

BANC D'ESSAI GOUVERNEMENTAL SUR LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES À PILE À COMBUSTIBLE

Rapport final

Cette publication a été réalisée par le Bureau du développement de l'hydrogène vert et des bioénergies en collaboration avec la Direction des communications.

Une version accessible de ce document est en ligne sur le site Québec.ca.

Si vous éprouvez des difficultés techniques, veuillez communiquer avec le Bureau du développement de l'hydrogène vert et des bioénergies à Bureau-H2-Bio@mern.gouv.qc.ca.

Pour plus d'informations :

Bureau du développement de l'hydrogène vert et des bioénergies
Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie
380, rue Saint-Antoine Ouest, 5e étage
Montréal (Québec) H2Y 3X7

Courriel : bureau-h2-bio@economie.gouv.qc.ca

Site Web : [Stratégie québécoise sur l'hydrogène vert et les bioénergies | Gouvernement du Québec \(quebec.ca\)](#)

Dépôt légal – 2024

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN [978-2-550-97867-1] (version électronique)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2024

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	3
RÉSUMÉ EXÉCUTIF	4
INTRODUCTION	6
ANALYSE	12
CONCLUSION	38
ANNEXE	39

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Dans le cadre des efforts soutenus pour assurer une transition énergétique durable, le gouvernement du Québec a lancé en avril 2019 un banc d'essai sur les véhicules électriques à pile à combustible (VEPC). Ce rapport synthétise les résultats de ce banc d'essai dont l'objectif fut 1) de documenter l'utilisation des VEPC en contexte nordique, notamment en ce qui a trait aux performances et à l'autonomie énergétiques par temps froid, 2) de développer les connaissances et l'expertise québécoises quant à l'utilisation de l'hydrogène dans les transports, mais aussi sa production par électrolyse de l'eau, 3) de sensibiliser la population québécoise et les employés de l'État aux technologies de l'hydrogène; et 4) de contribuer à accélérer l'électrification des flottes privées et gouvernementales.

Au cours de la période d'étude, d'avril 2019 à juin 2023, 46 VEPC (45 Toyota Mirai et 1 Hyundai Nexo) ont circulé dans la grande région de la Capitale-Nationale. Ces véhicules ont été méticuleusement surveillés avec des capteurs de haute précision, fournissant des données détaillées pour chaque trajet. La distance totale parcourue par la flotte pendant cette période atteint près de 500 000 km. Les performances des véhicules ont révélé une efficacité énergétique moyenne variable selon les saisons et les températures, avec des performances optimales atteignant 95 km/kg d'hydrogène en été contre environ 70 km/kg d'hydrogène en moyenne en hiver.

Le banc d'essai a également permis d'évaluer les performances des infrastructures de production et de distribution d'hydrogène situées dans la ville de Québec. En effet, le projet a mené à la construction de la première station de ravitaillement à l'hydrogène accessible au Québec. Cette station étant munie d'équipements de production d'hydrogène électrolytique sur son site, l'hydrogène vert consommé dans le cadre du banc d'essai était produit sur site, par électrolyse de l'eau. Les données opérationnelles recueillies et analysées ont indiqué qu'un total de 6 101 kg d'hydrogène vert a ravitaillé la flotte de véhicules d'avril 2019 à juin 2023. Le coût estimé de production de l'hydrogène est resté relativement stable, autour de 9,1 \$/kg.

Le rapport intègre des graphiques détaillés des différents indices de performance du banc d'essai qui mettent en évidence les variations saisonnières documentées par les analyses des tendances mensuelles, trimestrielles et annuelles réalisées par l'Institut de recherche sur l'hydrogène de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Ces analyses ont permis d'évaluer l'impact de plusieurs facteurs externes sur les performances, notamment la température.

Bien que le banc d'essai ait atteint les objectifs initialement fixés, certains défis notables ont été relevés. Bien que non critiques, ceux-ci nécessitent une attention particulière pour optimiser l'efficacité et la durabilité de l'écosystème dans son ensemble.

Les expériences et les apprentissages de ce projet pilote offrent des perspectives précieuses qui éclaireront les orientations en cours et à venir concernant le développement de l'hydrogène dans le secteur des transports.

Tableau 1. Synopsis des principaux résultats du banc d'essai.

	2019	2020	2021	2022	2023	Total	
Suivi des véhicules de la flotte							
Distance parcourue (km)	Total	62 832	226 620	123 650	65 959	19 764	498 825
	Moyenne	890	432	224	119	71	
GES évités (tCO₂)	Total	14,5	52,1	28,4	14,2	4,5	115
Efficacité énergétique (km/kg)	Moyenne	77 ±10	79 ±15	84 ±15	84 ±15	89 ±23	
Suivi de la production et de la distribution d'hydrogène							
Temps de recharge (min.)	-	-	4,6	3,5	4,5		
Masse de H₂ ravitaillé (kg)	681	2 750	1 605	803	262	6 101	
Coût de production d'hydrogène (\$/kg)	-	-	9,1	9,0	9,2		

INTRODUCTION

Le présent rapport est le résultat d'une collaboration étroite entre les différentes parties prenantes du banc d'essai du gouvernement du Québec sur les véhicules électriques à pile à combustible (VEPC) qui s'est échelonnée sur quatre années. Il présente une étude approfondie des performances associées au banc d'essai mis en place au sein de la ville de Québec. Le contenu de ce dernier rapporte les résultats des travaux de l'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), qui fut mandaté par le gouvernement du Québec pour analyser l'information compilée tout au long du projet.

Dans le cadre du présent rapport, une analyse statistique est réalisée pour les différents indicateurs de performance, avec des représentations graphiques permettant d'identifier les tendances majeures. Un intérêt particulier a été porté à la comparaison des performances de la flotte de véhicules sur différentes périodes du banc d'essai afin d'évaluer l'impact de variables telles que la température et les modèles de véhicules impliqués. Le rapport se concentre sur l'évaluation de l'impact de la température sur différents indicateurs de performance, un aspect crucial en raison des conditions climatiques variées du Québec.

Le rapport présente également des analyses comparatives de la variabilité des performances observées dans le cadre du banc d'essai et des données compilées par rapport à celles d'une étude similaire conduite par le National Renewable Energy Laboratory (NREL), aux États-Unis. Ces comparaisons offrent une perspective unique sur l'efficacité des systèmes de transport à hydrogène dans des environnements climatiques différents.

De façon complémentaire, le rapport offre aussi une analyse qualitative qui synthétise l'expérience des participants au banc d'essai, à la fois en ce qui a trait à l'utilisation des VEPC et à la station de ravitaillement, mais aborde aussi la perception plus générale des participants vis-à-vis des technologies de l'hydrogène.

Contexte

En 2018, l'ex-agence gouvernementale responsable de la transition énergétique, Transition énergétique Québec¹ (TEQ), a annoncé la création d'un banc d'essai dans la ville de Québec visant à étudier l'utilisation de VEPC (ou plus communément appelé « véhicules à hydrogène ») en contexte nordique afin d'évaluer leurs performances.

Étant donné la volonté gouvernementale d'électrifier le secteur du transport au Québec et l'intérêt d'explorer toutes les options technologiques disponibles, le projet a documenté avec une approche scientifique la technologie des piles à combustible permettant de convertir l'hydrogène en électricité. L'exploration d'options complémentaires à l'électrification des véhicules à batterie pourrait accélérer l'électrification du secteur des transports. Cantonné à la disponibilité commerciale limitée des VEPC, le banc d'essai a été initié avec des véhicules légers, faute d'accès à d'autres gammes durant cette période.

Ce projet scientifique visait non seulement à tester les VEPC en contexte nordique, mais aussi à développer des connaissances et une expertise sur l'usage de l'hydrogène dans le secteur des transports et à sensibiliser l'ensemble

¹ En novembre 2020, Transition énergétique Québec a été intégrée au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). Depuis octobre 2022, la responsabilité de l'énergie au Québec a été transférée au ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE).

de la population québécoise et, en particulier, les employés de l'État aux technologies de l'hydrogène. Les véhicules de location étant intégrés à la flotte institutionnelle du gouvernement du Québec, ce banc d'essai concourrait également aux objectifs en matière d'exemplarité de l'État.

Différentes parties prenantes se sont réparties les responsabilités afin de mener à bien ce banc d'essai.

- **Coordination du banc d'essai.** Transition énergétique Québec, qui est à l'initiative de ce banc d'essai, avait la charge de la coordination et participait à son financement. Après l'intégration de TEQ au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN), en novembre 2020, c'est ce dernier qui a coordonné le banc d'essai jusqu'en octobre 2022, lorsque la responsabilité a été transmise au ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE).
- **Location des véhicules.** Tout au long de l'année 2019, Toyota et Hyundai ont fourni les 46 VEPC qui ont été intégrés à la flotte gouvernementale dans le cadre du banc d'essai, et ce, pour une durée de location de 48 mois. La location de ces véhicules a été assurée par le Centre de gestion de l'équipement roulant (CGER) du ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD).
- **Construction et exploitation de la station de ravitaillement.** L'entreprise Harnois Énergies a été retenue à la suite d'un appel à propositions lancé au début du projet pour construire et exploiter une station publique de ravitaillement en hydrogène gazeux dans la région de la Capitale-Nationale.
- **Déploiement et gestion de la flotte.** Le CGER, dont la mission est d'offrir aux ministères et aux organismes publics du Québec des services complets de gestion de parcs de véhicules, avait la charge de la gestion opérationnelle du banc d'essai. Plus précisément, le CGER devait mettre en service les VEPC et en assurer le bon fonctionnement (service « clé en main ») au sein de la flotte de véhicules du gouvernement du Québec, pendant une période de 48 mois, de 2019 à 2023. Le CGER devait notamment promouvoir le banc d'essai auprès des ministères et organismes, trouver les participants institutionnels dudit banc d'essai, offrir des services d'encadrement, de soutien et de formation à tous les participants du banc d'essai, ainsi que gérer un processus d'acquisition de données liées à l'utilisation des véhicules (système de télémétrie).
- **Mesure et analyse des performances.** L'Institut de recherche sur l'hydrogène (IRH) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) avait la charge d'analyser et de documenter les données du système de télémétrie installé sur les véhicules ainsi que les données des systèmes de production et de distribution d'hydrogène. L'essentiel des analyses de l'IRH a été intégré dans le présent rapport.

Officiellement lancé en octobre 2019 et pour une durée de 48 mois, le banc d'essai est composé de 45 Toyota Mirai, de type berline, auxquels s'est ajouté en janvier 2020 un véhicule utilitaire sport (VUS) Hyundai Nexa. Le choix de véhicules légers a été fait par défaut en l'absence de VEPC d'autres catégories disponibles sur le marché en 2018-2019. L'ensemble de ces véhicules a été loué auprès des constructeurs et a progressivement intégré la flotte institutionnelle du gouvernement du Québec, entre avril 2019 et juillet 2020. Le banc d'essai s'est achevé en juin 2023, et le dernier véhicule a été remis aux constructeurs en décembre de la même année.

Quant à la station de ravitaillement en hydrogène gazeux du propriétaire-exploitant Harnois Énergies, située au 5105, boulevard Wilfrid-Hamel, à Québec, elle est ouverte au public depuis le 12 septembre 2019. L'électrolyseur présent sur le site a été fourni par Hydrogenics, une entreprise ontarienne productrice de technologies de l'hydrogène

détenue par l'entreprise américaine Cummins depuis 2019. L'électrolyseur peut produire jusqu'à 200 kg d'hydrogène vert par jour à partir de l'électricité du réseau d'Hydro-Québec. Cette station de ravitaillement principale est accompagnée d'une station temporaire, fournie par Toyota et opérationnelle dans les 24 à 48 heures en cas d'indisponibilité de la station principale pour cause de défaillance ou de maintenance.

Objectifs du banc d'essai

Plusieurs objectifs soutenaient la pertinence de la mise en œuvre d'un banc d'essai gouvernemental sur les VEPC :

- documenter l'utilisation des VEPC en contexte nordique, notamment en ce qui a trait aux performances et à l'autonomie énergétiques par temps froid;
- développer les connaissances et l'expertise québécoise sur l'utilisation de l'hydrogène dans les transports, mais aussi sa production par électrolyse de l'eau;
- sensibiliser la population québécoise et les employés de l'État au potentiel des technologies de l'hydrogène;
- contribuer à accélérer l'électrification de flottes privées et gouvernementales.

Architecture de l'écosystème

L'écosystème est subdivisé en trois grands groupes, à savoir le système de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, le système de distribution et la flotte de VEPC. L'hydrogène produit est renouvelable, l'électricité utilisée pour sa production provenant du réseau d'Hydro-Québec. Les systèmes de production et de distribution sont situés à proximité, sur le même site, à Québec afin d'assurer la nature renouvelable de l'hydrogène utilisé aux fins du projet pilote, d'optimiser la conception de l'écosystème et de réduire les coûts liés au transport de l'hydrogène. La figure 1 ci-dessous présente une vue schématique de l'écosystème.

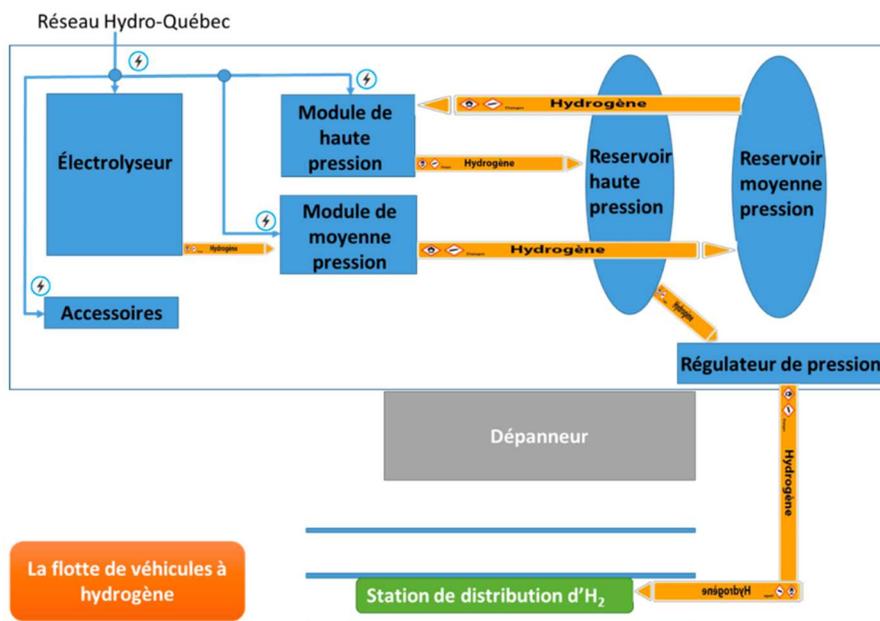


Figure 1. Vue schématique de l'écosystème de la station de ravitaillement de Québec.

Système de production de l'hydrogène

Le système de production d'hydrogène est constitué essentiellement de trois sous-ensembles, notamment l'électrolyseur, modèle HySTAT, le système de compression à haute pression de 850 bar (compresseur et réservoir) et le système de compression à moyenne pression de 320 bar (compresseur et réservoir également). Ces sous-ensembles fonctionnent dans des enceintes distinctes et interconnectées entre elles par des tubes de transport d'hydrogène (voir figure 2).

