mené un projet similaire l'année suivante (Natural Resources Canada, 2019). L'utilisation de l'hydrogène dans cette branche des transports a maintenant atteint un certain degré de maturité. Plusieurs pays sont activement impliqués dans le déploiement et la commercialisation de ce type de véhicule, notamment les États-Unis, le Canada, le Japon, l'Allemagne, le Royaume-Uni et le Brésil selon *Air Products* (2019). L'Europe dispose de 83 bus en opération et les États-Unis en ont 55. Des réservoirs à hydrogène de 40 kg sont placés sur le toit des véhicules, ne restreignant donc pas l'espace prévu pour les passagers à l'intérieur (Staffell et al., 2019). L'hydrogène est stocké sous pression dans des réservoirs à 350 bar (Shell, 2017).

À la fin 2018, 55 autobus alimentés par pile à hydrogène étaient en opération aux États-Unis, dont 25 en Californie (IEA, 2019). La ville d'Oakland en Californie dispose de la plus importante flotte en Amérique du Nord avec 12 bus à l'hydrogène (IEA, 2017). À travers le monde, plus de 450 bus à pile à hydrogène étaient sur la route en 2017 (Hydrogen Council, 2017b) mais la situation évolue rapidement ; on en retrouvait plus de 500 à la fin de 2018 (IEA, 2019).

En Europe, la ville d'Aberdeen en Écosse dispose de la plus grande flotte avec 10 bus à l'hydrogène (Ballard, 2019a). En opération depuis 2014, ces bus ont dépassé 1,6 million de km en janvier 2019. Chaque bus est propulsé par un module de pile à hydrogène provenant de l'entreprise canadienne *Ballard Power Systems* et alimenté par de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau de la société canadienne *Hydrogenics Corporation*.

Le secteur est en pleine expansion. La Corée du Sud prévoit remplacer 26 000 bus au gaz naturel par des bus à pile à hydrogène d'ici 2030 (Hydrogen Council, 2017b ; IEA, 2017). À la fin 2018, la Chine dispose du plus grand nombre de bus à pile à hydrogène avec 400 appareils dans des projets de démonstration (IEA, 2019). La Chine a par ailleurs annoncé en 2015 la commande de 300 bus pour Foshan City et Toyota planifie plus de 100 bus d'ici les Jeux Olympiques de Tokyo en 2020 (Staffell et al., 2019). *Ballard Power Systems*, dont le siège social se trouve à Burnaby, B.C., participe au développement des piles à hydrogène pour le projet de Foshan City.

Au moins 11 entreprises fabriquent des bus à pile à hydrogène dans le monde (IEA, 2019).

En termes de longévité, mentionnons que quatre bus de Londres ont été en opération pendant plus de 18 000 heures, 10 bus de Californie ont dépassé 12 000 heures et un bus a atteint 22 400 heures (Staffell et al., 2019). En Europe, les bus à pile à hydrogène ont accumulé 7 millions de km d'opération. Ces bus ont fait leurs preuves dans diverses conditions climatiques et topographiques.



Source : Air Products, 2019.

La consommation d'un bus de 12 mètres alimenté par des piles à hydrogène a été évaluée en moyenne à 9 kg de H₂/100 km et dépend de plusieurs facteurs dont le nombre de passagers transportés, la topographie du terrain, la vitesse du véhicule et les exigences en matière de chauffage et de climatisation. Le temps de recharge se situerait entre 5 et 10 minutes (Ballard, 2019d ; Lozanovski et al., 2018). Selon nos entretiens, la consommation moyenne se situerait plus près de 7 à 8 kg/km.

Une évaluation comparative de la performance d'opération indique que les bus propulsés à l'hydrogène ont une autonomie, un temps de recharge et des heures d'opération comparables aux bus alimentés au diesel (Lozanovski et al., 2019).

4.3 Transport de marchandises

L'utilisation de piles à combustible est spécialement *pertinente pour le transport sur de longues distances*, comme celles parcourues par les camions lourds (Hydrogen Council, 2017b) alors que les batteries électriques seraient plus appropriées pour les camions servant à la distribution locale. Le poids des batteries est un enjeu dans le cas des camions lourds puisqu'il pourrait réduire leur charge utile.

Dans le cadre du projet triennal AZETEC en Alberta (2019-2022), l'industrie du transport de marchandises teste actuellement l'utilisation de piles à hydrogène pour alimenter deux camions lourds faisant le trajet entre Edmonton et Calgary et carburant habituellement au diesel (Lowey, 2019). Bénéficiant ainsi d'une *plus grande puissance de son groupe motopropulseur* comparativement à l'alimentation au diesel, les camions peuvent *tirer des charges plus lourdes* et avoir une *meilleure performance lors des montées et de l'accélération*. On prévoit également des *coûts d'entretien plus faibles* avec l'alimentation par pile à hydrogène.

En France, le groupe de transport Perrenot, œuvrant dans la grande distribution, amorce aussi la conversion énergétique à l'hydrogène avec un premier camion Iveco pour la chaîne de magasins Carrefour prévu pour 2020 et un récent accord conclu avec le constructeur américain Nikola Motors de Phoenix, Arizona, pour la livraison de 10 véhicules à l'hydrogène (Actu-Transport-Logistique, 2019a).

Le modèle *Nikola Two*, dont la production est prévue pour 2022, disposera de 80 kg d'hydrogène pour une autonomie de 800 à 1 200 km selon le poids du chargement et fournissant 3 000 KWh d'énergie, soit environ trois fois plus qu'un camion Tesla. L'entreprise *Nikola Motors*, dont le carnet de commandes prévoit déjà 13 000 camions, envisage d'ailleurs de mettre en place un réseau de 700 stations de recharge à travers les États-Unis et le Canada d'ici 2028 (O'Dell, 2019).

Le géant de la bière Anheuser-Busch a annoncé en août 2019 une commande de 800 camions Nikola pour assurer la livraison de sa marchandise à l'intérieur des États-Unis (Fehrenbacher, 2019). L'entreprise veut réduire les émissions de CO₂ dans sa chaîne d'approvisionnement du quart d'ici 2025 ; environ 10 % de ces émissions proviennent du transport.

En 2019, le constructeur coréen Hyundai a conclu une entente avec un fournisseur d'énergie Suisse (*H₂ Energy*) pour la commercialisation de

1 600 camions à pile à hydrogène d'ici 2025 dans ce pays (Actu-Transport-Logistique, 2019b). On prévoit louer une bonne partie de ces camions à l'Association *H₂ Mobility Suisse* qui comprend les principaux pétroliers suisses, des entreprises de transport et logistique, ainsi que des acteurs de l'industrie et de la grande distribution. *H₂ Energy* sera chargé de la mise en place des stations de recharge et de la commercialisation des camions.

Des camions alimentés à l'hydrogène sont en opération dans plusieurs pays dont la Norvège, la Suisse et les Pays-Bas (IEA, 2017). L'entreprise Asko – le plus important commerçant en gros de biens de consommation de la Norvège – a commandé en 2017 à la multinationale suédoise Scania quatre camions de 27 tonnes propulsés à l'hydrogène produit localement par énergie solaire ; le système de piles à combustible est fourni par l'entreprise canadienne Hydrogenics (Scania, 2019).

Par ailleurs, le géant Cummins, spécialisé dans les moteurs de camions, a annoncé à la fin juin 2019 qu'il allait acquérir 80 % des parts de Hydrogenics (BusinessWire, 2019).

L'Agence française de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) a signé en juin 2019 une entente de partenariat de trois ans avec le Québec (via Transition Énergétique Québec) portant sur les innovations technologiques et les applications liées à l'hydrogène.

D'autres expérimentations avec les camions à l'hydrogène ont lieu dans les marchés analysés de façon détaillée plus loin. C'est notamment le cas du port de Los Angeles en Californie.

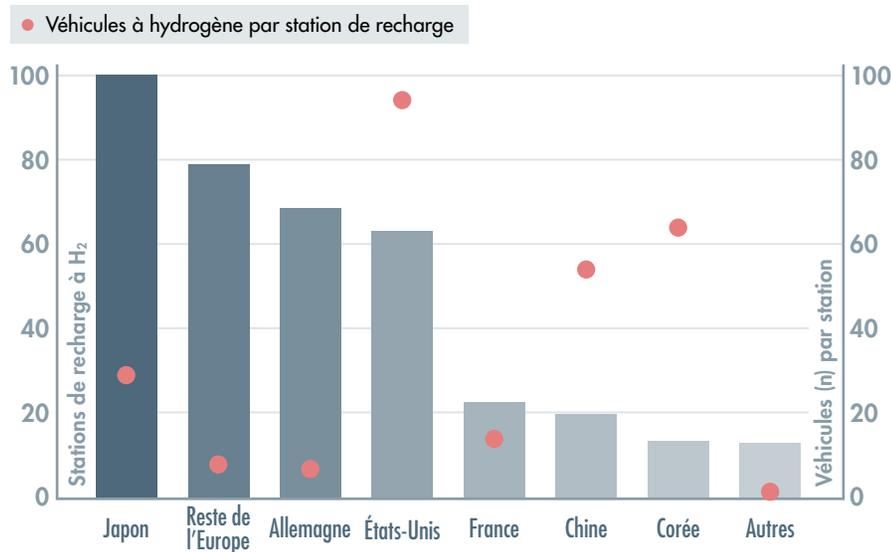


4.4 Stations de recharge

Un des facteurs importants de la réussite du déploiement des véhicules à pile à hydrogène est la mise en place de stations de recharge pour le réapprovisionnement sur l'ensemble du territoire.

Les données les plus récentes indiquent qu'à la fin de 2018, 381 stations de recharge seraient en opération dans le monde, principalement au Japon (100), suivi de l'Allemagne (69) et des États-Unis (63), principalement en Californie (IEA, 2019). Douze stations sont en construction dans le corridor New York – Boston (Zurschmeide, 2018). Un petit pays comme le Danemark disposait de 11 stations en 2017 et en avait une autre en préparation ; le pays est considéré comme celui disposant du réseau d'hydrogène le plus complet (Isenstadt et Lutsey, 2017).

FIGURE 12
Stations de recharge à l'hydrogène par pays, 2018

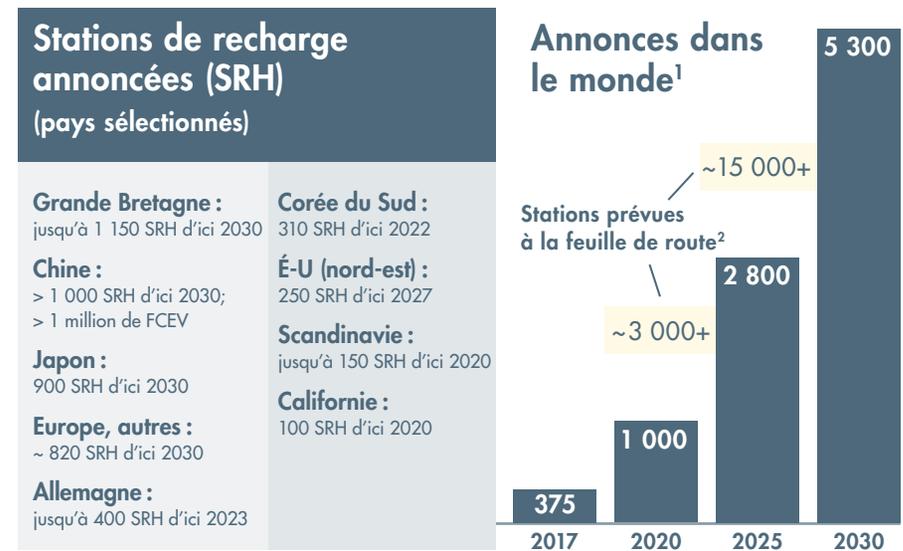


Source: Advanced Fuel Cells, 2019.

En Grande-Bretagne, on prévoit ouvrir 65 stations d'ici 2020 et 1 150 à travers le pays d'ici 2030 (UK H₂ Mobility, 2013). De nouvelles stations de recharge sont planifiées pour l'Allemagne (29), les Pays-Bas (17), la France (12), le Canada (7), la Corée du Sud (27) et la Chine (18) (GlobeNewsWire, 2019). Le Hydrogen Council (2017a) vise la cible de 3 000 stations sur la planète d'ici 2025, ce qui serait suffisant pour fournir de l'hydrogène à 2 millions de véhicules.

Deux stations sont maintenant en opération en Colombie-Britannique et quatre autres y ouvriront d'ici la fin de 2020 ; deux stations sont prévues pour la région du grand Toronto et une à Montréal (Vorano, 2019).

FIGURE 13
Plus de 5 000 stations de recharge à l'hydrogène ont été annoncées dans le monde



1 Annonces pour pays/régions sélectionnés : Californie, É-U (nord-est), Allemagne, Danemark, France, Pays-Bas, Norvège, Espagne, Suède, GB, Dubai, Chine, Japon, Corée du Sud

2 Nombre équivalent de stations à haute capacité (1 000 kg par jour)

Source: Hydrogen Council, 2017b.

Plusieurs constructeurs automobiles (Toyota) et de camions (Nikola Motors) sont aussi activement impliqués dans le déploiement des stations de recharge. Le coût d'investissement pour la mise en place d'une station est élevé. On l'estime actuellement à 0,6 à 2 millions de dollars américains pour de l'hydrogène à une pression de 700 bar et à 0,15 à 1,6 million pour de l'hydrogène à 350 bar et ce, pour des stations dont la capacité va de 50 kg de H₂ par jour (estimé inférieur) à 300 kg de H₂ par jour (estimé supérieur) (IEA, 2019). Selon nos entrevues, il semblerait qu'il soit difficile de construire une station pour moins de 2,5 millions.

À Québec, la compagnie Harnois Énergies opère une nouvelle station de recharge où elle produit l'hydrogène sur place par électrolyse. Cela lui permet de réaliser des économies sur les coûts de livraison qui sont relativement élevés par kg d'hydrogène. Il faut cependant mentionner que l'investissement initial requis pour aménager de telles installations est très élevé. Ce sont surtout les coûts liés à l'électrolyseur, au stockage et au compresseur qui expliquent la facture d'environ 5 millions \$ pour de telles installations. De ce montant, les coûts pour la pompe distributrice ne représentent qu'environ 200 000 \$. En ajoutant les frais d'aménagement de 1 million \$, on arrive à un total de près de 6 millions \$ comme investissement requis pour une telle station dont la capacité s'élève à 200 kg/jour. Pour rentabiliser un tel investissement, les deux niveaux de gouvernement (fédéral et provincial) offrent des subventions totalisant près de 4 millions \$, soit 1M\$ du fédéral et 2,9M\$ du Québec.

Au-delà des coûts, un des défis dans les villes denses comme celles de l'Europe est de trouver de l'espace disponible pour l'implantation des stations de recharge et d'en négocier l'usage avec les autorités municipales ou les propriétaires privés (IEA, 2019). Une autre solution est la mise au point de stations de *recharge mobile*. Plusieurs entreprises comme Air Products aux États-Unis, Wystrach GmbH en Europe ou Hino Australia expérimentent déjà cette approche.



Source: Michel Archambault.



Source: Mehta, 2018.

4.5 Autres applications possibles dans le secteur des transports

L'hydrogène comme source d'énergie peut aussi contribuer à *décarboniser le transport ferroviaire, le transport maritime et l'aviation*. Depuis 2018, l'entreprise française Alstom teste en Allemagne deux trains propulsés à l'hydrogène (Hydrails) dont l'un sur la ligne Cuxhaven-Buxtehude dans le nord du pays (Ruf et al., 2017). Selon Hydrogenics, les tests ont été concluants et le carnet de commandes continue de se remplir. Ces trains sont particulièrement prometteurs là où les voies ne sont pas électrifiées. Ils peuvent parcourir près de 1 000 km sans recharge. Chaque train utilise des piles à combustible de la société canadienne Hydrogenics et peut transporter près de 300 passagers et atteindre une vitesse de 140 km à l'heure. Le sujet sera couvert de façon détaillée plus loin dans la section sur l'Allemagne.

Les Allemands ont par ailleurs mis au point un avion électrique à l'hydrogène dans le but de concevoir un avion de transport régional de 19 places à zéro émission. Le HY4 utilise d'abord une pile au lithium afin de répondre à la consommation importante du décollage, puis en vol, la pile à combustible prend le relais. L'appareil est doté d'une autonomie de 750 à 1000 km avec une vitesse de croisière de 145 km/h. Un premier essai en vol a eu lieu en 2016 (Goudet, 2016). Les entreprises Airbus et Siemens ainsi que 20 universités sont derrière ce projet.

Aux États-Unis, la NASA travaille en ce moment avec des ingénieurs de l'Université de l'Illinois à la mise au point d'un avion de passagers à l'hydrogène (Ecott, 2019). On souhaite utiliser de l'hydrogène liquide plutôt que gazeux afin d'éviter d'avoir recours à des réservoirs de stockage pressurisés.



Source : Alstom, site web, 2019.

4.6 Applications dans l'industrie

Les applications de l'hydrogène en milieu industriel sont multiples. En 2018, l'industrie utilise déjà 55 millions de tonnes d'hydrogène comme matière première et l'hydrogène est lui-même un sous-produit des procédés industriels (Mehta, 2018). De plus, l'hydrogène est couramment utilisé pour alimenter plusieurs types d'appareils.

En Alberta, les appareils de manutention d'un centre de distribution de Walmart sont équipés de piles à hydrogène. Les chariots élévateurs et les transpalettes utilisent à cette fin de l'hydrogène produit par Air Liquide au Québec et des unités plug power Gen Drive alimentées par des piles à combustible de la société Ballard, permettant ainsi une réduction significative des coûts d'opération et des émissions de GES (Natural Resources Canada, 2019). Ce type d'application est très utile à l'intérieur des usines et des entrepôts car cela évite de contaminer l'environnement interne avec les polluants résultant de l'usage de moteurs à combustion ; la pollution sonore est aussi diminuée (Shell, 2017).

En Ontario, deux centres de distribution de Canadian Tire utilisent des chariots élévateurs alimentés à l'aide de piles à hydrogène Nuvera, de l'entreprise américaine *Nuvera Fuel Cells* (Nuvera Fuel Cells, 2017). Aux États-Unis, plus de 20 000 chariots élévateurs étaient alimentés à l'hydrogène à la fin de 2018 (energy.gov, 2018).

L'hydrogène est aussi utilisé habituellement dans les processus de l'industrie pétrochimique et l'industrie chimique pour la production du méthanol et d'autres composés chimiques servant dans les peintures, les fibres synthétiques ou les plastiques, dans l'industrie électronique, dans l'agriculture, notamment pour la production de l'ammoniac (NH_3) servant de fertilisant, de même que dans l'industrie alimentaire où il sert entre autres au processus d'hydrogénation des huiles végétales (IEA, 2017 ; Shell, 2017).

Dans le nord du Québec, un projet minier (Glencore's Raglan Mine) utilise l'énergie éolienne pour produire de l'hydrogène ensuite stockée sur le site même en vue de soutenir les opérations de la mine afin de remplacer le diesel (Natural Resources Canada, 2019).

4.7 Comparaison véhicule à batterie électrique (BEV) et véhicule à pile à hydrogène (FCEV)

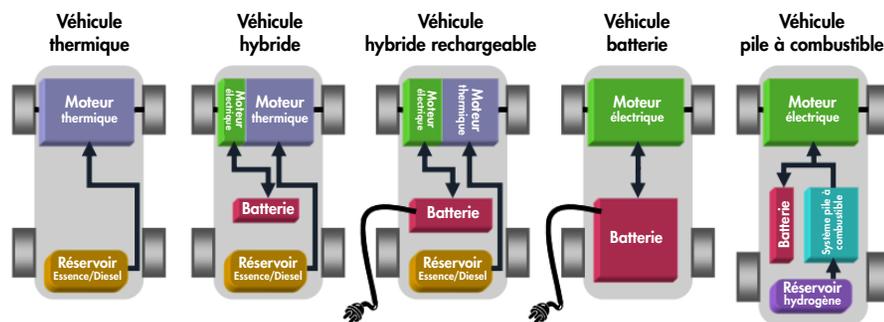
Les deux technologies ne sont pas en compétition mais complémentaires. Le choix ne repose pas uniquement sur le coût mais également sur d'autres facteurs tels que la performance, la flexibilité, la commodité et les avantages environnementaux.

L'hydrogène peut produire *plus d'énergie par unité de masse* qu'une batterie électrique, ce qui permet à un véhicule muni d'une pile à hydrogène de parcourir une *plus grande distance sans recharge* et nécessite donc moins d'infrastructures de recharge. De plus, *la recharge est plus rapide*, ce qui permet aussi à la station de recharge d'accommoder plus de véhicules dans un intervalle de temps donné (Staffell et al., 2019).

Par contre, l'utilisateur d'un véhicule électrique mu par une pile au lithium n'a pas à se rendre nécessairement à une station de recharge car il peut faire le plein chez lui, au travail ou dans un centre commercial alors qu'il est stationné.

Un véhicule à l'hydrogène dispose d'une plus faible efficacité énergétique qu'un véhicule électrique à batteries, mais l'hydrogène stocké à bord possède une densité énergétique supérieure pour un même poids comparativement à la batterie, ce qui rend la propulsion à l'hydrogène plus appropriée pour les déplacements de longue distance et les véhicules plus lourds. Les réservoirs d'hydrogène et les piles à combustible pèsent moins que les batteries, ce qui en fait un avantage au plan économique (Hydrogen Council, 2017b).

