



Quelles perspectives pour le poids lourd électrique à hydrogène pour le transport de marchandises ?



Objet de ce document

Ce document a pour vocation d'informer des acteurs (chargeurs, transporteurs, logisticiens, etc.) souhaitant s'engager ou travaillant déjà sur la thématique du camion électrique à hydrogène pour le transport de marchandises. Il est structuré sous la forme d'une liste de questions-réponses organisée selon les grandes thématiques du sujet, dans l'optique d'apporter des éléments d'information aux différentes problématiques inhérentes à la réalisation d'un projet de déploiement de poids lourds électriques à hydrogène.

Ce guide a été rédigé par Element Energy, pour et avec le support du groupe de travail dédié aux camions électriques à hydrogène, au sein du groupe France Hydrogène Mobilité, volet mobilité de France Hydrogène.

Ce document est basé sur des retours d'expérience de premiers projets, français et européens, et a de plus bénéficié du support d'acteurs clés et de précurseurs de la filière hydrogène française, qui ont apporté leurs contributions et ainsi aidé à enrichir le présent document. En particulier :

- Des porteurs de projets précurseurs en France et en Europe, notamment Air Liquide impliqué dans les projets comme HyAMMED et HyTrucks, GreenGT dans le cadre du projet CATHyOPÉ, et Colruyt dans le cadre de H2-Share, qui ont été consultés sur leurs projets de déploiements expérimentaux de camions électriques à hydrogène ;
- Des industriels clés du secteur : des constructeurs ou intégrateurs (Iveco, GreenGT), un constructeur de pile à combustible (Symbio, coentreprise entre Faurecia et Michelin), un fabricant de systèmes de stockage d'hydrogène (Faurecia), des constructeurs et exploitants de stations de recharge en hydrogène (Air Liquide, McPhy), des acteurs du transport et de la mobilité (la FNTR, Michelin, la PFA, CARA), ou encore un expert des technologies de l'énergie (le CEA) ;
- Le Groupe de Travail Réglementation de France Hydrogène.

Date de fin de la rédaction : Octobre 2021

Date de publication : Février 2022



A propos de France Hydrogène

Réunissant près de 400 membres, France Hydrogène fédère les acteurs de la filière française de l'hydrogène structurés sur l'ensemble de la chaîne de valeur : des grands groupes industriels développant des projets d'envergure, des PME-PMI et start-ups innovantes soutenues par des laboratoires et centres de recherche d'excellence, des associations, pôles de compétitivité et des collectivités territoriales mobilisés pour le déploiement de solutions hydrogène.

Interlocuteur privilégié des Pouvoirs Publics, France Hydrogène agit pour :

- Structurer une filière française de l'hydrogène performante, compétitive et innovante,
- Partager et promouvoir les enjeux de la filière,
- Faire connaître les bénéfices et les caractéristiques des technologies,
- Faciliter la concertation sociétale autour des objectifs nationaux et des initiatives locales,
- Faire évoluer le cadre réglementaire pour accompagner le déploiement des technologies hydrogène en France.

France Hydrogène accompagne la filière au plus près des territoires grâce à ses 12 délégations régionales.

Son ambition : accélérer le développement de solutions hydrogène pour réussir la transition énergétique, réindustrialiser le territoire et créer de la valeur localement pour améliorer la qualité de vie de tous.



Site internet : www.france-hydrogene.org

A propos du groupe Mobilité de France Hydrogène

France Hydrogène Mobilité est le groupe dédié à la mobilité des acteurs de la filière au sein de France Hydrogène. Il réunit des énergéticiens, des fabricants d'électrolyseurs, de stations de distribution, des constructeurs automobiles, des fabricants de composants comme les piles à combustible et les réservoirs, des fonds d'investissement, des porteurs de projet, des cabinets de conseil ainsi que des instituts de recherche. L'objectif du groupe est notamment de permettre à ses membres de travailler en intelligence collective, d'identifier les verrous que peuvent rencontrer les acteurs dans le développement de projets et de contribuer à les lever. France Hydrogène Mobilité est un lieu de partage et de synthèse d'informations, et ses travaux bénéficient à l'ensemble de la filière.

France Hydrogène Mobilité met en place des échanges sur l'ensemble des thématiques pertinentes à la filière, réalise des études, rédige des notes de position et propose des communications d'utilité pour le développement de la mobilité hydrogène en France. Les actions de France Hydrogène Mobilité peuvent être catégorisées selon cinq axes : partage de connaissances, éducation et sensibilisation, offre et visibilité, financement et réglementation.

Le groupe France Hydrogène Mobilité travaille dans le plein respect des règles de l'antitrust : n'est engagé dans aucune discussion, activité ou conduite, ni ne facilite aucune activité susceptible d'enfreindre, en son nom ou au nom de ses membres, le droit de la concurrence.





Valérie Bouillon-Delporte

1^{ère} Vice-Présidente de France
Hydrogène et coordinatrice
de son groupe Mobilité



C'est un défi colossal qui attend le transport de marchandises en France pour réussir cette transition énergétique dans des conditions de marché acceptables.

Avec 31 % des émissions nationales de gaz à effet de serre, le secteur du transport est le premier poste émetteur de gaz à effet de serre (GES) du pays et joue donc un rôle essentiel dans la lutte contre le réchauffement climatique. Le transport routier de marchandises pèse quant à lui pour 20 % des émissions de GES du transport français et représente près de 40 millions de tonnes équivalent CO₂.

Si le gazole demeure encore, et de loin, la première énergie du transport routier de marchandises, les choses sont en train d'évoluer rapidement, avec la montée en puissance de carburants alternatifs et plus récemment de motorisations électriques comme l'hydrogène.

La technologie est au cœur du changement pour le secteur des transports. Les réglementations en cours de discussion (Fit for 55) forcent la cadence, et notamment les objectifs de réduction des émissions de CO₂ pour les poids lourds à -15 % en 2025 et -30 % en 2030 par rapport à 2019.

L'hydrogène va jouer un rôle clé dans la décarbonation du secteur du transport routier pour les poids lourds. Bien sûr, pour certains usages, la technologie batteries répondra aux attentes. Mais elle ne suffira pas. Et la complémentarité des technologies permettra d'atteindre les objectifs de décarbonation ambitieux.

Des partenariats se nouent, des écosystèmes d'innovation se constituent pour apporter plus vite des solutions nouvelles aux marchés. Les premiers poids lourds électriques à hydrogène pour le transport de marchandises voient actuellement le jour en France et en Europe au travers de programmes tels que H2Haul ou encore le déploiement de 1600 camions électriques à hydrogène en Suisse avec Hyundai et H2 Energy.

La majorité des constructeurs européens se penchent aujourd'hui sur la technologie électrique à hydrogène, et certains d'entre eux proposeront une offre complète dans la seconde moitié de la décennie, après de premières pré-séries dès 2023-2024.

Fin 2021, la Commissaire Européenne aux Transports, Adina Valean a réaffirmé les objectifs européens de déploiements de 60 000 camions à pile à combustible et un réseau de 1500 stations hydrogène d'ici à 2030 afin de soutenir la «décarbonation du secteur européen des transports ». Des collaborations fortes, soutenues par les différents programmes européens et français, résultent en un nombre grandissant d'initiatives françaises et européennes (Corridor H2, CATHyOPÉ, H2Accelerate, HyTrucks), qui permettent une forte accélération de la filière.

Elles mettent enfin en évidence la nécessité d'efforts de concertation et de coordination entre les acteurs publics et privés, aussi bien au niveau national qu'au niveau européen. Tous les efforts doivent être mis en œuvre pour favoriser l'émergence d'une filière européenne compétitive et accompagner cette dynamique.

Car pour de nombreuses entreprises, l'échéance se rapproche à grands pas. Pour répondre à ces exigences, il faut agir rapidement. Nous devons réduire les émissions provenant des combustibles fossiles alors que les besoins en matière de transport de marchandises et de personnes ne cessent d'augmenter.

Mais quelles sont les innovations qui transformeront ce secteur traditionnellement difficile à décarboner ? Comment les mettre en œuvre ? Quelle est l'offre en développement ? Comment soutenir les constructeurs dans le développement de cette offre ? Quelles aides financières mettre en place pour accompagner et soutenir les développeurs de projets dans cette phase d'amorçage ? Quelles sont les baisses de coûts attendues ? Quel impact sur le coût total d'usage ? Qu'en est-il du déploiement des infrastructures ? Comment mettre en place une offre hydrogène bas carbone à prix compétitif ? A quelles évolutions de la réglementation doit-on se préparer ? Comment faciliter la transition des chargeurs et transporteurs vers des solutions efficaces technologiquement et acceptables économiquement ?

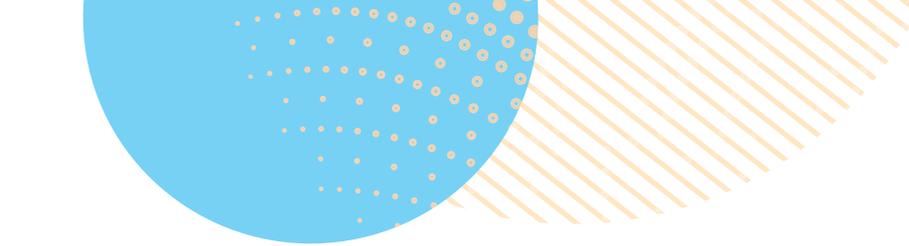
Ce livre blanc vise à répondre à toutes ces questions, analyse les solutions disponibles et les obstacles à surmonter pour accélérer la décarbonation du transport routier. Il traite des moyens technologiques qui peuvent être déployés à court ou moyen terme, tout en tenant compte des usages et des contraintes économiques, écologiques et sociales.

Il est le fruit de plusieurs mois de travail de l'ensemble des acteurs de la filière hydrogène, rassemblés au sein de France Hydrogène Mobilité avec le support de Element Energy et Seiya Consulting. Je tiens à les remercier pour leur engagement.

Ce livre blanc a été conçu pour vous aider à avancer et à passer à l'action.

Alors, bonne lecture !

Valérie Bouillon-Delporte



Résumé exécutif

Le camion électrique à hydrogène est une alternative prometteuse pour la transition environnementale du secteur du transport routier de marchandises. Ce potentiel se reflète dans la vision des transporteurs, qui manifestent un intérêt marqué pour cette technologie : dès 2019, dans le cadre d'une enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et France Hydrogène, plus de la moitié des acteurs interrogés envisageaient d'acheter un camion électrique à hydrogène à horizon 2025.

Pourquoi la solution électrique à hydrogène pour ma flotte de véhicules de transport de marchandises ?

Le camion électrique à hydrogène permet de répondre à la fois aux contraintes opérationnelles et environnementales. En effet, il s'agit de la solution zéro émission à l'échappement la plus proche du diesel sur le plan opérationnel (autonomies et temps de recharge). En ce sens, elle est capable d'adresser l'ensemble des segments d'usages du transport de marchandises, en complémentarité avec l'électrique à batterie qui peut répondre aux besoins les moins contraints. En particulier, lorsque les contraintes logistiques sont fortes (kilométrage élevé, forte charge utile nécessaire, temps limité pour la recharge etc.), l'électrique à hydrogène est la solution zéro émission à l'échappement la plus adaptée.