Système de distribution de l'hydrogène

Le système de distribution d'hydrogène est connecté à la station de production par le biais d'un régulateur de pression qui module de façon sécuritaire le débit et la pression de l'hydrogène provenant du réservoir haute pression (voir figure 2). Le système de régulation d'hydrogène est essentiellement constitué d'un ensemble de valves et de tubes assurant son fonctionnement. La station de ravitaillement, propriété de la compagnie Harnois, constitue la partie visible pour l'utilisateur de l'écosystème hydrogène. Elle est constituée essentiellement d'un réservoir d'hydrogène servant de système tampon et d'une pompe pour le remplissage du réservoir du VEPC. Tout comme dans le cas de l'essence, la station de ravitaillement dispose d'un afficheur de quantité et de prix de l'hydrogène gazeux rempli.

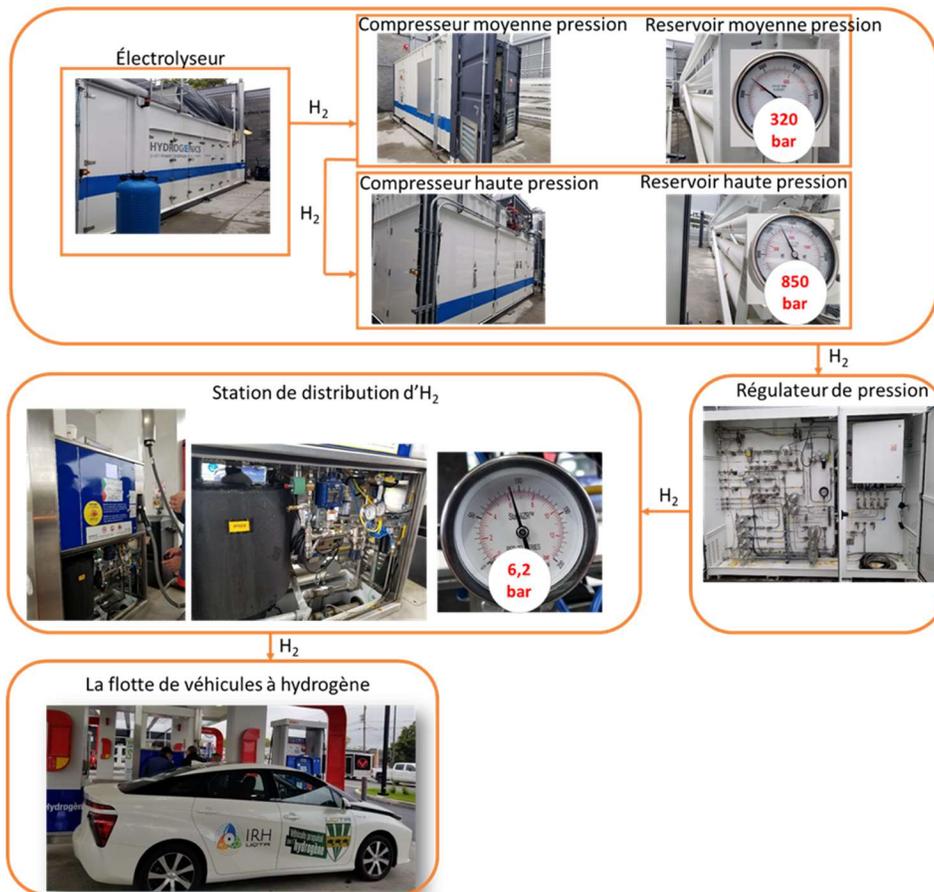


Figure 2. Photos de l'écosystème hydrogène.

Flotte de véhicules à pile à combustible

La flotte est constituée des VEPC déployés dans le cadre du banc d'essai. Ces véhicules, 45 Toyota Mirai et 1 Hyundai Nexo, sont équipés de moteurs électriques alimentés par des piles à combustible fonctionnant à base d'hydrogène. Ainsi, comme les véhicules à batterie, les VEPC sont électriques. Les différents capteurs installés dans ces véhicules transmettent des données ensuite analysées par l'IRH et permettent d'évaluer les différents indicateurs de performance de la flotte.

Les VEPC sont alimentés par de l'hydrogène gazeux comprimé qui alimente une pile à combustible embarquée (figure 3). Cette dernière ne brûle pas le gaz, mais transforme l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie électrique. Cette électricité alimente ensuite les moteurs électriques de la voiture, tout comme les véhicules électriques à batterie. Les émissions à l'échappement sont nulles, et les seuls rejets produits sont de l'eau pure.

Pour ce qui est de la construction de la pile à combustible, elle est similaire à celle d'une batterie. L'hydrogène pénètre dans l'anode, où il entre en contact avec un catalyseur qui favorise la séparation des atomes d'hydrogène en un électron et un proton. Les électrons sont recueillis par le collecteur de courant conducteur, qui est connecté au circuit haute tension de la voiture et alimente la batterie de bord ou les moteurs qui font tourner les roues.

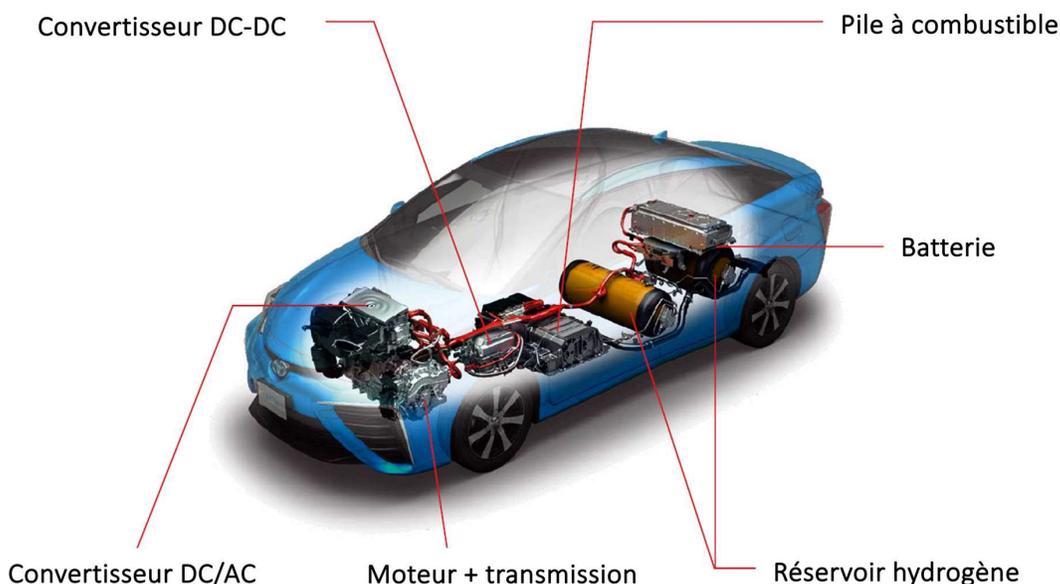


Figure 3. Coupe d'un véhicule à pile à combustible et ses différents composants.

Composants clés d'un véhicule à pile à combustible

Batterie (auxiliaire)	Pile à combustible	Contrôleur électronique de puissance
Dans un véhicule à propulsion électrique, la batterie auxiliaire basse tension fournit l'électricité nécessaire au démarrage de la voiture avant que	Un assemblage d'électrodes à membranes individuelles qui	Cette unité gère le flux d'énergie électrique fourni par la pile à combustible et la batterie de

la batterie de traction ne soit engagée. Elle alimente également les accessoires du véhicule.

utilise l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité.

traction, en contrôlant la vitesse du moteur électrique de traction et le couple qu'il produit.

Batterie

Cette batterie haute tension stocke l'énergie générée par le freinage par récupération et fournit une puissance supplémentaire au moteur de traction électrique.

Remplissage de carburant

Le pistolet d'un distributeur de carburant se fixe au réceptacle du véhicule pour remplir le réservoir.

Système thermique (refroidissement)

Ce système permet de maintenir la température de fonctionnement de la pile à combustible, du moteur électrique, de l'électronique de puissance et d'autres composants dans une plage appropriée.

Convertisseur DC/DC

Ce dispositif convertit le courant continu à haute tension provenant de la batterie de traction en courant continu à basse tension nécessaire au fonctionnement des accessoires du véhicule et à la recharge de la batterie auxiliaire.

Réservoir de carburant (hydrogène)

Il stocke l'hydrogène à bord du véhicule jusqu'à ce que la pile à combustible en ait besoin.

Transmission (électrique)

La transmission transfère la puissance mécanique du moteur de traction électrique pour entraîner les roues.

Moteur de traction électrique

En utilisant l'énergie de la pile à combustible et de la batterie de traction, ce moteur entraîne les roues du véhicule. Certains véhicules utilisent des moteurs-générateurs qui assurent à la fois les fonctions d'entraînement et de régénération.

Collecte de données

L'étude de suivi de performance de l'écosystème hydrogène dépend fortement de la disponibilité et de la qualité des données collectées à partir des capteurs installés dans les différents sous-ensembles (production et distribution de l'hydrogène, ainsi que la flotte de véhicules). Ces données ou variables sont transformées en indicateurs illustrant les performances du système et de ses différentes composantes. L'IRH évalue les indicateurs de performance de la station de distribution d'hydrogène directement à partir de Geotab, la plateforme d'accès aux données de télémétrie,

à l'exception du temps de ravitaillement, qui a été remplacé par le temps passé à la station. Pour remédier à ce manquement, les discussions avec les partenaires du banc d'essai ont permis d'avoir les données sur le temps réel de ravitaillement ainsi que sur les principales caractéristiques de la station de production et de la station de distribution.

Sondage auprès des utilisateurs

Dans le cadre du banc d'essai, un sondage facultatif a été réalisé au mois de janvier 2023 afin d'évaluer l'appréciation des participants concernant l'utilisation de la flotte de véhicules et de la station de ravitaillement. Connexe aux sondages formels et informels réalisés en continu par le CGER, l'objectif de ce sondage était d'évaluer le niveau de connaissance et de satisfaction des participants au banc d'essai vis-à-vis des technologies de l'hydrogène, et plus précisément des VEPC qu'ils ont utilisés pendant près de quatre années. Les questions posées alternaient entre réponses écrites et réponses à choix multiple, et les répondants n'étaient pas tenus de répondre à toutes les questions. Le sondage a été transmis aux participants du banc d'essai par le CGER via la plateforme SurveyMonkey. Les résultats du sondage sont résumés à la section II.e.

ANALYSE

Flotte de véhicules à pile à combustible

Les indicateurs de performance de la flotte de véhicules du banc d'essai sont regroupés en quatre catégories principales selon leur similarité : le déploiement des véhicules, le comportement de conduite, le comportement de ravitaillement et la consommation d'hydrogène. La flotte de véhicules à hydrogène a parcouru une distance totale de 498 827 km entre avril 2019 et le 30 juin 2023. Si cette même distance avait été parcourue par des voitures à essence avec une consommation moyenne de 10 L/100 km, la consommation totale d'essence aurait été de 49 883 litres. En considérant qu'un litre d'essence produit environ 2,3 kg de CO₂, les VEPC du banc d'essai ont ainsi permis d'éviter l'émission d'environ 115 tonnes de CO₂.

Déploiement des véhicules

Cette sous-section retrace l'évolution de la taille de la flotte de véhicules, en termes de mise en service, de distance totale parcourue ainsi que de l'utilisation effective de ces voitures. La figure 4 illustre l'évolution du déploiement des véhicules au cours de la période du banc d'essai. Afin d'illustrer le délai entre la livraison, l'instrumentation et l'utilisation effective des véhicules, les données de déploiement sont présentées sous deux formes différentes : le nombre de véhicules déployés et le nombre de véhicules ayant commencé à circuler. Les résultats montrent que le nombre de VEPC déployés dans le cadre du banc d'essai est resté relativement stable depuis octobre 2020, avec un total de 46 véhicules (45 Toyota Mirai et 1 Hyundai Nexa).

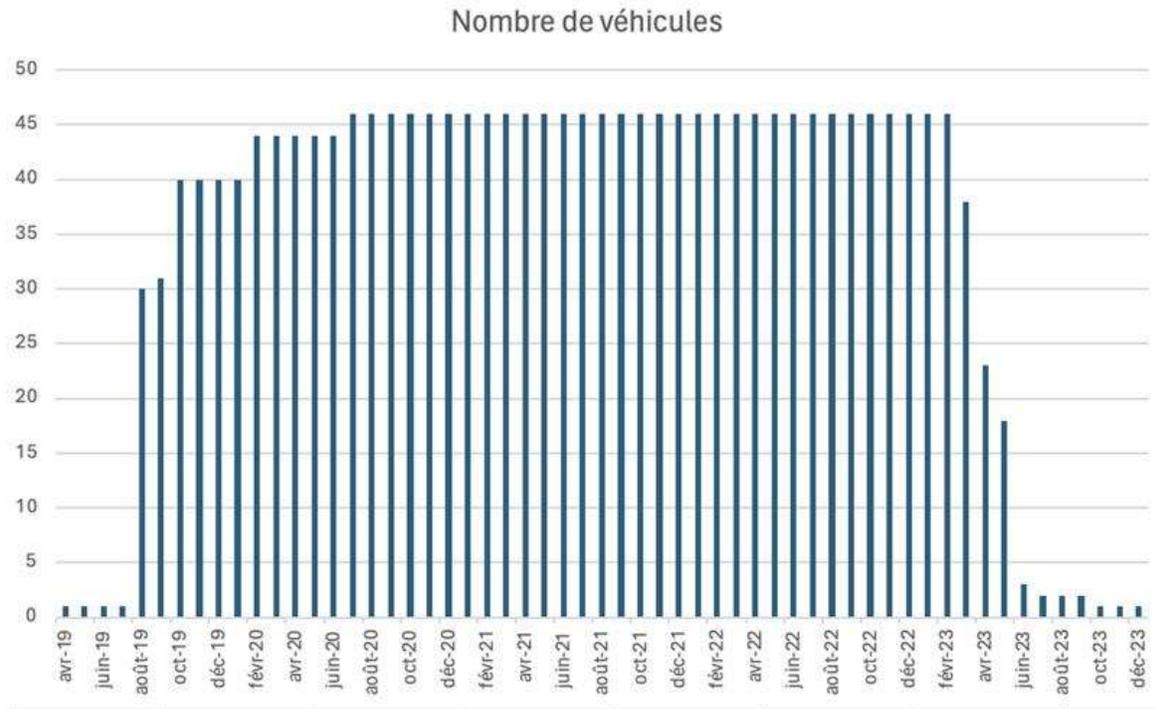


Figure 4. Nombre total de véhicules déployés.

Comportement de conduite

Cette section recense les indicateurs illustrant les habitudes de conduite des utilisateurs des véhicules de la flotte. Les différents indicateurs présentés sont la distance parcourue par les véhicules de la flotte, le nombre de sorties effectuées et la vitesse moyenne des trajets. En ce qui concerne la distance parcourue, la figure 5 montre l'évolution de la distance totale parcourue par l'ensemble des véhicules de la flotte. Cette figure illustre la non-homogénéité des distances parcourues au fil des années et une baisse progressive du kilométrage au cours des trois dernières années du banc d'essai. L'une des principales problématiques rencontrées durant ce banc d'essai est la faible utilisation de plusieurs véhicules de la flotte au fil du temps. Pour mieux caractériser le taux d'utilisation des véhicules, un critère d'utilisation basé sur la distance totale parcourue par chaque véhicule au cours d'un trimestre a été défini. Selon ce critère, un véhicule parcourant une distance totale de 200 km et plus durant un trimestre est considéré comme un véhicule effectivement utilisé (VEU).