FIGURE 14
Les différentes technologies de véhicules électriques



Source: Priem, 2017.

Avantages d'un véhicule à pile à hydrogène (Air Liquide, 2019b) :

- 500 km d'autonomie
- 5 minutes de temps de recharge
- Zéro émission (CO₂, particules, bruit)

La durée de vie des batteries électriques est affectée par plusieurs facteurs dont le climat (températures très froides), la surcharge, les taux élevés de charge/décharge ; ces facteurs ne viennent pas handicaper les véhicules à l'hydrogène, qu'ils soient à réservoir ou à pile (Staffell et al., 2019). Contrairement aux batteries, la performance des piles à hydrogène n'est pas diminuée dans le temps par le cycle de décharge/recharge ; la pile continue à produire de l'électricité aussi longtemps qu'elle est alimentée en hydrogène. De plus, selon Hydrogenics, contrairement aux batteries, les piles à combustibles utilisent très peu de métaux rares et la majorité des matériaux sont aisément recyclés.

TABLEAU 1
Performance comparée des différents modes de propulsion

	Moteur à combustion interne	Pile à combustible	Batterie électrique
Coût d'investissement	\$	\$\$\$	\$\$
Coût du carburant	\$\$	\$\$\$	\$
Coût d'entretien	\$\$\$	\$	\$
Besoins en infrastructures	\$	\$\$\$	\$\$
Émissions polluantes	•••	•	•
Efficiency	+	++	+++
Autonomie	+++	+++	+
Vitesse de recharge	+++	+++	+
Durée de vie	+++	+++	++
Accélération	++	+++	+++

Source: Staffell et al, 2019.

5. Les technologies actuelles et en développement

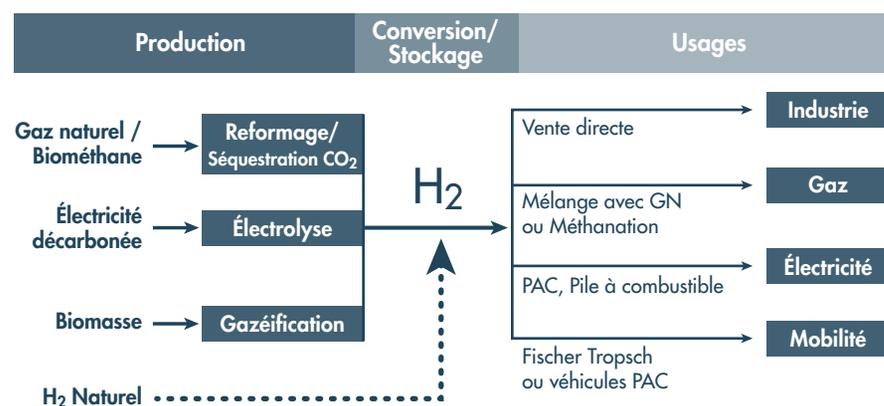
5.1 La production de l'hydrogène

Les modes de production actuels

Il existe plusieurs procédés pour la production de l'hydrogène; ils varient selon la source d'énergie utilisée (Rosen et Koochi-Fayegh, 2016 ; Singh et al., 2015 ; Sinigaglia et al., 2017 ; Staffel et al., 2019). Parmi les principaux, mentionnons :

- 1. Le reformage du gaz naturel par la vapeur :** sous l'action de la vapeur d'eau et de la chaleur et en présence d'un catalyseur, les molécules du méthane (CH_4) se séparent pour former du dihydrogène (H_2) et du dioxyde de carbone (CO_2). C'est le procédé le plus couramment utilisé et c'est l'option la moins polluante parmi les combustibles fossiles.
- 2. L'électrolyse de l'eau :** un courant électrique passé entre deux électrodes plongées dans l'eau à haute température dissocie la molécule d'eau pour mener à l'obtention de dioxygène (O_2) et de dihydrogène (H_2). Le procédé nécessite de l'électricité mais n'importe quelle source électrique peut être utilisée pour produire l'hydrogène (énergie hydroélectrique, solaire, éolienne, nucléaire).
- 3. La gazéification :** lors de la combustion du charbon, de la biomasse ou des résidus pétroliers lourds à température et pression très élevées, les gaz libérés se reforment pour donner du gaz de synthèse (syngas) composé de dihydrogène (H_2) et de monoxyde de carbone (CO).
- 4. L'oxydation partielle :** c'est la combustion incomplète d'hydrocarbures portés à très haute température pour produire du gaz de synthèse. Cette méthode réalisable avec ou sans catalyseur s'applique aux résidus pétroliers lourds et au charbon. Le procédé est plus souple que le reformage car il permet l'utilisation d'une plus grande variété de combustibles et le processus est plus rapide sans nécessiter l'ajout de chaleur externe. L'hydrogène obtenu par ce procédé est cependant en faible concentration comparativement au reformage du gaz naturel.

FIGURE 15
La chaîne hydrogène simplifiée : de la production aux usages



Source : IFP Énergies nouvelles, 2019.

Le reformage par la vapeur serait le procédé le moins coûteux et doté de la plus grande efficacité énergétique alors que la gazéification de la biomasse aurait la meilleure exergie (grandeur mesurant la quantité d'une énergie), tandis que la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire aurait le plus faible potentiel de réchauffement global (Sinigaglia et al., 2017).

D'après un examen de la littérature basé sur l'analyse du cycle de vie réalisé par Bhandari et al. (2014), le procédé d'électrolyse à partir de l'énergie hydroélectrique ou éolienne constituerait une des meilleures technologies de production de l'hydrogène, notamment en raison des faibles potentiels de réchauffement climatique et d'acidification.

Étant donné les forces et les faiblesses de chaque procédé, il y a un compromis à faire selon les coûts de production, l'efficacité énergétique et les impacts environnementaux. Les sources d'énergie comme le gaz naturel, le charbon et les produits pétroliers produisent de l'hydrogène à faible coût mais avec beaucoup d'impacts négatifs. Ces impacts sont amoindris lorsqu'on procède à la capture et au stockage du CO₂. Actuellement, les coûts de production à partir de sources d'énergie renouvelable sont élevés. Ainsi, produire une unité d'hydrogène à partir de l'eau requiert quatre fois plus d'énergie qu'à partir d'hydrocarbures.

TABEAU 2
Efficacité et consommation d'énergie pour différents procédés de production d'hydrogène (données combinées de plusieurs études)

	Efficiéce (pouvoir calorique inférieure)	Consommation d'énergie (kW h par kgH ₂)
Reformage du méthane	72 % (65-75 %)	46 (44-51)
Électrolyse	61 % (51-67 %)	55 (50-65)
Gazéification du charbon	56 % (45-65 %)	59 (51-74)
Gazéification de la biomasse	46 % (44-48 %)	72 (69-76)

Source: Staffell et al., 2019.

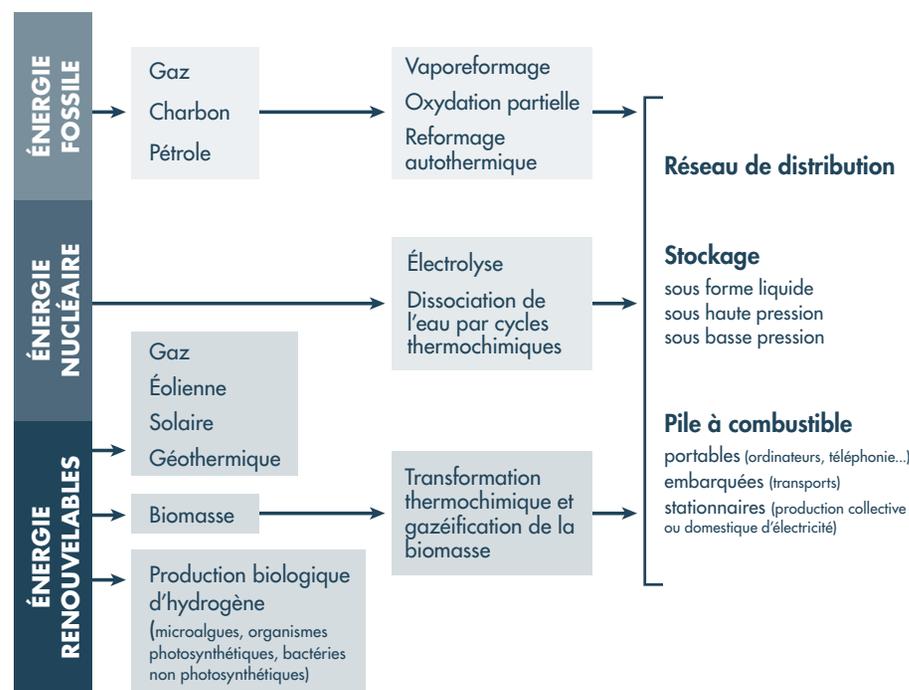
TABEAU 3
Coût de l'hydrogène selon différents procédés de production

Procédés	Coût de l'hydrogène (US \$ par kg)
Reformage du gaz naturel	1,03
Gaz naturel + séquestration de CO ₂	1,22
Gazéification du charbon	0,96
Charbon + séquestration de CO ₂	1,03
Électrolyse d'énergie éolienne	6,64
Gazéification de la biomasse	4,63
Pyrolyse de la biomasse	3,8
Fractionnement thermique de l'eau	1,63
Essence (comme référence)	0,93

Source: Hosseini et Wahid, 2016.

L'électrolyse de l'eau se fait à l'aide d'électrolyseurs et ceux-ci sont de plusieurs types (Brandon et al., 2017). Les électrolyseurs alcalins et les électrolyseurs de type PEM (membrane à échange de protons) sont deux technologies disponibles sur le marché aujourd'hui. Les *électrolyseurs à oxyde solide* sont en développement, mais ils n'ont pas encore été commercialisés (IEA, 2019).

FIGURE 16
La filière hydrogène



Source: Connaissance des énergies, 2015.

Le Département américain de l'Énergie prévoit qu'à court terme le reformage à la vapeur du méthane continuera à être utilisé, mais qu'à moyen terme l'hydrogène sera produit par électrolyse à partir d'énergie éolienne et par gazéification de la biomasse, et qu'à plus long terme, l'électrolyse à haute température et la production basée sur le solaire seront utilisées (US Department of Energy, 2017).

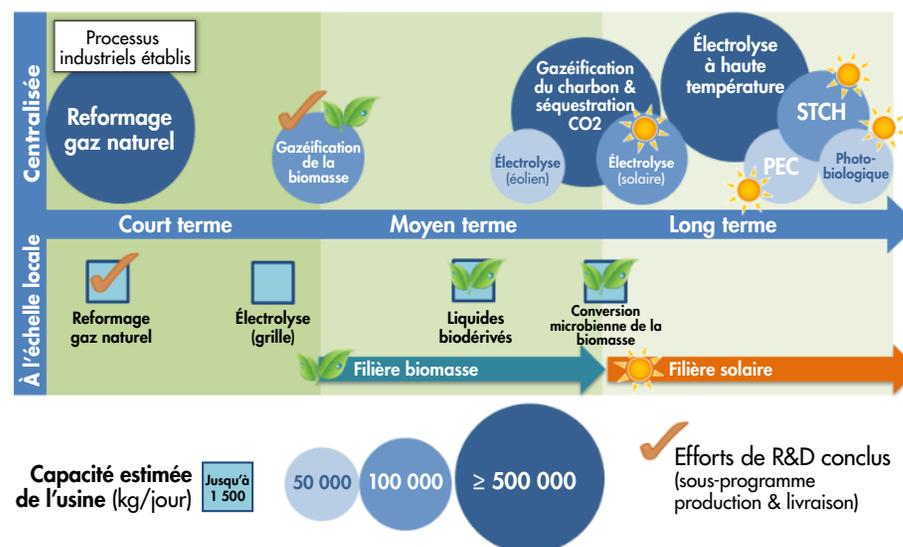
La production d'hydrogène à partir de sources d'énergie non-fossiles continuera vraisemblablement à être basée sur l'électrolyse de l'eau parce que ce procédé s'intègre bien avec les sources renouvelables comme l'hydroélectricité, le solaire et l'éolien (Rosen et Koochi-Fayegh, 2016). On explore cependant la possibilité d'utiliser comme source d'énergie de la chaleur à très haute température plutôt que de l'électricité, trop coûteuse. En ce moment, le coût de production de l'hydrogène par électrolyse est 2 à 3 fois supérieur à celui du reformage du gaz naturel ; selon IFP Énergies nouvelles (2019), l'accès à de l'électricité décarbonée à coût compétitif est nécessaire pour réduire le coût de production par électrolyse.

Les modes de production en développement

La *fragmentation (ou craquage) thermique de l'eau* est aussi vue comme une voie d'avenir pour la production à grande échelle d'hydrogène. Le procédé utilise la chaleur à température très élevée et des produits chimiques pour mener une série de réactions chimiques qui vont décomposer l'eau pour produire de l'hydrogène. Les produits chimiques impliqués sont réutilisés à chaque cycle, formant ainsi une boucle fermée où uniquement de l'eau est consommée.

La *photo-électrolyse* est une autre technologie en développement : ce procédé – qui utilise directement les rayons du soleil comme seul apport d'énergie – consiste à éclairer un photo-catalyseur à semi-conducteur immergé dans l'eau ou un électrolyte aqueux, ce qui a pour résultat de dissocier les molécules d'eau en oxygène et en hydrogène sous l'effet du bombardement de photons. Le coût des matériaux requis est actuellement élevé.

FIGURE 17
Les voies de la production de l'hydrogène



Source : US Department of Energy, 2017.

En 2019, Air Liquide a investi dans la plus grande unité d'électrolyse à membrane échangeuse de protons du monde pour la production d'hydrogène décarboné. Situé à Bécancour au Québec, l'électrolyseur de 20 MW (ou 8 000 kg/jour), doté de la technologie de *Hydrogenics*, permettra d'assurer l'approvisionnement des marchés industriels et de la mobilité d'Air Liquide en Amérique du Nord. Cette unité de production devrait réduire l'empreinte carbone par rapport à la production traditionnelle d'hydrogène, économisant près de 27 000 tonnes de CO₂ par an.

(Air Liquide, 2019a)

La *production biologique de l'hydrogène* (par fermentation ou par biophotolyse) est aussi envisagée à partir de plusieurs substrats, qu'il s'agisse des déchets ménagers, des algues, de la biomasse ou même des eaux usées (Menia et al., 2019). Elle est moins énergivore et plus respectueuse de l'environnement que les procédés conventionnels. Le bio-hydrogène peut être produit par des organismes autotrophes ou hétérotrophes. Dans le premier cas, l'énergie solaire est convertie en hydrogène par des réactions photosynthétiques via des micro-organismes photosynthétiques (micro-algues ou bactéries photosynthétiques). Dans le second cas, les substrats organiques sont transformés en composés organiques plus simples avec production simultanée de H_2 ; il existe deux types de conversion hétérotrophes : la photo-fermentation, impliquant des bactéries photosynthétiques, et la fermentation sombre, impliquant des bactéries anaérobies.

La *capture et le stockage de CO_2* , lorsque l'hydrogène est produit à partir d'énergies fossiles, permettent de limiter les émissions de GES. La capture consiste à piéger les molécules de CO_2 avant, pendant ou après l'étape de combustion des énergies fossiles afin d'éviter sa libération dans l'atmosphère (connaissance des energies.org, 2019b). Une fois capturé, le CO_2 peut être transporté par pipeline, par bateau ou par camion pour être injecté dans les formations géologiques du sous-sol, permettant sa séquestration sur de longues périodes, voire des siècles.

Lors du transport par pipeline, le CO_2 doit être comprimé pour atteindre un état quasi-liquide; chaque année aux États-Unis, plus de 40 millions de tonnes de CO_2 sont transportées grâce à un réseau de conduites de 4 000 km (Planète énergies, 2015). Par camion ou par navire, le CO_2 est transporté sous forme liquide à une pression de 15 bar et une température de moins 30°C. Ensuite, le CO_2 peut être stocké dans les aquifères salins profonds, dans les réservoirs d'hydrocarbures ou dans le gisement de pétrole lui-même. On estime à 800 mètres la profondeur minimale dans le sous-sol terrestre pour le stockage du CO_2 .

5.2 Le stockage de l'hydrogène

Deux aspects du stockage sont à considérer : l'entreposage en vrac et le stockage dans les véhicules. Pour l'entreposage en vrac en vue d'un usage à long terme, les formations géologiques souterraines (telles les cavernes de sel), les aquifères et les puits de pétrole épuisés constitueraient les meilleures options (Brandon et Kurban, 2017 ; IEA, 2019).

Le mode de stockage le plus approprié dépendra du volume d'hydrogène à entreposer, de la durée du stockage, du temps requis pour la décharge et de la disponibilité géographique des différentes options ; ainsi, plusieurs heures de stockage sont requises à une station de recharge alors que des jours ou des semaines de stockage s'avèrent nécessaires pour protéger l'utilisateur contre les décalages possibles entre l'offre et la demande. Une période de stockage encore plus longue peut être requise pour faire le pont dans les changements saisonniers de l'offre et de la demande en électricité (IEA, 2019).

Les principales méthodes de stockage sont *la compression et la liquéfaction*. La compression dans des réservoirs est la technologie la plus utilisée actuellement ; c'est aussi la plus facile et la moins coûteuse (Rivard et al., 2019 ; Sinigaglia et al., 2017). L'hydrogène peut être compressé de quelques dizaines de bar à 350 ou 700 bar pour être acheminé. Des contenants à pression basse (45 bar) ou moyenne (200-500 bar) sont couramment utilisés en industrie, mais des tubes et réservoirs à forte pression (700-1000 bar) sont utilisés pour les stations de recharge et pour les véhicules (Staffell et al., 2019). À 700 bar, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres ; c'est l'approche privilégiée par les constructeurs automobiles (Air Liquide, 2019c). Compte tenu de la pression élevée et de la robustesse requise pour le réservoir, celui-ci doit prendre la forme d'un cylindre, ce qui rend son intégration à l'architecture d'un véhicule plus difficile (Rivard et al., 2019).

Les réservoirs d'hydrogène des stations de recharge ont une plus forte pression que ceux des véhicules afin de permettre une recharge rapide ; l'hydrogène compressé a seulement 15% de la densité énergétique du pétrole, ce qui fait que les stations d'hydrogène requièrent plus d'espace pour la même quantité de combustible (Staffell et al., 2019).

L'hydrogène peut être compressé à froid (au-dessous de $-123,15^{\circ}\text{C}$) ou cryo-compressé (refroidi à près de la température critique de -253°C mais demeure sous forme gazeuse) (Shell, 2017). Une autre option pour le stockage consiste à compresser l'hydrogène liquide en le refroidissant jusqu'au point de fonte ; juste avant qu'il devienne solide, il se transforme en gel (*slush hydrogen*) : il est alors composé d'égale portion d'hydrogène solide et liquide et a une densité de stockage 16% supérieure à celle de l'hydrogène liquide (Shell, 2017).

Le *stockage par liquéfaction* permet d'atteindre une densité volumétrique (0,070 kg/L) supérieure à celle obtenue par la compression (0,030 kg/L) mais néanmoins beaucoup plus faible que celle obtenue par les combustibles fossiles (Sinigaglia et al., 2017). L'hydrogène liquide est stocké à une température de moins 253°C . Un réservoir d'hydrogène liquide doit être isolé parfaitement afin de réduire le transfert de chaleur ; le transfert de chaleur de l'environnement au liquide augmente la pression à l'intérieur du réservoir (Rivard, 2019). Un autre problème posé par la liquéfaction est que 30 à 33% de l'énergie est dépensée pour liquéfier l'hydrogène gazeux (Sinigaglia et al., 2017). La basse température de stockage rend l'hydrogène liquide moins attrayant pour la mobilité ; les réservoirs doivent être bien isolés, donc avoir des parois très épaisses (Rivard et al., 2019). Le risque de fuite n'est pas à négliger car en raison de la petite taille de sa molécule, l'hydrogène peut traverser de nombreux matériaux y compris certains métaux. De plus, il en fragilise certains en les rendant cassants.

Afin d'éviter cette dépense d'énergie, on peut incorporer l'hydrogène dans des molécules plus grosses et facilement transportables sous forme liquide telles que l'ammoniac et les liquides organiques porteurs d'hydrogène (mieux connus sous l'acronyme LOHC : Liquid Organic Hydrogen Carrier). Ces liquides ont une densité de stockage d'hydrogène élevée, permettant une manipulation sûre de l'hydrogène. Ils sont plus faciles à transporter que l'hydrogène mais une étape additionnelle est requise pour le libérer avant la consommation finale, ce qui occasionne de l'énergie et des coûts supplémentaires qui doivent être pris en compte (IEA, 2019).

Le stockage de l'hydrogène sous forme solide – plus particulièrement sous forme d'hydrures métalliques – représente une voie d'avenir intéressante ; il peut ainsi être stocké dans un autre matériau auquel il se lie chimiquement ou peut être absorbé physiquement à des densités supérieures à celle de l'hydrogène liquide (Singh, 2015). Il peut s'agir par exemple de la formation d'hydrures métalliques solides obtenus par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques dont les plus prometteurs sont à base de magnésium et les alanates ; cependant, seule une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux (Air Liquide, 2019b). Néanmoins, la méthode offrirait un stockage sécurisé de l'hydrogène, réversible et doté d'un excellent rendement énergétique (Techniques de l'ingénieur, 2011).