Le camion électrique à hydrogène est parfaitement aligné avec les orientations des politiques environnementales européennes, nationales, locales et privées :

- Il contribue aux **objectifs de réductions des émissions de CO₂ imposés aux constructeurs de camions de 15 % en 2025 et de 30 % en 2030 par rapport à 2019.**
- Il peut circuler dans les **ZFE des centres-villes (zones à faibles émissions), dont 23 d'entre elles sont d'ores et déjà en place ou en projet en 2022.**
- Il s'inscrit dans les objectifs de politiques RSE des entreprises.

Enfin, le déploiement d'un réseau de distribution de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone a été identifié comme une priorité nationale et européenne (et la garantie de l'origine de cet hydrogène conditionne d'ailleurs l'accès aux principaux guichets de financement).

Quelle dynamique actuelle et en construction pour ce secteur en France et en Europe ?

De nombreux projets de camions électriques à hydrogène sont annoncés et commencent à voir le jour en France et en Europe, parmi lesquels le programme européen H2Haul

ou encore le déploiement de **1 600 camions électriques à hydrogène en Suisse d'ici 2025** par exemple.

Cette phase d'amorçage de la filière est caractérisée par une forte collaboration entre l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur :

- Les constructeurs de véhicules se structurent pour développer et livrer les premiers camions électriques à hydrogène en respectant des calendriers ambitieux.
- Les énergéticiens et fournisseurs d'équipements se positionnent pour déployer des infrastructures de production et distribution de l'hydrogène, renouvelable ou bas carbone, adaptées aux besoins des transporteurs.
- Les premiers transporteurs et chargeurs prêts à s'engager sur la voie de l'hydrogène identifient des flux logistiques particulièrement pertinents, permettant notamment de réduire les surcoûts inhérents à cette première phase de développements.
- L'ensemble de ces acteurs travaillent ensemble pour réaliser ces premiers déploiements, souvent autour de bassins régionaux, afin de sécuriser l'accès à des stations d'approvisionnement en hydrogène situées au cœur des flux logistiques ciblés.

Aujourd'hui en pleine industrialisation de ses solutions, la filière connaît une forte accélération et à l'heure où la majorité des constructeurs européens se saisissent de la technologie hydrogène, **les premières pré-séries de camions seront disponibles dès 2023-2024**. En parallèle, le réseau de distribution de l'hydrogène se développe, et couvrira progressivement les bassins régionaux puis les corridors européens RTE-T. Pour réaliser ces développements en cohérence, des alliances entre constructeurs de véhicules et acteurs de la fourniture d'hydrogène se créent comme les initiatives H2Accelerate ou HyTrucks. Cette synergie du développement de l'offre de véhicules et de solutions d'approvisionnement pose les bases pour des déploiements commerciaux plus conséquents, attendus après 2025.

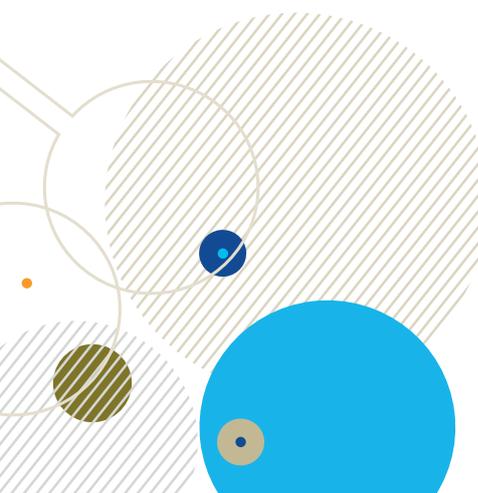
Ainsi, l'ensemble de la filière se fixe des objectifs qui permettront à la France et à l'Europe de réunir les conditions nécessaires d'un marché mature à horizon 2030. D'une part, **la disponibilité de véhicules produits en série est annoncée par les constructeurs pour 2026-2028**. D'autre part, un développement conséquent du réseau d'hydrogène pour la recharge est en cours pour atteindre les objectifs fixés par la réglementation AFIR, qui impose la mise en place d'un **maillage de stations de ravitaillement en hydrogène avec une distance maximale de 150 km entre elles le long du réseau complet du RTE-T d'ici fin 2030**.

Comment construire un projet de déploiement de poids lourds électriques à hydrogène pour le transport de marchandises ?

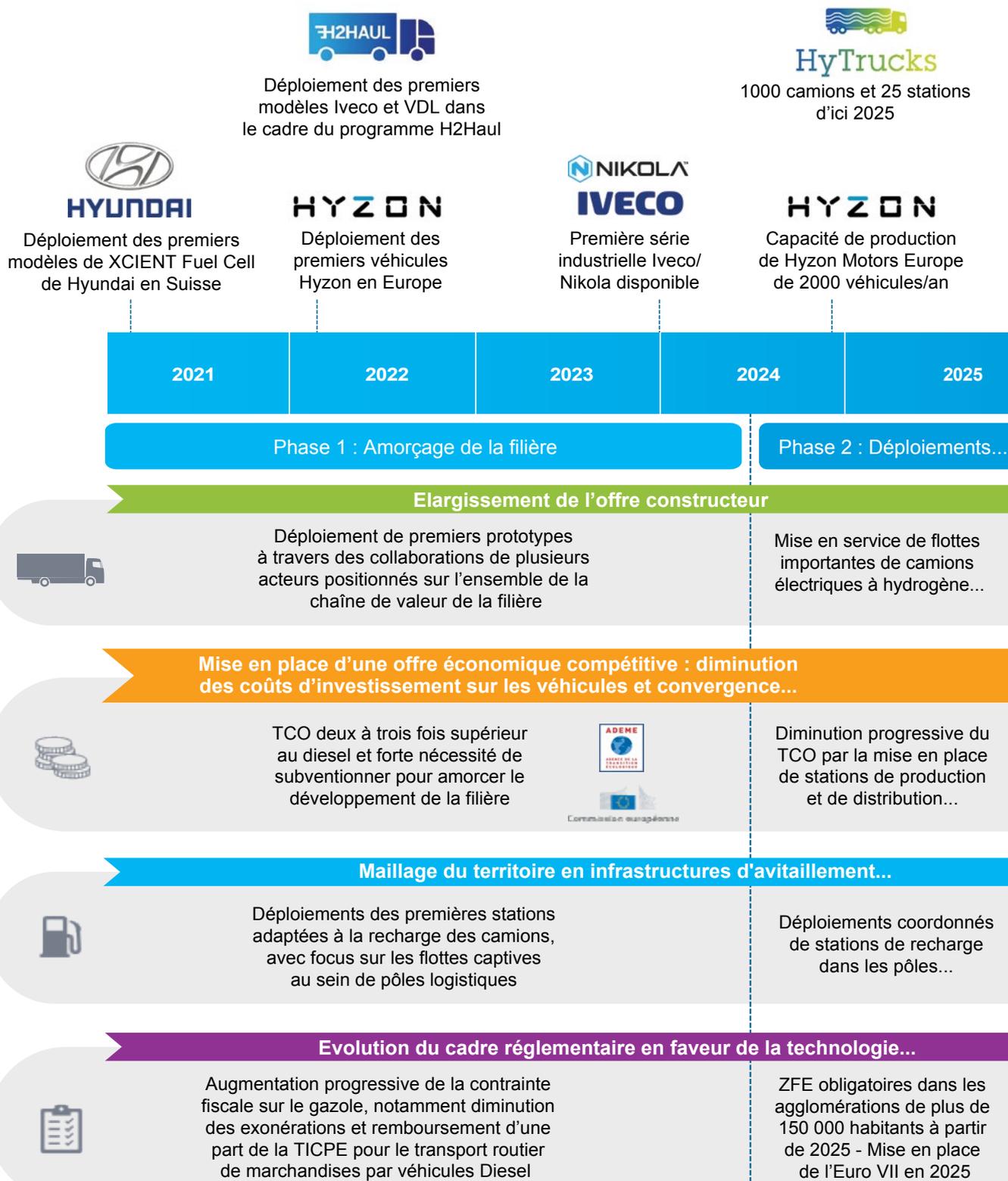
Les premiers camions électriques à hydrogène représentent aujourd'hui un surcoût important tant sur l'achat du véhicule que sur le carburant. Cela étant, les effets d'échelle créés par la multiplication de projets pionniers, soutenus financièrement, en parallèle des avancées en termes de R&D attendues dans les prochaines années, entraîneront une baisse conséquente des prix des véhicules comme du carburant hydrogène. Par ailleurs, **le soutien de l'Etat à la filière hydrogène s'est vu renforcé en 2021 de 1,9 milliard d'euros, qui s'ajoutent aux 7,2 milliards déjà engagés** et qui permettront de soutenir au total plus d'une centaine de projets. Pour assurer le succès de ces premiers projets, les efforts devront porter notamment sur ces éléments clés :

- L'implication de l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur dès la phase de montage du projet.
- La mise en place d'un contexte réglementaire et financier propice au développement de la mobilité hydrogène, notamment via les subventions à l'achat des véhicules et aux infrastructures et les mécanismes de soutien à la production d'hydrogène bas-carbone.
- La gestion du surcoût actuel relatif à l'hydrogène, qui doit être partagé entre transporteur et chargeur, mais surtout limité par les travaux et investissements des constructeurs et fournisseurs d'équipements, avec le support d'un cadre national et européen.
- La gestion du calendrier ambitieux du développement de cette solution pour l'atteinte d'un marché de masse (investissements et commandes, développement et production des véhicules, construction des infrastructures d'avitaillement, sécurisation des subventions, gestion des aspects réglementaires, etc.).

Ainsi, la convergence des courbes de coûts totaux de possession de l'électrique à hydrogène et du diesel, de plus en plus taxé, est attendue à horizon 2030, et sera permise par les efforts mis en œuvre aux niveaux national mais également européen, dans un contexte global d'impératif de décarbonation du transport lourd.