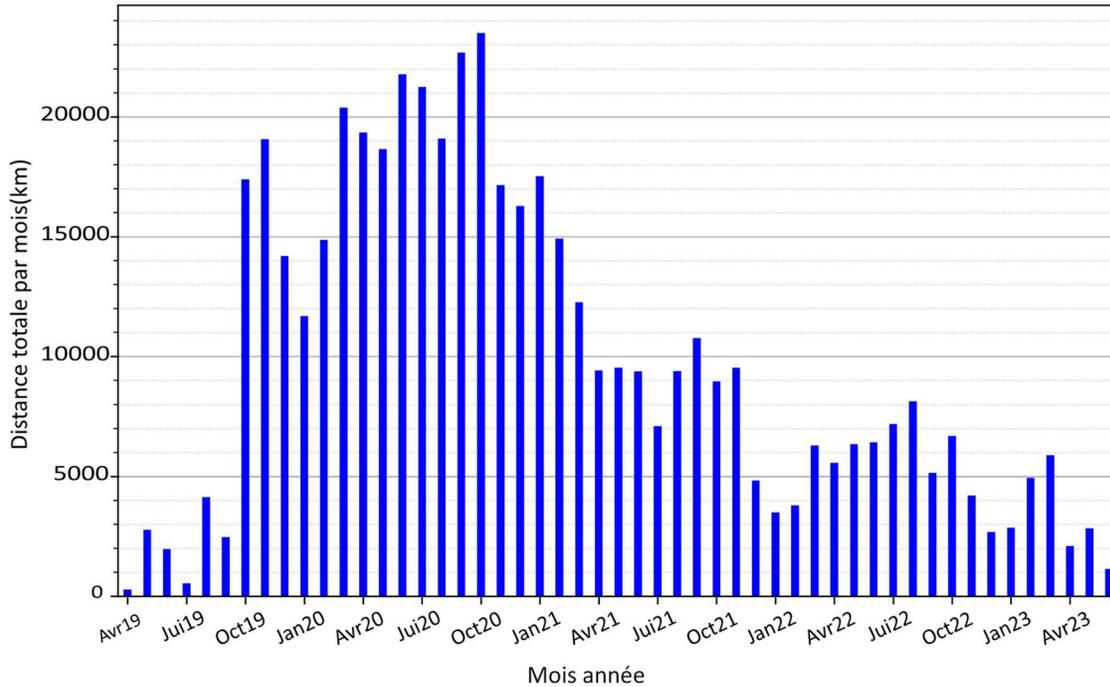


Figure 5. Distance totale parcourue par mois par tous les véhicules de la flotte.

La figure 6 illustre l'évolution du taux d'utilisation des véhicules de la flotte chaque trimestre tout au long de la période du banc d'essai. Cette figure met en évidence que les deux premières années ont connu une période d'engouement, avec un taux d'utilisation des véhicules de la flotte élevé, atteignant même 80 % lors du trimestre d'octobre à décembre 2020. Cependant, après cette période de pointe, le taux a progressivement chuté au cours des deux dernières années du banc d'essai sous les 40 % de la flotte, soit une diminution de moitié par rapport à la période de pointe. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette baisse d'utilisation des véhicules au fil du temps. Parmi ces facteurs, on peut citer les problèmes rencontrés par les usagers lors du ravitaillement en hydrogène à la station de distribution, qui seront abordés dans la section II.d. de ce rapport, ainsi que la baisse du nombre de déplacements liée à l'adoption du télétravail.

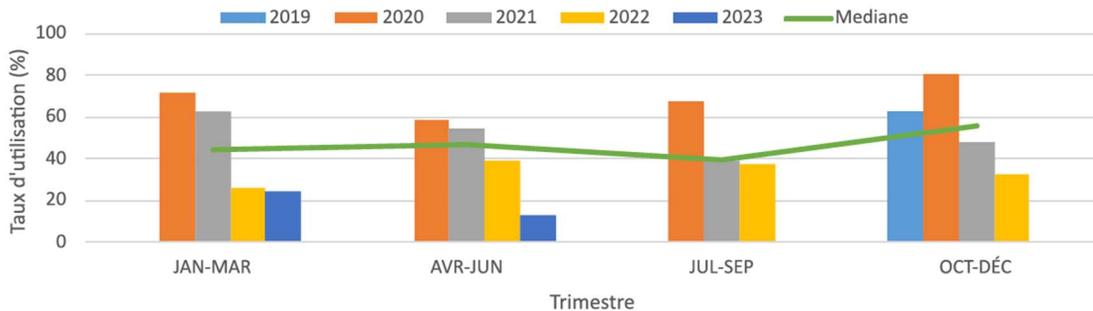


Figure 6. Évolution du taux d'utilisation effective des véhicules de la flotte par rapport à la taille de la flotte (46 véhicules)²

² Seuls les véhicules ayant parcouru une distance totale de 200 km et plus au cours du trimestre sont représentés sur cet histogramme.

Afin de mieux caractériser le comportement des véhicules de la flotte dans leurs conditions normales d'utilisation, les véhicules qui ont été très peu utilisés (distance trimestrielle inférieure à 200 km) ont été exclus des données présentées dans les figures 7 et 8. La figure 7 affiche le nombre moyen de sorties mensuelles effectuées par les VEU durant les quatre années du banc d'essai, tandis que la figure 8 présente la distance moyenne mensuelle parcourue par ces mêmes véhicules.

Ces données soulignent une corrélation claire entre le nombre de sorties et la distance parcourue moyenne, révélant une certaine régularité dans les habitudes de trajet. De plus, les résultats indiquent une utilisation légèrement plus élevée en été (juin à septembre) par rapport aux autres périodes de l'année. La pointe d'utilisation globale de la flotte a été observée en juin 2020, avec environ 68 sorties par véhicule en moyenne et une distance moyenne parcourue par véhicule d'environ 800 km. Enfin, l'analyse des données groupées indique que les utilisateurs des VEU ont parcouru en moyenne une distance mensuelle de 445 km. Cette analyse considère l'ensemble de la période du banc d'essai, à l'exception des deux premiers et des deux derniers trimestres, qui sont des périodes caractérisées respectivement par le déploiement progressif et le retrait progressif des véhicules.



Figure 7. Évolution du nombre de sorties mensuelles des véhicules effectivement utilisés (VEU).

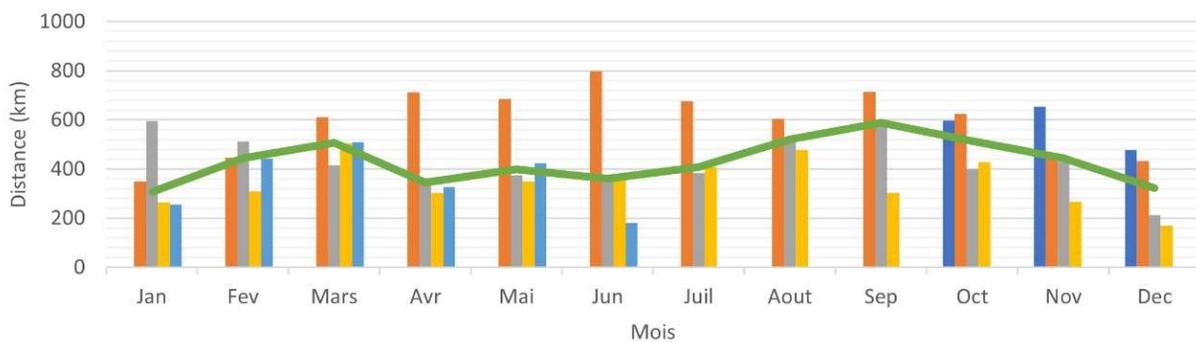


Figure 8. Évolution de la distance moyenne mensuelle des véhicules effectivement utilisés (VEU).

La figure 9 illustre la corrélation entre la distance totale parcourue par les véhicules de la flotte chaque trimestre, le déploiement des véhicules et leur taux d'utilisation. L'indication principale de cette figure est que la distance parcourue par la flotte est presque proportionnelle de manière linéaire au taux d'utilisation des véhicules. De plus, la période présentant la meilleure utilisation des véhicules de la flotte s'étend de fin 2019 au début de l'année 2021. Le taux d'utilisation moyen des VEU sur l'ensemble de la période du banc d'essai est d'environ 48 %.

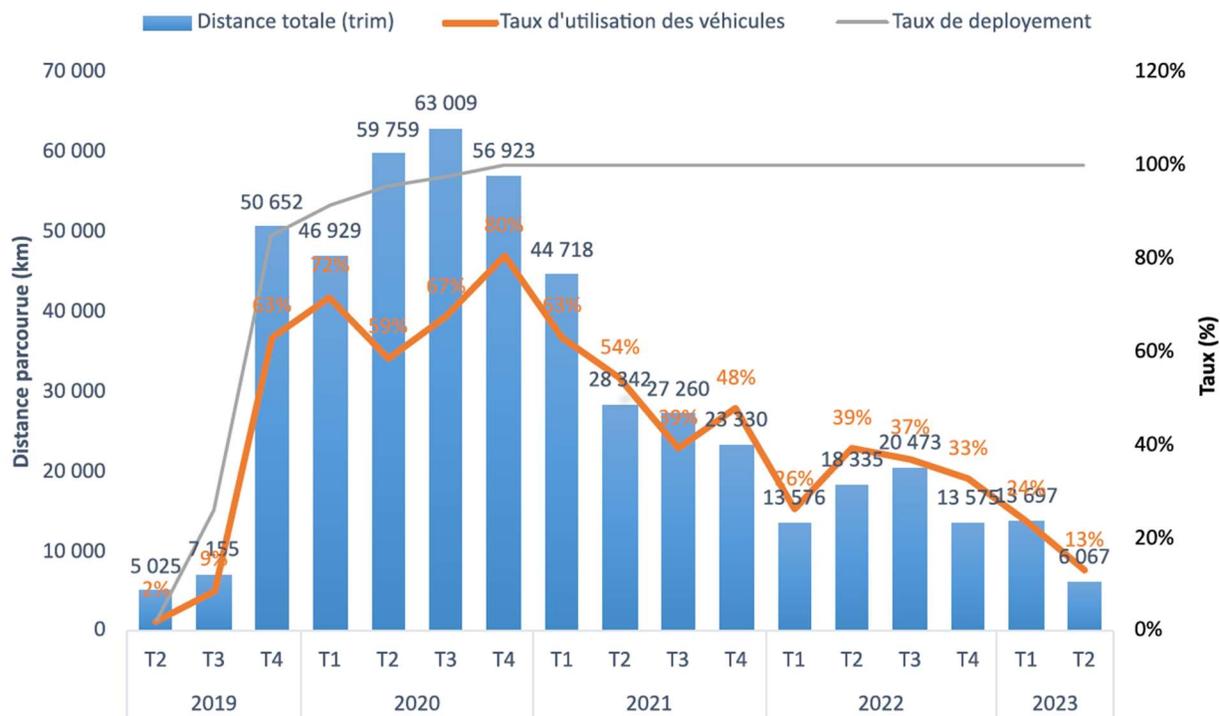


Figure 9. Évolution de la distance totale parcourue par les véhicules et le taux d'utilisation au cours des trimestres.

La figure 10 illustre la distribution de la vitesse moyenne des trajets de plus de 2 km pour toute la période du banc d'essai. L'analyse des données révèle que les véhicules de la flotte circulaient à une vitesse moyenne de 38 km/h en tenant compte de l'ensemble des déplacements, à l'exception de ceux de moins de 2 km. Ce résultat est très proche de celui de l'étude du NREL, qui est de 35 km/h³. À partir de cette donnée, on peut déduire que la majorité des déplacements ont lieu en milieu urbain, étant donné que près de 75 % de ces trajets sont effectués à une vitesse moyenne inférieure à 50 km/h.

³ National Renewable Energy Laboratory (NREL), « Fuel Cell Vehicle Composite Data Products », 2018.

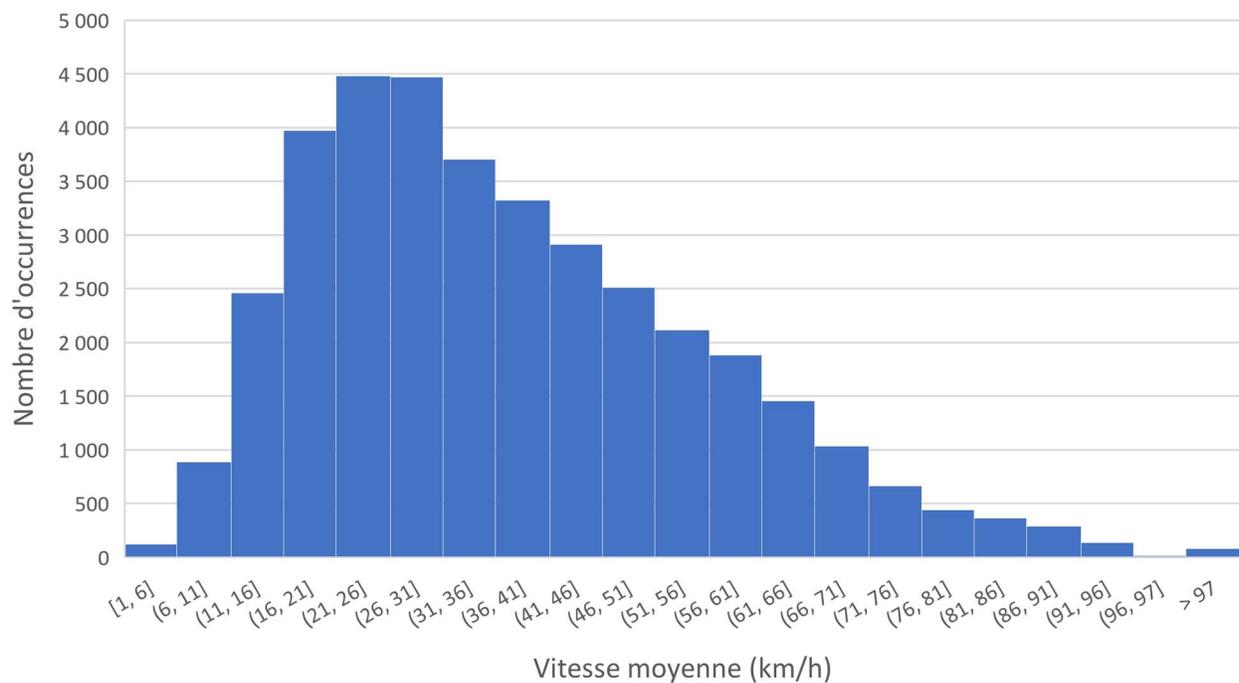


Figure 10. Répartition des trajets selon la vitesse moyenne.