Les chercheurs de la start-up française *HySiLabs* créée en 2015 et soutenue par la Commission européenne ont récemment mis au point *Hydrosil*, un hydrure de silicium (polymère constitué d'atomes de silicium liés chacun à deux atomes d'hydrogène). Le composé est liquide et stable ; il s'affranchit du stockage à haute pression et permet de stocker et transporter sept fois plus d'hydrogène sous forme liquide que sous forme gazeuse (Olivennes, 2018).

Une autre technologie envisagée consiste en l'absorption de molécules d'hydrogène par un matériau poreux comme des microsphères de verre (de 5 à 200 μm de diamètre). Les microsphères de verre offrent deux fois plus de capacité de stockage que les hydrures métalliques par unité de masse et une demie fois leur capacité de stockage par unité de volume (Rosen, 2016). Il existe plusieurs matériaux d'adsorption (procédé physique différent de l'absorption, qui est plutôt un procédé chimique) et les molécules d'hydrogène sont faiblement liées à leur surface, ce qui permet de les relâcher facilement (Sinigaglia et al., 2017).

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide



Source : France Diplomatie, 2016.

5.3 La distribution de l'hydrogène

Tout comme le stockage, la distribution de l'hydrogène jusqu'à l'utilisateur final constitue un élément-clé de la transition énergétique. En raison de sa faible densité, il peut s'avérer onéreux de transporter l'hydrogène sur de longues distances. Il existe plusieurs options de transport selon l'état dans lequel se trouve l'hydrogène (liquide, gazeux, solide), la distance à parcourir et l'ampleur de la demande (Afhyac, 2016; ETSAP, 2014; IEA, 2019; Singh et al., 2015; Sinigaglia et al., 2017; Shell, 2017; Staffell et al., 2019).

1. **Remorques porte-tubes ou remorque conteneur pour le transport de gaz comprimé:** elles ont une capacité maximale de 1 000 kg à 500 bar. Ce mode de distribution est utilisé pour de faibles livraisons à distance rapprochée du site de production de l'hydrogène. Au Canada, des producteurs comme Air Liquide peuvent transporter de 250 à 380 kg par remorque porte-tubes à 180 bar. De plus grandes quantités peuvent être transportées à 450 bar et lorsque l'hydrogène est liquéfié.



Source : Afhyac, 2016.

2. **Camions citernes pour le transport d'hydrogène liquide:** ils ont une capacité de 400 à 4 000 kg d'hydrogène liquide. On peut transporter de plus grands volumes que pour le gaz comprimé. Ils pourraient être utilisés pour alimenter les stations de recharge. Sur de grandes distances, il est plus efficace de transporter l'hydrogène sous forme liquide.

FIGURE 18
Transport de l'hydrogène par la route

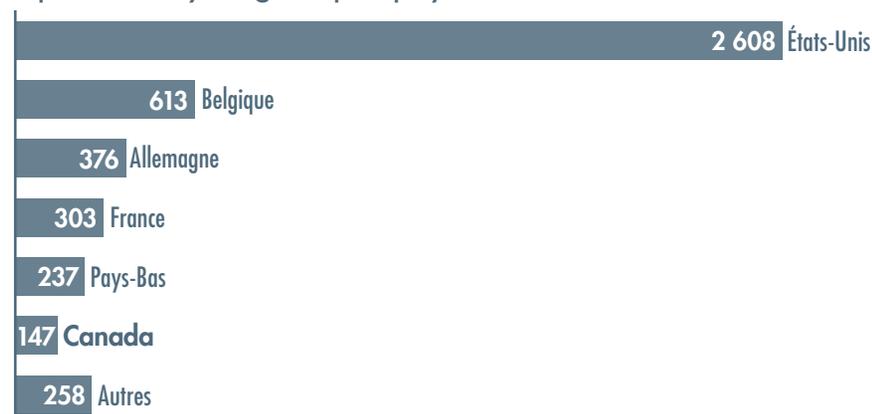


Source : Shell, 2017.

3. Pipelines pour l'hydrogène gazeux : il existe près de 5 000 km de pipelines dans le monde, dont plus de la moitié aux États-Unis. Cela est peu, comparé aux 3 millions de km pour le gaz naturel. Ces pipelines sont habituellement la propriété d'entreprises de production d'hydrogène et servent surtout à alimenter des installations chimiques et des raffineries.

La distribution d'hydrogène sous forme gazeuse par pipeline serait le mode le plus abordable pour transporter de grandes quantités d'hydrogène sur des distances inférieures à 1 500 km. Mais les pipelines requièrent un coût d'investissement initial élevé. Pour le transport d'hydrogène, les pipelines ont un diamètre de 25 à 30 cm et opèrent à une pression de 10 à 20 bar. Ils sont actuellement faits d'acier mais auraient une meilleure performance et un plus faible coût s'ils étaient de polymère renforcé de fibres. Il n'en reste pas moins que l'énergie requise pour compresser et pomper l'hydrogène est considérable. La durée de vie des pipelines à l'hydrogène est longue (50 à 100 ans).

FIGURE 19
Pipelines d'hydrogène par pays en 2017 (en kilomètres)



Source : Shell, 2017.

4. Pipeline de gaz naturel dans lequel on injecte de l'hydrogène en faible quantité : l'hydrogène peut aussi être transporté via le réseau de pipelines du gaz naturel en injectant jusqu'à 20% du volume dans ce dernier (en Allemagne, la limite a été fixée à 10% afin de réduire le risque de dommages aux installations de gaz naturel). On estime qu'aux États-Unis, 5 à 15% d'hydrogène pourrait être injecté dans le gaz naturel sans préjudice pour l'infrastructure des pipelines ou pour l'utilisateur final. Des technologies de séparation et de purification ont été mises au point pour extraire l'hydrogène ainsi transporté.

La conversion des pipelines de gaz naturel en pipelines dédiés au transport d'hydrogène une fois la vie utile des premiers terminée a aussi été suggérée. Le stockage de l'hydrogène dans des molécules plus grosses et facilement transportables sous forme liquide telles que l'ammoniac ou les liquides organiques porteurs d'hydrogène peut aussi servir à la distribution, notamment pour le transport outre-mer (IEA, 2019). Il serait également possible de transporter l'hydrogène sous forme d'hydrure métallique.

5. Transport par bateau : c'est ce que prévoit faire le Japon en important de l'hydrogène liquéfié produit en Australie à partir de lignite. La Norvège et la Colombie-Britannique se sont aussi montrées intéressées par cette méthode d'exportation de leur hydrogène au Japon. La question est traitée plus longuement dans la section sur le Japon.

6. Transport par train : le transport par train de l'hydrogène serait aussi possible mais le sujet est très peu documenté.

Quel que soit le mode de distribution utilisé, il faut tenir compte des coûts de conversion et reconversion de l'hydrogène, tout autant que des coûts de stockage et de distribution et prendre en considération les infrastructures existantes, de même que les questions de sécurité. Dans plusieurs cas, l'ampleur de ces coûts et des défis rencontrés fera ressortir qu'il est plus abordable et moins risqué de produire l'hydrogène localement (IEA, 2019).

5.4 L'hydrogène pour la propulsion des véhicules

Actuellement, deux technologies ont recours à l'hydrogène pour la propulsion des véhicules. L'hydrogène peut alimenter directement des moteurs thermiques ou bien permettre de produire de l'électricité dans des piles à combustible adaptées aux véhicules électriques.

1. La pile à combustible

Il existe plusieurs modèles de piles à combustible, selon le type d'électrolyte qu'elles utilisent. La pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC) serait le modèle privilégié pour les applications mobiles. Elle opère à basse température (entre 60 et 80°C), ce qui fait qu'elle ne prend pas de temps à se réchauffer et à générer de l'électricité (Chabannes, 2019; CHFCA, 2016). C'est aussi la plus petite et la plus légère des piles.

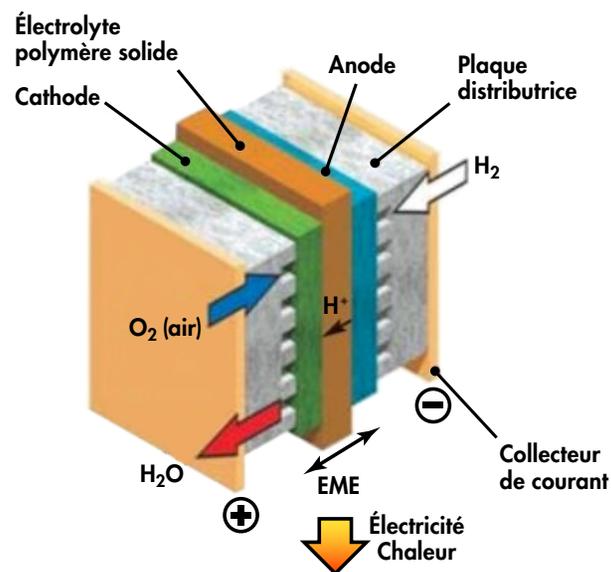
La pile à combustible fonctionne à l'inverse de l'électrolyse. L'hydrogène injecté sur l'anode se dissocie en protons et électrons; ces derniers ne peuvent traverser l'électrolyte et passent par le circuit électrique externe. Les protons quant à eux traversent une membrane sélective ultrafine (l'électrolyte) et viennent se recombinaison avec l'air injecté sur la cathode en donnant de l'eau, de la chaleur et de l'électricité (Chabannes, 2019). C'est cette électricité qui sert à faire fonctionner un moteur. La pile à combustible a besoin d'une source externe pour l'alimenter car elle est un convertisseur d'énergie et non une source d'énergie comme la batterie. C'est ici qu'entrent en jeu les réservoirs d'hydrogène placés dans le véhicule.

La membrane échangeuse de protons (l'électrolyte) doit être hydratée pour fonctionner et rester stable. La pile nécessite la présence d'un catalyseur fait de nanoparticules de platine; celui-ci doit être rugueux et poreux de façon à offrir le maximum de surface à l'hydrogène ou à l'oxygène. Le catalyseur de platine est coûteux et très sensible à l'empoisonnement au monoxyde de carbone, ce qui oblige à réduire la présence de ce dernier si l'hydrogène en contient.

2. Le moteur à hydrogène

Il s'agit d'un moteur à combustion interne qui utilise l'hydrogène comme carburant. Mais les propriétés de combustion de l'hydrogène diffèrent de celles de l'essence et du diesel. Il brûle plus rapidement, ce qui nécessite d'adapter la forme de la chambre de combustion et de calibrer le moment de l'explosion afin d'éviter une combustion anormale. Le dihydrogène (H_2) réagit avec le dioxygène (O_2), créant ainsi une explosion (libération d'énergie) qui pousse sur le piston. La combustion d'un kg d'hydrogène libère trois fois plus d'énergie que celle d'un kg d'essence mais l'hydrogène nécessite un volume supérieur. Des ajustements sont nécessaires selon que l'hydrogène est utilisé sous forme gazeuse ou liquide. Un autre procédé consiste à injecter de l'hydrogène dans l'essence conventionnelle et le diesel de façon à réduire les émissions de CO_2 (Gurz et al., 2017).

FIGURE 20
Principe de fonctionnement de la pile à combustible



Source: Voiture électrique populaire, 2019.

3. Le réservoir à hydrogène

L'hydrogène est stocké dans un réservoir sous très haute pression (700 bar) dans le véhicule. Pour une autonomie d'environ 500 km, le réservoir contient 5 kg d'hydrogène dans un volume de 125 litres et pèse environ 130 kg. Cela s'ajoute au poids du module de piles à combustible (environ 100 kg) (Chabannes, 2019). Le réservoir est renforcé de fibre de carbone avec un revêtement intérieur plastique, ce qui assure la pureté de l'hydrogène nécessaire pour alimenter les piles à combustible (Mehta, 2018).

Le coût des piles à combustible de type membrane échangeuse de protons (PEMFC) et leur durée de vie sont des éléments qui peuvent limiter leur compétitivité en ce moment. À cela s'ajoutent la rareté et le coût du platine utilisé comme catalyseur (Chabannes, 2019). On s'attend néanmoins à ce que les avancées technologiques en vue d'optimiser le design de la pile à combustible et que les efforts pour réduire l'utilisation du platine combinés aux économies d'échelle générées par une production plus importante viennent réduire les coûts actuels (IEA, 2019). On vise des cibles de 30 à 40 dollars américains pour la pile à combustible avec une durabilité de 5 000 à 8 000 heures (IEA, 2017).

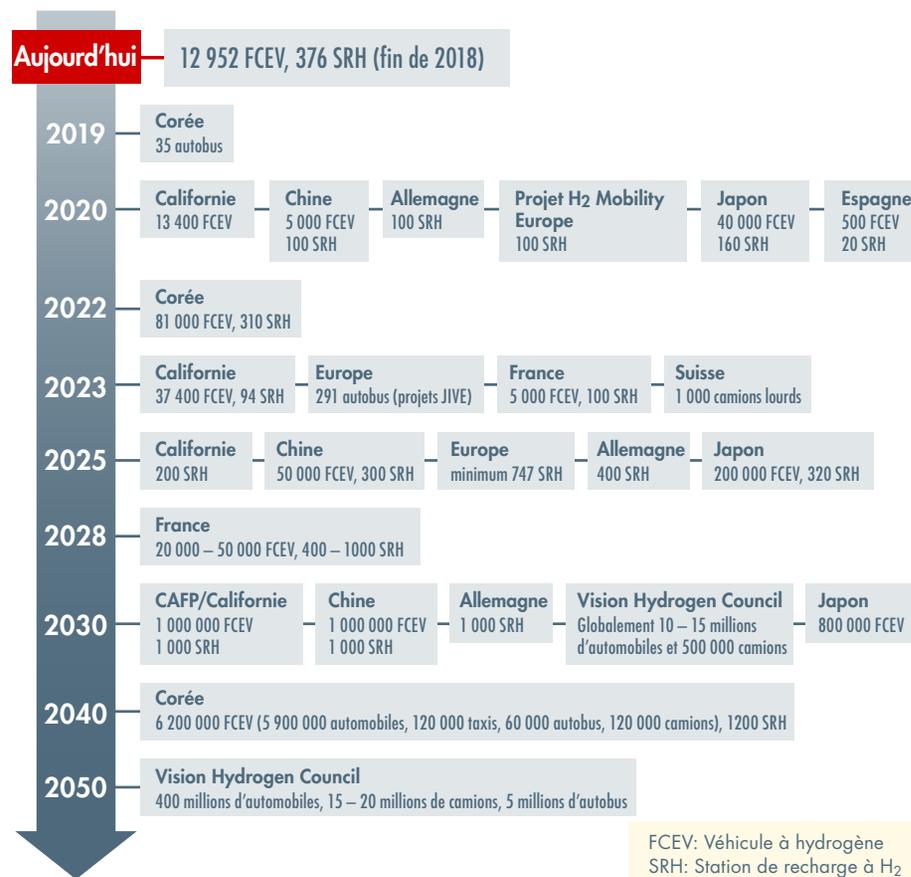
6. Marchés extérieurs florissants

Le déploiement de l'hydrogène dans le secteur des transports s'est accéléré ces dernières années un peu partout sur la planète, tel qu'illustré dans les trois graphiques suivants ayant trait au nombre de véhicules en circulation et au nombre de stations de recharge ouvertes à la fin de 2018 ainsi qu'aux perspectives de développement dans plusieurs pays.

Cette section examine plus en détail la situation dans quatre pays ou État parmi les plus avancés dans le domaine : la Californie, la Chine, le Japon et l'Allemagne. On peut dégager quelques constats généraux de cet examen :

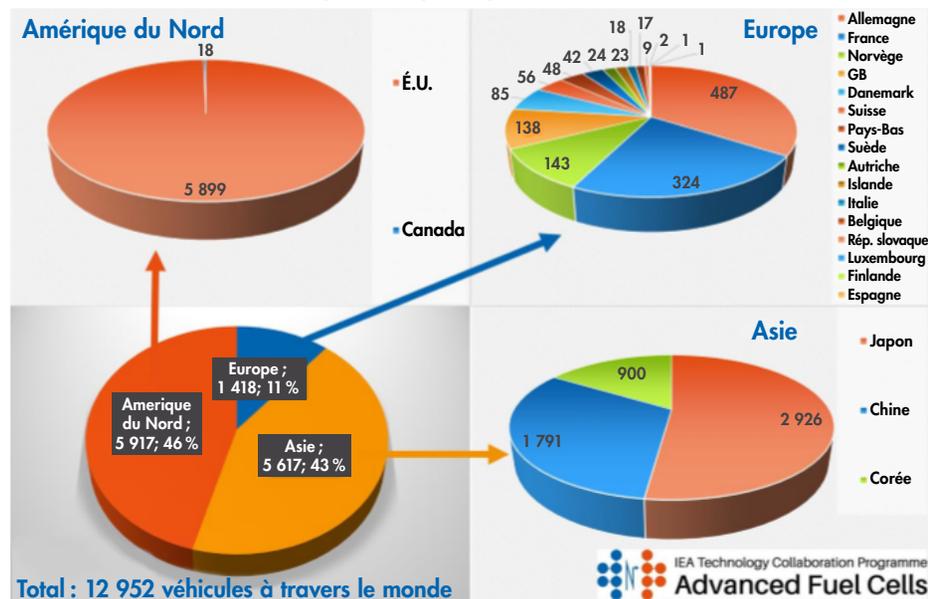
- 1) la volonté tangible de chacun de diminuer drastiquement ses émissions de GES à court, moyen et long terme afin de se conformer aux Accords de Paris sur les changements climatiques ;
- 2) le désir d'opter de plus en plus pour des énergies renouvelables ;
- 3) l'investissement massif des gouvernements (fédéral et régionaux) sous la forme de financement de la R&D, de partenariats public-privé, d'aide aux entreprises pour le développement de nouvelles technologies et de mise en place de stations de recharge et d'incitatifs à l'achat de véhicules à pile à hydrogène ;
- 4) le souhait de profiter de cette nouvelle opportunité économique pour les marchés intérieur et extérieur ;
- 5) l'importance des partenariats (et consortiums) d'entreprises de façon à mettre à profit l'expertise de chacune d'elles et de faire plus de poids en vue d'acquérir des fonds pour la recherche ou le déploiement des technologies ;
- 6) la collaboration avec les entreprises étrangères ;
- 7) l'offre d'incitatifs à l'achat de véhicules (mis à part l'Allemagne) ;
- 8) le souci de s'attaquer du même coup au problème de pollution de l'air et à ses effets sur la santé ;
- 9) et plus particulièrement dans le cas du Japon, la volonté d'accéder à une plus grande auto-suffisance énergétique.

FIGURE 21
Cibles, visions et projections annoncées par pays jusqu'en 2050



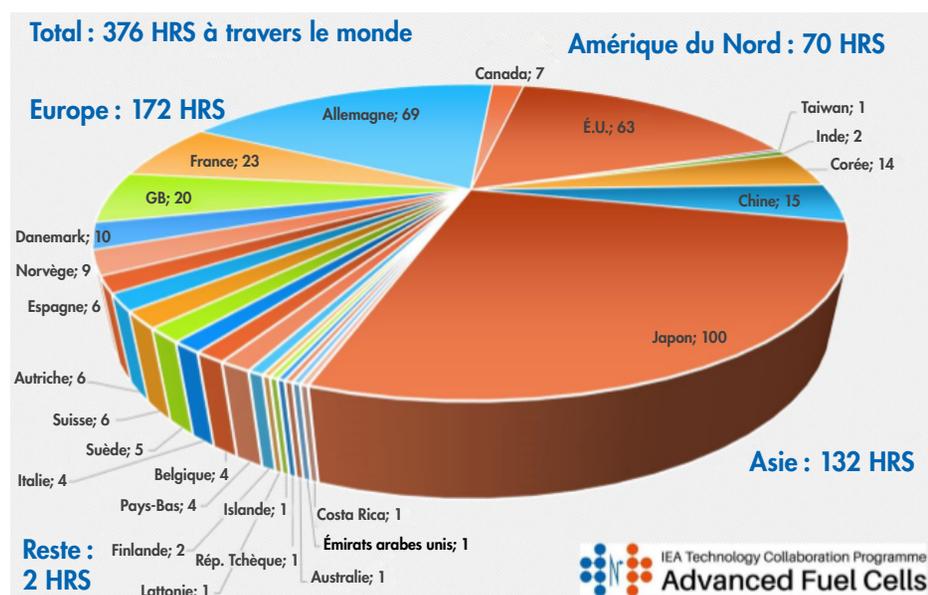
Source : Advanced Fuel Cells, 2019.

FIGURE 22
 Nombre de véhicules à pile à hydrogène dans le monde, fin 2018



Source : Advanced Fuel Cells, 2019.

FIGURE 23
 Nombre de stations de recharge à l'hydrogène dans le monde, fin 2018



Source : Advanced Fuel Cells, 2019.

6.1 Californie

Aux prises avec des taux élevés de smog en milieu urbain et soucieuses de réduire les émissions de GES associées au transport (soit 41 % de l'ensemble des émissions en Californie), les autorités californiennes ont entrepris un vaste programme de conversion énergétique aux véhicules à zéro émission suite à l'adoption du règlement *California Zero-Emission Vehicle*. En janvier 2018, le gouverneur de l'État a signé un décret (B-48-18) visant à promouvoir le déploiement de 5 millions de véhicules à zéro émission d'ici 2030 et la mise en place de 200 stations de recharge d'ici 2025. Beaucoup d'acteurs du public et du privé sont impliqués dans cette transition.