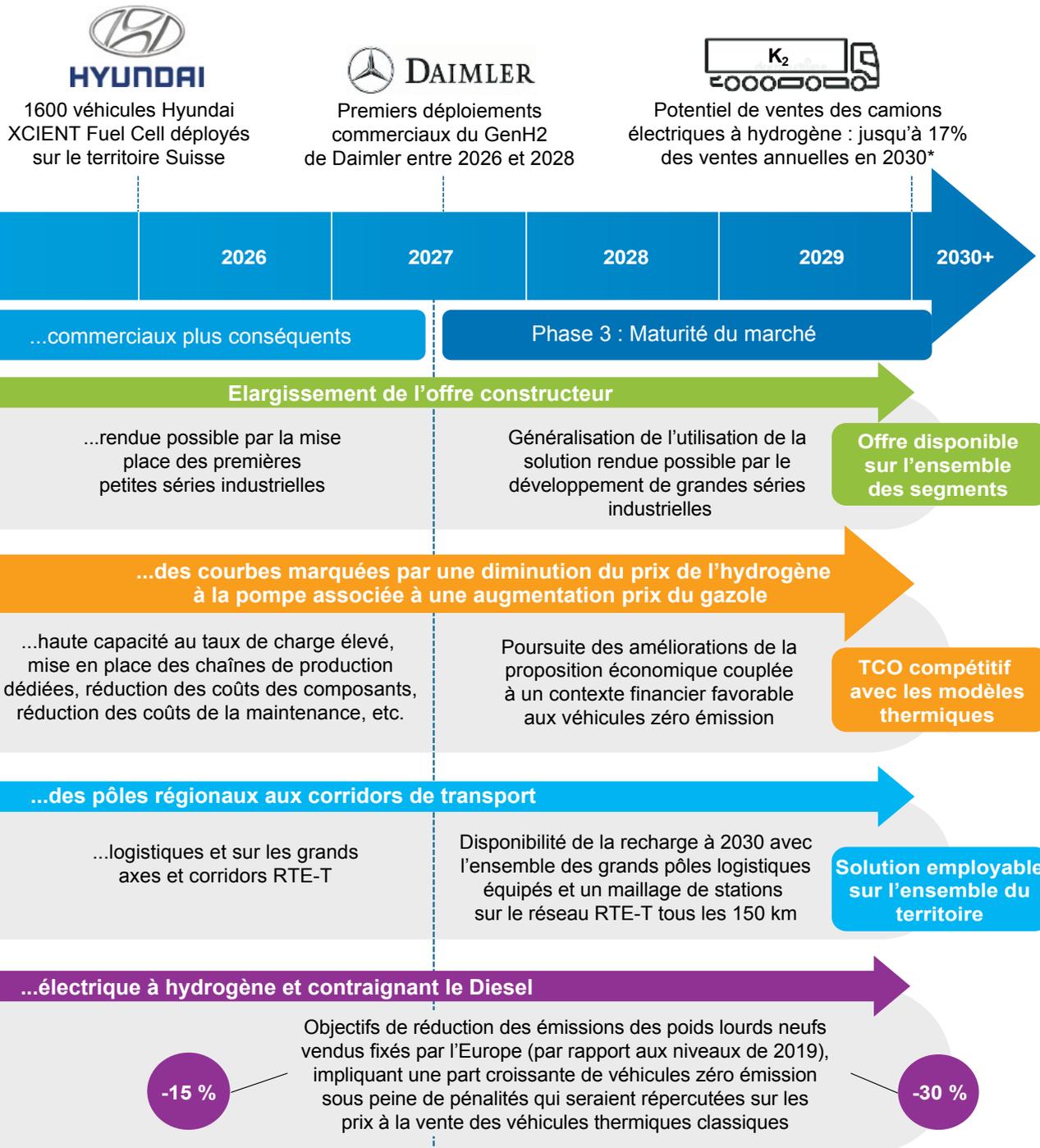
De l'amorçage de la filière à la maturité du marché :
 Les principales évolutions attendues dans la filière du poids lourd électrique
 à hydrogène pour le transport de marchandises dans la décennie



*FCH JU, 2020. « Fuel Cells Hydrogen Trucks – Heavy-Duty's High Performance Green Solution ».

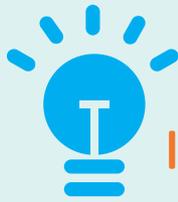
H2Accelerate

Déploiements progressifs de camions et de stations dans la décennie



 **Sommaire**

Edito	5
Résumé exécutif	7
Introduction	13
1. Pourquoi la solution électrique à hydrogène pour ma flotte de véhicules de transport de marchandises ?	16
1.1 Pour quel positionnement par rapport aux autres alternatives énergétiques ?	
1.2 Pour quels types d'usages ?	
1.3 Quels atouts au regard des orientations environnementales actuelles ?	
2. Quelle dynamique actuelle et en construction pour ce secteur en France et en Europe ?	46
2.1 Quels acteurs impliqués dans le développement du marché ?	
2.2 Quelle offre en construction en termes de véhicules ?	
2.3 Quelles infrastructures de recharge nécessaires ?	
2.4 Quels projets phares en phase d'émergence de la filière ? – Etudes de cas	
3. Comment construire un projet de déploiement de poids lourds électriques à hydrogène pour le transport de marchandises ?	98
3.1. Quelles clés pour construire un projet de déploiement ?	
3.2 Quels modèles économiques associés ? Les dispositifs de soutien et guichets de financement	
3.3. Quelles réglementations à prendre en compte lors du montage d'un projet ?	
Conclusion : Quelles seront les clés pour la concrétisation d'une filière du transport de marchandises à l'hydrogène et à quels horizons de temps ?	139
Annexes	144
1. Enquête utilisateurs Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité	
2. Hypothèses relatives à la masse des composants embarqués	
3. Bases de données environnementales	
4. Bases de données techniques	
5. Hypothèses du modèle d'évolution des postes de coûts des camions électriques à hydrogène et diesel des quatre segments étudiés	
6. Réglementation véhicules lourds électriques à hydrogène constructeurs	
Liste des acronymes et des abréviations	159



Introduction

Des projets de déploiements de camions électriques à hydrogène voient le jour en Europe et dans le monde, et les premières mises en exploitation de ces véhicules sur le territoire français devraient être effectives début 2022.

En effet, le contexte du changement climatique et de la pollution atmosphérique est associé à une forte prise de conscience de la part de l'ensemble des acteurs de ce secteur, tout comme de la part des instances nationales et européennes, qui mettent en place des politiques environnementales visant la limitation des émissions. Cette prise de conscience collective est ainsi soutenue par les évolutions du cadre réglementaire, accélérant la transition des véhicules du transport de marchandises vers des solutions basses et zéro émissions.

Or, le secteur du poids lourd de transport de marchandises est soumis à des contraintes opérationnelles fortes, et requiert pour un certain nombre d'applications des autonomies élevées et des temps de recharge courts. La technologie électrique à hydrogène présente dans ce cadre le potentiel d'être une solution zéro émission à l'échappement, tout en évitant les compromis opérationnels par rapport aux solutions thermiques. Après la phase d'expérimentations actuelles des premiers poids lourds électriques à hydrogène, la filière devra amorcer une phase de transition depuis les projets de démonstration vers des projets de plus grande échelle et de commercialisation, dès la deuxième partie de la décennie. Celle-ci sera accompagnée d'une massification des commandes et de la mise en exploitation de flottes de dimensions plus importantes, pour viser une filière pleinement opérationnelle d'ici à 2030.

Les camions électriques à hydrogène correspondent à un secteur qui est en phase de création et qui évolue rapidement pour être amené à se développer dans les prochaines années. Par conséquent, bien que l'objectif de ce document ait été de proposer une description et une analyse les plus complètes possibles sur la base des éléments disponibles à date – retours d'expériences de porteurs de projets européens en cours de déploiement, complétés par des entretiens approfondis avec des acteurs français du transport et de la logistique, et des industriels porteurs du secteur en France – on notera la réserve suivante :

la multiplication actuelle des projets de déploiements de camions électriques à hydrogène en Europe s'accompagnera naturellement de retours d'expérience, potentiellement d'une augmentation des niveaux de standardisation des solutions, d'évolutions réglementaires,

etc., et l'ensemble de ces évolutions pourront conduire ultérieurement à des révisions et mises à jour de cette publication.

Ainsi, ce document a l'ambition d'accompagner les acteurs de la chaîne logistique du transport de marchandises qui souhaitent s'engager sur la solution électrique à hydrogène, en apportant dans une première partie un descriptif détaillé des atouts de cette solution, dans une deuxième partie une présentation de la dynamique actuelle, tant sur l'offre de véhicules et de stations de recharge que sur les projets en cours, et dans une troisième partie une présentation des points clés pour la mise en œuvre des projets de premiers déploiements de camions électriques à hydrogène.

Ce document s'appuie sur les résultats d'une enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et France Hydrogène, visant à décrire la perception actuelle et projetée du marché du poids lourd en Europe.

Une analyse complétée par une étude menée par Hydrogen Europe en lien avec le groupe de travail sur le poids lourd électrique à hydrogène de France Hydrogène Mobilité :

Afin de décrire la perception actuelle et projetée du marché s'agissant de la solution hydrogène pour le secteur des transports de marchandises, nous nous appuyerons au fil de ce document sur une étude réalisée par Hydrogen Europe fin 2019, en lien avec le groupe Mobilité de France Hydrogène.

Une enquête utilisateurs a été conduite, dans le but d'appréhender le positionnement des acteurs de la filière du transport de marchandises européenne et de confronter les performances des solutions bas carbone ou zéro émission à la réalité terrain.

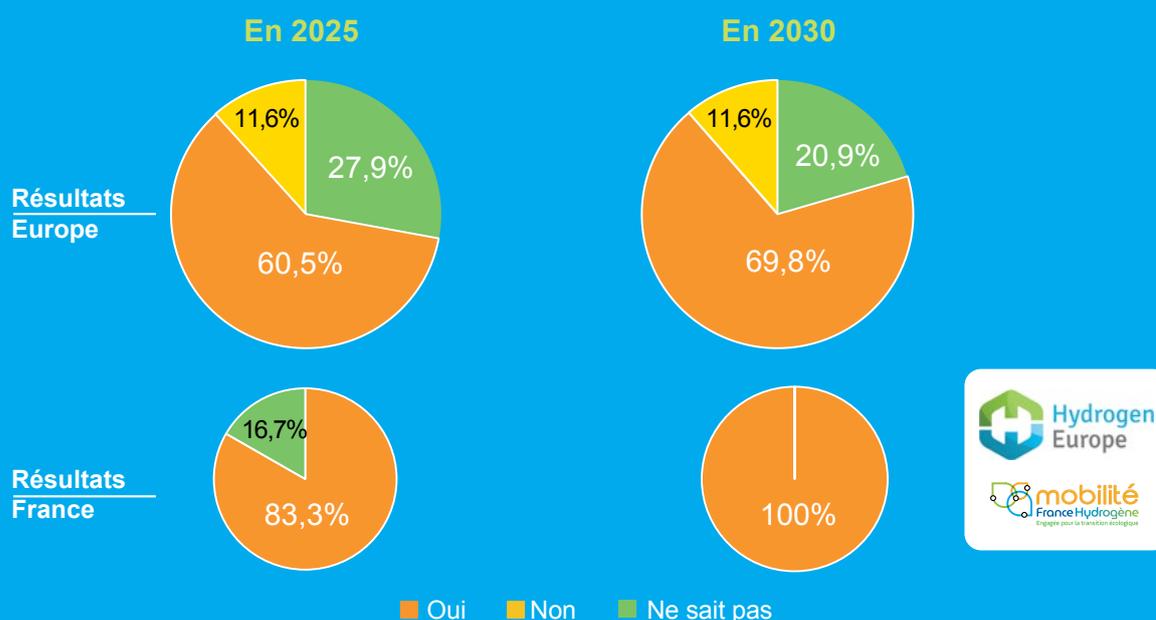
Dans le cadre de cette étude, 44 entreprises ont été interrogées au cours des troisième et quatrième trimestres 2019, avec pour objectif de cerner le degré d'appétence des acteurs du transport et de la logistique pour les camions électriques à hydrogène, et leurs points de vue sur les évolutions attendues pour la prochaine décennie.