Comportement de ravitaillement

Le niveau du réservoir d'hydrogène avant ravitaillement est représenté à la figure 11. Cette illustration montre que près de la moitié des véhicules arrivent à la station de distribution avec un niveau de réservoir compris entre 20 % et 50 %. De plus, les véhicules se sont ravitaillés avec un niveau moyen du réservoir d'hydrogène avant le ravitaillement d'environ 35,7 %. Ces résultats sont similaires à ceux observés par l'étude du NREL, qui a rapporté une moyenne de 35 %⁴. En définitive, les observations réalisées au cours de chaque trimestre mettent en lumière une certaine régularité dans les habitudes de ravitaillement des conducteurs des véhicules de la flotte concernant le niveau du réservoir avant ravitaillement.

⁴ NREL, 2018.

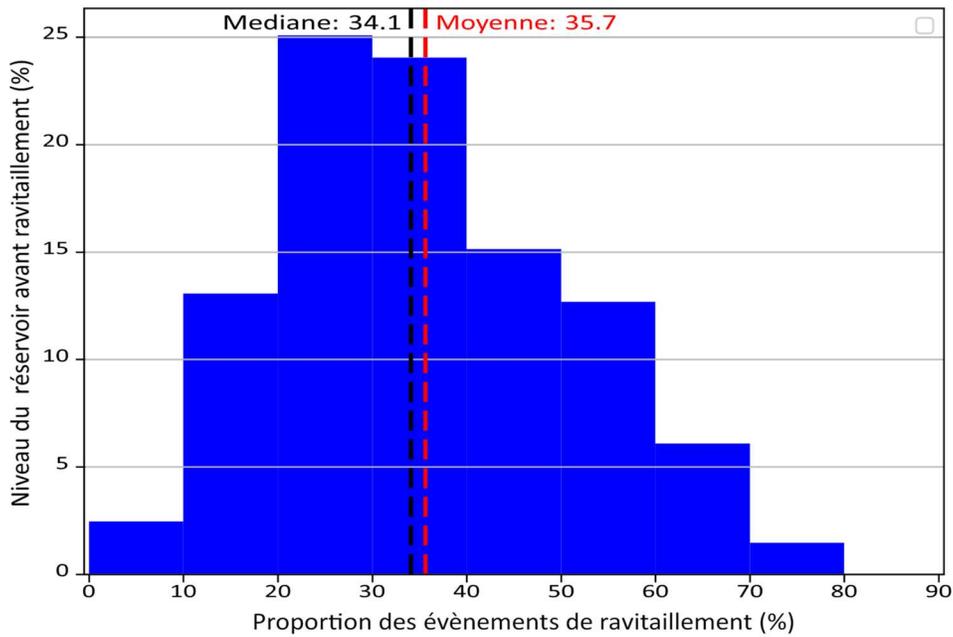


Figure 11. Distribution du niveau de réservoir moyen avant ravitaillement.

Il est important de noter que le ravitaillement de sept véhicules de la flotte est géré par le CGER. En ce qui concerne l'heure de ravitaillement, l'analyse des données révèle que le ravitaillement des véhicules par le CGER se fait en majorité autour de 10 h, 13 h et 19 h (figure 12). En revanche, les autres véhicules (gérés par les conducteurs eux-mêmes) se sont ravitaillés en majorité dans la plage horaire de 7 h à 15 h, avec des pointes vers 10 h et 11 h. Quant aux jours de la semaine (figure 13), les remplissages effectués par le CGER sont majoritairement réalisés le mercredi, suivis d'une deuxième pointe le dimanche. Les autres véhicules se ravitaillent majoritairement du lundi au vendredi, et très rarement le samedi et le dimanche. Ces observations sont pleinement cohérentes avec celles de chaque trimestre, ce qui témoigne d'une constance dans les habitudes de ravitaillement des utilisateurs.

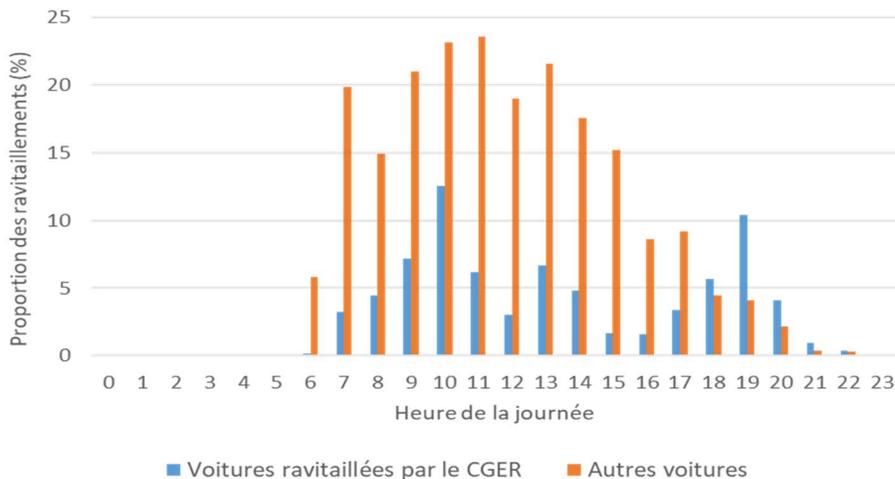


Figure 12. Répartition des remplissages en fonction des heures de la journée.

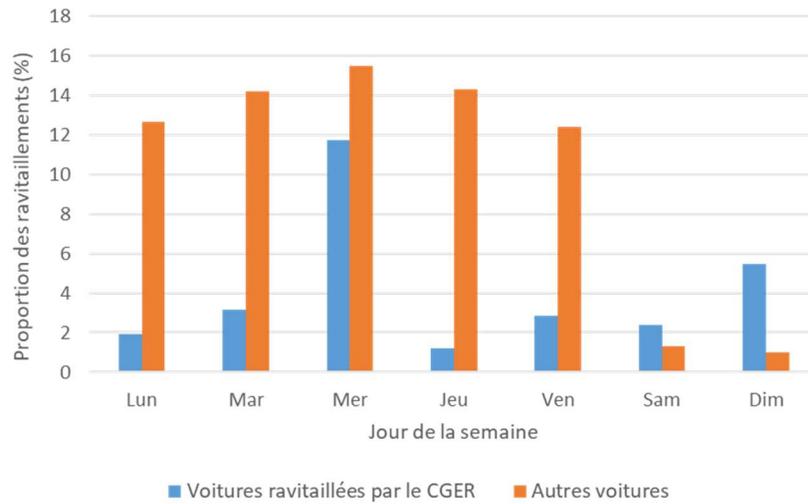


Figure 13. Répartition des remplissages en fonction du jour de la semaine.

Consommation d'hydrogène

La figure 14 illustre la diversité des températures saisonnières moyennes au Québec. Cette alternance de périodes de températures positives et négatives a un effet considérable sur quelques indicateurs de performance de l'écosystème, notamment sur l'efficacité énergétique des véhicules.

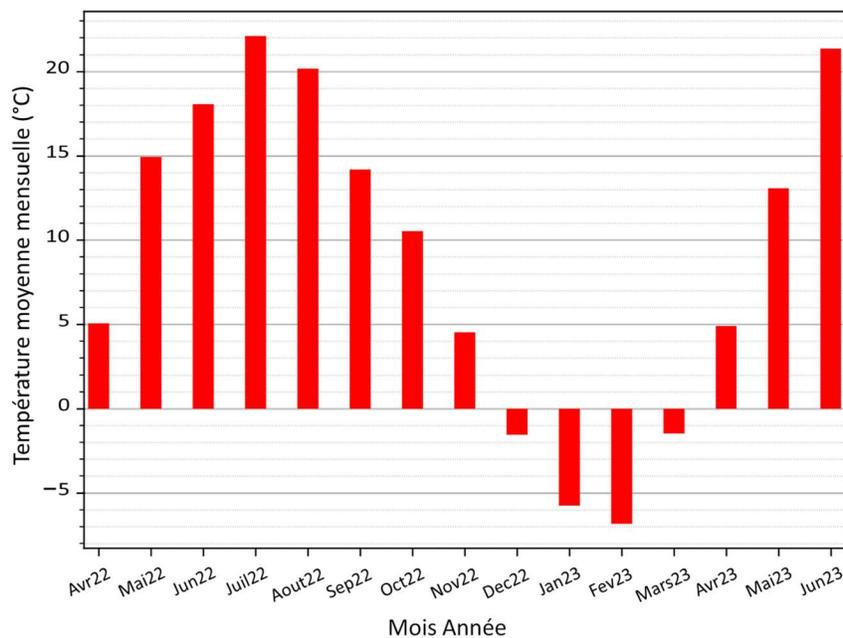


Figure 14. Distribution de la température ambiante moyenne mensuelle lors des déplacements.

Dans cette section, nous présentons l'étude de l'efficacité énergétique des véhicules, qui est exprimée en km/kg. Cet indicateur est très important, car il fournit à l'utilisateur des informations pertinentes telles que l'autonomie et les coûts liés à l'utilisation du véhicule. L'efficacité est calculée dans cette étude selon les données de ravitaillement des véhicules et la distance parcourue entre deux ravitaillements. Bien que ce soit un calcul approximatif, il donne une bonne indication de l'efficacité des véhicules. Les détails du calcul sont présentés dans l'équation suivante :

$$\eta_e^{\text{eff}} \approx \frac{d^{e,e-1}}{(n_{e-1}^{\text{reser}} - n_e^{\text{reser}}) C_{\text{total}}^{\text{reser}}}$$

Équation où e est l'événement de ravitaillement où le véhicule vient à la station pour se ravitailler en hydrogène, $d^{e,e-1}$ est la distance parcourue par le véhicule entre l'événement de ravitaillement actuel et le précédent événement de ravitaillement en km, n_e^{reser} , n_{e-1}^{reser} et $C_{\text{total}}^{\text{reser}}$ sont respectivement le niveau du réservoir avant le ravitaillement pour l'événement de ravitaillement actuel en %, le niveau du réservoir après l'événement de ravitaillement précédent en % et la capacité de stockage d'hydrogène du véhicule en kg.

La figure 15 présente l'évolution mensuelle de l'efficacité énergétique moyenne (km/kg) pour l'ensemble de la flotte au cours de chaque année. Il est important de rappeler que la flotte de véhicules est composée de deux technologies de véhicules à hydrogène : 45 Toyota Mirai et 1 Hyundai Nexu. L'analyse des données révèle une tendance cohérente montrant une diminution de l'efficacité énergétique à mesure que la température baisse, constatée tout au long de la période du banc d'essai. Cette baisse de performance énergétique en corrélation avec la température s'explique principalement par la demande accrue d'énergie pour le chauffage de l'habitacle et également par les forces résistives, telles que les frottements et l'aérodynamique. L'analyse des données montre que les valeurs les plus élevées de l'efficacité énergétique moyenne mensuelle (> 90 km/kg) se situent dans la période allant de mai à septembre, et en partie en octobre, notamment depuis 2021.

La nette augmentation de l'utilisation de la Hyundai Nexu, liée à un changement d'utilisateur, par rapport aux Toyota Mirai, depuis le trimestre de janvier-mars 2022, a contribué progressivement à améliorer l'efficacité moyenne globale de la flotte au fur et à mesure que le nombre de Mirai en circulation diminuait. Par ailleurs, dans des conditions de température similaire (> 20 °C), les chiffres de ce banc d'essai sont supérieurs aux résultats du NREL (88 km/kg en moyenne⁵). En revanche, les valeurs moyennes mensuelles de l'efficacité énergétique observées dans ce banc d'essai sont inférieures à la valeur du constructeur (110 km/kg), qui peut être considérée comme une valeur théorique de référence. En définitive, les températures moyennes chaudes (supérieures à 10 °C) améliorent les performances énergétiques des voitures à hydrogène. Ces performances se dégradent considérablement pour les températures négatives (inférieures à -1 °C), avec notamment les plus faibles performances enregistrées en hiver, de décembre à mars.

⁵ NREL, 2018.

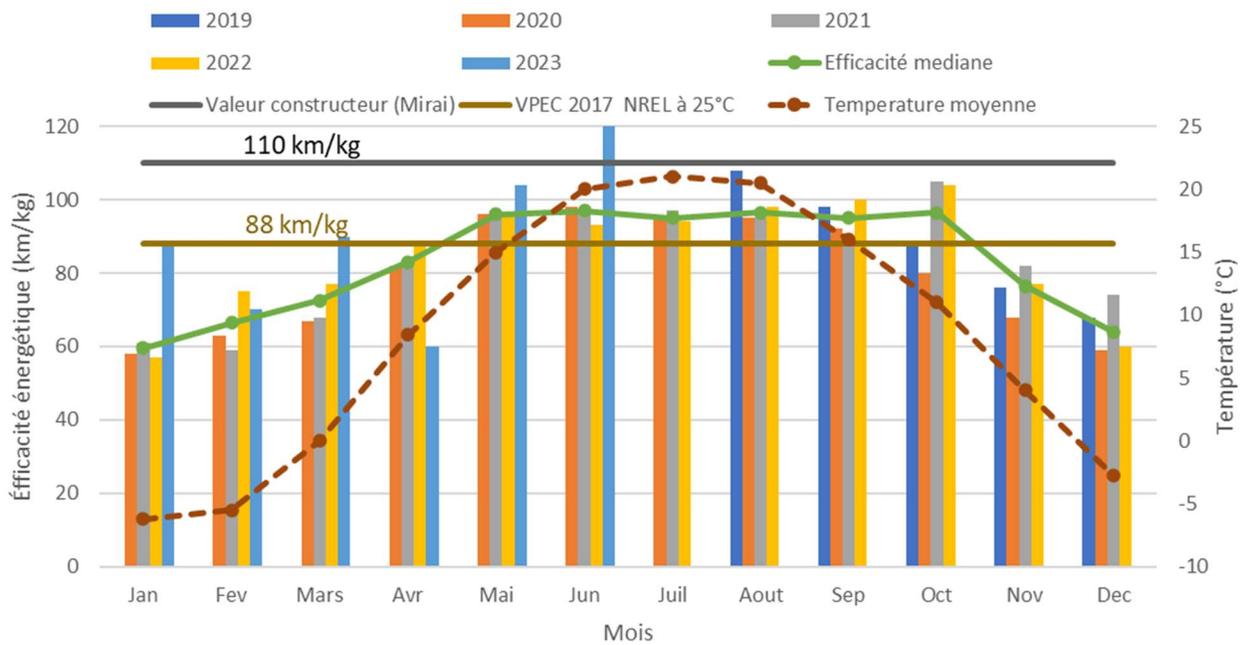


Figure 15. Répartition de l'efficacité énergétique moyenne mensuelle des véhicules.

Il convient de rappeler que les données de l'efficacité énergétique présentées sont estimées à partir des données de différents capteurs intégrés au véhicule, dont le capteur du niveau de réservoir d'hydrogène entre les ravitaillements. Ainsi, la précision de ces mesures détermine directement la précision des calculs d'estimation de l'efficacité énergétique. La figure 16 présente l'efficacité énergétique à l'échelle de chaque trajet, ce qui permettrait d'observer toute la variabilité dans les données et de mieux caractériser l'efficacité énergétique selon les trajets. Les résultats confirment également la tendance à la baisse de l'efficacité énergétique avec la température.