Activement impliqué dans la transition énergétique vers l'hydrogène depuis 1999, le partenariat public/privé *California Fuel Cell Partnership* (CaFCP) a élaboré une vision dans laquelle il prévoit un million de véhicules à pile à hydrogène sur la route en 2030 et un réseau de 1 000 stations de recharge qui devraient permettre de couvrir la grande majorité des résidents californiens, dont 7,66 millions des 9,15 millions de résidents des régions défavorisées.

TABEAU 4

Couverture potentielle des communautés défavorisées (sur le plan économique, sanitaire et environnemental) par un réseau de 1 000 stations de recharge à l'hydrogène en 2030

Régions	Stations dans les futures régions prioritaires	Population des régions prioritaires	Population à 15 minutes de route	% population à 15 minutes de route	% population couverte
Non défavorisées	403	17 704 848	26 199 288	70,3%	75%
Défavorisées	597	7 663 418	8 883 966	23,8%	25%
Total	1 000	25 368 266	35 083 254	94,1%	100%

Source: adapté de California Air Resources Board, 2018.

Après avoir documenté le processus d'évolution de l'adoption de cette nouvelle technologie, le partenariat CaFCP a élaboré une stratégie en trois phases pour développer le marché des véhicules à pile à hydrogène :

1. Stimuler le marché par des programmes gouvernementaux de financement susceptibles d'attirer les investisseurs privés et définir des politiques de long terme pour la mise en place d'infrastructures ;
2. Motiver les consommateurs en proposant des incitatifs à l'achat de véhicules à pile à hydrogène, mettre en place un réseau de stations de recharge et stimuler l'offre d'hydrogène de façon à rendre son prix plus abordable ;
3. Diversifier les applications technologiques basées sur les piles à hydrogène, installer des stations de recharge le long des corridors de transport de marchandises et intégrer la production d'hydrogène et celle d'électricité renouvelable afin d'améliorer l'efficacité du système.

En 2012, le *California Air Resources Board* a adopté une série de règlements, connus sous le nom de *Advanced Clean Cars*, visant à contrôler les émissions des véhicules automobiles.

Pour sa part, la *California Energy Commission* a fourni le financement d'une installation permettant de produire deux tonnes par jour d'hydrogène provenant à 100% de sources renouvelables afin d'alimenter le réseau de stations de recharge (*California Air Resources Board*, 2018). La multinationale *Air Liquide* a décidé d'investir plus de 150 millions de dollars américains pour construire une usine d'une capacité de 30 tonnes d'hydrogène par jour, soit de quoi alimenter 35 000 véhicules à pile ainsi que les 19 stations de recharge de *FirstElement Fuel Inc.*, un acteur majeur de la distribution d'hydrogène avec qui elle a conclu une entente (*Air Liquide*, 2018 ; *Plaza*, 2018) ; la construction doit démarrer au Nevada en 2019 et se terminer en 2022.

Actuellement, entre 37 et 44% de l'hydrogène utilisé dans les transports en Californie est de source renouvelable (*California Hydrogen Business Council*, 2018).

En mai 2018, on comptait 4 819 véhicules à pile à hydrogène sur le territoire et 36 stations de recharge en fonction, auxquelles s'ajouteront 28 autres stations d'ici la fin 2020 et pour lesquelles un financement a déjà été octroyé (California Air Resources Board, 2018). En 2020, ce réseau de 64 stations sera accessible au tiers de la population de Californie dans un rayon de 15 minutes de route. Les stations initiales couvraient la région de Los Angeles mais les autres centres urbains majeurs seront desservis par ces 64 stations (Isenstadt et Lutsey, 2018).

En décembre 2018, le *California Air Resources Board* (CARB) a annoncé un règlement (Innovative Clean Transit) obligeant les nouveaux bus mis sur le marché à être à zéro émission à partir de 2029 et à ce que tous les bus sur la route soient à zéro émission en 2040 (Pocard, 2019). De la sorte, les émissions de GES devraient chuter de 19 millions de tonnes métriques entre 2020 et 2050, soit l'équivalent des émissions de 4 millions d'automobiles. Le règlement oblige aussi les agences de transit à soumettre leur plan de déploiement des bus à l'hydrogène d'ici les 4 ou 5 prochaines années. Trois sociétés de transport en commun opèrent des bus à hydrogène dans leur flotte, bien qu'en faible nombre en ce moment (Natural Resources Canada, 2019).

Pour ce qui est des camions, le port de Los Angeles prévoit déployer 10 camions lourds de classe 8 à l'hydrogène et deux stations de recharge, aidé par un financement provenant à 50% du *California Air Resources Board*; les partenaires du projet incluent *Toyota*, *Shell* et *Kenworth*. Deux autres projets touchent les camions desservant le port de San Pedro Bay à Los Angeles et les camions de livraison de UPS (Natural Resources Canada, 2019).

Parmi les autres acteurs de la transition énergétique, mentionnons le *California Hydrogen Business Council* (CHBC) qui inclut 100 entreprises et agences privées impliquées dans l'hydrogène et qui a pour mission de faire progresser la commercialisation de l'hydrogène dans le secteur de l'énergie afin de réduire les émissions nocives, de même que la dépendance aux énergies fossiles.

L'organisation à but non lucratif Energy Independence Now (EIN) avec le soutien financier de la *Leonardo DiCaprio Foundation* et du *California Hydrogen Business Council* a fait paraître en mai 2018 une feuille de route détaillant une série de recommandations visant à promouvoir la production et l'utilisation de l'hydrogène issu de sources renouvelables (Sampson, 2018).

6.2 Chine

La Chine *n'est pas aussi avancée que ses voisins* le Japon et la Corée du Sud dans le déploiement des véhicules à pile à hydrogène. Contrairement aux autres pays qui ont mis l'accent sur les véhicules personnels et les bus, la Chine cible d'abord le marché des véhicules commerciaux. Plus de 500 camions à pile à hydrogène incluant 100 camions de livraison de taille moyenne sont en opération à Shanghai en 2018 (Natural Resources Canada, 2019). Ces camions sont équipés des modules de piles à hydrogène de 30 kW de *Ballard Power Systems* (Wong, 2018). Dans la ville de Rugao, 500 autres véhicules de livraison sont aussi en opération (IEA, 2019).

Après un déploiement annoncé en 2015, le pays dispose à la fin de 2018 de la plus importante flotte de bus à pile à hydrogène avec plus de 400 bus dans des projets de démonstration (IEA, 2019), principalement à Foshan City et dans le parc industriel de Yunfu. Ces bus devraient avoir une autonomie de plus de 300 km et une consommation de moins de 8,5 kg/100km (Ballard, 2019b).

Par ailleurs, une usine de production de bus à l'hydrogène a ouvert ses portes à Yunfu: 300 bus étaient sur la ligne de montage du constructeur Feichi en novembre 2017 (Liu et al., 2018); l'entreprise a la capacité de produire 5 000 véhicules par an.

La Chine possède aussi le *premier tramway à l'hydrogène* dans la ville de Tangshan au nord du pays; mis en service en octobre 2017 et disposant d'un module à pile à hydrogène de Ballard, il peut parcourir 40 km à une vitesse maximum de 70 km/heure (Natural Resources Canada, 2019).

La Chine a misé sur l'implantation d'entreprises manufacturières produisant des batteries et des piles à hydrogène. Un partenariat entre *Ballard Power Systems* et *Synergy* a mené à la construction d'une première usine de modules de pile à hydrogène dans le parc industriel de Yunfu; cette usine peut produire 500 MW d'unités de pile à hydrogène par an (Liu, 2018; Natural Resources Canada, 2019). Un autre partenariat réunit *Hydrogenics* et *SinoHytec* depuis quelques années déjà (Verheul, 2019).

Les infrastructures de recharge sont encore peu développées (Natural Resources Canada, 2019). À la fin de 2018, seulement 21 stations de recharge étaient recensées (Verheul, 2019). Dans la région de Foshan et Yunfu, elles étaient inexistantes en 2015 ; depuis, plus de 10 sont en construction à Foshan et quatre sont apparues à Yunfu en 2018 (Liu et al., 2018). Sinopec (China Petroleum and Chemical Corp.), le plus grand raffineur et propriétaire de stations d'essence au monde et aussi membre du *Hydrogen Council*, se lance en 2019 dans la construction de stations de recharge à l'hydrogène (Xin, 2019). La Chine a récemment annoncé la construction d'ici 2021 de 40 stations de recharge à l'hydrogène le long de quatre corridors dans le Delta du Yangtse ; ces corridors relieront les villes de Shanghai, Huzhou, Nantong, Ningbo, Rugao, Jiaxing et Zhangjiagang (Lim, 2019). En juin 2019, la plus grande station de recharge à l'hydrogène au monde a ouvert ses portes au public à Shanghai ; d'une capacité quotidienne de plus de deux tonnes, elle peut alimenter jusqu'à 600 véhicules par jour (Hood, 2019).

La mise en place des stations à l'hydrogène bénéficie du *fort soutien des gouvernements locaux* qui souhaitent ainsi promouvoir la venue de nouvelles industries dans leur région et dynamiser l'économie locale (Matsumoto, 2019).

La transition tardive mais accélérée de la Chine vers l'hydrogène est encouragée par de *généreuses subventions gouvernementales* à l'industrie, à la R&D, aux sociétés de transport de personnes et de marchandises et aux consommateurs eux-mêmes pour l'achat de véhicules (Matsumoto, 2019). Le gouvernement chinois aspire à atteindre un million de véhicules à l'hydrogène sur la route d'ici 2030 (Li, 2018).

Parmi les *freins au déploiement de l'hydrogène* dans les transports, on a pointé du doigt la technologie et la réglementation (Verheul, 2019). Le *retard accusé dans les technologies de compression* pour le stockage de l'hydrogène fait que la plupart des stations de recharge ouvertes sont à 350 bar (ou 35 MPa) plutôt qu'à 700 bar (ou 70 MPa). On rapporte par ailleurs qu'en 2019 la plupart des stations de recharge sont utilisées uniquement pour des projets de démonstration et n'opèrent pas encore commercialement.

Des *carences au chapitre des normes et de la réglementation* dans la construction et l'opération des stations de recharge ralentiraient aussi le développement des infrastructures (Verheul, 2019). Ainsi, la réglementation actuelle empêcherait l'adoption d'innovations étrangères telle l'installation de stations très compactes (occupant à peine 7 m²) qui peuvent être intégrées aux stations de recharge existantes comme celles produites par une entreprise norvégienne ; cela s'avère impossible à cause de l'obligation de placer le compresseur à au moins 20 m des autres composantes de la station. D'autres problèmes réglementaires ont trait à la production de l'hydrogène : puisque l'hydrogène est classé comme produit chimique dangereux, sa production est permise dans les parcs chimiques uniquement.

Le fait de cibler d'abord les véhicules commerciaux permet à la Chine de bonifier ses technologies de compression et d'acquérir de l'expérience en ce qui a trait à la sécurité de l'hydrogène. Puis, comme les trajets des véhicules commerciaux sont plus prévisibles que les déplacements automobiles, moins de stations de recharge sont nécessaires. Enfin, cette approche peut contribuer à faciliter l'acceptation sociale de l'hydrogène comme carburant auprès d'un public encore réticent pour des raisons de coût et de sécurité (Verheul, 2019).

Bien que la Chine soit le plus gros producteur d'hydrogène au monde (21 millions de tonnes en 2016 auxquelles s'ajoutent près de 12 millions de tonnes d'hydrogène comme sous-produit), la majeure partie provient de combustibles fossiles, notamment du charbon, par un procédé de gazéification (Verheul, 2019). Le pays dispose d'environ 1 000 gazéificateurs, mais cette utilisation représente seulement 5% de la consommation totale de charbon. De plus, les ressources en charbon sont principalement concentrées dans l'ouest du pays alors que la demande en hydrogène est plutôt localisée dans l'est, là où sont les grandes villes ; il n'y a pas de réseau de pipelines à hydrogène à grande échelle reliant les deux régions à l'heure actuelle. Le même décalage géographique vaut aussi pour les énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien.

6.3 Japon

Désireux de réduire sa dépendance quasi-totale (94 %) aux sources d'énergie fossile étrangères et soucieux d'éviter d'autres catastrophes nucléaires comme celle de Fukushima en 2011, le Japon s'inscrit comme chef de file mondial en ce qui a trait à la recherche, au développement et à l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie dans plusieurs secteurs incluant celui des transports, ce qui lui permettra d'accroître son autosuffisance énergétique en plus de réduire ses émissions de gaz à effet de serre.

Le pays abrite deux des trois principaux constructeurs automobiles actifs dans la production de véhicules à pile à hydrogène (*Toyota* et *Honda*) et de nombreuses entreprises qui participent au développement des technologies relatives à l'hydrogène, parmi lesquelles *Kawasaki* pour ce qui est du transport de l'hydrogène, *Panasonic* pour la fabrication des piles à hydrogène et *Toshiba* pour l'électrolyse de l'eau (Popov, 2018). L'accent est mis sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement.

En 2018, 11 entreprises incluant constructeurs automobiles, entreprises actives dans le développement d'infrastructures et investisseurs ont formé un consortium, le *Japan H₂ Mobility* (JHyM), afin de mettre en commun les investissements privés et publics en vue d'accroître le nombre de véhicules à pile à hydrogène sur la route et les stations de recharge pour les alimenter ; depuis, sept autres entreprises ont joint le consortium (Nagashima, 2018 ; Natural Resources Canada, 2019 ; Popov, 2018). Celui-ci souhaite mettre en place 80 stations à l'échelle du pays d'ici 2021.

Autre groupe impliqué dans le développement et la promotion des infrastructures à l'hydrogène, l'*Association of Hydrogen Supply and Utilization Technology* (HySUT) comprend 35 membres du secteur industriel incluant des entreprises d'énergie, d'ingénierie, de construction d'automobiles et des opérateurs de stations de recharge (Natural Resources Canada, 2018).

Le *Council for a Strategy for Hydrogen and Fuel Cell* – créé par le gouvernement japonais – a fait paraître en 2014 (version révisée en 2016) une *Feuille de route pour l'hydrogène et les piles à combustible* dans laquelle il prévoit la construction de 160 stations de recharge desservant environ 40 000 véhicules d'ici 2020 ; pour 2025, les cibles visées sont de 320 stations et 200 000 véhicules (Popov, 2018). Afin d'encourager ce déploiement, le gouvernement offre des incitatifs à l'achat de véhicules automobiles et de bus ainsi que des fonds (capital et opération) pour soutenir la mise en place et le fonctionnement des stations de recharge (Natural Resources Canada, 2019).

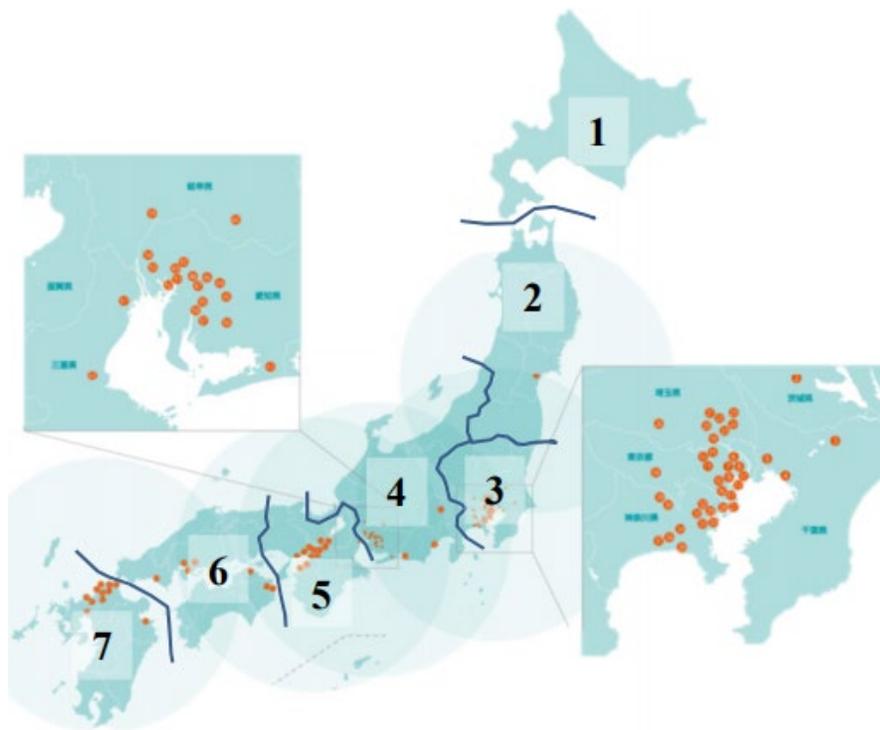
À la fin juin 2018, le Japon disposait de 100 stations de recharge à l'hydrogène (dont environ le tiers étaient mobiles, selon Isenstadt et Lutsey, 2017), soit le plus grand nombre pour un pays et de 2 580 véhicules automobiles à l'hydrogène, occupant à ce chapitre le 2^e rang au monde après la Californie (Ikeda, 2018). En raison de la réglementation plus stricte au Japon, une station y coûte deux à trois fois plus cher qu'en Europe, soit 4,5 à 5,4 millions de dollars américains ; pour être profitable, une station doit desservir environ 900 véhicules par an (Nagashima, 2018). De plus, les normes de sécurité en vigueur font qu'une station à l'hydrogène requiert un espace environnant plus grand qu'une station à essence, ce qui peut occasionner des coûts très élevés dans une ville comme Tokyo où l'espace disponible est rare et cher. Enfin, la recharge doit être effectuée par du personnel spécialisé disposant d'un permis dans la manutention des gaz sous pression et non par le client lui-même.

Toyota a vendu son premier bus à l'hydrogène au Japon en 2018 : le *Sora*, équipé de deux modules de pile à combustible de 114 kW sur le toit, peut déplacer 79 passagers et parcourir 200 km avec un réservoir à l'hydrogène de 600 litres (23,3 kg). L'entreprise prévoit fournir 100 bus pour la région de Tokyo à l'occasion des Jeux Olympiques de 2020 (Nagashima, 2018).

La même année, *Toyota* s'est lancée dans la production de camions pour la chaîne de dépanneurs 7-Eleven qui compte 20 000 établissements au Japon. D'une capacité de 3 tonnes, ces camions peuvent couvrir 200 km par jour ; deux camions sont prévus pour 2019 (Nagashima, 2018). *Toyota* développe aussi des camions pour le marché d'exportation.

FIGURE 24

Nombre de stations de recharge et de véhicules à hydrogène au Japon à la fin 2018



Région	Stations de recharge à H ₂ (n)	Véhicules à pile à H ₂ (n)
Hokkaido (1)	1	16
Tohoku (2)	3	44
Kanto (3)	40	1 033
Chubu (4)	25	1 021
Kansai (5)	12	243
Chugoc/Shikoku (6)	8	92
Kyushu (7)	11	131
Total	100	2 580

Source: Ikeda, 2018.

Deux installations de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire par électrolyse de l'eau sont en voie de réalisation dans la région de Fukushima : la première est en période d'essai de 2018 à 2020 à Soma et une autre est en construction à Namie (Natural Resources Canada, 2019). Cette dernière devrait fournir l'énergie des bus prévus pour les Jeux Olympiques de 2020.



Source: Manthey, 2018.

Pour combler ses besoins énergétiques, le Japon prévoit également importer de l'hydrogène d'autres pays dont l'Australie. Découlant d'une collaboration entre la *Queensland University of Technology* et l'*University of Tokyo*, un premier chargement produit à partir de l'énergie solaire à Redlands au sud de de la ville de Brisbane a été livré au Japon au début de 2019 (Queensland University of Technology, 2019). La Norvège veut aussi s'inscrire sur les rangs des fournisseurs d'énergie verte au Japon à partir de son hydroélectricité (Lindgaard Molnes, 2019). Au début de 2016, les entreprises *Kawasaki* et *Iwatani* se sont associées à la ville de Kobe pour mettre en place un terminal d'importation de l'hydrogène d'Australie ; celui-ci sera opérationnel en 2020 (Irfan, 2016). L'entreprise *Kawasaki* est en train de mettre au point un navire citerne dédié au transport de l'hydrogène liquide (Kawasaki, site web 2019) ; avec plusieurs partenaires, *Kawasaki* a aussi débuté la construction d'un terminal de chargement en Australie qui sera équipé pour liquéfier l'hydrogène produit à partir de la lignite (Sampangi Archana Rani, 2019). Opérationnel pour la phase pilote en 2021, les activités commerciales devraient commencer dans les années 2030.

Le Japon prévoit importer 660 000 tonnes d'hydrogène par an en 2030. L'entreprise *Hummingbird Hydrogen HH₂*, de la Colombie-Britannique, envisage de produire de l'hydrogène liquide à partir de la biomasse et par électrolyse de l'eau à son complexe de bioraffinerie pour des fins d'exportation au Japon et en Corée du sud (Hummingbird Hydrogen, 2019).

Le scénario illustré dans la feuille de route du *Council for a Strategy for Hydrogen and Fuel Cell* résume les cibles visées par le pays d'ici 2030 pour atteindre la réduction escomptée de 26% des émissions de GES; le pays envisage de réduire ses émissions de 80% d'ici 2050 (Iida et Sakata, 2019). À cette date et avec l'atteinte de cette cible, la part de l'hydrogène dans le système énergétique japonais sera de 13%. Trois mesures sont prévues dans la Feuille de route pour parvenir à une réduction du coût élevé de l'hydrogène: 1) miser sur l'acquisition de ressources peu coûteuses, 2) établir des chaînes d'approvisionnement à grande échelle et 3) généraliser l'utilisation de l'hydrogène dans différents secteurs (transport, industrie, production d'énergie, etc.). Mentionnons enfin le rôle du *NEDO* (New Energy and Industry Development Organization) – organisme public de R&D financé entièrement par le ministère de l'Énergie, du Commerce et de l'Industrie (METI) – comme acteur principal dans la mise au point des nouvelles technologies pour atteindre les cibles visées (Iida et Sakata, 2019).