Les acteurs européens interrogés sont répartis sur l'ensemble de la chaîne de valeur du transport de marchandises et de la logistique, du chargeur au transporteur, et sont positionnés sur des types de transports et de marchandises variés, incluant le transport en vrac, par conteneurs, en distribution locale ou en intermodal. Le détail des entreprises interrogées et de leurs segments d'activités est présenté en annexe 1. Les résultats de cette enquête, abordant les orientations stratégiques, les spécifications techniques attendues, les habitudes de ravitaillement et le cadre réglementaire, seront présentés dans les différentes sections de ce document.

En préambule, un premier résultat notable issu de cette enquête : sur l'ensemble des acteurs européens interrogés, plus de 60 % envisagent d'acheter des camions électriques à hydrogène d'ici à 2025, et près de 70 % d'ici à 2030. Ce constat est encore plus marqué en France, où l'ensemble des acteurs interrogés envisage de faire l'acquisition de poids lourds électriques à hydrogène d'ici à 2030, dont 83 % d'entre eux dès 2025. Ces résultats sont présentés sur la Figure 1 ci-dessous, et indiquent une forte appétence pour la technologie, pour a minima la tester, et si les essais sont satisfaisants être en mesure de l'utiliser largement à l'avenir.

Résultat issu de l'enquête utilisateurs de Hydrogen Europe et du groupe Mobilité de France Hydrogène, en réponse à la question : « Envisagez-vous d'acheter des camions électriques à hydrogène ? »

Figure 1 – Réponses des interrogés français et européens à la question « Envisagez-vous d'acheter des camions électriques à hydrogène en 2025 et 2030 ? »

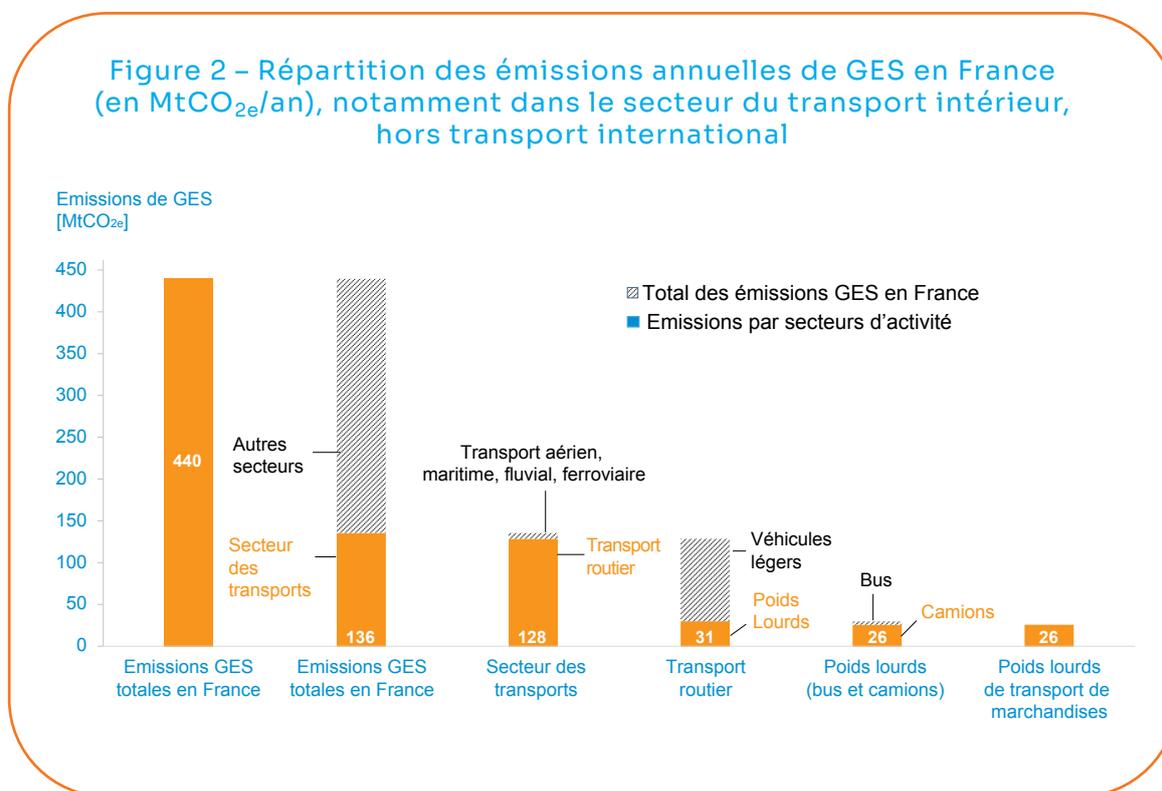


* Source : Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité (2019).
Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

1 Pourquoi la solution électrique à hydrogène pour ma flotte de véhicules de transport de marchandises ?

En France, le constat de l'impact environnemental du transport routier de marchandises est sans équivoque, puisque sur un parc de porteurs et de tracteurs totalisant plus de 520 000 véhicules², près de 99 % des camions circulent au gazole, et sont encore fortement polluants malgré les améliorations réalisées ces 20 dernières années. Sur l'ensemble du parc, seul 1 % des poids lourds est alimenté par un carburant alternatif, principalement par du GNV, et les modes de propulsion électriques, batterie et hydrogène confondus, sont jusqu'à présent extrêmement minoritaires, représentant moins de 0,1 % du parc.

Par conséquent, les répercussions environnementales de l'activité de transport routier de marchandises, par ailleurs centrale pour l'économie, sont encore lourdes, tant sur les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre (GES) que sur l'impact en termes de qualité de l'air. Cet impact GES est présenté sur la Figure 2 ci-après, qui souligne que le secteur des transports, tous modes de déplacements confondus, est la première source d'émissions en France, et représente plus de 30 % des 440 MtCO_{2e} générées chaque année sur le territoire.



2-Ministère de la Transition Ecologique, 2020. Etudes et données statistique SDES : Le parc de poids lourds en circulation au 1er janvier 2020.

Sur les 136 mégatonnes de CO_{2e} générées chaque année par l'ensemble du secteur des transports, le transport routier de marchandises engendre 26 MtCO_{2e}, soit près de 20 % des GES émis par les transports au niveau national³.

Outre les émissions de GES, le transport routier génère également des polluants atmosphériques à des niveaux significatifs, notamment des particules fines ou des oxydes d'azote (NOx), qui affectent la qualité de l'air. Ces émissions de polluants représentent un enjeu central de santé publique, puisque selon Santé Publique France, ce sont près de 40 000 décès prématurés par an qui sont imputables à la pollution atmosphérique en France, et qui pourraient être évités⁴.

Dans ce contexte, une décarbonation rapide et significative du transport lourd de marchandises sera nécessaire pour d'une part contribuer à atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'autre part combattre la pollution atmosphérique. A l'instar d'autres segments du secteur des transports, les poids lourds devront réaliser une diminution significative de leurs émissions carbonées d'ici 2030, et quasi-complète d'ici 2050. La politique européenne encadrant la vente de poids lourds neufs fixe les objectifs de réduction des émissions de CO₂ pour ces véhicules à -15 % en 2025 et -30 % en 2030 par rapport à 2019⁵. Dans ce cadre, le développement des poids lourds zéro émission représente une nécessité pour la décarbonation du secteur du transport, et contribuera à répondre efficacement aux enjeux de diminution de la pollution atmosphérique (NOx, particules fines, etc.).

In fine, un corpus réglementaire (détaillé dans la partie 1.3) relatif à la fois à la mobilité lourde et aux enjeux de qualité de l'air aux niveaux européen et national font que les alternatives au diesel, et en particulier les alternatives zéro émission – électrique à batterie, électrique à hydrogène, électrique alimenté par caténaire et routes électrifiées – devront jouer un rôle majeur dans la décarbonation du secteur. La place que jouera chacun de ces modes de propulsion dans le mix futur dépendra de multiples facteurs, dont les développements des différentes technologies, leurs facultés à répondre à des besoins opérationnels particuliers, et leurs modèles économiques associés.

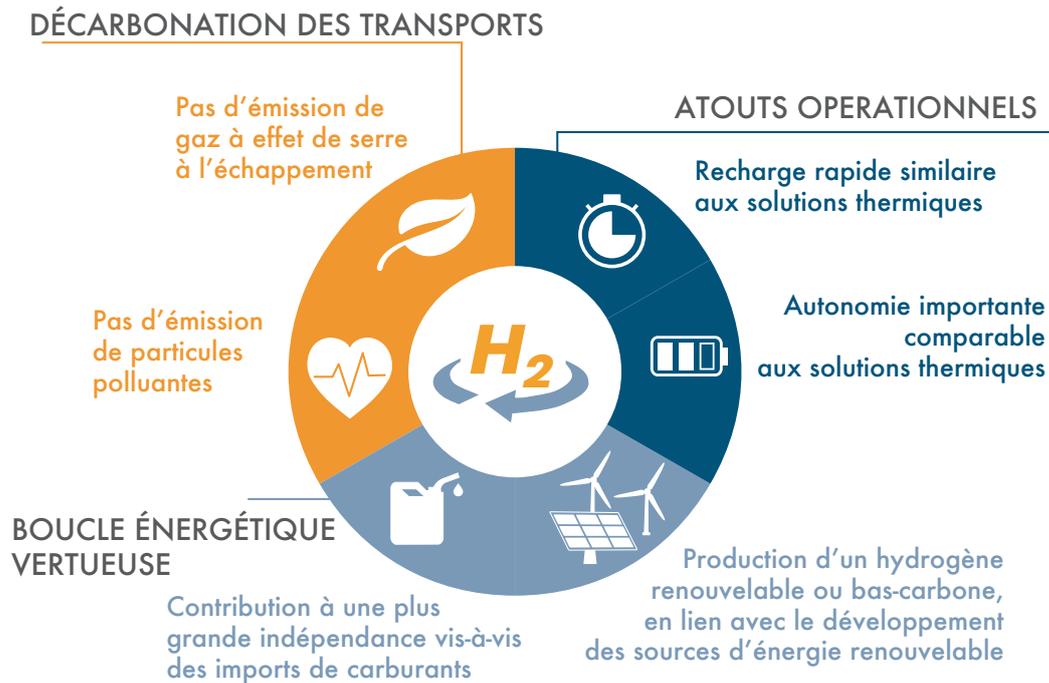
Dans le panel des options zéro émission, l'électrique à hydrogène se distingue par des caractéristiques opérationnelles sans compromis par rapport aux solutions thermiques actuelles avec des niveaux d'autonomie et de temps de recharge qui seront comparables à ceux du diesel. Par ailleurs, le développement de la mobilité hydrogène s'accompagne de celui de la production d'hydrogène renouvelable et bas carbone.

3-Ministère de la Transition Ecologique, 2021. *Les émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports.*

4-Santé Publique France, 2021. *Pollution de l'air ambiant : nouvelles estimations de son impact sur la santé des Français.*

5-Conseil de l'Union Européenne, 2019. *Réduction des émissions : le Conseil adopte des normes d'émissions de CO₂ pour les poids lourds.*

Figure 3 - La solution électrique à hydrogène présente des atouts multiples sur les plans environnementaux et opérationnels. Le développement de la mobilité hydrogène s'articule avec celui des énergies renouvelables, et renforce l'indépendance énergétique.