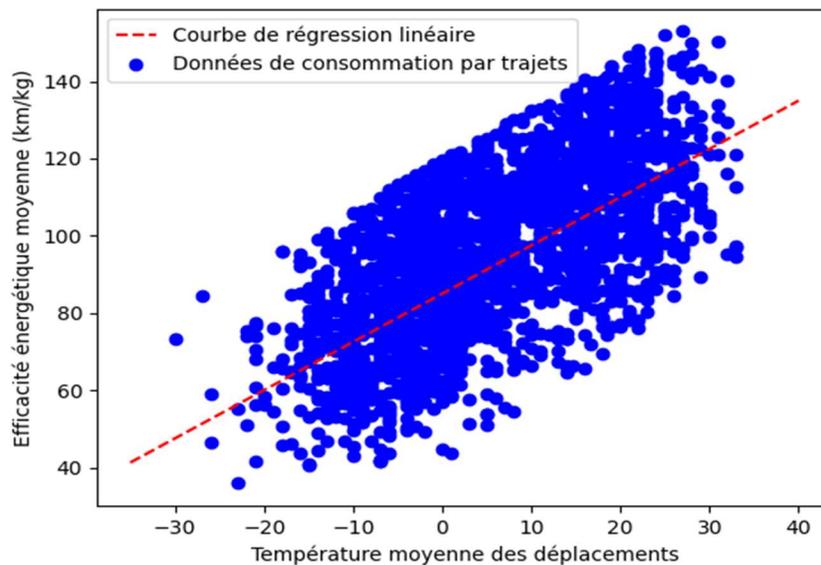


Figure 16. Évolution de l'efficacité énergétique en fonction de la température moyenne journalière.

Le tableau 2 présente un ensemble d'indicateurs de performance des véhicules Mirai de la flotte à trois températures distinctes (-6 °C, 10 °C et 20 °C).

Tableau 2. Performances énergétiques des véhicules Mirai pour trois valeurs de la température.

	Température moyenne -6 °C	Température moyenne 10 °C	Température moyenne 20 °C
Nombre de km parcourus par kg d'H ₂ (km/kg)	64 km/kg	98 km/kg	108 km/kg
Fluctuations par rapport à la valeur du constructeur (110 km/kg)	-41,81 %	-10,9 %	-1,81 %
Consommation moyenne (kg/100 km)	1,56 kg/100 km	1,02 kg/100 km	0,92 kg/100 km
Autonomie avec un plein d'hydrogène en km	320 km	490 km	540 km
Coût de 100 km en CAD (prix à la pompe : 17,3 CAD/kg)	27 CAD	17,6 CAD	15,9 CAD

Les observations des figures 14 à 16 indiquent que, outre l'imprécision des capteurs de mesure de niveau de réservoir, plusieurs autres facteurs peuvent affecter considérablement l'efficacité énergétique. Ces facteurs sont :

- les habitudes de conduite;
- la diminution de l'efficacité de la pile à hydrogène et de la batterie de soutien installées sur le véhicule à basses températures;
- l'ajout de l'énergie nécessaire pour le chauffage en hiver ou pour la climatisation en été;
- l'augmentation de la force de frottement des roues à cause du contact entre les pneus d'hiver et la chaussée, qu'elle soit dégagée ou couverte de neige;
- l'augmentation de la résistance aérodynamique causée par le vent.

Pour tout véhicule électrique, qu'il soit à batterie ou à pile à combustible, il y a une pénalité énergétique inévitable associée au chauffage de l'habitacle. Cependant, dans le cas d'une pile à combustible, la chaleur générée par la réaction électrochimique peut être réutilisée pour contribuer au chauffage de l'habitacle, ce qui peut réduire la pénalité énergétique comparée à celle d'un véhicule électrique à batterie.

La figure 17 donne une indication sur l'efficacité théorique des différents sous-ensembles d'un VEPC ainsi que sur les forces résistives appliquées. Le tableau 3 indique l'efficacité théorique globale d'un véhicule à hydrogène à température ambiante (du réservoir aux roues).

Composants de la Mirai

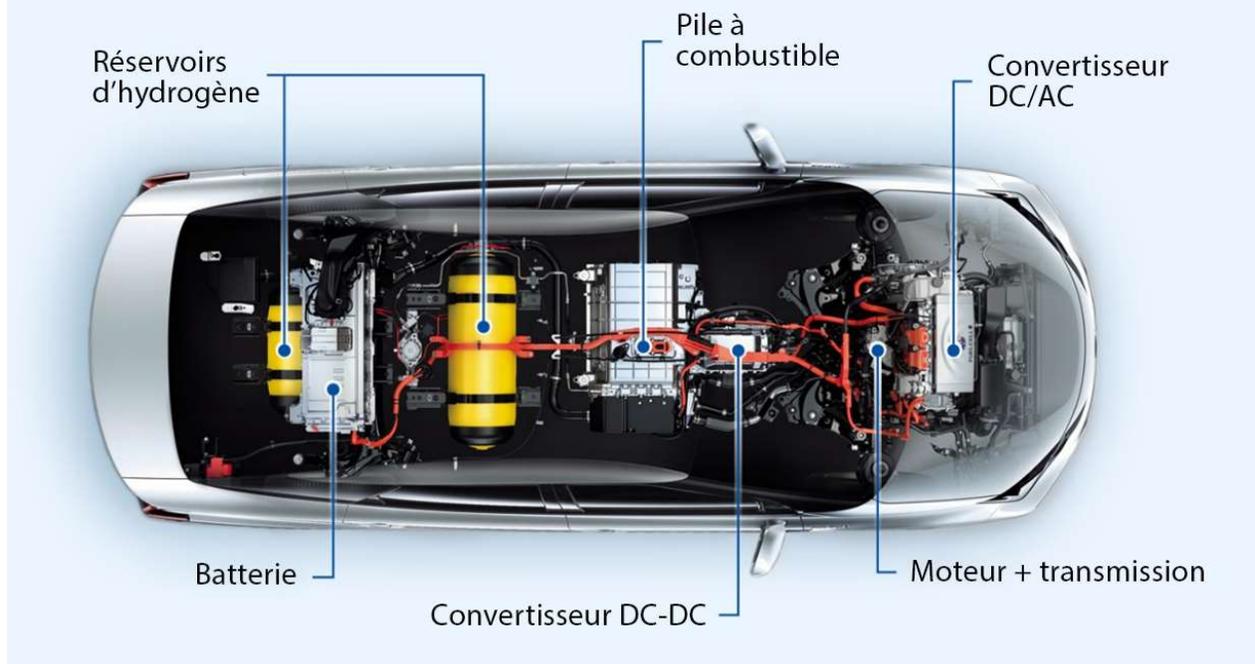


Figure 17. L'efficacité des différents sous-ensembles d'un véhicule à hydrogène.

Tableau 3. Efficacité théorique globale d'un véhicule à hydrogène⁶.

η réservoir au roue				
44,62%				
Efficacité (η)	η PAC (2)	η convertisseur	η Moteur électrique	η transmission
100%	55%	98%	90%	92%


```

    graph LR
      A[Réservoir d'Hydrogène] --> B[Pile à hydrogène]
      B --> C[Convertisseur]
      C --> D[Moteur électrique]
      D --> E[Transmission]
  
```

Station de production de l'hydrogène

Il est important de noter que les indicateurs de la station de production sont disponibles à partir du trimestre juillet-septembre 2020. Dans cette section, les indicateurs de performance de l'électrolyseur et des compresseurs haute et moyenne pression sont présentés. Les données sur l'électrolyseur incluent le temps de fonctionnement, la masse d'hydrogène produite, l'énergie consommée, le taux moyen de production et la consommation spécifique moyenne,

⁶ Résultats des performances énergétiques proposées par l'IRH.

ainsi que les problèmes survenus. En ce qui concerne les compresseurs haute et moyenne pression, les données rapportées comprennent la disponibilité et la quantité d'hydrogène stocké, ainsi que les problèmes relevés.

Performance de la production

La figure 18 illustre le taux moyen de production de l'électrolyseur. Le taux de production d'hydrogène par l'électrolyseur HySTAT est resté stable durant toute la période du banc d'essai, avec une moyenne d'environ 5,0 kg/h.

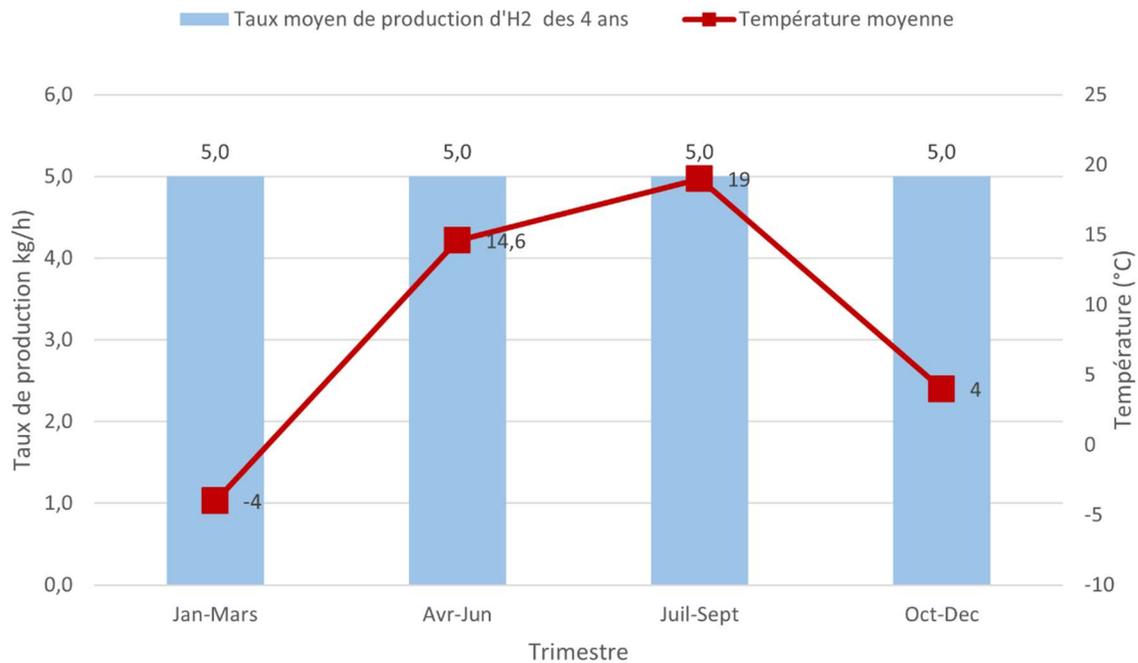


Figure 18. Taux moyen de production de l'électrolyseur HySTAT.

La figure 19 présente la consommation d'électricité spécifique de l'électrolyseur exprimée en kWh/kg. La consommation spécifique d'électricité oscille très légèrement autour de 55,4 kWh/kg, un chiffre légèrement supérieur à la valeur théorique de l'électrolyseur HySTAT de 50,8 kWh/kg. Notamment, ces données restent remarquablement constantes sur toute la durée du banc d'essai et ne semblent pas être affectées par les basses températures au cours de l'année.

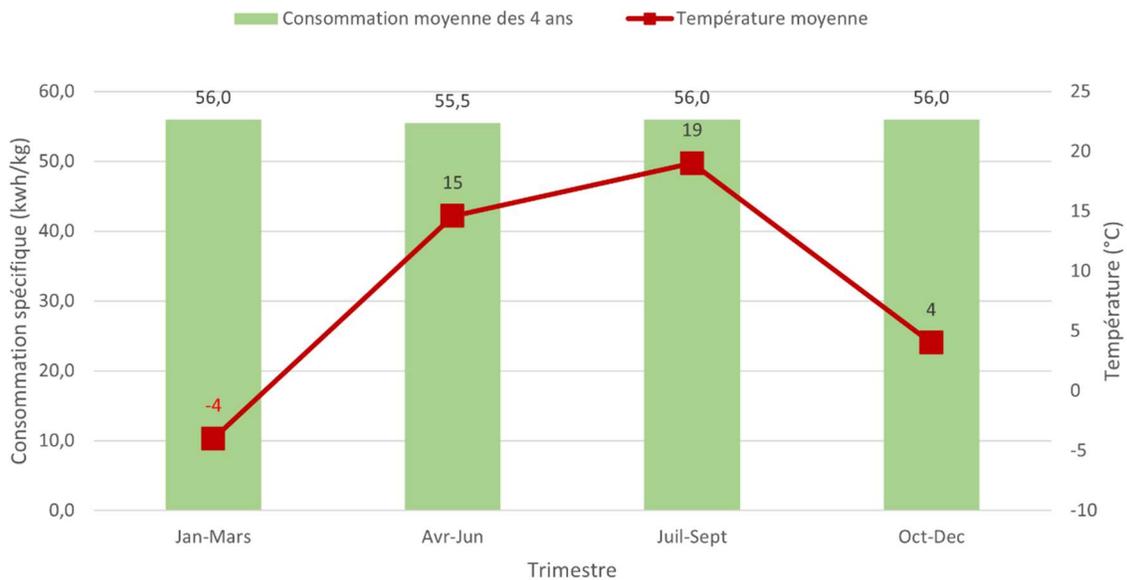


Figure 19. Consommation d'électricité propre à l'électrolyseur.

La figure 20 présente les quantités d'hydrogène stocké à haute pression (850 bar) et à moyenne pression (320 bar). Ces masses d'hydrogène stocké ne semblent pas être affectées par les changements de mois et de saison dans l'année. La quantité d'hydrogène stocké à moyenne pression connaît une fluctuation autour de 161 kg, avec un écart-type de 13 kg, tandis que la quantité d'hydrogène stocké à haute pression fluctue autour de 56 kg, avec un écart-type de 5 kg.