Source: Kawasaki, site web 2019.

6.4 Allemagne

Abandonnant progressivement l'énergie nucléaire et souhaitant s'orienter dorénavant vers des sources d'énergie renouvelable, l'Allemagne est le pays le plus avancé d'Europe pour ce qui est de la conversion à l'hydrogène et du développement des piles à combustible mais pas spécifiquement pour le secteur des transports. En 2013, le gouvernement adopte sa *Mobility and Fuels Strategy* qui vise à réduire les émissions de GES dans tous les secteurs; la cible à atteindre en 2050 est une baisse de 80 à 95% des niveaux prévalant en 1990. En 2012, le ministère du Transport et de l'Industrie et plusieurs partenaires du secteur privé (*Air Liquide, Air Products, Daimler, Linde et Total*) ont signé une lettre d'intention en vue de la mise en place d'un réseau de stations de recharge à l'hydrogène, menant ainsi à la création de 50 stations à une pression de 700 bar dans 7 régions métropolitaines et sur les principaux corridors du pays (Clean Energy Partnership, 2019).

En 2015, six entreprises (*Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell et Total*) ont formé le consortium *H₂ Mobility* afin d'étendre le réseau de stations de recharge avec une cible de 400 stations couvrant l'ensemble du pays en 2025 (Natural Resources Canada, 2019). À la fin de 2018, 60 stations étaient opérationnelles, positionnant ainsi l'Allemagne au 2^e rang au monde après le Japon; *H₂ Mobility* possédaient et opéraient 54 d'entre elles; le consortium vise la cible de 100 stations pour la fin de 2019 (Carr, 2019). Ces 100 stations devraient permettre d'alimenter les véhicules d'un bassin de population de 6 millions de personnes selon le PDG de *H₂ Mobility* (Kind, 2019). *H₂ Mobility* cherche à réduire les coûts d'implantation en intégrant l'offre d'hydrogène à des stations d'essence conventionnelles et en utilisant des compresseurs de stockage à 700 bar (Isenstadt et Lutsey, 2017). Au nord du pays, trois stations seront alimentées à partir de l'énergie éolienne (GlobeNewsWire, 2019).

Du côté des véhicules, la mise en place de 646 bus à l'hydrogène a fait l'objet d'un financement à ce jour (Braunsdorf, 2018). Il y avait 16 bus en activité en novembre 2018. L'entreprise *Ballard Power Systems* a commencé à fournir les piles à hydrogène de 40 bus pour les villes de Cologne et Wuppertal en 2019 (Carr, 2019). L'entreprise française *Alstom* vient pour sa part de remporter un appel d'offres pour fournir 27 trains à hydrogène à la région de Francfort; la commande de 500 millions d'euros – dont 360 millions qui iront à *Alstom* – prévoit aussi la fourniture d'hydrogène, la maintenance et la mise à disposition de capacités de réserve pour les 25 prochaines années (BFMTV, 2019a). Cela s'ajoute aux deux trains *Hydrail* actuellement en test. Soulignons que l'Allemagne dispose d'environ 4 000 trains alimentés au diesel et qui pourraient éventuellement faire l'objet d'une conversion à l'hydrogène (IEA, 2017). Enfin, à la fin de 2018, on retrouvait aussi environ 500 véhicules automobiles à pile à hydrogène sur les routes (Natural Resources Canada, 2019).

Le gouvernement fédéral a créé en 2008 le programme *National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technology* (NOW) dont le rôle est de financer des projets de R&D visant à stimuler la coordination des activités des entreprises, des laboratoires de recherche et autres acteurs publics pour développer un secteur industriel compétitif (Afhyprac, 2018b). Le financement fédéral disponible est de 1,4 milliard d'euros sur 10 ans et combine la R&D et la commercialisation (Braunsdorf, 2018).

En 2017, la 2^e phase du programme NIP (National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cells) inclut le financement de la construction de nouvelles stations de recharge; 60% des coûts d'investissement seront couverts et la réalisation d'électrolyseurs utilisant une énergie verte sera incluse (Afhyprac, 2018b).

La production d'hydrogène fait aussi partie de la stratégie de développement. *Shell* et *ITM Power* ont démarré en 2019 la construction d'une usine d'électrolyse (projet *Refthyne*) pour produire de l'hydrogène à partir d'électricité générée par des sources d'énergie renouvelables dans la ville de Wesseling; les opérations devraient débuter en 2020 et fournir 1 300 tonnes d'hydrogène par année (Euractiv, 2019). En 2018, un partenariat formé de *Linde AG*, *Flachstahl GmbH* et *Avacon Natur GmbH* a annoncé un projet de construction d'une usine de production d'hydrogène par électrolyse à partir de l'énergie éolienne à Salzgitter (Carr, 2019).

Le pays est également impliqué dans le développement des piles à combustible. En 2017, dix entreprises allemandes du secteur des transports se sont jointes au *Centre for Solar Energy and Hydrogen Research* pour développer des piles à combustible jusqu'au stade de la maturité; on vise une production annuelle de 30 000 modules de pile à combustible. Un autre projet impliquant la participation de l'entreprise suédoise *PowerCell Sweden AB* et les constructeurs *BMW*, *Daimler*, *Ford* et *Volkswagen* prévoit aussi le développement de tels modules (Afhyprac, 2018b). Enfin, en 2019, c'est au tour de *PowerCell Sweden* et de *Bosch* d'unir leurs efforts pour produire des piles à hydrogène pour les camions et les automobiles; le lancement sur le marché est prévu pour 2022 (Krok, 2019).

FIGURE 25
Stations de recharge à l'hydrogène en Allemagne au début 2019



Source: GlobeNewsWire, 2019.

En juillet 2019, le ministère allemand de l'Économie et de l'Énergie a annoncé un financement annuel de 100 millions d'euros pour aider 20 laboratoires de recherche à tester les nouvelles technologies relatives à l'hydrogène en vue d'applications à l'échelle industrielle (Dezem, 2019).

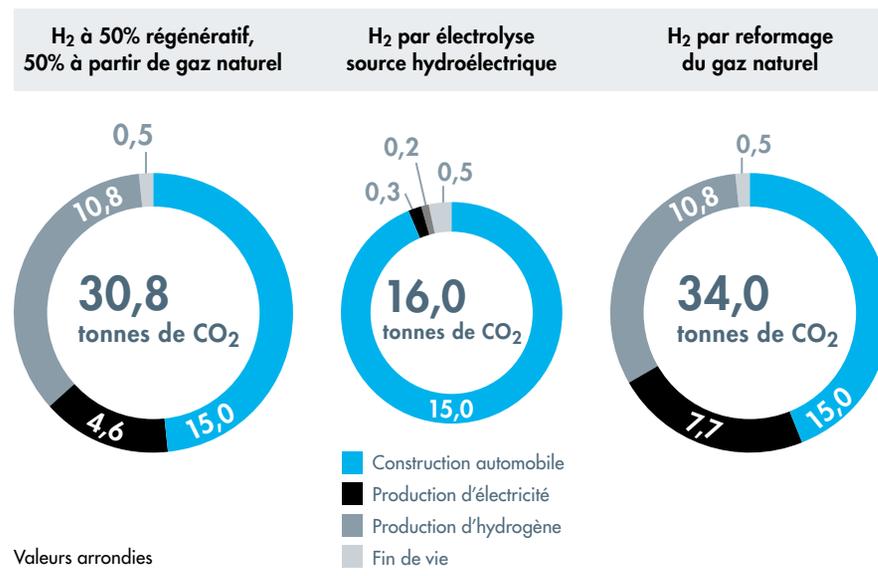
Les avancées technologiques réalisées à l'heure actuelle n'ont pas été suivies du même essor dans le développement des véhicules à pile à hydrogène, les constructeurs allemands les ayant délaissés au profit de ceux à batterie électrique (Shumaker, 2018). Un des principaux freins au développement serait le coût élevé des véhicules comparativement à des marchés comme celui de la Californie car le gouvernement allemand n'offre pas d'incitatif à l'achat. Néanmoins, *Audi*, en collaboration avec *Ballard Power Systems* et *Hyundai*, s'est dit prêt à s'inscrire dans le développement des véhicules à l'hydrogène et la compagnie prévoit sortir son modèle *h-tron-quattro* en 2020, ciblant principalement le marché chinois où plus de 30% des ventes de *Audi* sont réalisées (Kable, 2019).

Le constructeur *BMW* vient pour sa part d'annoncer son entrée sur le marché des véhicules à pile à hydrogène pour les années 2020 en partenariat avec *Toyota* (Taylor, 2019). *Mercedes-Benz* vient de développer un modèle unique au monde, un véhicule utilitaire sport hybride combinant batterie au lithium et pile à hydrogène, le *GLC Fuel Cell*. Le constructeur précise que l'empreinte carbone du véhicule est très faible lorsque propulsé à l'aide d'hydrogène provenant de sources d'énergie renouvelable: les émissions de CO₂ attribuables à la production d'hydrogène et d'électricité à partir de sources renouvelables sont de 0,5 tonne (figure 26, cercle du centre) comparativement à 15,4 tonnes lorsque l'hydrogène provient en partie du reformage du gaz naturel ou à 18,5 tonnes lorsque l'hydrogène provient directement du gaz naturel (figure 26, cercle de gauche) (FuelCellsWorks, 2019). Le véhicule a une autonomie de 430 km – auxquels s'ajoutent 51 km fournis par la batterie – et il peut être rechargé en trois minutes. Depuis 2019, il est disponible en location via *Mercedes-Benz Rent* à 799 euros par mois dans les villes allemandes déjà bien équipées de stations de recharge à l'hydrogène.



Source: Shumaker, 2018.

FIGURE 26
L'empreinte carbone sur le cycle de vie de la Mercedes-Benz GLC Fuel Cell



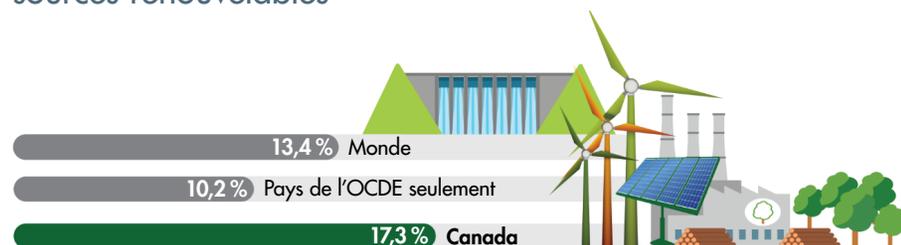
7. Le portrait de la situation au Québec

7.1 Les sources d'énergie utilisées au Québec

Le Québec se distingue par la part importante occupée par les énergies renouvelables dans son système énergétique, soit 49% du total en 2016. Cela se compare avantageusement avec les autres pays de l'OCDE où seule la Suède dépasse ce seuil, avec 54% d'énergie renouvelable en 2019; dans l'ensemble du Canada, les énergies renouvelables représentaient seulement 17,3% du total en 2017 (Ressources Naturelles Canada, 2019).

FIGURE 27

Pourcentage de l'approvisionnement d'énergie provenant de sources renouvelables



Source: Ressources Naturelles Canada, site web 2019.

Le pétrole représente 36% du bilan énergétique du Québec et plus des trois quarts de cette source d'énergie vont au secteur des transports. La part de l'hydroélectricité était également de 36%, soit 818 Pétajoules (Whitmore et Pineau, 2018). La biomasse et l'énergie éolienne ont un apport non négligeable avec 13,5% du total des énergies.

Les biocombustibles proviennent principalement des résidus forestiers mais peuvent aussi dériver d'autres matières organiques. Il est à noter que les énergies renouvelables proviennent du Québec alors que les hydrocarbures sont entièrement importés (Whitmore et Pineau, 2018).

Le Québec occupe la première position au Canada pour la production d'hydroélectricité et la deuxième place après l'Ontario pour ce qui est de l'énergie éolienne (RNC, site web 2019).

TABLEAU 5

Disponibilité des sources d'énergie primaire au Québec, 2016

	Sources	Pétajoules	Part du total (%)	Équivalence
Importations = 51%	Pétrole	826	36	137 millions de barils
	Gaz naturel	325	14	8,4 milliards de m ³
	Charbon	13	1	0,6 million de tonnes

	Sources	Pétajoules	Part du total (%)	Équivalence
Sources locales = 49%	Hydro	818	36	227 TWh
	Biomasse	170	7,5	
	Éolienne	126	6	35 TWh
	Total	2 278	100	

Source: Whitmore et Pineau, 2018.

D'importantes pertes d'énergie

Moins de la moitié de l'énergie disponible au Québec en 2016 a servi à répondre à la demande (46%) car on assiste à des pertes importantes (54%) découlant de certaines inefficacités du système au cours de la transformation, du transport et de la consommation de l'énergie. Le secteur du transport était responsable de 35% de ces pertes; ce secteur serait beaucoup moins efficace que les autres (Whitmore et Pineau, 2018).

Dans le cas de l'électricité générée au Québec, près des deux tiers de la production aboutissent en pertes liées aux systèmes électriques y compris la transmission. Les pertes sont également importantes du côté des hydrocarbures. La chaleur produite mais non entièrement utilisée est la principale cause de perte d'énergie (Whitmore et Pineau, 2018).

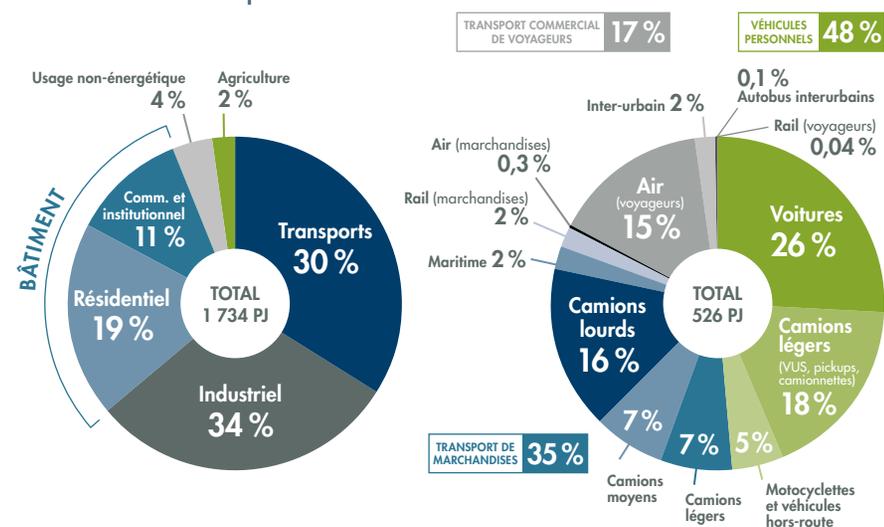
7.2 L'énergie dédiée au secteur des transports

Au Québec, le secteur des transports accaparait 30% de l'énergie en 2016, la presque totalité provenant de produits pétroliers (97%) alors que la part allant à l'électricité dans ce secteur était de 0,4%.

À lui seul, le transport de marchandises représentait 35% de l'utilisation de l'énergie. Le transport de marchandises est celui qui est en plus forte croissance: le parc de véhicules s'est accru de 162% entre 1990 et 2014 (comparativement à une hausse de 59% pour le nombre de véhicules personnels) et atteignait 791 000 camions légers, moyens et lourds en 2016. La distance parcourue par ces camions a quant à elle augmenté de 24% au cours de cette période (Whitmore et Pineau, 2018). Ces données amènent les auteurs de l'étude qui les citent à conclure que « la priorité devrait être accordée aux initiatives pouvant réduire la consommation d'énergie et les émissions de GES dans le secteur des transports commerciaux ».

FIGURE 28

Énergie par secteur d'activité et par type de véhicule dans le secteur des transports



Note: les activités de transports aérien, maritime et ferroviaire ne sont pas disponibles par région. Les données sur le transport aérien incluent les lignes intérieures et étrangères, considérant les modes d'utilisation énergétique recensés dans le Bulletin sur la disponibilité et l'écoulement d'énergie au Canada (57-003-X).

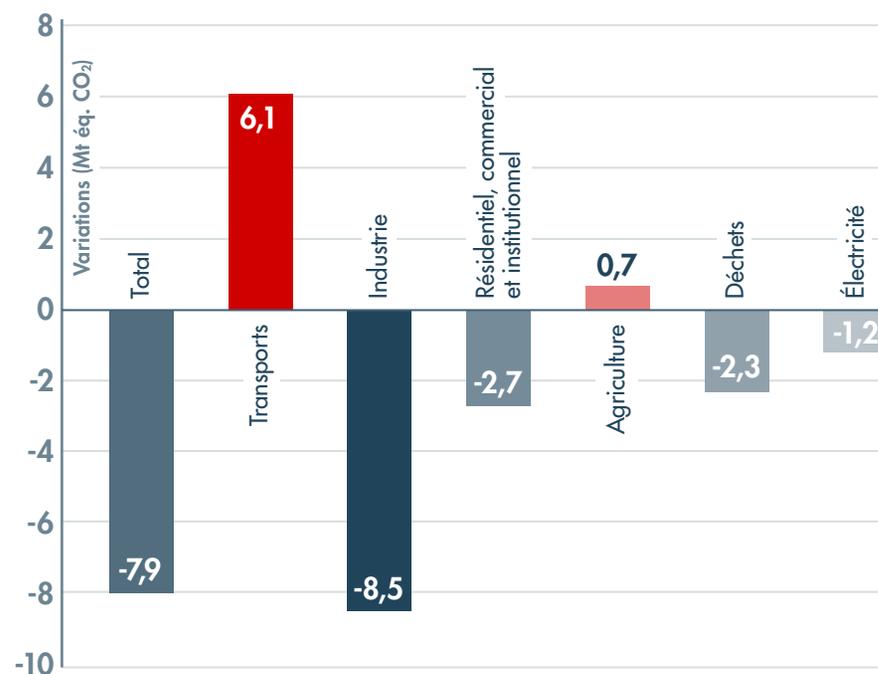
Source: Whitmore et Pineau, 2018.

7.3 Les émissions de gaz à effet de serre

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) atteignaient 77 Mt équivalent CO₂ au Québec en 2016. De ce total, 27 Mt découlaient du transport routier, dont 12 Mt du transport de marchandises par la route (Whitmore et Pineau, 2018). Le transport par camion lourd comptait pour plus du tiers des émissions de GES du transport par la route.

FIGURE 29

Variation des émissions de GES par secteur au Québec entre 1990 et 2016



Source: AVEQ, 2019.

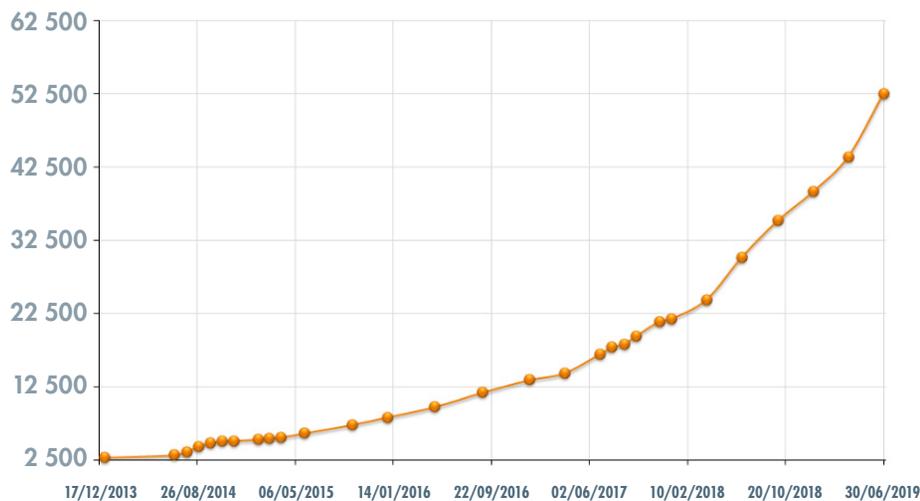
Malgré une baisse des émissions de GES dans la plupart des secteurs entre 1990 et 2016, on note qu'elles continuent d'augmenter dans les transports (AVEQ, 2019). Les émissions de GES du transport par camion lourd se sont accrues de 156,5% entre 1990 et 2015, annulant ainsi la réduction observée dans les émissions du transport par automobile (TEQ, 2018).

7.4 L'avènement des véhicules électriques

Au Canada, c'est au Québec que l'on compte le plus de véhicules électriques (Toyota, 2016) : au 30 juin 2019, on dénombrait 52 556 véhicules électriques sur les routes et ils se répartissent à peu près également entre véhicules entièrement électriques (n=26 300) et véhicules hybrides rechargeables (n=26 256) (AVEQ, 2019). Encouragée par les incitatifs gouvernementaux, leur progression sur les routes depuis leur avènement témoigne de l'intérêt marqué des Québécois pour les véhicules à énergie propre ; le deuxième trimestre de 2019 a enregistré une croissance de 2 878 véhicules supplémentaires par mois.