Les trois chapitres de cette section visent à présenter les caractéristiques des poids lourds électriques à hydrogène introduites ci-dessus, dans un premier temps en les comparant aux autres options de propulsion, ensuite en les replaçant dans le cadre des contraintes opérationnelles relatives aux différents segments d'usages du transport de marchandises, et enfin en les situant dans le contexte des politiques environnementales.

1.1 Pour quel positionnement par rapport aux autres alternatives énergétiques ?

Aujourd'hui, différents systèmes de propulsion alternatifs au diesel se développent, en particulier le gaz naturel (GNV ou bioGNV), l'électrique à batterie, l'électrique à hydrogène (PAC), ou encore la technologie de route électrique, qui fait l'objet d'expérimentations en Europe. Il existe trois principales catégories de routes électriques qui pourraient être développées, à savoir les caténaires, adaptées aux camions, l'induction, adaptée aujourd'hui aux voitures et aux bus circulant à faible vitesse, et la conduction par rails au sol, adaptée à la fois aux camions et aux voitures. Ces technologies pourraient être particulièrement intéressantes pour le transport longue distance, sur les réseaux autoroutiers. Cependant, elles ne présentent d'intérêt que si le déploiement de l'infrastructure est massif, en plus d'être transverse entre Etats européens, ce qui nécessite des décisions fortes et des investissements en infrastructures considérables.

Ce chapitre vise à décrire les principaux attributs d'un poids lourd électrique à hydrogène, puis à mener une analyse comparative des caractéristiques techniques, opérationnelles et environnementales des technologies alternatives au diesel, en les confrontant successivement à l'électrique à hydrogène.

Chacune de ces technologies présente des caractéristiques techniques qui lui sont propres, et qui influent sur sa capacité à adresser les différents segments du transport de marchandises. La figure 4 ci-dessous, issue de l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le groupe Mobilité de France Hydrogène, expose le point de vue des acteurs de la filière sur la capacité de ces technologies à répondre aux besoins opérationnels actuels du secteur du transport de marchandises. Ainsi, si l'on se concentre sur l'aspect purement opérationnel, les acteurs consultés indiquent que l'électrique à hydrogène comme le gaz naturel (comprimé ou liquéfié) répondent aux besoins de plus de la moitié d'entre eux (respectivement à hauteur de 72 % pour l'hydrogène, et 58 % et 68 % pour le GNC et GNL), l'électrique à batterie répondrait aux besoins de 37 %, et la technologie caténaire répondrait aux besoins opérationnels de 23 %.

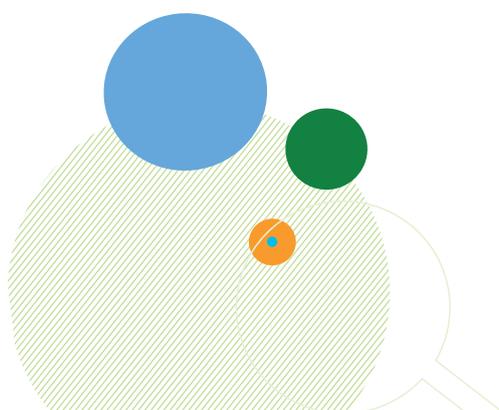
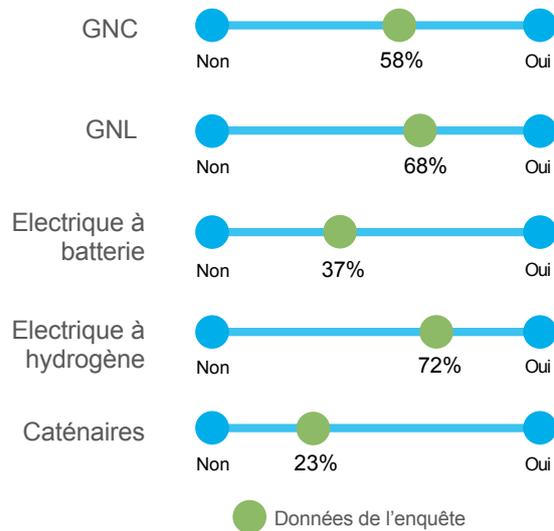


Figure 4 - Réponses de 43 acteurs français et européens à la question « D'après votre niveau actuel de connaissances, la technologie de carburant alternatif suivante pourrait-elle répondre à vos besoins opérationnels actuels ? »⁶



Avant d'entrer dans la comparaison entre les différentes technologies, on notera qu'il existe deux solutions de propulsion distinctes utilisant l'hydrogène comme carburant :

- **La technologie électrique à hydrogène** : il s'agit d'une technologie zéro émission. Elle consiste à transformer de l'hydrogène en électricité et en eau grâce à une pile à combustible. L'électricité alimente un moteur électrique (et l'eau est rejetée dans l'environnement sous forme de vapeur). Une batterie est ajoutée pour alimenter la motorisation électrique de concert avec la PAC lors d'un fort appel de puissance, à l'accélération par exemple. C'est cette technologie qui est décrite en détails dans ce document.

- **La technologie thermique à hydrogène** : elle consiste à consommer de l'hydrogène par combustion dans un moteur thermique, de la même façon qu'un carburant fossile classique. Il ne s'agit pas d'une technologie zéro émission, des gaz sont émis à l'échappement (principalement des NOx, en l'absence d'O₂ pur pour la combustion). Les moteurs thermiques à hydrogène sont étudiés par plusieurs constructeurs, mais les informations sur cette technologie sont peu disponibles à ce stade. Une comparaison succincte entre thermique à hydrogène et électrique à hydrogène sera tout de même proposée plus loin dans ce chapitre.

⁶-Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

1.1.1 Le poids lourd électrique à hydrogène

Un des atouts essentiels des poids lourds électriques à hydrogène est qu'ils présenteront des caractéristiques opérationnelles proches de celles du diesel. Les premiers modèles expérimentaux peuvent parcourir de 400 à 800 km entre deux recharges, et les modèles proposés dans la deuxième moitié de la décennie devraient dépasser les 1000 km d'autonomie, permettant la même fréquence de ravitaillement que les modèles thermiques classiques. De plus, le temps nécessaire pour une recharge pourra être également comparable à celui des véhicules thermiques, avec typiquement des temps de recharge aujourd'hui estimés inférieurs à 30 minutes, et potentiellement de l'ordre de 10 minutes dans les prochaines années.

Par ailleurs, l'utilisation d'un moteur électrique supprime les émissions de polluants locaux ou de GES à l'échappement, mais présente également le potentiel de réduire considérablement les nuisances sonores (jusqu'à un facteur 10 par rapport au thermique). Le bilan carbone global sur le cycle de vie du puits à la roue de la solution électrique à hydrogène est fortement favorable par rapport au diesel, même s'il est variable selon le mode de production de l'hydrogène. Ainsi, les niveaux d'émissions du puits à la roue d'un camion électrique à hydrogène sont réduits de 71 % par rapport au diesel si l'hydrogène utilisé est produit par électrolyse à partir du mix électrique français (provenant à 70 % du nucléaire en France⁷), et de 89 % s'il est produit par électrolyse à partir d'électricité éolienne. En revanche, si l'hydrogène consommé est fortement carboné, produit par vaporeformage du méthane par exemple, le bilan carbone du puits à la roue reste insatisfaisant.

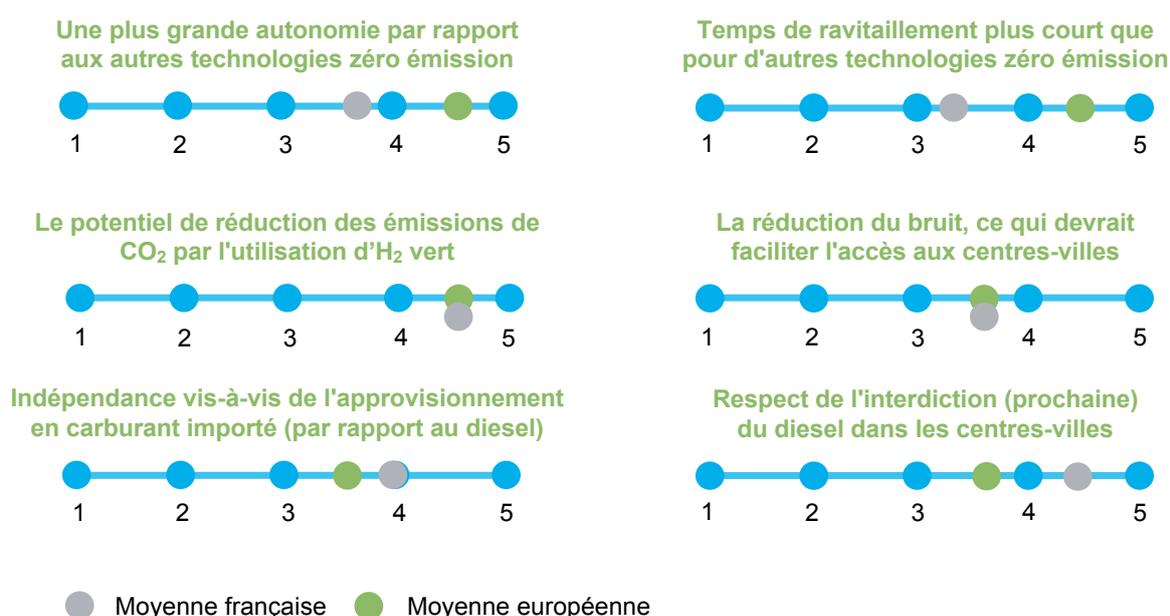
C'est pourquoi le développement de la mobilité hydrogène s'accompagne intrinsèquement de la transition du secteur de la production de l'hydrogène. Si le mode de production historique de l'hydrogène est le vaporeformage du méthane, représentant encore la majorité de l'hydrogène produit et consommé dans l'industrie, la filière du transport s'oriente aujourd'hui clairement vers une production alternative d'hydrogène, renouvelable ou bas carbone, produit par électrolyse, pyrogazéification de biomasse, vaporeformage de biogaz (dont une partie avec CCUS), ou encore coproduit lors d'un procédé industriel (comme les électrolyses chlore/soude ou les procédés de déshydrogénation). En particulier, la production par électrolyse de l'eau connaît un développement rapide, et devrait représenter une puissance installée de 6,5 GW en France en 2030⁸, et assurer la production de 680 000 tonnes d'hydrogène par an, soit 75 % de la consommation actuelle.

7-EA, 2019.

8-Ministère de l'Economie, des Finances et de la Relance, 2020. *Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène bas-carbone en France.*

Ainsi, les camions électriques à hydrogène présentent des caractéristiques opérationnelles et environnementales uniques pour la filière. Comme le montre la Figure 5 ci-dessous, elles sont perçues positivement par les acteurs interrogés dans le cadre de l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le groupe France Hydrogène Mobilité⁹. Ils soulignent en particulier l'impact positif de l'autonomie, du temps d'avitaillement, du potentiel de réduction des émissions de GES et des nuisances sonores de cette technologie. Parmi les points forts identifiés par la filière, la possibilité d'accéder aux centres-villes sans restriction et l'indépendance vis-à-vis de l'approvisionnement en carburant importé sont à considérer.

Figure 5 - Réponses de 43 acteurs français et européens à la question «De votre point de vue, quels sont les principaux avantages des camions électriques à hydrogène ?»