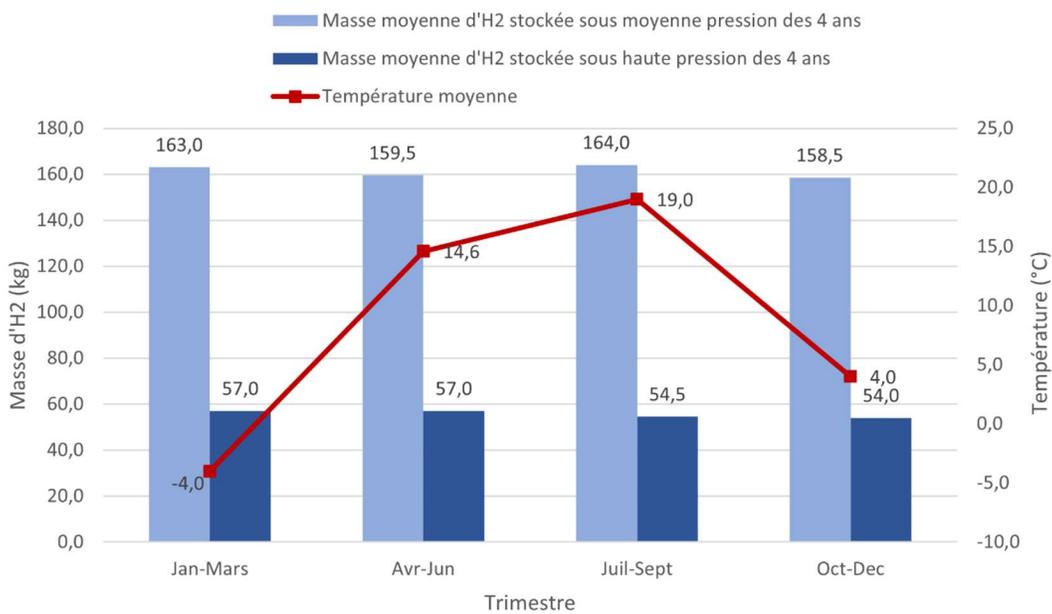


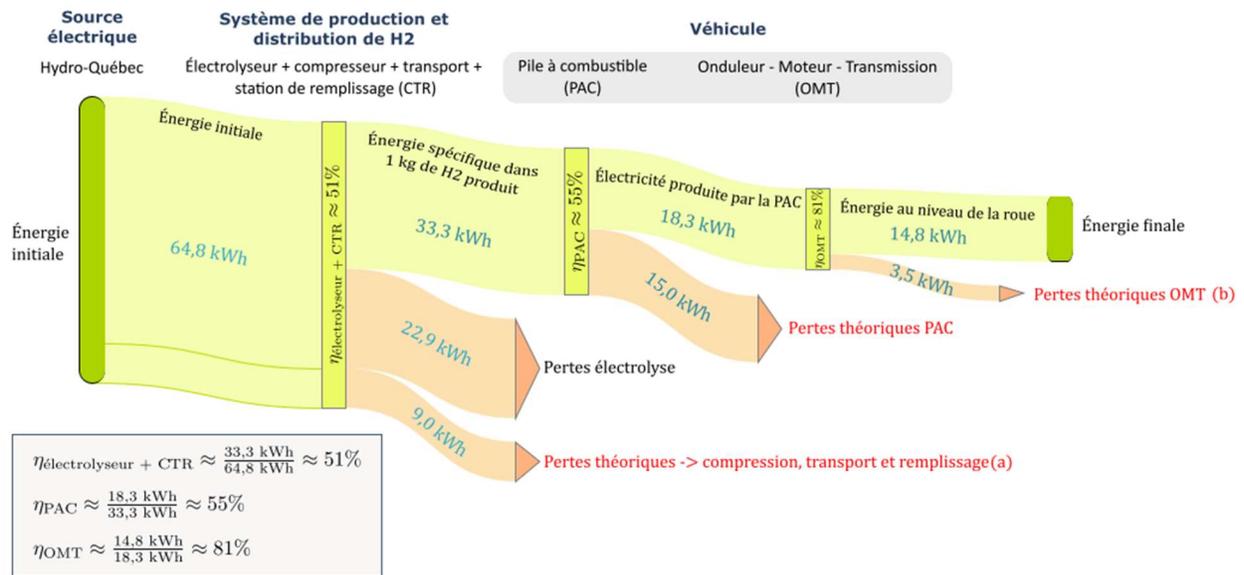
Figure 20. Quantité d'hydrogène stocké à haute et moyenne pressions.

Le tableau 4 présente l'efficacité théorique et la consommation mesurée des trois sous-ensembles (du puits aux roues). Il est important de noter que les efficacités des différents sous-ensembles diminuent à basse température, entraînant ainsi une augmentation de la consommation globale de l'écosystème.

Tableau 4. L'efficacité et la consommation des trois sous-ensembles (du puits aux roues).

Efficacité (η) du puits aux roues			
22,7 %			
η du système de production et de distribution			η du réservoir aux roues (Toyota Mirai)
51,0 %			
Efficacité (η)	η Électrolyseur Hystat	η systèmes de Compression, de Transport et de Remplissage (CTR)	
100%	60,0 %	85,0 %	44,6 %
Énergie spécifique de l'Hydrogène	Consommation de l'électrolyseur selon le Dashboard (1)	Consommation approximative des systèmes CTR [2]	Consommation moyenne à 10°C
33,3 kWh/kg	≈ 55,8 kWh/kg	9 kWh/kg	1,02 kg/100 km
	Énergie nécessaire pour produire 1 kg d'hydrogène à la pompe		34 kWh/100 km (2)
	≈ 64,8 kWh/kg		Consommation moyenne à -6°C
			52 kWh/100 km (2)
<p>(1) Consommation de l'électrolyseur selon le Dashboard incluant la consommation des sous-systèmes suivants : partie process, panneau de contrôle, rack d'alimentation, système de purification de l'hydrogène, système de traitement de l'eau, refroidisseur sec, toutes les interconnexions dans le conteneur.</p> <p>(2) Consommation moyenne en kWh/100 km = Consommation moyenne en kg/100 km x Énergie spécifique de l'hydrogène (≈33,3 kWh/kg)</p>			

La figure 21 présente le diagramme de Sankey illustrant les flux énergétiques à partir de l'énergie initiale pour produire 1 kg d'hydrogène, ainsi que les pertes d'énergie dans les sous-ensembles.



(a) Pertes théoriques dans le système de distribution (compression, transport, station de remplissage (CTR)) en se basant sur la référence [1].
 (b) Pertes théoriques au niveau de l'onduleur, le moteur électrique et la transmission du véhicule (OMT), voir tableau 6.

Figure 21. Diagramme de Sankey illustrant les flux énergétiques à partir de l'énergie initiale pour produire 1 kg d'hydrogène, ainsi que les pertes d'énergie dans les sous-ensembles.

Coût de production

Une étude a été réalisée pour calculer le coût de production de 1 kg d'hydrogène, en prenant en compte la masse d'hydrogène produite en kg et l'énergie consommée par la station de production d'hydrogène en kWh. La figure 22 montre la consommation moyenne mensuelle d'énergie nécessaire pour produire 1 kg d'hydrogène (exprimée en kWh/kg) et pour le transporter jusqu'à la station de distribution, en fonction de la température. Cette consommation se maintient relativement stable autour de 64,7 kWh. Il est important de noter que la consommation énergétique pour produire 1 kg d'hydrogène et le transporter à la station de distribution est calculée à partir de la consommation de l'électrolyseur et de la consommation approximative des systèmes de compression et de la station de remplissage (environ 9 kWh/kg). Une démarche avait été précédemment entreprise par Harnois pour mesurer cette consommation à l'entrée de tout le système (production et distribution) en utilisant un wattmètre pour une plus grande précision. Cependant, il s'est avéré que les valeurs obtenues avec le wattmètre n'étaient pas valides.

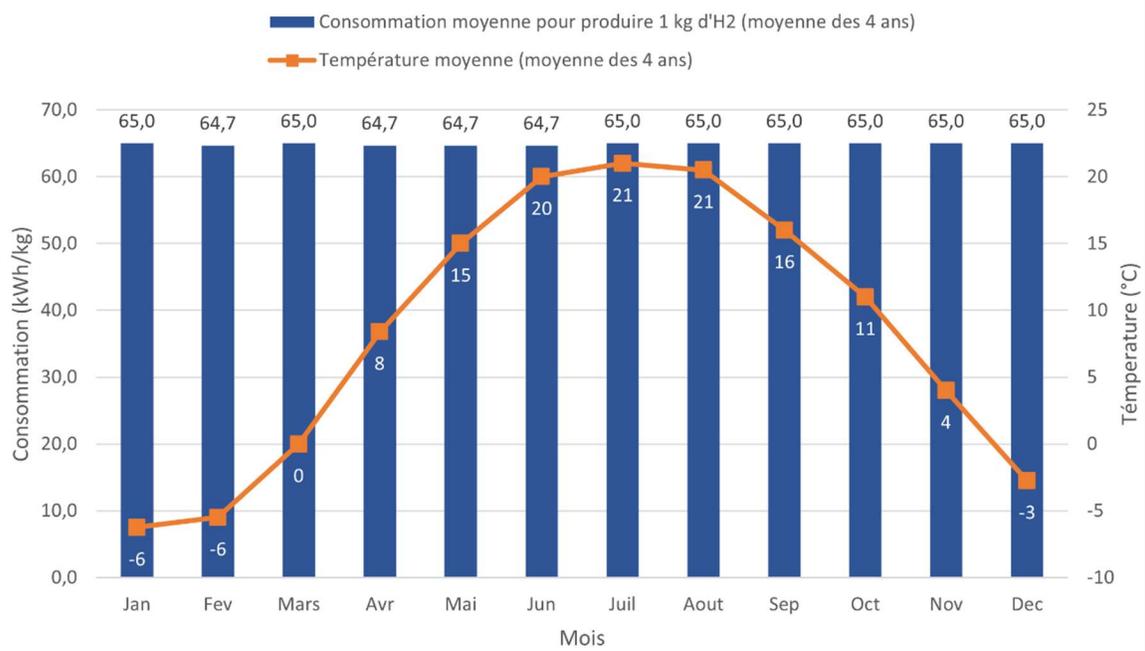


Figure 22. Consommation électrique mensuelle pour produire 1 kg d'hydrogène en fonction de la température.

La figure 23 illustre le coût de production de 1 kg d'hydrogène, calculé selon les tarifs d'Hydro-Québec (\$/kWh), sans inclure les coûts supplémentaires tels que ceux liés à la maintenance. Il est important de noter que le Tarif G9, qui varie entre 0,144 et 0,15 \$/kWh, est facturé à Harnois. Le coût moyen de production de 1 kg d'hydrogène pendant la période du banc d'essai s'élève à environ 9,05 \$/kg.

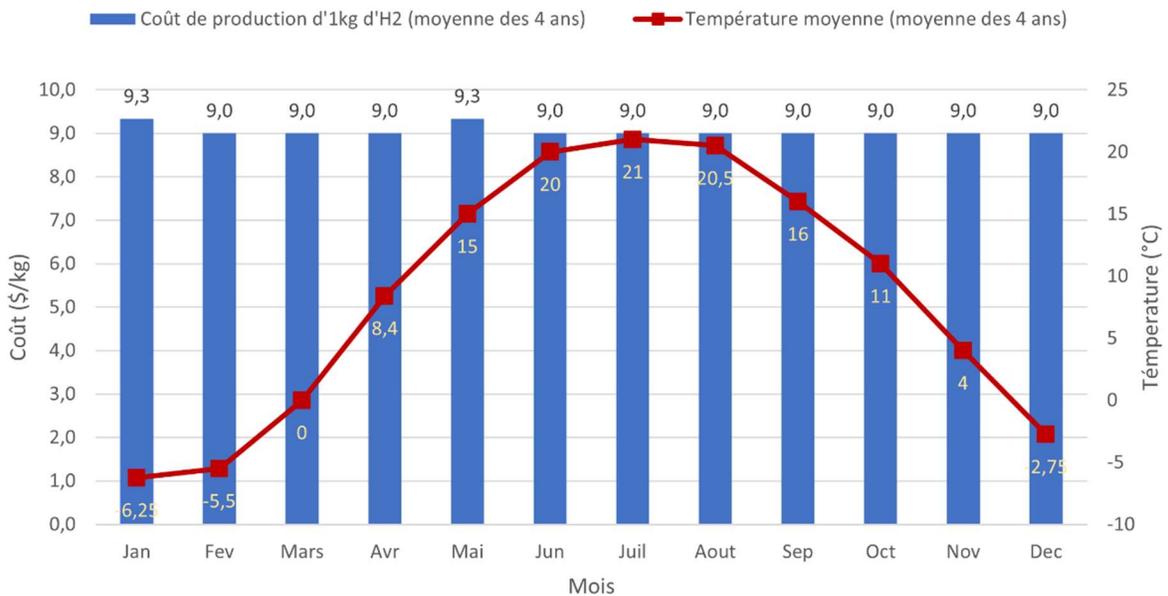


Figure 23. Coût de production mensuel de 1 kg d'hydrogène.

Station de distribution de l'hydrogène

Les indicateurs de la station de distribution incluent la distribution de la quantité d'hydrogène par ravitaillement chaque mois, la répartition des quantités d'hydrogène remplies en fonction des heures de la journée, la répartition des quantités d'hydrogène remplies en fonction des jours de la semaine et l'évolution du prix estimé de l'hydrogène au kilomètre.

Performance de ravitaillement

La figure 24 illustre la quantité moyenne d'hydrogène remplie par ravitaillement. Il en ressort que la quantité moyenne d'hydrogène ravitaillée se situe entre 2,5 et 3,1 kg par ravitaillement. Ces observations montrent une grande similitude de trimestre en trimestre, indiquant une faible variabilité mensuelle, avec les quantités les plus faibles observées de mars à juin.

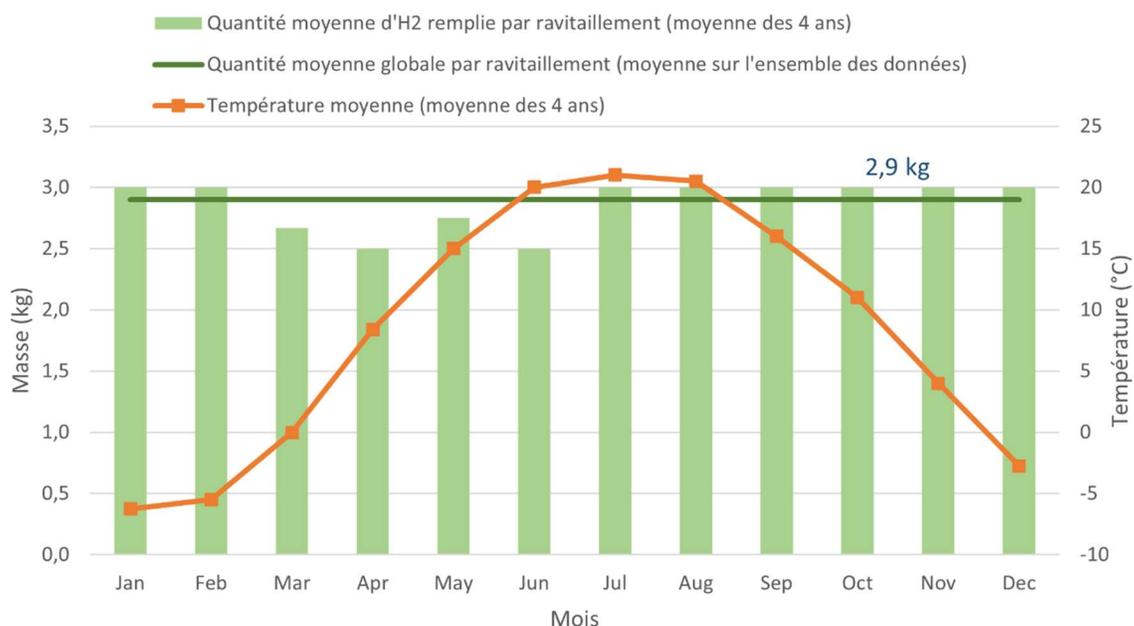


Figure 24. Quantité moyenne d'hydrogène par ravitaillement pour chaque mois.

Les répartitions des quantités d'hydrogène ravitaillées par rapport aux heures de la journée et aux jours de la semaine sont présentées respectivement aux figures 25 et 26. On observe que ces données suivent presque la même tendance que celles de la répartition des événements de ravitaillement (figures 12 et 13). En effet, les plus grandes quantités d'hydrogène ravitaillées l'ont été autour de 10 h et de 19h pour les véhicules ravitaillés par le CGER. En revanche, pour les autres véhicules, les plus grandes quantités d'hydrogène ont été remplies entre 7 h et 15 h, avec des pointes observées vers 10 h et 11 h. La station de remplissage est majoritairement utilisée par les conducteurs des véhicules de la flotte du lundi au vendredi, et très rarement le samedi et le dimanche.