À cela s'ajoute le nombre de bornes de recharge qui a atteint 4 726 bornes au 30 juin 2019 ; ce nombre n'inclut pas les bornes de recharge à domicile (AVEQ, 2019). Les données les plus récentes indiquent que des incitatifs financiers ont été accordés pour 21 265 bornes à domicile depuis 2012 (TEQ, 2019, données statistiques, évolution du programme Roulez vert).

FIGURE 30
Nombre de véhicules électriques sur les routes du Québec au 30 juin 2019



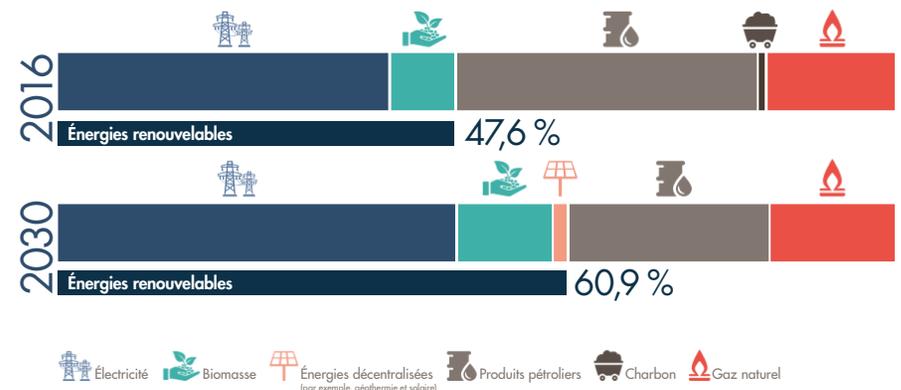
Source: AVEQ, 2019.

7.5 Les mesures incitatives pour rouler à l'énergie propre

Au Québec, les mesures mises en avant actuellement visent presque essentiellement les véhicules entièrement électriques et les véhicules hybrides rechargeables. Dans le cadre du programme *Roulez vert*, le gouvernement québécois offre depuis 2012 des rabais allant jusqu'à 8 000 \$ pour l'achat de véhicules électriques neufs ou d'occasion ainsi qu'un remboursement partiel pour l'installation de bornes de recharge à domicile, au travail ou pour le multi logement. Depuis le 1^{er} mai 2019, le gouvernement fédéral offre un incitatif additionnel pouvant aller jusqu'à 5 000 \$ pour l'achat d'un véhicule neuf électrique, hybride rechargeable ou à pile à hydrogène (TEQ, site web, 2019).

Les efforts relèvent de plusieurs ministères et des investissements importants sont prévus pour de nombreux projets et programmes dans 1) le Plan d'action en électrification des transports 2015-2020, 2) le Plan d'action 2018-2023 de la Politique de mobilité durable – 2030, 3) le Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques et 4) le Plan d'action de la politique énergétique 2030.

FIGURE 31
Cibles visées en matière d'énergies renouvelables d'ici 2030



Source: MERN, 2016.

Le *Plan d'action en électrification des transports* est doté d'un budget de 420 millions de dollars pour mettre en place 35 mesures visant à favoriser les transports électriques, à développer la filière industrielle liée à l'électrification des transports et à réduire les émissions de GES, de même que la dépendance au pétrole ; le plan a notamment prévu 2,5 M\$ pour

soutenir l'implantation de bornes de recharge rapide le long des principaux axes routiers (MTQ, 2015). Le Plan d'action sur la mobilité durable est doté d'un budget de 1 064 M\$ et comporte aussi plusieurs mesures visant à encourager les énergies propres (MTQ, 2018).

Avec un budget majoré à 4,86 milliards de dollars en 2019-2020, le *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques* poursuit plusieurs objectifs visant une utilisation accrue d'énergies propres: réduire la consommation de combustibles fossiles, étendre le recours aux sources d'énergie renouvelable, accélérer l'électrification des transports et la création d'entreprises dans ce domaine, et encourager la R&D sur les technologies propres (MELCC, site web, 2019).

Par son *Plan sur la mobilité durable*, le gouvernement québécois vise à atteindre en 2020 une réduction de 40% de la consommation de pétrole dans le secteur des transports sous le niveau de 2013 et une diminution de 37,5% des émissions de GES dans le secteur des transports sous le niveau de 1990 (MTQ, 2018).

Le *Plan d'action en électrification des transports* vise les cibles suivantes pour 2020: 1) atteindre 100 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables, 2) réduire de 150 000 tonnes les émissions de GES découlant du transport et 3) réduire de 66 millions les litres de carburant consommés annuellement au Québec (MTQ, 2015).

Le *Plan d'action de la Politique énergétique 2030* vise quant à lui à: 1) améliorer de 15% l'efficacité avec laquelle l'énergie est utilisée, 2) réduire de 40% la quantité de produits pétroliers consommés, 3) augmenter de 25% la production d'énergie renouvelable et 4) augmenter de 50% la production de bioénergie (Énergie et Ressources naturelles Québec, site web 2019). Le plan prévoit la mise en place d'un projet pilote de stations multicarburants – incluant l'hydrogène – qui s'étendra à l'échelle du Québec d'ici 2030; elles seront d'abord installées dans les régions à fort potentiel d'utilisation (MERN, 2016).

Enfin, le *Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques 2018-2023* prévoit la mise en place d'un banc d'essai pour intégrer l'hydrogène dans le secteur des transports, incluant un projet pilote pour introduire des véhicules alimentés à l'hydrogène et développer les conditions nécessaires à la mise à l'essai de cette filière (TEQ, 2018).

Dans le cadre du *Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change* (Environment and Climate Change Canada, 2016), le gouvernement canadien a, pour sa part, alloué des sommes dans ses

budgets de 2016 à 2019 pour des programmes de *Ressources Naturelles Canada* visant à soutenir les infrastructures pour la recharge des véhicules électriques et pour les combustibles tels que le gaz naturel et l'hydrogène (16,4 M\$ en 2016, 80 M\$ en 2017 et 130 M\$ en 2019). Le programme *EVAFIDI* (Electric Vehicle and Alternative Fuel Infrastructure Deployment Initiative) fournit une aide représentant 50% des coûts des projets admissibles jusqu'à concurrence de 1 M\$ par station de recharge. Dans le cadre de ce programme, le gouvernement canadien a investi 96,4 M\$ pour les stations de recharge, 76,1 M\$ pour soutenir les projets de démonstration qui ont trait aux technologies de recharge et 10 M\$ pour le développement de normes binationales (Canada-USA) pour les véhicules et les infrastructures à faible empreinte carbone (Ressources naturelles Canada, 2019b; Ressources naturelles Canada, site web, 2019a).

D'autres montants ont été alloués dans le budget fédéral de 2018 pour soutenir les technologies innovatrices d'énergie propre, dont 800 M\$ dans le cadre du *Fonds stratégique pour l'innovation* afin de stimuler la R&D, faciliter la croissance et l'expansion des entreprises, attirer et retenir les investissements à grande échelle et faire progresser la recherche industrielle, le développement et la démonstration de technologies grâce à la collaboration entre le secteur privé, les chercheurs et les organisations à but non lucratif (Fonds stratégique pour l'innovation, 2018).

Avec les États-Unis, le Japon, les Pays-Bas et la Commission Européenne, le Canada a lancé en mai dernier à Vancouver la *New Hydrogen Initiative* qui mettra l'accent sur 1) le déploiement de l'hydrogène pour les applications industrielles actuelles, 2) le déploiement des technologies de l'hydrogène dans le secteur des transports et 3) le rôle de l'hydrogène pour combler les besoins énergétiques des communautés (US Department of Energy, 2019).



Source: Marie Demers.

7.6 La réglementation actuelle pour limiter les émissions de CO₂ et la dépendance aux hydrocarbures

Le Québec est la première province canadienne à avoir adopté une réglementation incitant les constructeurs de véhicules automobiles à améliorer leur offre de véhicules à zéro émission. La norme VZE (véhicule à zéro émission) est entrée en vigueur en janvier 2018. Les constructeurs assujettis sont obligés d'accumuler des crédits en procurant des véhicules à zéro ou à faible émission au marché québécois. La cible de crédits est calculée en appliquant un pourcentage au nombre total de véhicules légers (de promenade) vendus au Québec par un constructeur donné. Plus l'autonomie en mode électrique d'un véhicule est élevée, plus le constructeur obtiendra de crédits. On souhaite que la norme VZE stimule l'innovation et la production des meilleures technologies (MELCC, site web, 2019).

Dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques, le gouvernement canadien a annoncé en 2018 des normes plus strictes pour le règlement sur la pollution par le carbone des véhicules lourds. On prévoit que les nouvelles normes qui entreront en vigueur en 2020 permettront de réduire les émissions de CO₂ d'environ 6 millions de tonnes par année d'ici 2030 ; elles s'appliqueront aux camions, autobus scolaires et autres véhicules lourds construits après 2020.

Le gouvernement canadien a aussi mis au point la *Norme sur les combustibles propres* et proposé une approche réglementaire établissant des exigences de réduction de l'intensité en carbone pour les combustibles liquides comme l'essence et le diesel. Cette norme s'applique aux fournisseurs et elle incorpore les exigences relatives à la teneur minimale en combustibles renouvelables qui figurent dans le *Règlement sur les carburants renouvelables* (Environnement et changement climatique Canada, 2019). On prévoit que la norme entrera en vigueur en 2022 pour ce qui est des combustibles liquides et en 2023 pour les combustibles gazeux ou solides. L'objectif global est d'atteindre une réduction de 30 mégatonnes d'émissions de GES d'ici 2030.

8. L'opportunité pour le développement de la filière hydrogène au Québec

Doté de sources d'énergie renouvelable importantes et à prix abordable, qu'il s'agisse de l'hydroélectricité, de l'éolien ou de la biomasse, le Québec est bien placé pour profiter de la transition énergétique visant la réduction des émissions de GES. La production d'hydrogène par électrolyse à partir des excédents d'hydroélectricité observés en période de faible consommation permet une meilleure adéquation entre l'offre et la demande car l'hydrogène produit peut être stocké et libéré ensuite en périodes de pointe, réduisant ainsi les pertes d'énergie et permettant de mieux faire face aux fluctuations quotidiennes ou saisonnières dans la consommation.

8.1 La production d'hydrogène

Compte tenu des importantes pertes d'énergie observées actuellement, il y a lieu d'envisager cette piste avec sérieux. La multinationale française *Air Liquide* s'est engagée sur cette voie avec la mise en place d'une unité de production d'hydrogène de 8 000 kg par jour à partir de l'hydroélectricité à Bécancour en 2019 (*Air Liquide*, 2019a). Il est aussi intéressant de noter qu'*Air Liquide* a acquis une participation de 18,6% dans la société canadienne *Hydrogenics*.

L'entreprise *Messer Canada*, anciennement *Linde Canada*, produit depuis plus de 30 ans de l'hydrogène liquide et depuis 20 ans de l'hydrogène comprimé à son usine de Magog. L'hydrogène y est produit à 100% à partir de l'hydroélectricité. Enfin, on apprenait en mai dernier que l'entreprise européenne *Hy2gen AG* envisage de construire une centrale de production industrielle d'hydrogène à Varennes (*Desjardins*, 2019). L'investissement prévu est de l'ordre de 120 M\$. L'hydrogène y sera produit à partir de l'électrolyse de l'eau. L'usine devrait être fonctionnelle au premier semestre de 2022. Une augmentation de la production d'hydrogène pourrait avoir pour effet de le rendre moins cher à produire.

La production locale d'hydrogène dans les régions éloignées s'avère aussi judicieuse pour rendre ces régions plus autonomes et éviter les défis et les coûts associés à la transmission d'énergie sur de grandes distances. C'est le cas pour la mine *Raglan*, dans le Grand Nord québécois, qui a misé sur la conversion en hydrogène des surplus d'énergie éolienne, permettant ainsi de stocker les excédents d'énergie pour les utiliser lorsque nécessaire. Dans la même optique, l'exploitation des résidus forestiers pour en faire de l'hydrogène serait aussi profitable aux régions éloignées, où les ressources forestières abondent.

Au-delà du stockage et de l'utilisation de l'hydrogène au Québec, l'exportation de cette ressource propre, transportable plus facilement que l'électricité et par plusieurs modes de transport différents, offre une opportunité économique intéressante, notamment avec le nord-est américain. Au moins une douzaine de stations de recharge et deux centres de distribution d'hydrogène sont prévus, en cours d'implantation ou déjà en fonction dans plusieurs États (Massachusetts, Connecticut, Rhode Island, New York, Delaware et New Jersey) (*Berman*, 2016). L'entreprise *Air Liquide* est partie prenante du projet de mise en place de ces stations et prévoit exporter vers ces marchés une partie de l'hydrogène qu'elle produira au Québec.

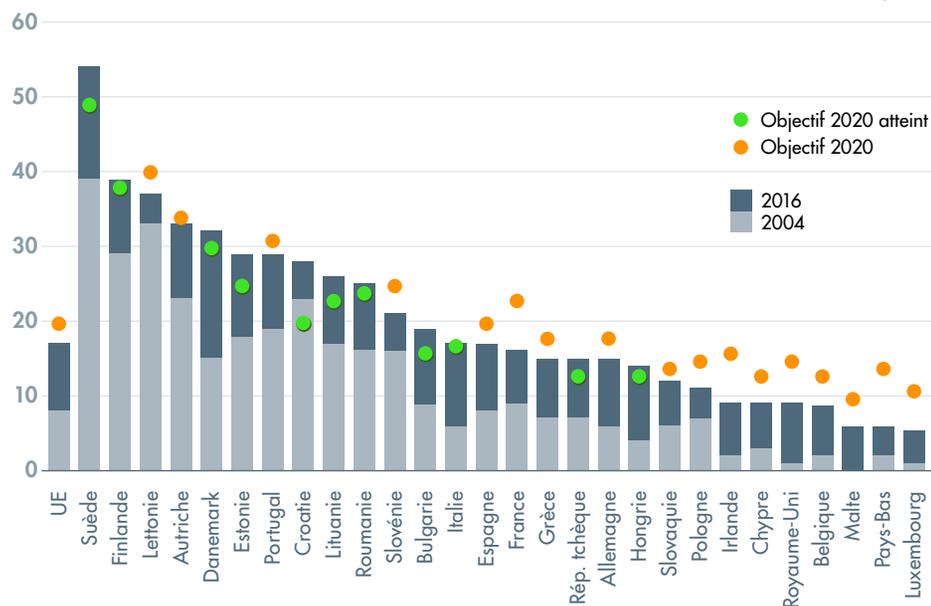
En 2017, le Québec a produit 212 TWh d'électricité dont 95% provenait de source hydroélectrique; des 39,6 TWh dirigés vers l'exportation, 70% sont allés principalement dans le Vermont, l'État de New-York et le Maine (*Whitmore et Pineau*, 2018). Il existe donc une ouverture dans ces régions pour l'énergie propre du Québec.

Tout comme l'Australie et la Colombie-Britannique, qui prévoient exporter de l'hydrogène au Japon par navire-citerne, il y aurait peut-être lieu pour le Québec d'envisager ce mode de transport pour l'exportation de l'hydrogène produit au Québec vers certains pays d'Europe peu dotés de ressources renouvelables et accusant un retard dans la transition énergétique vers les énergies renouvelables, notamment les Pays-Bas, la France et la Belgique (*Eurostat*, 2019).

Si on peut produire de l'électricité à partir de la biomasse (1% de l'électricité au Québec en 2017), il s'avère que l'on peut aussi produire de l'hydrogène par thermolyse ou gazéification à partir de cette ressource. Le Québec est bien positionné pour développer cette filière puisque ses forêts génèrent environ 6,5 millions de tonnes de biomasse forestière par an (Institut de recherche sur l'hydrogène, UQTR, site web, 2019), que la biomasse constitue déjà 7,5% de l'énergie produite au Québec (Whitmore et Pineau, 2018) et que le potentiel des résidus forestiers au Québec serait sous-utilisé (Plourde, Radio-Canada, 2016). Souvent laissés sur place après les coupes forestières, ces résidus pourrissent sur les chantiers.

Le programme de R&D de l'Institut de recherche sur l'hydrogène de l'UQTR à Trois-Rivières travaille actuellement à la conception d'un système de production de l'hydrogène à partir du procédé de gazéification. Une entreprise engagée sur cette voie en Colombie-Britannique où la biomasse forestière est également abondante envisage d'exporter au Japon l'hydrogène ainsi produit, illustrant les possibilités d'exportation résultant de l'exploitation de cette ressource (Hummingbird Hydrogen, 2019).

FIGURE 32
Part de l'énergie provenant de sources renouvelables dans les États membres de l'UE (en % de la consommation finale brute d'énergie)



Source: Eurostat, 2019.

Au-delà de la production d'hydrogène

Mis à part la production d'hydrogène, de multiples occasions d'affaires sont possibles. En voici quelques-unes, à titre d'exemples. Une PME montréalaise fondée en 2007 et spécialisée dans la fabrication d'appareils à pile à combustible a signé une entente en 2016 avec l'Armée de l'air française pour développer des véhicules aériens sans pilote à longue portée et alimentés à l'hydrogène (McKenna, 2016). EnergyOR a mis au point un quadricoptère de 9,5 kg pouvant soulever une charge d'un kg et qui est doté d'une autonomie d'un peu plus de deux heures; l'appareil est alimenté à l'aide d'une pile à combustible utilisant une membrane polymère électrolyte. L'entreprise produit aussi des unités portatives de piles à combustible et elle envisage des débouchés dans plusieurs secteurs (EnergyOR, site web, 2019).

Vehex, une entreprise de Boucherville, vend au Québec et dans les Maritimes des générateurs d'hydrogène du manufacturier canadien *dynaCert* qui a développé la technologie *HydraGen*: il s'agit d'une unité d'électrolyse mobile et compacte permettant d'abaisser la consommation de carburant des moteurs du secteur des transports et de l'industrie lourde et ainsi de réduire les émissions de GES et de prolonger la durée de vie de ces moteurs (VEHEX, site web, 2019).

8.2 Les différents segments de marché pour la conversion à l'hydrogène

Les chariots élévateurs

La conversion à l'hydrogène des chariots élévateurs, omniprésents dans les usines, les centres de distribution, les garages et les entrepôts est sans doute l'application la plus simple et la plus rapide à réaliser dans l'optique de la transition énergétique. Ces appareils de manutention bénéficieraient d'une recharge plus rapide et de l'absence d'émissions polluantes dans les endroits fermés où ils se trouvent habituellement. Aux États-Unis, on retrouvait déjà plus de 20 000 chariots élévateurs alimentés par une pile à hydrogène en 2018 (U.S. Department of Energy, 2018).

Au centre de distribution de IKEA à Brossard seulement, on en retrouve environ 120 (Transport Routier, 2018). Certains chariots élévateurs sont déjà alimentés à l'aide d'une batterie électrique, comme c'est le cas des 24 chariots du centre de distribution de l'entreprise Jean Coutu à Varennes. À notre connaissance, il n'y a pas de données permettant de chiffrer le nombre de chariots élévateurs en fonction au Québec. Les entreprises Toyota et Plug Power ont pour leur part commencé à développer les chariots élévateurs à l'hydrogène.

À Balzac en Alberta, la flotte de 95 chariots élévateurs d'un nouveau centre de distribution de *Walmart* a été convertie à l'hydrogène (provenant majoritairement du Québec) et après une période de test de quatre mois (représentant 18 000 heures et 2 100 recharges), des gains de productivité de 3,5% ont été observés comparativement à des chariots alimentés à l'aide d'une batterie électrique; on prévoit que ce changement de technologie entraînera une réduction des émissions de GES de 530 tonnes par an (Ballard, 2019c; Liftway, 2019). *Walmart* a aussi installé des chariots à l'hydrogène à son nouveau centre de distribution ouvert à Cornwall, Ontario en 2017.



Chariot élévateur à pile à combustible
(Toyota Industries Corporation)

Source: Toyota, 2017.

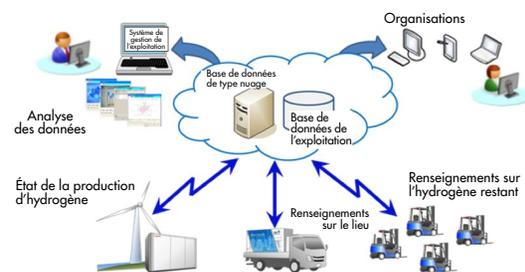


Schéma du système de gestion

Les véhicules sur la route

La quasi-absence d'infrastructures de recharge à l'hydrogène sur le réseau routier québécois et canadien ainsi que les coûts imposants de leur mise en place militent en faveur de l'adoption d'une stratégie de déploiement par étape, et ce, d'autant plus que la superficie du territoire à couvrir est relativement grande comparativement à celle d'autres pays. Cette approche permet d'intégrer graduellement des stations de recharge au réseau de façon ciblée, en misant d'abord sur les véhicules qui roulent le plus et/ou qui produisent le plus d'émissions de GES.

En plus de réduire les irritants découlant de la faible disponibilité des infrastructures, cela aurait pour effet d'optimiser l'utilisation des stations mises en place et de familiariser la population avec ce nouveau type de vecteur d'énergie, contribuant ainsi à améliorer son acceptabilité sociale. Une fois un certain degré de maturité atteint dans le déploiement des stations de recharge à l'hydrogène sur le réseau, la transition énergétique pour le grand public serait sûrement plus rapide et nécessiterait des investissements moindres. Il sera alors possible de répondre aux besoins des automobilistes qui souhaitent adopter des véhicules électriques mais qui ne sont pas disposés à accepter les contraintes liées aux temps de recharge des véhicules à batteries.