⁹-Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

1.1.2 Positionnement par rapport au GNV

Même s'ils représentent seulement 1 % du parc français en 2021, les poids lourds GNV dédiés au transport de marchandises en France connaissent des ventes en nette progression ces dernières années. Le parc de poids lourds GNV s'est en effet développé, passant de quelques 250 camions circulant au gaz naturel en 2014, à près de 6500 véhicules GNV immatriculés en août 2021 selon l'AFGNV¹⁰. Cette évolution des ventes est alignée avec les résultats de l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le groupe France Hydrogène Mobilité⁹, selon laquelle 58 à 68 % des transporteurs considèrent le gaz naturel comme compatible avec leurs besoins opérationnels (dépendant de son état gazeux ou liquide), en plus des avantages de disponibilité des véhicules et de maturité de cette technologie.

Tout comme l'électrique à hydrogène, la technologie gaz naturel présente l'avantage de caractéristiques opérationnelles proches du diesel, tant sur le plan de l'autonomie que sur celui des durées de recharge. Cela étant, contrairement à l'électrique à hydrogène, c'est un carburant qui induit des émissions de GES à l'échappement. Les émissions de GES du puits à la roue des poids lourds GNV dépendent du mode de production du carburant. Elles sont proches de celles du Diesel si le gaz naturel est produit à partir de sources fossiles, mais sont réduites de 80 % si le carburant utilisé est du bioGNV, se rapprochant du niveau de réduction de l'hydrogène renouvelable. Le bioGNV représente aujourd'hui une alternative crédible, qui sera cependant limitée par la quantité de ressources disponibles pour sa production. Par ailleurs, la combustion dans un moteur thermique n'étant jamais parfaite du fait de la variation de température, du régime de fonctionnement, et de la richesse du mélange, les véhicules fonctionnant au gaz naturel ne suppriment pas les émissions de polluants atmosphériques. Les émissions de particules fines et de NOx sont fortement réduites, mais en contrepartie les émissions des hydrocarbures totaux imbrulés (THC) augmentent¹¹.

Ainsi, si l'écart de maturité avec la technologie gaz naturel est à l'avenir comblé par l'électrique à hydrogène, cette dernière solution présentera les mêmes qualités opérationnelles que la première, mais avec en outre la réduction des émissions de GES, polluants atmosphériques, et nuisances sonores.

¹⁰-AFGNV, 2021. L'observatoire du GNV.

¹¹-Pour améliorer les performances des moteurs, on tend vers des mélanges présentant des excès d'air, donc d'O₂, de plus en plus faibles, du dioxygène qui va principalement oxyder les hydrocarbures légers (méthane, éthane, etc.) et manquer pour oxyder les traces d'hydrocarbures lourds à la cinétique de réactions plus lente. Il en résulte une anti-corrélation entre TCH et NOx : la réduction des NOx a pour contrepartie une augmentation très significative des imbrulés, cela étant d'autant plus vrai pour le biogaz dont la composition chimique est plus saturée en eau et diverses espèces chimiques selon les substrats utilisés.

Le bioGNV comme l'hydrogène renouvelable ou bas carbone pourront s'inscrire dans des stratégies d'indépendance vis-à-vis des énergies fossiles, et dans des logiques de production de carburant en ligne avec le développement des EnR. Par ailleurs, la production maîtrisée d'hydrogène renouvelable ou bas carbone et de bioGNV, résultant d'intrants aux coûts d'exploitation (amortissement et approvisionnement en électricité) davantage prédictibles et stables que ceux des marchés mondiaux spéculatifs de stock (pétrole et gaz naturel issu de sources fossiles), les usagers pourront bénéficier d'une meilleure visibilité et prédictibilité de leurs coûts opérationnels, ce qui constitue l'un des points d'attention les plus critiques des professionnels du transport aujourd'hui.

1.1.3 Positionnement par rapport au moteur thermique à hydrogène

L'hydrogène sous forme gazeuse peut être utilisé comme carburant dans un moteur thermique, sans causer d'émissions de CO₂ à l'échappement. Cette technologie n'est aujourd'hui pas disponible sur le marché, mais est étudiée par des constructeurs comme Iveco ou Volvo Trucks / Renault Trucks par exemple , et pourrait être proposée dans les prochaines années. Une fois cette technologie maîtrisée, la disponibilité des moyens de production en série pourrait être rapide, puisque les équipements nécessaires seront similaires à ceux déjà utilisés sur les modèles thermiques, ce qui serait en faveur de prix des véhicules attractifs. Par ailleurs, les moteurs à combustion pourraient être plus stables, tolérants aux contaminants du carburant et robustes aux petites particules. Ils pourraient également être plus durables que les piles à combustible. En revanche, l'hydrogène thermique présente un certain nombre d'inconvénients :

- D'une part, c'est une solution qui n'est pas zéro émission à l'échappement : au-delà du rejet de vapeur d'eau, des NOx sont émis lors du fonctionnement du véhicule.
- D'autre part, l'efficacité énergétique est moindre en comparaison avec une solution électrique à hydrogène. En effet, une pile à combustible présente un rendement supérieur à celui d'un moteur thermique, même hybride et optimisé, et permet au même titre qu'un hybride thermique le rechargement d'une batterie au freinage. A titre d'exemple, une PAC pour camion grand routier en cours de développement devrait présenter un rendement net du système complet de 10 points supérieur à un moteur thermique à hydrogène dans les mêmes conditions de circulation.

12-H2 Mobile, 2021. Les moteurs à injection hydrogène aussi efficaces que les piles à combustible ?

Par conséquent, un véhicule à hydrogène thermique consommera plus d'hydrogène pour une même distance parcourue, ce qui signifie d'une part qu'un réservoir plus volumineux sera nécessaire pour un même kilométrage, et d'autre part que la facture en carburant sera plus importante. Or, pour un véhicule lourd, le coût total de possession (ou TCO) dépend pour une large partie du poste de coût lié au carburant. De fait, même si le prix d'achat des véhicules lourds thermiques à hydrogène était inférieur à celui des poids lourds électriques à hydrogène du fait de la préexistence des lignes de production, le TCO ne serait pas significativement plus avantageux.

- Enfin, l'utilisation de l'hydrogène pour alimenter un moteur à combustion ne supprime pas la pollution sonore intrinsèque aux moteurs thermiques.

Ainsi, si elle est développée dans les prochaines années, la solution thermique à hydrogène pourrait présenter une alternative décarbonée pour la mobilité lourde, au coût d'investissement intéressant. En revanche, il ne s'agit pas d'une solution zéro émission, puisqu'elle rejette des NOx à l'échappement, contrairement à la solution électrique à hydrogène. Des synergies sont cependant envisageables entre poids lourds électriques à hydrogène et thermiques à hydrogène. D'une part, ils pourraient s'approvisionner dans les mêmes infrastructures de distribution, augmentant ainsi le facteur de charge des stations, faisant diminuer les coûts de l'hydrogène. D'autre part, une augmentation des commandes de véhicules à hydrogène permettrait aux équipementiers et aux fournisseurs de réservoirs d'amortir la R&D et les investissements, faisant baisser la courbe des coûts pour tous les véhicules à hydrogène, soutenant ainsi la compétitivité des deux solutions.

1.1.4 Positionnement par rapport à l'électrique à batterie¹³

Contrairement aux deux solutions présentées précédemment, propulsées par un moteur thermique avec combustion du carburant, l'électrique à batterie correspond, comme l'électrique à hydrogène, à une solution zéro émission. Les véhicules électriques à batterie présentent des niveaux d'émissions de GES du puits à la roue variables en fonction du mode de production de l'électricité.

13-Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

L'électricité produite en France est faiblement carbonée, issue aux trois-quarts du nucléaire, peu émetteur de gaz à effet de serre. Ainsi, un véhicule électrique à batterie alimenté par le mix électrique français réduit les émissions de GES du puits à la roue de 91 % par rapport au diesel, soit des niveaux d'émissions légèrement inférieurs à ceux des véhicules électriques à hydrogène (si l'hydrogène est produit par électrolyse). L'électrique à batterie présente même le potentiel de supprimer la quasi-totalité des émissions d'un diesel, à hauteur de 98 %, si l'électricité est produite à partir d'éolien terrestre par exemple. Cet écart d'émissions entre électrique à hydrogène (hydrogène produit par électrolyse), et électrique à batterie, provient de la différence d'efficacité énergétique globale des procédés, depuis la production du vecteur énergétique à sa consommation dans le véhicule. En effet, l'efficacité énergétique de l'électrolyse est de l'ordre de 60 %, et de l'électricité additionnelle est consommée pour la compression du gaz et sa distribution. Ainsi, pour effectuer un même trajet, un véhicule électrique à hydrogène consomme environ trois fois plus d'électricité que son équivalent à batterie. Cette surconsommation électrique globale explique l'écart des niveaux d'émissions du puits à la roue entre véhicules électriques à batterie et à hydrogène – émissions qui restent faibles si l'hydrogène est produit par électrolyse en France.

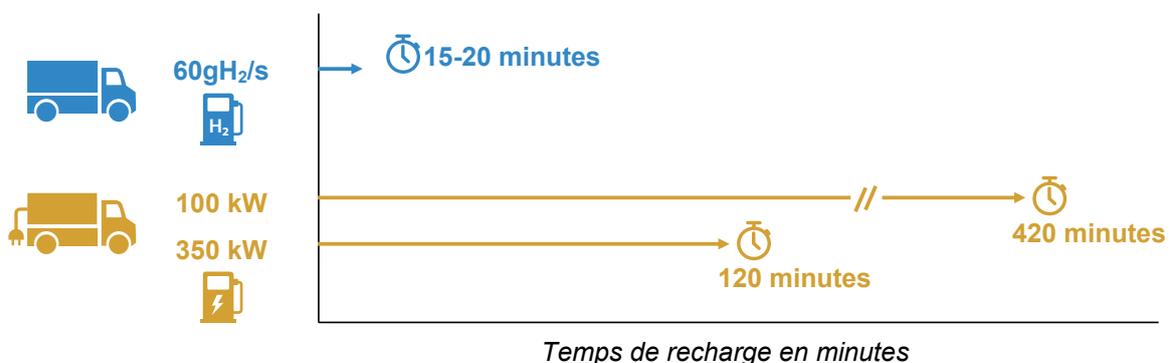
On notera que les batteries posent question en termes de dépendance d'approvisionnement. En 2021, 94 % du marché mondial de la production de batteries est détenu par des entreprises asiatiques, les trois premiers fournisseurs mondiaux (CATL, Panasonic et LG Energy Solutions) détenant 70 % de ce marché mondial. Cela étant, les industriels ont pris conscience de l'importance d'un approvisionnement local, et nombre de gigafactories en construction en Europe sont destinées à la fabrication des cellules et des composants, et devraient entrer en opérations dans les prochaines années à Douvrin en France, Kaiserslautern en Allemagne, ou encore Skellefteå en Suède par exemple. En 2021, 80 % des composants des batteries lithium utilisées dans les voitures sont déjà recyclables¹⁴, et ces avancées bénéficieront probablement directement au recyclage des batteries pour les poids lourds. Les entreprises de la filière, comme Umicore, groupe belge spécialisé dans le recyclage des métaux, ou encore la multinationale française Orano, se mettent en ordre de marche pour produire de nouveaux matériaux actifs de batteries, à partir de batteries usagées. De plus, la Directive Batterie européenne va imposer une séparation poussée des métaux, à hauteur de 90 % du cobalt, du cuivre, et du nickel, et 35 % du lithium dès 2025, qui passeront respectivement à 95 % et 70 % en 2030.