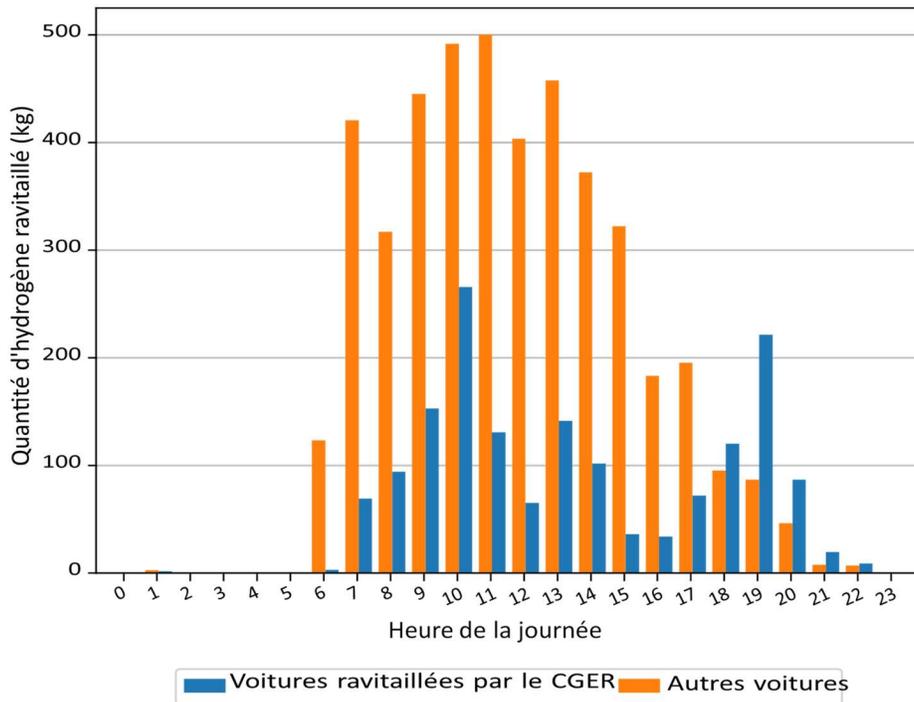


Figure 25. Répartition des quantités d'hydrogène remplies en fonction des heures de la journée.

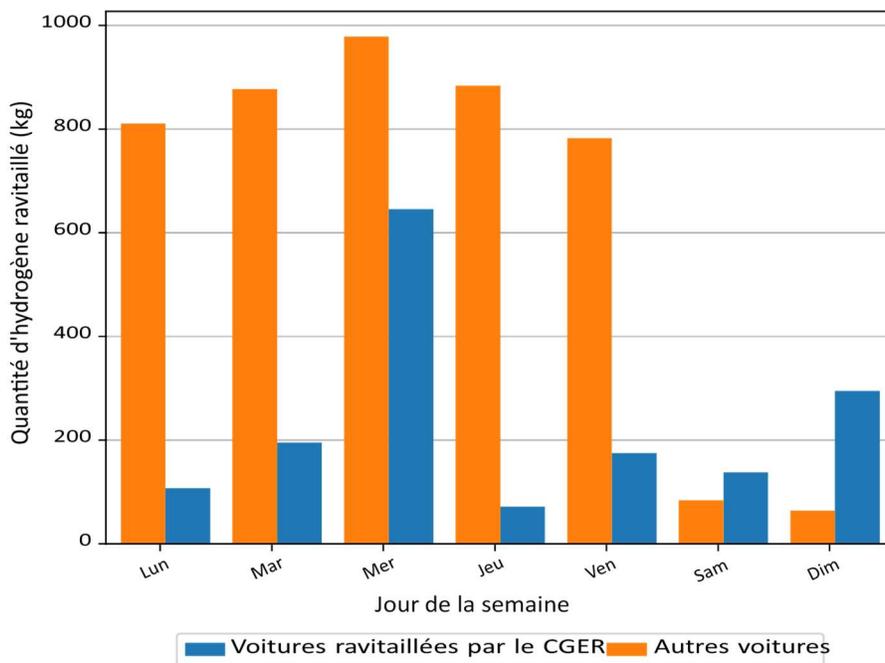


Figure 26. Répartition des quantités d'hydrogène remplies en fonction des jours de la semaine.

La figure 27 montre le nombre total de remplissages par semaine et le nombre de remplissages échoués par semaine. La première observation que l'on peut faire à partir de cette figure est que le taux d'échec est plus élevé en hiver par rapport à la saison estivale. En effet, l'analyse des données indique que les remplissages échoués se sont principalement produits au cours des trimestres où les températures sont plus basses, soit janvier à mars et octobre à décembre, ce qui a entraîné la dégradation de l'expérience des utilisateurs en termes de ravitaillement en hydrogène. Sur l'ensemble de la période d'essai, les remplissages échoués ont constitué environ 26 % du total.

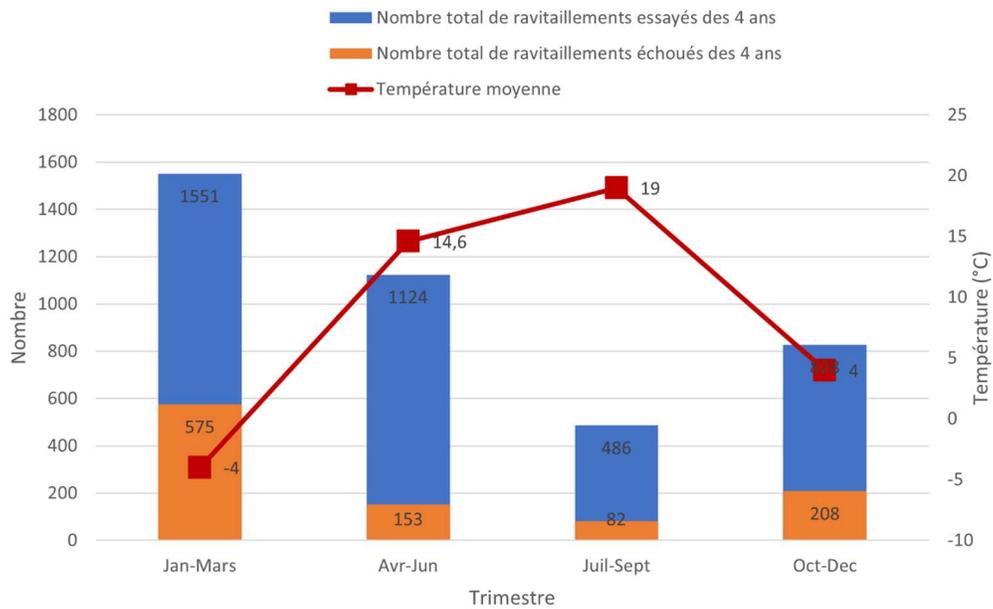


Figure 27. Nombre de remplissages totaux (échoués et réussis) et nombre de remplissages échoués.

La figure 28 illustre la durée moyenne mensuelle que les conducteurs passent à la station de ravitaillement. Les analyses indiquent que la durée passée à la station a légèrement fluctué autour d'une moyenne d'environ 9,4 minutes.

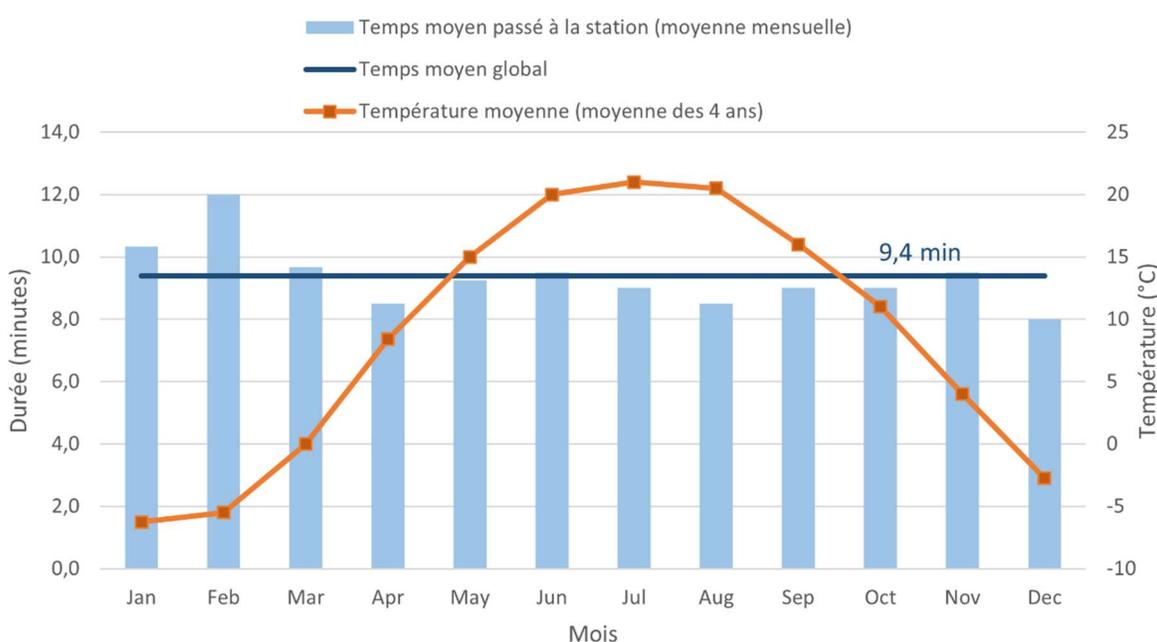


Figure 28. Durée moyenne mensuelle passée à la station de ravitaillement.

Coût de ravitaillement

La figure 29 montre l'évolution du prix moyen de l'hydrogène au kilomètre pour chaque mois en tenant compte des observations de l'ensemble de la période du banc d'essai. Comme cela a été le cas depuis le début du banc d'essai, le prix moyen de l'hydrogène par km présente une tendance inverse à celle de la température ambiante. La valeur moyenne du prix de l'hydrogène par km se situe autour de 13 ¢/km. Il ressort également de cette figure que le prix de l'hydrogène par km est généralement au plus bas d'avril à octobre.

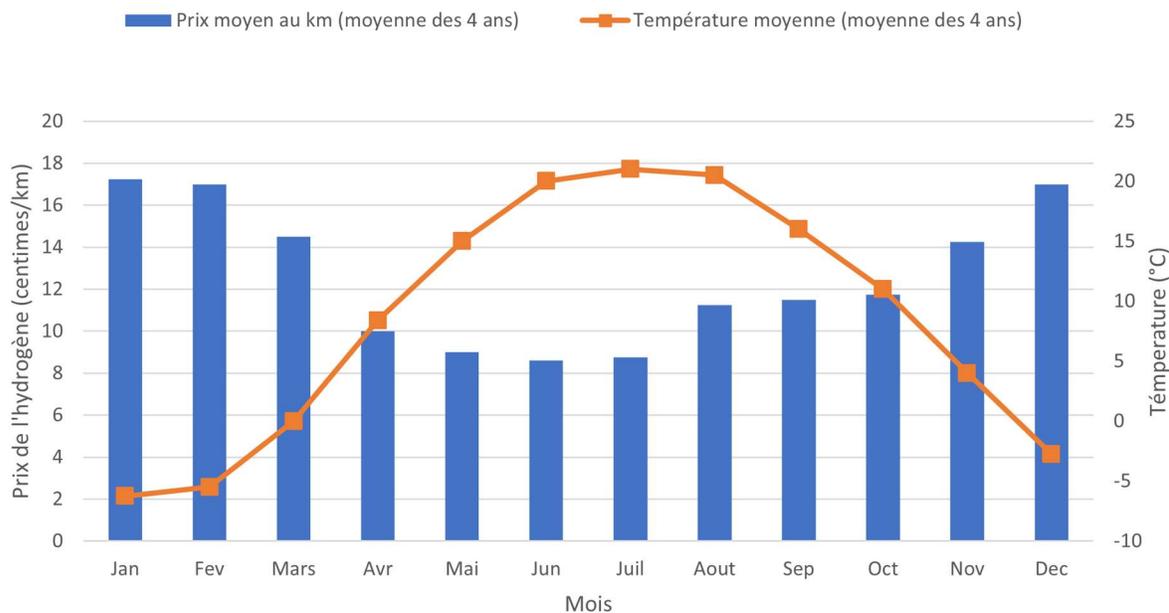


Figure 29. Évolution du prix estimé de l'hydrogène au km.

Problématiques rencontrées

Les problèmes survenus dans l'écosystème sont classés en différentes catégories selon leurs similitudes :

- Problèmes liés aux véhicules
- Problèmes liés à la mauvaise utilisation des équipements par les usagers
- Problèmes intrinsèques aux stations de production
- Problèmes intrinsèques à la station de distribution

Les tendances observées dans chaque catégorie de problèmes sont détaillées dans les sections suivantes.

Problèmes liés à la flotte de véhicules à pile à combustible

Durant toute la période du banc d'essai, seulement deux problèmes répertoriés étaient liés aux caractéristiques intrinsèques des véhicules (défaillance du régulateur de pression sur le même véhicule).

Problèmes liés à la mauvaise utilisation des équipements

Les problèmes de cette catégorie ont considérablement diminué au cours du banc d'essai, notamment grâce à une formation dispensée par Harnois Énergies. Le problème lié à un délai d'attente entre les ravitaillements, apparu au cours du trimestre d'avril à juin 2021, a également été résolu.

Problèmes liés aux stations de production et de distribution de l'hydrogène

La figure 30 illustre l'évolution du nombre d'incidents techniques au fil des trimestres. Une augmentation significative des problèmes au niveau de la station de distribution a été observée durant plusieurs trimestres, notamment d'avril à juin (2020 et 2023), de janvier à mars 2022, et d'octobre à décembre 2022.

La station de distribution est la plus touchée en termes de nombre d'incidents, suivi dans l'ordre décroissant par les compresseurs, l'électrolyseur, les utilisateurs, et enfin les véhicules. Ces chiffres sont particulièrement révélateurs quant à la maturité technologique des VEPC.

Par ailleurs, la figure 31 montre la répartition des problèmes par catégorie pour la période d'avril 2019 à juin 2023, avec 83,4 % des problèmes associés à la station de distribution, 9,1 % aux compresseurs, 4,1 % à l'électrolyseur, 3,2 % aux utilisateurs et 0,2 % aux véhicules.