Les flottes captives

Pour ce qui est des véhicules, les flottes captives pourraient être ciblées dans un premier temps car elles peuvent être ravitaillées en carburant à leur point de départ ou aux stations de transit dans le cas des bus, ce qui nécessite la mise en place d'un plus faible réseau de stations de recharge et donc des coûts d'investissement initial moindres. De plus, leurs trajets et leur consommation sont prévisibles. Enfin, les flottes captives roulent beaucoup plus que les véhicules personnels, qui eux, sont stationnés la majeure partie du temps. Ces flottes comprennent les voitures taxis, les véhicules de livraison, les flottes gouvernementales, les véhicules d'urgence (policiers, pompiers, ambulances), les autobus inter et intra-urbains et d'autres véhicules de services.

En France, les acteurs de la filière hydrogène ont décidé d'orienter leur stratégie de développement vers les flottes captives (Breton, 2018 ; Mobilité Hydrogène France, 2016). En adoptant cette approche pour démarrer le marché, on s'assure que la station de recharge fonctionne à bonne capacité dès son ouverture et on réduit le besoin en investissement, de même que le risque d'une station peu utilisée. De cette façon, les flottes captives constituent un levier pour le marché de l'hydrogène, marché qui aurait moins de chance de décoller avec la seule demande des particuliers selon les proposants. Onze projets ont récemment été sélectionnés dans différentes régions françaises par le Ministère de la transition écologique et par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) pour bénéficier d'un soutien financier relatif à la mise en place de flottes captives de véhicules à l'hydrogène ou de stations de recharge (BFMTV, 2019b) ; l'investissement potentiel est de l'ordre de 475 millions d'euros et les véhicules priorités sont principalement les voitures taxis, les camions d'ordures ménagères, les services de livraison, les bus et des véhicules utilitaires.



Source : Breton, 2018.

Les données de la Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ, 2019) disponibles pour l'année 2018 indiquent que le Québec dispose de 8 004 taxis urbains et régionaux, 3 970 bus dédiés au transport urbain relevant de l'ATUQ (Association du transport urbain du Québec), 10 650 bus scolaires, 5 359 automobiles ou camions légers de la flotte gouvernementale québécoise, 2 375 automobiles ou camions légers de la flotte gouvernementale fédérale, 12 758 véhicules de police, de service

d'incendie ou autres véhicules d'urgence sans compter les 879 ambulances. À ces flottes captives s'ajoutent celles des grandes entreprises commerciales, notamment les véhicules de livraison de type automobile ou camion léger ainsi que les camions moyens ou lourds desservant les centres de distribution et les grandes chaînes de magasins ; les services de livraison à domicile des magasins et restaurants, et les entreprises de livraison de courrier et de colis constituent aussi des cibles de choix pour la conversion à l'hydrogène. Selon Statistique Canada, il y avait en 2016 au Québec 791 000 camions de marchandises, dont 487 000 camions légers, 221 000 camions moyens et 83 000 camions lourds (Whitmore et Pineau, 2018).

Le transport de marchandises

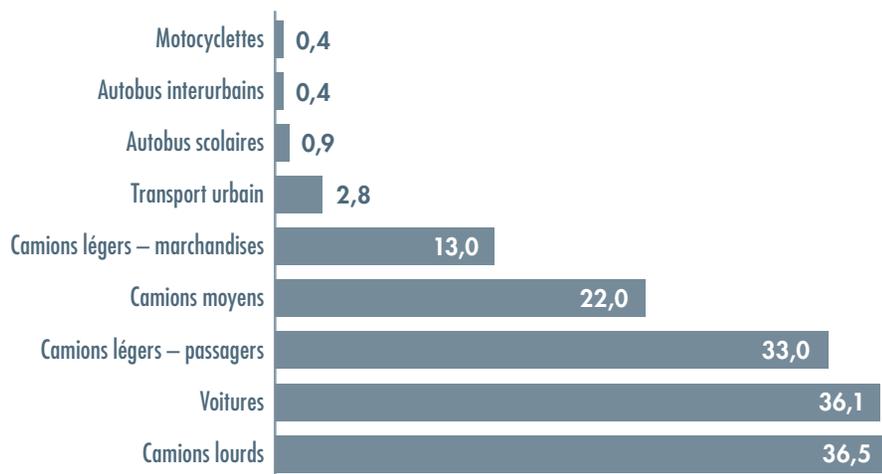
Des experts québécois du secteur de l'énergie ont récemment ciblé les transports commerciaux comme domaine à prioriser pour les initiatives visant à diminuer la consommation d'énergie et les émissions de GES si l'on souhaite atteindre les cibles de réduction établies par le gouvernement pour 2030 (Whitmore et Pineau, 2018). Notons que les camions légers pour le transport des marchandises ont connu une très forte progression entre 1990 et 2014 (+253 %) ; le nombre de camions lourds a pour sa part augmenté de 32 % au cours de la période mais la distance parcourue par chacun s'est accrue de 55 %. Soulignons qu'au Québec, un camion lourd parcourt en moyenne 90 622 km par année alors qu'un véhicule à usage personnel parcourt 13 398 km ; de plus, la consommation moyenne de carburant en litres par 100 km est trois fois plus élevée pour les camions lourds (Whitmore et Pineau, 2018).

La circulation des camions le long des grands axes routiers contribue non seulement à la pollution de l'air et la pollution sonore le long de ces axes, mais aussi aux effets délétères de cette pollution sur la santé de ceux qui résident à proximité ; ces impacts ne se limitent pas aux problèmes respiratoires mais incluent les problèmes cardiovasculaires, le cancer, la prématurité et la démence (American Lung Association, 2019 ; Public Health Ontario, 2015). Au Canada, 30 % de la population habite à moins de 500 mètres d'un grand axe routier et selon une étude récente menée par des chercheurs de l'Université de Toronto, le type de véhicule importerait plus que le volume de trafic comme contributeur à la pollution de l'air et à ses effets nocifs sur la santé : les vieux camions lourds fonctionnant au diesel seraient les principaux coupables (Wang et al., 2018).

Au Québec, parmi les 791 000 véhicules dédiés au transport des marchandises en 2016, on retrouvait 83 000 camions lourds (Whitmore et Pineau, 2018). Malgré leur nombre moins élevé par rapport aux autres camions, ce sont eux qui consomment le plus de carburant et qui produisent le plus d'émissions de GES, compte tenu de la distance élevée qu'ils parcourent (90 622 km/an) et de leur consommation élevée de carburant (29,9 L/100 km). La conversion à l'hydrogène de cette catégorie de camions ressort comme une étape essentielle à la décarbonisation des transports.

FIGURE 33

Émissions de GES du transport routier, Canada, 2014 (Mt équivalent CO₂)



Source : Ressources naturelles Canada, Base de données complète sur la consommation d'énergie.

Plusieurs constructeurs ont relevé le défi et fabriquent actuellement des camions lourds à pile à hydrogène. À la suite d'une entente de partenariat avec l'entreprise suisse H₂ Energy, le constructeur Hyundai fournira 1 600 camions à la Suisse entre 2019 et 2025 et il envisage une expansion à d'autres pays européens le plus rapidement possible (Hampel, 2019). De son côté, Toyota et l'entreprise Kenworth se sont associés pour mettre au point 10 camions lourds propulsés à l'hydrogène qui vont desservir les ports de Los Angeles et Long Beach en Californie (Babcock, 2019). Le constructeur suédois Scania est aussi dans la course avec des camions à l'hydrogène de 26 tonnes commandés par la Norvège; la Norvège cible d'ailleurs 1 000 camions à l'hydrogène pour 2023. Aux États-Unis, la jeune entreprise Nikola Motors a déjà un carnet de commandes de 13 000 camions lourds et semi-remorques à l'hydrogène destinés à plusieurs pays.

Moyennant des incitatifs à la conversion à l'hydrogène, les entreprises de transport québécoises pourraient aussi s'engager sur cette voie. Peu de mesures des plans gouvernementaux en vigueur pour promouvoir les énergies propres visent spécifiquement le transfert vers l'hydrogène, mais certaines mesures mises en place pourraient être pertinentes.



Source : American Lung Association, site web, 2019.

► Les priorités d'action 2015-2020 pour favoriser les transports électriques prévoient entre autres :

- 1) 12,5 M\$ pour des mesures de soutien à des projets de démonstration en transport de marchandises ;
- 2) 38,4 M\$ pour mettre au point des solutions novatrices pour le transport des marchandises ;
- 3) 10 M\$ pour le soutien aux PME pour favoriser l'acquisition, l'implantation et la commercialisation d'équipements et de technologies permettant de réduire les émissions de GES.

► Le plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques prévoit pour sa part :

- 1) 200 M\$ pour améliorer le bilan carbone et l'efficacité énergétique des entreprises ;
- 2) 77 M\$ pour réduire l'empreinte environnementale du transport routier des marchandises.

► Le plan d'action en mobilité durable prévoit dans le cadre de son budget 2018-2023 :

- 1) 124,4 M\$ dans le cadre du programme Roulez vert ;
- 2) 10,4 M\$ pour le projet pilote de stations multicarburants ;
- 3) 7,9 M\$ pour le programme de gestion de l'énergie dans les parcs de véhicules routiers.

8.3 Les nouveaux projets d'infrastructures en transport

Parce qu'ils n'en sont pas encore à la phase d'implantation, les nouveaux projets d'infrastructures en transport offrent un terrain particulièrement propice à l'intégration de l'hydrogène comme source d'alimentation. Plusieurs projets sont prévus au Québec, notamment le futur tramway de la ville de Québec et ultérieurement le train à haute fréquence dans le corridor Québec-Windsor.

Dans une ville touristique à caractère historique comme Québec, où la qualité du paysage urbain est importante, l'alimentation du tramway à l'hydrogène permettrait d'éviter les structures aériennes d'alimentation à l'électricité prévues actuellement et dont l'effet visuel peut s'avérer disgracieux. L'utilisation de l'hydrogène pour alimenter le tramway aurait aussi pour effet d'éliminer les coûts associés à la construction des lignes aériennes de courant. La ville de Québec pourrait ainsi s'inscrire comme chef de file dans l'adoption de cette technologie, accentuant du même coup son attrait comme destination touristique.

Rappelons que la Chine a inauguré un premier tramway à l'hydrogène dans la ville de Tangshan en 2017 et que celui-ci dispose d'un module à pile de l'entreprise canadienne Ballard (Natural Resources Canada, 2019).

De son côté, *Hyundai Motor* et sa filiale de train *Hyundai Rotem* coopèrent actuellement à la réalisation d'un tramway à l'hydrogène pour la Corée en 2020. Les modules de pile à hydrogène mis au point par *Hyundai Motor* seront installés entre les wagons où *Hyundai Rotem* développera l'interface. Ce tramway pourra parcourir 200 km avec une seule charge à une vitesse de 70 km/heure (Ji-hye, 2019).

Le tramway de la ville de Québec

Source: Ville de Québec



Le futur train à haute fréquence du corridor Québec-Windsor

Au Canada, la flotte de 2 318 locomotives de train a consommé 2 millions de litres de diesel en 2016, ce qui a généré 5 964 kilotonnes de gaz à effet de serre et plus de 100 kilotonnes d'autres contaminants de l'air (Railway Association of Canada, 2017). Cela a amené Transport Canada à financer une étude de faisabilité de train à l'hydrogène pour la grande région de Toronto. L'étude menée par *MetroInx* et parue en 2018 conclut que la construction et l'exploitation d'un réseau de trains à l'hydrogène pour le système de transport interrégional Go Transit est techniquement réalisable et que le coût global équivaut à celui d'un système d'électrification suspendu conventionnel; sa mise en œuvre présente différents niveaux de risques et des profits comparables à l'électrification conventionnelle (MetroInx, 2018).

L'entreprise française *Alstom* teste actuellement deux trains à l'hydrogène en Allemagne et prévoit livrer à ce pays 27 autres trains à l'hydrogène pour la région de Francfort (BFMTV, 2019a). Le Canada n'est pas absent du projet: l'entreprise ontarienne *Hydrogenics*, récemment acquise par *Cummins*, a signé en 2015 une entente avec *Alstom* pour lui fournir 200 modules de pile à combustible sur une période de 10 ans (Shirres, 2018). Puisqu'il y joue un rôle non négligeable, le Canada pourrait bénéficier de l'expérience en cours pour envisager à son tour la possibilité de mettre en place un train à l'hydrogène dans le corridor Québec-Windsor. La mise en place de trains à l'hydrogène est devenue une option envisageable avec le perfectionnement de la technologie des modules de piles à hydrogène: avec le temps, ceux-ci sont devenus à la fois plus compacts et plus performants (Shirres, 2018).

En plus de réduire les émissions polluantes et la pollution sonore, les trains fonctionnant à l'hydrogène permettent d'éviter de modifier les ponts et les tunnels pour faire passer les lignes d'alimentation électrique le long des voies, de même que la coupe d'arbres le long du corridor. Le recours à l'hydrogène produit à partir d'une source d'énergie renouvelable, abordable et abondante au Québec contribue de plus à l'indépendance énergétique dans les transports.

En juin dernier, Le Royaume-Uni testait son premier train hybride à l'hydrogène *HydroFlex*, initiative conjointe du *Centre for Railway Research and Education* de l'Université de Birmingham et de *Porterbrook*, la compagnie de chemins de fer britannique; l'entreprise *Ballard Power Systems* de Colombie-Britannique a fourni les modules de pile à combustible (Galluci, 2019). *Alstom* et l'entreprise britannique *Eversholt Rail* travaillent à la conception du *Breeze*, un train à l'hydrogène prévu pour 2022. Dans le cadre de sa stratégie industrielle, le gouvernement britannique investit 23 millions de livres pour l'hydrogène dans les transports (Wiseman, 2019).



Source: Wiseman, 2019.

9. Conclusion, conditions de faisabilité et recommandations

9.1 Conclusion

Cette étude avait pour but de mieux comprendre le rôle de l'hydrogène comme vecteur d'énergie renouvelable et propre dans un contexte de réduction des émissions de gaz à effet de serre. On a vu que la production d'hydrogène à partir des ressources hydroélectriques renouvelables et propres comme celles dont dispose le Québec permet d'optimiser l'utilisation de la production excédentaire d'électricité propre en offrant la possibilité de stocker les surplus en période de faible consommation pour les rendre disponibles ensuite en période de pointe ou même pour les exporter. On a revu les différentes modes de production et de stockage de l'hydrogène de même que ses utilisations industrielles et dans le domaine des transports. On a également examiné les marchés extérieurs où l'utilisation de l'hydrogène est la plus avancée, soit la Californie, la Chine, le Japon et l'Allemagne.

On s'est ensuite penchés sur le cas particulier du Québec qui se distingue des autres provinces canadiennes et des pays de l'OCDE par la part importante occupée par les énergies renouvelables dans son système énergétique. Néanmoins, les émissions de gaz à effet de serre (GES) atteignaient 77 Mt équivalent CO₂ au Québec en 2016 et, de ce total, 27 Mt découlaient du transport routier, dont 12 Mt du transport de marchandises par la route (Whitmore et Pineau, 2018). Pour réduire ces émissions, les gouvernements du Québec et du Canada ont adopté plusieurs mesures et plans d'action qui ont été sommairement passés en revue dans notre étude.

Finalement, on a vu que le Québec est particulièrement bien placé pour profiter du développement de la filière hydrogène, notamment en vertu de la possibilité de produire l'hydrogène par électrolyse à partir des excédents d'hydroélectricité observés en période de faible consommation. Le Québec peut aussi profiter de la conversion à l'hydrogène dans différents segments de marché prometteurs incluant les flottes captives (taxis, véhicules de livraison, flottes gouvernementales, véhicules d'urgence et autobus inter et intra-urbains), les chariots élévateurs, le transport des marchandises incluant les camions lourds, les nouveaux projets d'infrastructures de transport comme le tramway de Québec et le train à haute fréquence. Dans un deuxième temps, on pourra procéder au développement d'un réseau de bornes de recharge à l'hydrogène afin de desservir notamment le segment des automobilistes qui sont réticents à l'usage de véhicules électriques à batteries.

9.2 Conditions de faisabilité et recommandations

- ▶ Les pays les plus avancés dans le déploiement de l'hydrogène dans le secteur des transports se caractérisent tous par un engagement ferme de leur gouvernement qui se traduit par des investissements massifs sous la forme de financement de la R&D, de partenariats public-privé, d'aide aux entreprises pour le développement de nouvelles technologies et la mise en place de stations de recharge, et enfin, d'incitatifs à l'achat de véhicules à pile à hydrogène.
- ▶ Un autre trait marquant est la création d'un consortium réunissant tous les acteurs intéressés du secteur privé, qu'il s'agisse de constructeurs automobiles, de producteurs d'énergie ou d'entreprises de technologie à pile à hydrogène et ce, afin de combiner les expertises et d'avoir un poids plus important.
- ▶ Aucun de ces pays ne bénéficie cependant comme le Québec d'une part élevée d'énergie renouvelable dans son bilan énergétique. Cela positionne avantageusement le Québec sur l'échiquier mondial dans la transition énergétique à l'hydrogène, que ce soit comme remplacement des carburants fossiles au Québec même, ou bien en vue de l'exportation d'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelable.

Dans cette optique, plusieurs actions sont à envisager, aussi bien dans le secteur public que dans le secteur privé pour mettre à profit les atouts dont le Québec dispose. Il ne s'agit pas pour autant de mettre de côté l'approche actuelle qui table principalement sur la conversion à l'électricité des véhicules, mais d'étendre la transition vers les énergies propres afin

Pour le secteur public :

- Miser sur les plans d'action en vigueur pour élargir à l'hydrogène le recours aux énergies propres ;
- Se doter d'une feuille de route de l'hydrogène avec des objectifs et des cibles ;
- Encourager les initiatives de production d'hydrogène à partir des sources d'énergie renouvelable comme l'hydroélectricité, notamment dans les régions éloignées ;
- Stimuler la R&D sur les technologies relatives à l'hydrogène ;
- Mettre en place des incitatifs pour l'achat de véhicules à l'hydrogène, en particulier ceux des flottes captives comme les voitures taxis, les véhicules de livraison, les flottes gouvernementales, les véhicules d'urgence et les autobus ainsi que les camions lourds ;
- Contribuer avec le secteur privé au financement du déploiement graduel des stations de recharge à l'hydrogène ;
- Fournir un cadre réglementaire pour assurer l'utilisation sécuritaire de l'hydrogène ;
- Sensibiliser le public aux enjeux liés à l'hydrogène (sécurité, coûts, bénéfices pour l'environnement).

Actif dans le domaine depuis environ 25 ans, l'Institut de recherche sur l'hydrogène de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) devrait être mis à contribution pour accompagner le déploiement de la stratégie. Parmi les autres acteurs dont l'apport peut s'avérer très utile, mentionnons l'Association canadienne de l'hydrogène et des piles à combustible (ACHPC), ainsi que Ressources Naturelles Canada, Transports Canada et la nouvelle coalition Hydrogène Québec.

d'inclure l'hydrogène et ainsi profiter des avantages additionnels que celui-ci procure. Les arguments justifiant nos recommandations ayant été détaillés dans le chapitre précédent, on peut maintenant résumer les mesures à envisager pour cette stratégie de déploiement de l'hydrogène en les répartissant en deux catégories :

Pour le secteur privé :

- Collaborer avec le secteur public et d'autres intervenants à l'élaboration de politiques fructueuses ;
- Investir dans la production d'hydrogène à des fins d'utilisation au Québec et d'exportation ;
- Adopter une stratégie de conversion par étape :
 - Convertir d'abord les chariots élévateurs dans l'industrie puisque les bénéfices ont déjà été démontrés par des entreprises privées comme Walmart et Canadian Tire ;
 - Participer à la conversion de flottes captives de véhicules (taxis, véhicules de livraison, flottes gouvernementales, véhicules d'urgence et autobus) car elles peuvent être ravitaillées à leur station ou terminus ;
 - Mettre l'accent sur les camions lourds, grands générateurs de GES, en convertissant d'abord ceux qui retournent à leur terminal à chaque soir ;
 - Intégrer l'hydrogène dans les nouveaux projets d'infrastructure de transport comme les tramways et les trains de passagers ;
 - Participer à la construction d'un réseau de stations de recharge à l'hydrogène.

Il va sans dire que les coûts liés à la transition énergétique vers l'hydrogène seront importants. Mais on peut s'attendre à ce que les bénéfices qui en découleront soient substantiels, tant pour les entreprises impliquées que pour l'environnement et la société québécoise dans son ensemble. Avec ses ressources renouvelables, le Québec occupe une position favorable pour amorcer cette transition.

Références

Actu-Transport-Logistique (2019a).

Groupe Perrenot: l'hydrogène et l'électrique bientôt sur parc. *Actu-Transport-Logistique*, 22 mars.

Actu-Transport-Logistique (2019b). Hyundai prévoit finalement 1 600 camions hydrogènes pour la Suisse et l'Europe. *Actu-transport-Logistique*, 26 avril.

Advanced Fuel Cells (2019)

AFC TCP 2019 Survey on the number of fuel cell vehicles, hydrogen refueling stations and targets. International Energy Agency (IEA), ieafuelcell.com.

AFHYPAC (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible) (2018a).

Développons l'hydrogène pour l'économie française. Étude prospective, Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible, Paris.

AFHYPAC (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible) (2018b).

Le programme allemand. *Mémento de l'Hydrogène* fiche 8.2, janvier 2018, Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible, Paris.