¹⁴Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021. *Développer l'automobile propre et les voitures électriques.*

L'autonomie des poids lourds électriques à batterie est limitée par la densité énergétique des batteries, qui impose pour les constructeurs de trouver un équilibre entre quantité d'énergie embarquée, poids des batteries, volume occupé dans le véhicule, et donc entre autonomie et masse de marchandises transportées. Cela étant, les avancées rapides réalisées ces dernières années dans le secteur des batteries ont permis de considérablement améliorer leur efficacité. Actuellement, l'autonomie des poids lourds électriques à batterie est de l'ordre de 200 à 300 km en conditions réelles de circulation, et est réduite en cours de vie par l'usure des composants. Cependant, les développements en cours visent l'objectif de 500 kilomètres d'autonomie d'ici la fin de la décennie.

L'avitaillement est plus long pour des poids lourds électriques à batterie, en comparaison avec des solutions thermiques ou électriques à hydrogène, y compris lorsque la recharge est effectuée à des bornes de charge rapide. La Figure 6 ci-dessous propose une comparaison des temps nécessaires à la recharge permettant d'obtenir 500 km d'autonomie, entre un poids lourd électrique à hydrogène, à une borne de distribution 700 bar avec un débit maximal de 60 gH₂/s¹⁵, et un poids lourd électrique à batterie, avec une borne rapide de 100 kW d'une part, et avec une borne ultra-rapide de 350 kW d'autre part (et sans dépasser 80 % de capacité rechargée pour la batterie, auquel cas la vitesse de recharge baisse significativement). Dans cette situation, la recharge est environ 10 fois plus rapide pour un poids lourds électrique à hydrogène. Cet exemple présente les durées de recharge pouvant être observées sur les équipements de distribution soumis à la réglementation de 2021. Les flux maximums de distribution de l'hydrogène comme les puissances des bornes de recharge électrique seront amenés à évoluer dans les prochaines années.

Figure 6 - Comparatif des temps de recharge pour récupérer 500 km d'autonomie pour des poids lourds électriques à batterie et électriques à hydrogène



¹⁵-Le flux de distribution de l'hydrogène est aujourd'hui limité par la réglementation à 60 gH₂/s à 700 bar, et à 120 gH₂/s à 350 bar. Ces valeurs sont des bornes maximales autorisées, mais en pratique, la recharge n'est pas effectuée de manière linéaire, à flux constant.

Compte-tenu des développements technologiques actuels, le temps de recharge des poids lourds électriques à batterie rend leur utilisation compatible avec des utilisations qui permettent de dédier du temps à la recharge, et moins compatible avec certains usages intensifs pour lesquels des temps de recharge courts sont nécessaires. C'est également le cas pour les activités qui nécessitent une grande flexibilité, non conciliables avec l'immobilisation d'un véhicule sur de longues plages horaires pour le processus de recharge.

Dans tous les cas, le déploiement de bornes de recharge de très forte puissance pose aussi des problèmes d'infrastructures de réseaux de distribution électriques, qui doivent être dimensionnés en conséquence, le coût des bornes de recharge de forte puissance et le prix même de l'électricité conduisent les acteurs actuels de la recharge à vendre leur électricité plus cher : sur les réseaux électriques de recharge de forte puissance en Europe, on constate des prix de recharge d'électricité plus élevés que les pleins de gazole, en termes de kWh transférés.

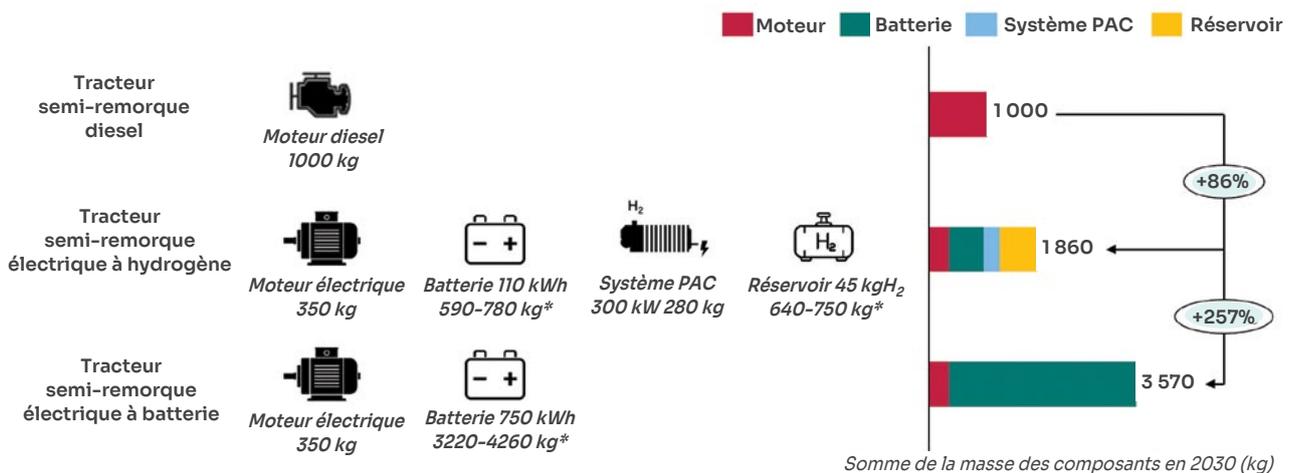
Lancé aux États-Unis, le projet « Megawatt Charging System » vise à élaborer un nouveau système de recharge extrêmement rapide, un standard principalement destiné aux futurs poids lourds, avions et navires électriques. Les câbles et le connecteur devront résister à une intensité en crête de 3 000 A sous une tension de 1 250 V, de quoi remplir la batterie d'un gros camion en 15 à 20 minutes, à condition que l'accumulateur soit capable d'absorber une telle charge. Au-delà des enjeux techniques, délivrer de telles quantités d'énergie implique de repenser le réseau public d'électricité. En effet, la production d'un réacteur nucléaire EPR (1 650 MW) serait totalement absorbée par seulement 440 poids lourds rechargeant simultanément à pleine puissance.

Dans tous les cas, même avec des puissances de charge inférieures à 350 kW, la recharge d'une flotte captive de véhicules de dizaines de camions dans un même dépôt logistique posera très certainement des problèmes de réseau, excluant la possibilité d'une conversion complète de la flotte.

Enfin, l'intégration au poids lourd d'une batterie de haute capacité entraîne une diminution de la charge et du volume utiles. La Figure 7 ci-dessous présente un comparatif de la masse des différents composants de propulsion embarqués par un tracteur semi-remorque (ensemble routier) Diesel, électrique à hydrogène et électrique à batterie, nécessaires à une autonomie de 500 km (hypothèses complètes en annexe 2).

Un tracteur semi-remorque électrique à batterie doit embarquer 3,6 tonnes de batteries pour atteindre 500 km d'autonomie, et le moteur électrique d'une masse trois fois inférieure aux moteurs Diesel ne suffit pas à compenser ce surpoids. De fait, cette masse additionnelle embarquée diminue la capacité de chargement des véhicules, ce qui peut impacter significativement le modèle d'affaires des transporteurs. Au contraire, un poids lourd électrique à hydrogène doit embarquer un réservoir à hydrogène moins volumineux et lourd que les batteries, une batterie de faible capacité, un système de pile à combustible, et un moteur électrique, ce qui correspond finalement actuellement à 2,1 tonnes de composants pour un tracteur doté de 500 km d'autonomie, soit une réduction de 38 % du poids total des composants par rapport à un tracteur semi-remorque électrique à batterie.

Figure 7 - Comparaison de la masse des composants de différentes technologies pour un tracteur semi-remorque¹⁶

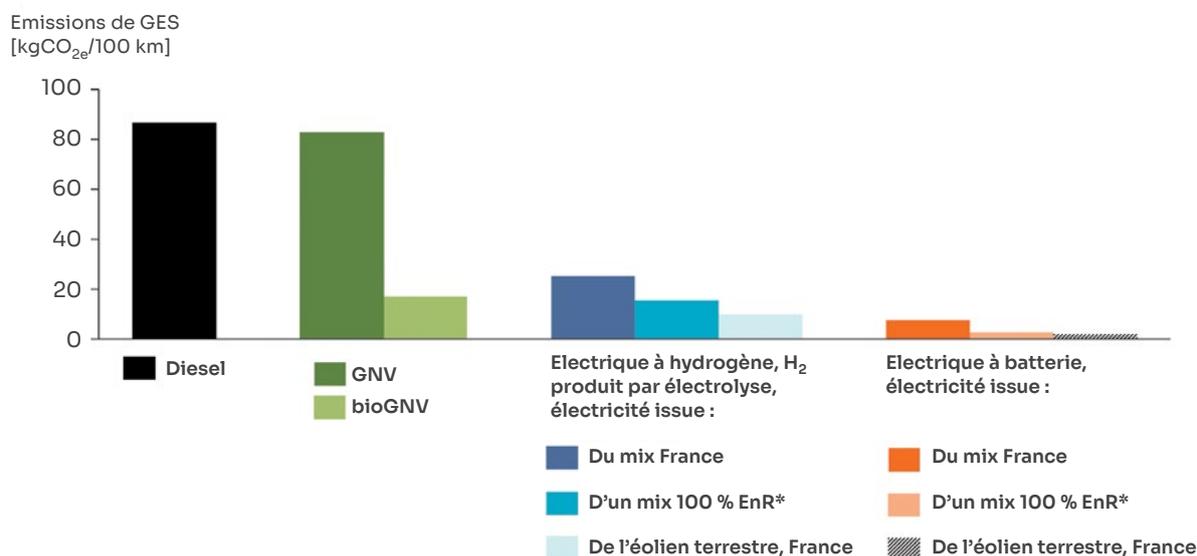


*La fourchette basse correspond aux projections pour 2030 et la fourchette haute aux projections pour 2023

En conclusion, les solutions électriques à batterie et électriques à hydrogène sont adaptées pour des usages différents, toutes deux en tant que solutions zéro émission à l'échappement, et qui permettent de réduire considérablement les émissions de GES du puits à la roue, comme le montre la Figure 8.

16-Les masses affichées sont des estimations et correspondent à une autonomie recherchée de 500 km pour un semi-remorque. De plus, la masse (variable) du carburant embarqué (diesel ou hydrogène) n'est pas considérée. Le détail des hypothèses est présente en annexe 2. La valeur de la masse du moteur diesel est un ordre de grandeur et est utilisée comme donnée de base pour comparaison avec les autres solutions.

Figure 8 - Evaluation des émissions GES du puits à la roue d'un tracteur semi-remorque pour différentes alternatives énergétiques [kgCO_{2e}/100 km]¹⁷



*Le « mix 100 % EnR » désigne un mix entre électricité d'origine éolienne à 63 %, solaire à 17 %, hydraulique à 13 %, et thermique à 7 %, proportions permettant de techniquement satisfaire la demande française, d'après le Rapport « Un mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, 2015.