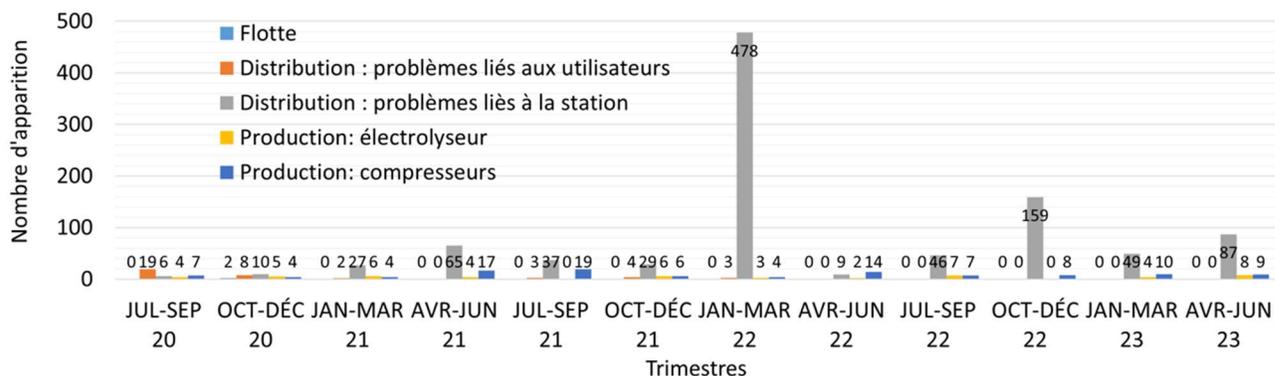


Figure 30. Évolution des problèmes au cours des trimestres.

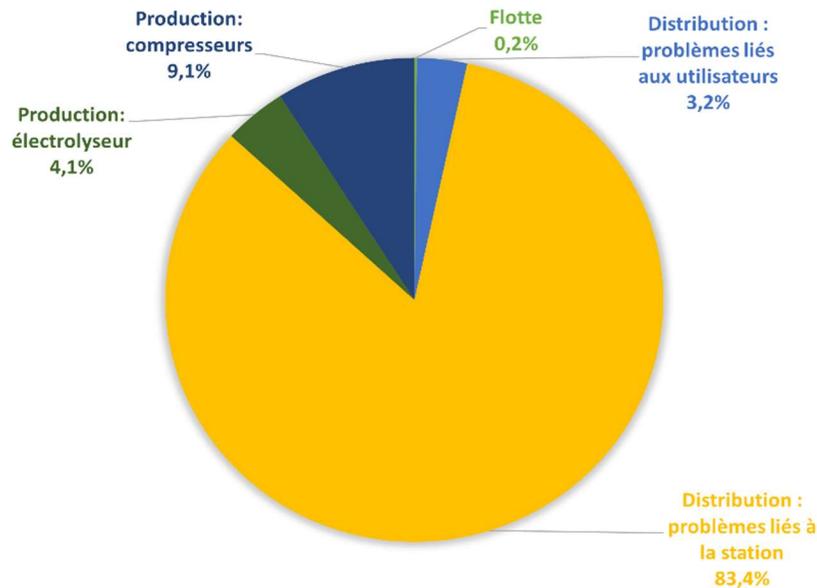


Figure 31. Répartition des problèmes par sous-ensemble pour la période : avril 2019 à juin 2023.

Les différents problèmes évoqués ci-dessus entraînent des interruptions au niveau des stations de production et de distribution. La figure 32 illustre le pourcentage et la durée d'indisponibilité de ces stations au cours des trimestres. Il est important de noter que tous les incidents mentionnés n'ont pas le même niveau de gravité.

Pour mieux illustrer la non-corrélation directe entre le nombre d'incidents et la durée d'indisponibilité des sous-ensembles, prenons l'exemple du trimestre de janvier à mars 2022, où un nombre élevé d'incidents a entraîné une durée d'indisponibilité relativement faible des sous-ensembles. Il convient également de mentionner l'interconnexion naturelle de certains sous-ensembles, qui peut créer une indisponibilité globale affectant plusieurs sous-ensembles simultanément.

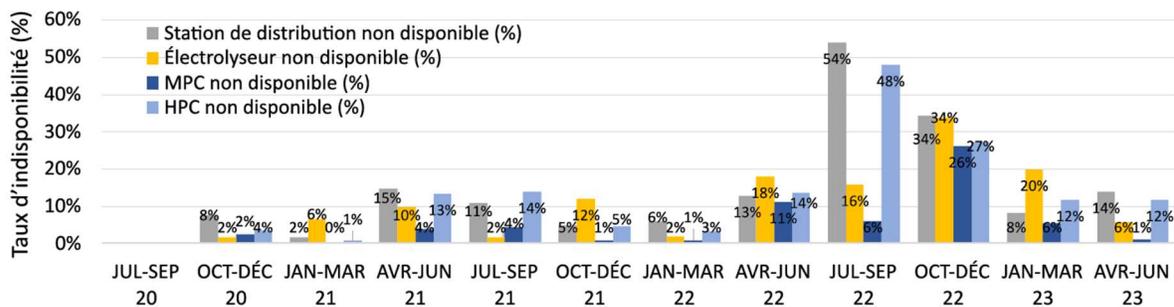


Figure 32. Pourcentage d'indisponibilité des différents sous-ensembles au cours des trimestres.
MPC : compresseur moyenne pression, HPC : compresseur haute pression.

La figure 33 indique que la durée totale d'indisponibilité pour chaque sous-ensemble inclut le temps consacré à la maintenance. Cela met en évidence que, bien que les arrêts programmés pour la maintenance soient essentiels, ils constituent également une part importante de l'indisponibilité globale. La gestion efficace de la maintenance est donc cruciale pour minimiser l'impact sur la disponibilité des services et assurer une exploitation fiable du système de distribution d'hydrogène.

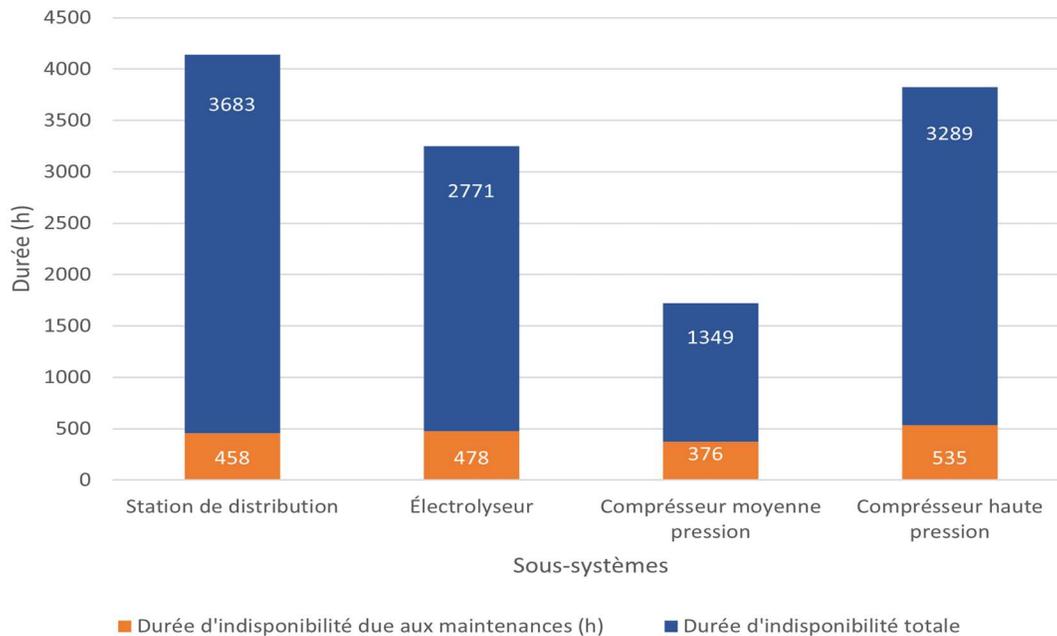


Figure 33. Répartition des durées d'indisponibilité par sous-ensemble pour la période : avril 2019 à juin 2023.

Autres problèmes

Outre les problèmes matériels, d'autres obstacles ont fragilisé la réussite du banc d'essai. Par exemple, pendant deux ans, entre les mois de mars 2020 et 2022, la pandémie de COVID-19 a perturbé la bonne conduite du banc d'essai, principalement en raison de la généralisation du télétravail. À cette période, l'utilisation limitée des véhicules du banc d'essai a été un obstacle à la collecte suffisante de données de télémétrie pour une analyse optimale des performances du banc d'essai.

En outre, le rayon d'action limité du véhicule, cantonné aux alentours de la ville de Québec en raison de la présence d'une seule station de ravitaillement dans la province, a également été une grande préoccupation. Néanmoins, le service de remplissage des véhicules proposé par le CGER a contribué à réduire cet obstacle.

Appréciation des utilisateurs

Au début de 2023, un sondage a été réalisé auprès des utilisateurs des VEPC du banc d'essai. L'objectif de ce sondage était d'évaluer le niveau de connaissance et de satisfaction des participants au projet pilote vis-à-vis des technologies de l'hydrogène et plus spécifiquement des VEPC qu'ils ont utilisés pendant près de quatre années. Les réponses obtenues ont notamment permis de qualifier l'évolution de la connaissance en les comparant aux réponses obtenues dans un sondage similaire réalisé au lancement du projet.

Les questions posées alternaient entre réponses écrites et réponses à choix multiples, et les répondants n'étaient pas tenus de répondre à toutes les questions. Sur les 46 participants institutionnels au banc d'essai, dix d'entre eux

ont répondu au sondage — soit 22 % des utilisateurs — et certains de ces répondants n'ont pas répondu à toutes les questions. Ainsi, les conclusions de ce sondage ne sauraient être pleinement représentatives de l'expérience globale associée au banc d'essai, bien qu'elles permettent de dresser des constats particuliers.

Avant le lancement du banc d'essai, la majorité des répondants ont précisé que leur niveau de connaissance des technologies de l'hydrogène était nul et qu'elles ne leur faisaient ni bonne ni mauvaise impression. Deux répondants avaient toutefois indiqué qu'ils avaient une mauvaise impression des technologies de l'hydrogène. En outre, des appréhensions liées à la sécurité existaient concernant l'hydrogène ou les stations de ravitaillement, même si près de la moitié des répondants a déclaré n'avoir aucune appréhension relative aux technologies de l'hydrogène.

Après près de quatre ans de participation au banc d'essai, la majorité des répondants ont affirmé avoir apprécié, voire très apprécié, conduire un VEPC, et une forte proportion des répondants ont considéré les véhicules comme fiables. Également, neuf répondants sur dix ont précisé qu'ils ont ressenti des différences marquantes selon les saisons concernant leur utilisation des véhicules — surtout en raison de la baisse de l'efficacité énergétique et donc, de l'autonomie du véhicule. En conséquence, plus de la moitié des répondants ont affirmé être insatisfaits de l'autonomie de leur véhicule, alors que quatre répondants se sont déclarés satisfaits.

Concernant le ravitaillement des véhicules, l'expérience générale des répondants a été négative. En cause, l'indisponibilité répétée de la station de ravitaillement pour cause de panne, ainsi que la dépendance vis-à-vis d'une seule station existante, qui a rendu particulièrement difficile la logistique associée à l'utilisation des véhicules pour la plupart des répondants. Certains répondants ont précisé que la station de ravitaillement était plus souvent en panne l'hiver que l'été. Pour la plupart des répondants, le véhicule était utilisé uniquement en zone urbaine, dans la région de la Capitale-Nationale, pour éviter une potentielle panne d'hydrogène qui aurait nécessité un remorquage.

Selon les répondants, l'indisponibilité répétée de la station de ravitaillement et l'absence de station en dehors de la ville de Québec ont été le frein principal à une utilisation plus régulière et intensive des véhicules. En raison de ces problématiques, certains participants du banc d'essai ont décidé de retourner prématurément leur(s) véhicule(s) au CGER, responsable de la location des véhicules, ou tout simplement de ne plus les utiliser. Pour autant, près de la moitié des répondants ont précisé avoir apprécié de conduire un VEPC ou participer au banc d'essai.

Après avoir participé au banc d'essai, la majorité des répondants ont déclaré que leurs connaissances relatives aux technologies de l'hydrogène se sont un peu ou beaucoup améliorées. Néanmoins, en raison des problématiques relatives à la station de ravitaillement, les appréhensions initiales des participants concernant les technologies de l'hydrogène ne se sont généralement pas dissipées, et leur point de vue s'est aussi globalement dégradé. Seulement quatre répondants sur dix ont affirmé que leur point de vue n'avait pas évolué, et aucun d'entre eux n'a précisé que leur point de vue s'était amélioré.

Finalement, la satisfaction des répondants participant au banc d'essai semble mitigée — quatre sur dix se déclarent satisfaits et six sur dix, insatisfaits, voire très insatisfaits —, bien que cela ne soit manifestement pas lié aux véhicules, mais au ravitaillement. Dans ce contexte, la quasi-totalité des répondants a spécifié que des stations de ravitaillement plus nombreuses et fiables amélioreraient considérablement l'expérience utilisateur. Ainsi, si les répondants ne prévoient pas continuer d'utiliser un VEPC dans le cadre de leurs déplacements professionnels, ils sont largement indifférents, sur le plan de la sécurité, à l'implantation d'une station de ravitaillement à proximité de leur domicile.

CONCLUSION

L'étude des performances liées au banc d'essai implanté dans la ville de Québec, qui s'est échelonnée de 2019 à 2023, représente un jalon majeur dans la compréhension et l'adoption de l'hydrogène vert dans le secteur des transports. Ce projet, lancé par le gouvernement du Québec en 2019, visait à évaluer les performances des VEPC ainsi que l'infrastructure de production et de distribution associée dans un climat nordique, enrichissant ainsi les connaissances sur la mobilité électrique à l'hydrogène.

La mise en œuvre de ce banc d'essai a permis de déployer 46 VEPC et de soutenir la construction d'une première station de ravitaillement en hydrogène dans la ville de Québec, marquant un pas en avant significatif dans l'adoption de cette technologie au Québec.

Ce projet pilote a non seulement documenté l'efficacité opérationnelle des VEPC, mais aussi la résilience de cette technologie face à la rigueur des conditions hivernales québécoises. Ainsi, la réalisation du projet soutient l'option technologique de recourir à l'hydrogène vert aux fins de l'électrification du secteur du transport au Québec.

Les résultats du banc d'essai ont révélé une efficacité énergétique variable des VEPC en fonction de la température extérieure, avec des performances optimales en été et une relative baisse en hiver. Cette variation met en lumière la capacité des VEPC à fonctionner efficacement dans des conditions climatiques extrêmes. La robustesse de l'infrastructure de production et de distribution d'hydrogène, malgré les défis associés à la fiabilité de cette première station de ravitaillement, illustre la maturité croissante des technologies de l'hydrogène.

En conclusion, les enseignements tirés de ce banc d'essai sont précieux pour l'avenir de l'électrification des transports, en particulier dans les régions aux conditions climatiques nordiques. Les résultats et enseignements tirés de ce banc d'essai offrent des perspectives précieuses pour le développement de l'hydrogène dans le secteur des transports, surtout lourd et intensif, où les performances des batteries pourraient demeurer modérées.

ANNEXE

Ministères et organismes participant au banc d'essai	
Ministère ou organisme	Nombre de véhicules octroyés
Ville de Québec	16
CGER	3
Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie	4
Ministère des Transports et de la Mobilité durable	4
CIUSS de la Capitale-Nationale	5
Ville de Lévis	1
Agence des services frontaliers du Canada	1
Forces armées canadiennes	1
Agence du revenu	1
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation	3
Hydro-Québec	3
Réseau de transport de la Capitale	2
Ministère de la Sécurité publique	1
Université du Québec à Trois-Rivières	1

Annexe n° 1 — Ministère et organismes participant au banc d'essai et nombre de véhicules octroyés.