AFHYPAC (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible) (2016).

Le transport d'hydrogène. *Mémento de l'Hydrogène* fiche 4.1, mai 2016, Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible, Paris.

Air Liquide (2019a).

Air Liquide investit dans la plus grande unité d'électrolyse à membrane du monde pour développer sa production d'hydrogène décarboné. Air Liquide, Communiqué de presse, Paris, 25 février.

Air Liquide (2019b).

L'énergie hydrogène pour véhicules. Relever les défis du transport propre. Air Liquide, site web.

Air Liquide (2019c).

Comment stocker l'hydrogène. Air Liquide Énergies, energies.airliquide.com, Paris.

Air Liquide (2018).

Air Liquide to build first world scale liquid hydrogen production plant dedicated to the supply of hydrogen energy markets. *Air Liquide News*, Paris, 18 novembre.

Air Products (2019).

Autobus à hydrogène. Air Products, site web, Allentown, Pennsylvanie.

American Lung Association (2019).

Living near highways and air pollution. American Lung Association, site web, Chicago.

Asia Times Staff (2019).

Beijing wants 100,000 hydrogen cars by 2025. *Asia Times*, 25 mars.

AVEQ (2019).

Association des véhicules électriques du Québec, site web, Montréal.

Babcock S. (2019).

Kenworth, Toyota unveils jointly developed hydrogen fuel cell truck. *Truckinginfo.com*, 22 avril.

Ballard (2019a).

Case study – Fuel cell zero-emission buses for Aberdeen, Scotland. Ballard Power Systems, Burnaby, B.C., Canada.

Ballard (2019b).

Case study – Fuel cell zero-emission buses in Foshan and Yunfu, China. Ballard Power Systems, Burnaby, B.C., Canada.

Ballard (2019c).

Case study – Fuel cell forklift fleet at Walmart Canada. Ballard Power Systems, Burnaby, B.C., Canada.

Ballard (2019d).

Fuel cell electric buses. Proven performance and the way forward. Ballard Power Systems, Burnaby, B.C., Canada.

Berman B. (2016).

Network of 12 hydrogen fueling stations takes root in Northeast. *FuelCellCars.com*, 23 avril.

BFMTV (2019a).

Alstom gagne un gros contrat de 27 trains à hydrogène. BFMTV, 21 mai.

BFMTV (2019b).

Les pouvoirs publics financeront ces 11 projets favorisant l'usage de l'hydrogène par les véhicules. BFMTV, 4 mai.

Bhandari R., Trudewind C.A. et Zapp P. (2014).

Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – A review. *Journal of Cleaner Production*, 85: 151-163.

Boucly P. (2015).

Un changement de paradigme dans le système énergétique. *Smart grids-CRE, L'hydrogène.* Commission de régulation de l'énergie, Paris.

Brandon N.P. et Kurban Z. (2017).

Clean energy and the hydrogen economy. *Philosophical Transactions A Math. Phys. Eng. Sci.*, 375 : 2098-2118.

Braunsdorf P. (2018).

Country overview Germany. NOW GmbH, *International Infrastructure Workshop*, Boston, 11 septembre.

Breton A. (2018).

Les flottes captives, premières cibles de la filière hydrogène. *Environnement Magazine*, 23 février.

BusinessWire (2019).

Cummins to acquire Hydrogenics. *BusinessWire.com*, 28 juin.

California Air Resources Board (2018).

2018 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment & Hydrogen Fuel Station Network Development. Sacramento, California.

California Fuel Cell Partnership (2018).

The California fuel cell revolution: A vision for advancing economic, social, and environmental priorities. California Fuel Cell Partnership, Sacramento, juillet.

California Hydrogen Business Council (2018).

CHBC Hydrogen FAQ. California Hydrogen Business Council, Compton, California, 15 janvier.

Carr J. (2019).

Germany Fuel Cell Industry Developments. Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 18 mars.

Chabannes F. (2019).

Le duel batteries-hydrogène pour la motorisation décarbonée du transport routier. *Connaissance des énergies*, 9 mai.

CHFCA (2016).

What types of fuel cells are there? Canadian Hydrogen & Fuel Cell Association, Education Centre, Vancouver.

Clean Energy Partnership (2019).

H₂ Infrastructure: A Network of Filling Stations for Germany. Clean Energy Partnership, site web.

Connaissance des énergies (2019a).

Hydrogène dans les transports. Fiche pédagogique. Connaissances des énergies.org

Connaissance des énergies (2019b).

Capture et stockage du CO₂. Fiche pédagogique. Connaissances des énergies.org

Connaissance des énergies (2015).

Hydrogène énergie. Fiche pédagogique. Connaissances des énergies.org

Daimler (2019).

Sustainability transparent: It all depends on the lifecycle. Daimler, site web.

Desjardins F. (2019).

Une société européenne veut produire de l'hydrogène à Varennes, *Le Devoir*, 25 mai.

Dezem V. (2019).

Germany Turns to Hydrogen in Quest for Clean Energy Economy. *Bloomberg.com*, 2 août.

Ecott K. (2019).

NASA is working on hydrogen powered all electric passenger planes. *NowScience*, 15 mai.

EnergyOR (2019).

Products. EnergyOR, A Plug Power Company, site web.

Energy.gov (2019).

Fact of the month November 2018: There are now more than 20,000 hydrogen fuel cell forklifts across the United States. Washington D.C.

Environment and Climate Change Canada (2016).

Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change, Ottawa.

Environnement et Changement climatique Canada (2019).

Norme sur les combustibles propres: Approche réglementaire proposée, Ottawa.

ETSAP (2014).

Hydrogen production & distribution. *IEA-ETSAP Technology Brief P12*, février.

Euractiv (2019).

Germany eager to become global leader in developing hydrogen technologies. Euractiv, site web.

Eurostat (2019).

Statistiques sur les énergies renouvelables. Eurostat site web, Kirchberg, Luxembourg.

Fehrenbacher K. (2019).

How Anheuser-Busch plans to sustainably ship cold beer around the USA. *GreenBiz*, 13 août.

Fonds stratégique pour l'innovation (2018).

Industrie Canada, Ottawa, site web.

France Diplomatie (2016).

Nouvelle méthode de stockage de l'hydrogène sous forme liquide. *France Diplomatie*, Paris, 29 juillet.

Frangoul A. (2017).

A hydrogen production plant that turns water into car fuel. CNBC, 13 octobre.

FuelCellsWorks (2019).

The eco-balance of the Mercedes-Benz GLC F-Cell, FuelCellsWorks.com, 3 avril.

Galluci M. (2019).

All aboard the U.K.'s first hydrogen train. *IEEE Spectrum*, 21 juin.

Global CCS Institute (2018).

Facilities database. Global Carbon Capture and Storage Institute, site web, Docklands, Australie.

GlobeNewsWire (2019).

Highest increase of hydrogen refuelling stations in Germany worldwide in 2018 again. *GlobeNewsWire*, 15 février.

Goudet J.L. (2016).

Le HY4, un avion électrique à hydrogène étonnant, a pris son envol. *Futura-Sciences*, 6 octobre.

Green Car Congress (2018).

€26M ZEFER project to introduce 180 fuel cell electric vehicles into fleets in Paris, Brussels and London. *Green Car Congress*, 3 mai.

Gurz M., Baltacioglu E., Hames Y. et Kaya K. (2017).

The meeting of hydrogen and automotive: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 23334-23346.

Hampel C. (2019).

Hyundai & H2E: 1,600 fuel cell trucks for Europe. *Electrive.com*, 15 avril.

Hood T. (2019).

New Shanghai hydrogen refueling station is the largest and most advanced in the world. *HydrogenFuelNews.com*, 12 juin.

Horsin Molinaro H. et Multon B. (2018).

Énergies renouvelables et véhicules à batteries ou à pile à combustible et hydrogène. École Normale Supérieure Paris-Saclay.

Hosseini S.E. et Wahid M.A. (2016).

Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57(C): 850-866.

Hummingbird Hydrogen (HH₂) (2019).

Producing Liquid Hydrogen for Bulk Export. HH₂ site web, West Vancouver.

Hydrogen Council (2017a).

How hydrogen empowers the energy transition. Bruxelles.

Hydrogen Council (2017b).

Scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition. Bruxelles.

IEA (2019).

The future of hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the International Energy Agency for the G20, Japon, Paris, juin.

IEA (2017).

Global trends and outlook for hydrogen. Paris, décembre.

IFP Énergies Nouvelles (2019).

Tout savoir sur l'hydrogène. IFP Énergies nouvelles, site web.

Iida S. et Sakata K. (2019).

Hydrogen technologies and developments in Japan. *Clean Energy* 3: 105-113.

Ikeda T. (2018).

Status of hydrogen fueling station technologies in Japan. *International Hydrogen Infrastructure Workshop*, Boston, Mass., 11 septembre.

Institut de recherche sur l'hydrogène (2019).

Valorisation de la biomasse. Université du Québec à Trois-Rivières, Institut de recherche sur l'hydrogène, site web, Trois-Rivières.

IRENA (2018).

Hydrogen from renewable power. Technology outlook for the energy transition. International Renewable Energy Agency, Irena.org, Abou Dabi.

Irfan U. (2016).

Japan bets on a hydrogen-fueled future. *Scientific American*, 3 mai.

Isenstadt A. et Lutsey, N. (2017).

Developing hydrogen fueling infrastructure for fuel cell vehicles: A status update. *The International Council on Clean Transportation*, Briefing, octobre.

Jain I.P. (2009).

Hydrogen the fuel for 21st century. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34: 7368-7378.

Ji-hye S. (2019).

Hyundai Motor, Rotem to develop hydrogen-powered tram by 2020. *Korea Herald*, 10 juin.

Kable G. (2019).

Audi renews hydrogen fuel cell development. *WardsAuto.com*, 3 mai.

Kawasaki (2019).

From LNG Carriers to Liquefied Hydrogen Carriers. Site web.

Kind A. (2019).

Germany: Building one of the world's most advanced hydrogen infrastructure. *Medium.com*, 27 mai.

Krok A. (2019).

Bosch partners with Sweden's Powercell to build fuel cells for electric cars, trucks. *CNET.com*, 29 avril.

Leblanc J. (2018).

Rouler à l'hydrogène. *Québec Science*, 15 février.

Li J. (2018).

Hydrogen energy country overview: China. National Institute of Clean-and-low-carbon Energy, for the US DOE International Hydrogen Infrastructure Workshop 2018, 11-12 septembre.

Liftway (2019).

The entire fleet of material handling at the new Walmart perishable distribution centre (PDC) in Balzac Alberta is powered by hydrogen fuel cells.
Liftway.ca, site web, Case Study Walmart Canada Fuel Cell Forklift Fleet.

Lim C. (2019).

China to build dozens of hydrogen refueling stations for clean energy mobility. *Business Times*, 27 mai.

Lindgaard Molnes (2019).

The race towards the hydrogen society in Japan. *Bergen Energy Lab*, 18 septembre.

Liu Z., Kendall K. et Yan X. (2018).

China progress on renewable energy vehicles: Fuel cells, hydrogen and battery hybrid vehicles. *Energies*, 12: 54-63.

Lowey M. (2019).

\$15 million-project to test hydrogen fuel in Alberta's freight transportation sector.
Canadian Energy Systems Analysis Research, 12 mars.

Lozanovski A., Whitehouse N., Ko N. et al. (2018).

Sustainability assessment of fuel cell buses in public transport. *Sustainability*, 10: 1480-1494.

Manthey N. (2018).

Toyota & Seven-Eleven launching fuel cell project. *Electrice.com*, 6 juin.

Matsumoto A. (2019).

Development potential of hydrogen fuel cell electric vehicles in China. *Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report*, mars.

McKenna A. (2016).

Drones et hydrogène assureront les livraisons de demain. *Les Affaires*, 24 septembre.

Mehta A. (2018).

Hydrogen: Still the fuel of the future?
Chemistry World, 30 juillet.

MELCC (2019).

Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques. Ministère de l'Environnement et de Lutte contre les Changements Climatiques, site web, Québec.

Menia S., Nouicer I., Bakouri Y. et al. (2019).

Production d'hydrogène par procédés biologiques. *Oil & Gas Science and Technology*, 74: 34-49.

MERN (2016).

L'énergie des Québécois. Source de croissance.
Plan d'action de la politique énergétique 2030. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec.

METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) (2019).

Basic Hydrogen Strategy. METI, site web, Tokyo.

Metrolinx (2018).

Hydrail feasibility study report. Metrolinx, Toronto.

Mobilité Hydrogène France (2016).

Mobilité Hydrogène France,
Présentation à l'AVERE, 14 avril. Afhyprac.org

Molinaro H.H. et Multon B. (2018).

Énergies renouvelables et véhicules à batteries ou à pile à combustible et hydrogène.
École Normale Supérieure Paris-Saclay.

MTQ (2015).

Propulser le Québec par l'électricité. Plan d'action en électrification des transports 2015-2020.
Ministère des transports du Québec, Québec.

MTQ (2018).

Transporter le Québec vers la modernité. Plan d'action de la politique de mobilité durable 2018-2023.
Ministère des transports du Québec, Québec.

Nagashima M. (2018).

Japan's hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications, *Études de l'Ifri*, Ifri, Paris, octobre.

Natural Resources Canada (2019).

Hydrogen and Fuel Cells: Sector Status and Vehicle Use in Canada, Ottawa.

Nuvera Fuel Cells (2017).

Canadian Tire Corporation to deploy fuel cell systems from Nuvera. Nuvera.com, 7 février.

O'Dell J. (2019).

Nikola unveils trucks, Launches \$1.5 Billion investment drive. *Trucks*, 17 avril.

Offer GJ, Howey D, Contestabile M. et al. (2009).

Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy*, 38: 24-29.

Olivennes B. (2018).

La révolution de l'hydrogène accélérée grâce à un stockage plus aisé? *Les Smart Grids*, 18 décembre.

Planète énergies (2015).

Le transport et le stockage du CO₂.
Planète-energies.com, 9 juin.

Plaza P. (2018).

California to build liquid hydrogen production plant for the supply of fuel cell EVs.
Petrol Plaza, 28 novembre.

Plourde F. (2016).

Une ressource sous-exploitée : les résidus forestiers.
Les années lumière, Radio-Canada, 10 janvier.

Pocard N. (2019).

California commits to 100% zero-emission bus purchases by 2029: Now what?
Blog.Ballard.com, 31 janvier.

Popov S. et Baldynov O. (2018).

The hydrogen energy infrastructure development in Japan. *Green Energy and Smart Grids*, E3S Web of Conferences 69: 02001.

Potvin C., Burch S., Layzell D. et al. (2017).

Rebâtir le système énergétique canadien. Vers un avenir sobre en carbone. Dialogue pour un Canada Vert, Ressources naturelles Canada, Ottawa.

Priem T. (2017).

Le véhicule à pile à combustible. *Journée de la Mobilité Électrique*, Villeurbanne, France, 14 novembre.

Public Health Ontario (2015).

Case study: Health effects of traffic-related air pollution in a small community. Public Health Ontario, Toronto.

Queensland University of Technology (2019).

Queensland celebrates first shipment of green hydrogen to Japan. Queensland University of Technology, site web, Brisbane, Australie, 28 mars.

Radio-Canada (2016).

Québec créera quatre stations multicarburants d'ici 2018. Ici Radio-Canada.ca, 3 octobre.

Ressources naturelles Canada (2019a).

Base de données complètes sur la consommation d'énergie. Ressources naturelles Canada, Efficacité énergétique, Statistiques de la consommation d'énergie, Tableaux BNCÉ, site web, Ottawa.

Ressources naturelles Canada (2019b).

Faits sur l'énergie renouvelable. Ressources naturelles Canada, site web, Ottawa.

Rivard E., Trudeau M. et Zaghib K. (2019).

Hydrogen storage for mobility: A review. *Materials*, 12: 1973-1994.

Rosen M.A. et Koochi-Fayegh S. (2016).

The prospects for hydrogen as an energy carrier: An overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and the Environment*, 1: 10-29.

Ruf Y., Kaufmann M., Lange S. et al. (2017).

Fuel Cells and hydrogen applications for regions and cities, vol 1. Fuel Cells and Hydrogen (FCH), Roland Berger GmbH, Munich, septembre 2017.

Ruf Y., Lange S., Pfister J., Droege C. (2018).

Fuel cells and hydrogen for green energy in European cities and regions. A study for the fuel cells and hydrogen joint undertaking.

Roland Berger GmbH, Munich, septembre.

Sampangi Archana Rani K. (2019).

Kawasaki starts construction on hydrogen liquefaction and loading terminal in Australia. *NS Energy*, 22 juillet.

Sampson J. (2018).

Energy Independence Now releases renewable hydrogen roadmap. *GasWorld*, 22 mai.

Scania (2019).

Scania et Asko testent la propulsion à l'hydrogène. Scania.com, Södertälje, Suède.

SAAQ (2019).

Données statistiques, Mathieu Girard-Verreault, communication personnelle, Société de l'assurance automobile du Québec, Québec.

Shell (2017).

Shell hydrogen study: Energy of the future? Sustainable mobility through fuel cells and H₂. Shell Deutschland Oil GmbH, Hambourg.

Shirres D. (2018).

Hydrail comes of age. *Rail Engineer*, 5 janvier.

Shumaker C. (2018).

Hydrogen and fuel cells: A global update. *Advanced Clean Technology News*, 4 octobre.

Singh S., Jain S., PS V. et al. (2015).

Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51: 623-633.

Sinigaglia T., De Vargas Lewiski F., Santos Martins T. (2017).

Viability and impacts of hydrogen economy in mobility – A review. *SAE Technical Papers 2017-36-0291*.

Staffell I., Scamman D., Velazquez Abad A. et al. (2019).

The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12: 463-491.

Tarascon J.M. (2011).

La filière hydrogène: de la production au stockage. Chaire Développement durable, Environnement, Énergie et Société, Chaire annuelle – Année académique 2010-2011, Paris.

Taylor M. (2019).

BMW promises to join the hydrogen fuel cell party. *Forbes*, 1^{er} juillet.

Techniques de l'ingénieur (2011).

Décollage du stockage de l'hydrogène sous forme solide. *Le Magazine d'Actualité – Environnement*, 22 mars.

TEQ (2018).

Conjuguer nos forces pour un avenir énergétique durable. Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétique 2018-2023. Transition Énergétique Québec, Québec.

TEQ (2019).

Transition énergétique Québec, site web, Québec.

Terlouw W., Peters D., van Tilburg J. et al. (2019).

Gas for climate. The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system. Prepared for Gas for climate. A path to 2050. Navigant Netherlands B.V., Utrecht.

Toyota (2017).

L'exploitation à grande échelle commence dans le cadre d'un projet de démonstration d'approvisionnement en hydrogène à faible teneur en carbone pour les chariots élévateurs à pile à combustible.

Communiqué de presse, 12 juillet.

Toyota, avec le soutien de l'UQTR (2016).

L'ABC de l'hydrogène au Québec.

Transport Routier. (2018).

Système de signalisation sécuritaire pour chariots élévateurs inventé par un cariste d'Ikea Brossard.

Transport Routier, 29 octobre.

UK H₂ Mobility (2013).

Phase 1 results.

Assets.publishing.service.gov.uk, Londres.

US Department of Energy (2018).

Fuel cells fact of the month November 2018.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy,

Fuel Cells Technology Office, Washington D.C.

US Department of Energy (2017).

Hydrogen production pathways. Washington D.C.

VEHEX (2019).

Solutions écoénergétiques à l'hydrogène pour le transport. VEHEX, site web, 2019.

Verheul B. (2019).

Overview of hydrogen and fuel cell developments in China. Holland Innovation Network China,

Shanghai, janvier.

Voiture Électrique Populaire (2019).

La voiture à hydrogène (ou pile à combustible).

Voiture Électrique Populaire, site web.

Vorano N. (2019).

Hydrogen fuel-cell cars create zero emissions and "fill up" faster than EVs. So what's stopping them?

The Globe and Mail, 6 février.

Wang J.M., Jeong C.H., Hilker N. et al. (2018).

Near-road air pollutant measurements: Accounting for inter-site variability using emission factors.

Environmental Science & Technology, 52: 9495-9504.

Whitmore J. et Pineau P-O. (2018).

État de l'énergie au Québec, 2019. Chaire de gestion

du secteur de l'énergie, HEC Montréal, préparé pour

Transition énergétique Québec, Montréal.

Wilkin B. (2017).

Nous avons testé le PVheater, un stockage de

l'électricité photovoltaïque excédentaire domestique.

Renouvelle, 14 décembre.

Wiseman E. (2019).

Hydrogen fuel cell trains to run on British railways

from 2022. *The Telegraph*, 7 janvier.

Wong A. (2018).

Status of hydrogen and fuel cell related business in

China. *Innovation for Cool Hearth Forum*,

Tokyo, 10 octobre.

World Energy Council (2018).

Hydrogen an enabler of the grand transition. Future energy leader position paper 2018.

Future Energy Leaders, Hydrogen Task Force, Londres.

Xin Z. (2019).

Sinopec to focus on construction of refueling stations.

China Daily, 11 avril.

Yumurtaci Z. et Bilgen E. (2004).

Hydrogen production from excess power in small electric installations.

International Journal of Hydrogen Energy, 29: 687-693.

Zurschmeide J. (2018).

The coming hydrogen fuel cell evolution.

Digital Trends, 21 juillet.

Annexe 1 : Liste des membres de la coalition Hydrogène Québec



TOYOTA



HYUNDAI



HYDROG(E)NICS