Dans le panel des solutions zéro émission, camions électriques à batterie et à hydrogène peuvent être utilisés de façon complémentaire pour les usages sur lesquels ils sont respectivement les plus adaptés. En effet, malgré les contraintes d'exploitation des camions électriques à batterie, ils permettent de répondre à un certain nombre de besoins opérationnels, ce qui est reflété dans les résultats issus de l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le groupe France Hydrogène Mobilité¹⁸, qui indiquent qu'ils conviendraient pour un tiers des transporteurs et logisticiens interrogés. La pertinence de cette solution dépend alors du segment d'utilisation considéré, décrit dans le chapitre suivant, mais aussi des zones ciblées pour la recharge, car les capacités locales de distribution et de foisonnement des réseaux électriques sont hétérogènes, d'un quartier à l'autre.

1.2 Pour quels types d'usages ?

La filière du transport de marchandises concerne une variété d'usages et de missions spécifiques, qui, selon leurs contraintes opérationnelles propres, nécessitent des caractéristiques de véhicules variables, pouvant mener à des choix technologiques différents.

¹⁷-Voir annexe 3, données issues de la base carbone ADEME et de l'Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène de l'ADEME, 2020.

¹⁸-Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

Le secteur des poids lourds en général peut être décrit selon un certain nombre de classifications, distinguant le type de véhicule (porteur rigide ou tracteur), le type de traction (4x2, 4x4, 6x2, 6x4...), ainsi que le PTAC associé.

De façon très synthétique, les poids lourds dédiés au transport de marchandises peuvent être regroupés autour de quatre segments caractéristiques prenant en considération le type de véhicule et l'usage associé, en définissant ainsi les quatre groupes suivants : les porteurs de distribution urbaine, à faibles kilométrages journaliers et PTAC, les porteurs de distribution régionale, les tracteurs de distribution régionale et les tracteurs de distribution long-courrier, aux plus hauts kilométrages et PTAC. A ceux-ci s'ajouteraient notamment les véhicules de construction et les bennes à ordures ménagères, qui ne sont pas l'objet du présent document.

Pour chacun de ces quatre segments, le Tableau 1 ci-dessous présente des ordres de grandeur caractéristiques en termes de kilométrages journaliers, PTAC, et consommations de gazole et d'hydrogène, recueillis notamment auprès de la FNTR¹⁹. Il s'agit d'ordres de grandeurs indicatifs pour ce type de véhicules, qui sont en réalité variables et dépendant de nombreux facteurs (voir annexe 4).

19-Les fourchettes de consommation des véhicules diesel sont issues des retours terrain synthétisés et partagés par la FNTR.

Tableau 1 - Synthèse des segments des poids lourds du transport de marchandises

Segment de véhicule de transport de marchandises

Illustrations²⁰

Véhicules de distribution urbaine (porteurs)

Les véhicules de distribution urbaine permettent le plus souvent de faire la liaison entre les zones de stockage de marchandises et les commerces citadins.

Ordres de grandeur caractéristiques :

- Kilométrage journalier : 100-200 km
- PTAC : 7,5-16 T
- Consommation moyenne de gazole : 15-26 L/100 km
- Consommation moyenne d'H₂ : 4-6,5 kgH₂/100 km



20-© Iveco. Images utilisées à titre illustratif, ces véhicules n'étant à ce jour pas proposés en version hydrogène.

Véhicules de distribution régionale (porteurs)

Les véhicules régionaux de livraison roulent souvent mais sur des distances modérées. Ils ne comprennent pas seulement les camions à rideaux.

Ordres de grandeur caractéristiques :

- Kilométrage journalier : 200-500 km
- PTAC : 16-32 T
- Consommation moyenne de gazole : 23-30 L/100 km
- Consommation moyenne d'H₂ : 6-8 kgH₂/100 km



Tracteurs à semi-remorque à utilisation régionale

Le segment des semi-remorques à utilisation régionale comprend les véhicules de type tracteur-remorque, dont les trajets sont généralement répétitifs. Cela concerne par exemple les liaisons entre différents centres de distribution de marchandises au sein d'une région. On pourra inclure à ce segment les porteurs avec remorque attelée.

Ordres de grandeur caractéristiques :

- Kilométrage journalier : 200-500 km
- PTAC : 32-44 T
- Consommation moyenne de gazole : 28-32 L/100 km
- Consommation moyenne d'H₂ : 7-9 kgH₂/100 km



Tracteurs à semi-remorque long-courriers

Le segment des semi-remorques long-courriers comprend les véhicules de type tracteur-remorque opérant dans le fret de marchandises national ou international. Ils parcourent jusqu'à 800 km par jour et sont ceux dont la consommation journalière de carburant est la plus importante.

Ordres de grandeur caractéristiques :

- Kilométrage journalier : 500-800 km
- PTAC : 32-44 T
- Consommation moyenne de gazole : 28-32 L/100 km
- Consommation moyenne d'H₂ : 7-9 kgH₂/100 km



Du point de vue des transporteurs et logisticiens, les principaux aspects pris en compte dans le choix d'un véhicule et a fortiori d'un mode de propulsion, pour un usage donné, sont le kilométrage journalier parcouru par le véhicule, le temps disponible pour la recharge, la consommation énergétique du véhicule et le volume et la masse nécessaires pour le transport des marchandises. Sur ces quatre critères, l'hydrogène présente les avantages suivants :

- **L'autonomie** : les autonomies des premiers prototypes de poids lourds électriques à hydrogène sont de 400 à 800 km, mais les véhicules électriques à hydrogène les plus performants devraient atteindre 1000 km d'autonomie d'ici 2028. Au-delà de 300 km/jour notamment, le poids lourd électrique à hydrogène est donc une technologie zéro émission particulièrement pertinente en termes de caractéristiques techniques et opérationnelles.

- **Le temps nécessaire pour la recharge** : les temps de recharge des poids lourds électriques à hydrogène sont estimés aujourd'hui de 15 à 30 minutes, et pourraient descendre à 10 minutes au cours de la décennie. Lorsque l'activité permet peu de temps d'arrêt pour la recharge, dans le cas d'un fonctionnement en flux tendu par exemple, la technologie électrique à hydrogène est particulièrement adéquate.

- **La consommation énergétique** : si le véhicule présente une consommation énergétique élevée, due à la présence d'équipements spécifiques embarqués, l'électrique à hydrogène est particulièrement pertinent. En effet, l'efficacité énergétique des solutions électriques pour l'alimentation d'auxiliaires est supérieure à celle des solutions thermiques. L'électrique à hydrogène est donc intéressant sur ce segment et peut être adapté aux tracteurs à semi-remorques frigorifiques par exemple.

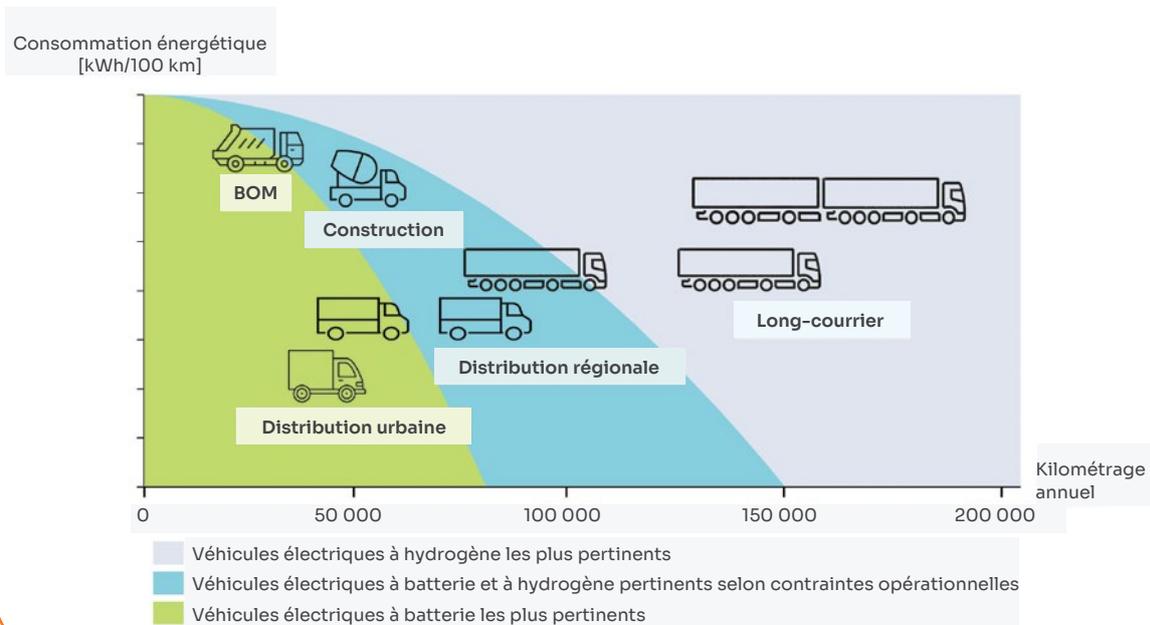
- **Le volume disponible pour le chargement** : en pratique, l'utilisation de solutions électriques nécessite un volume pour les composants, réservoirs et motorisation, supérieur à celui des véhicules Diesel. Cette augmentation de volume est de l'ordre d'un facteur deux pour l'électrique à hydrogène et trois pour l'électrique à batterie. La solution électrique à hydrogène est donc la solution électrique la plus avantageuse pour les camions circulant rarement en charge réduite.

La solution électrique à hydrogène peut donc présenter des points forts sur l'ensemble des segments du transport de marchandises, en particulier pour des usages intensifs caractérisés par des kilométrages élevés et des temps disponibles pour la recharge courts, ce qui les positionne en situation de complémentarité avec l'autre principale solution zéro émission, l'électrique à batterie, particulièrement bien adaptée pour des kilométrages moins élevés et avec un temps plus long pouvant être consacré à la recharge.

L'enjeu est donc de pouvoir utiliser les solutions électriques car zéro émission, en utilisant (i) l'électrique à batterie sur les usages compatibles, notamment pour un meilleur rendement énergétique global, et (ii) l'électrique à hydrogène pour les usages non compatibles avec la batterie, présentant des contraintes opérationnelles.

Dans le cadre de la réflexion portant sur la complémentarité entre électrique à hydrogène et électrique à batterie, les seuils de kilométrages et de consommations énergétiques des véhicules peuvent permettre de déterminer la solution la plus adaptée, comme illustré ci-dessous. Ainsi, l'électrique à batterie est une solution adaptée pour une majorité des véhicules de livraisons urbaines, présentant des kilométrages inférieurs à 80 000 km/an. Au-delà, notamment sur le segment de la distribution régionale à usage intensif, l'électrique à hydrogène est particulièrement pertinent, et devient la principale alternative zéro émission au-delà d'un kilométrage annuel estimé de 100 000 à 150 000 km/an (comme décrit Figure 9). L'électrique à hydrogène est également particulièrement adapté lorsque les véhicules présentent une forte consommation énergétique liée aux auxiliaires, comme les caisses frigorifiques.

Figure 9 – Complémentarité des solutions électrique à batterie et électrique à hydrogène en fonction du kilométrage annuel et de la consommation énergétique du véhicule²¹

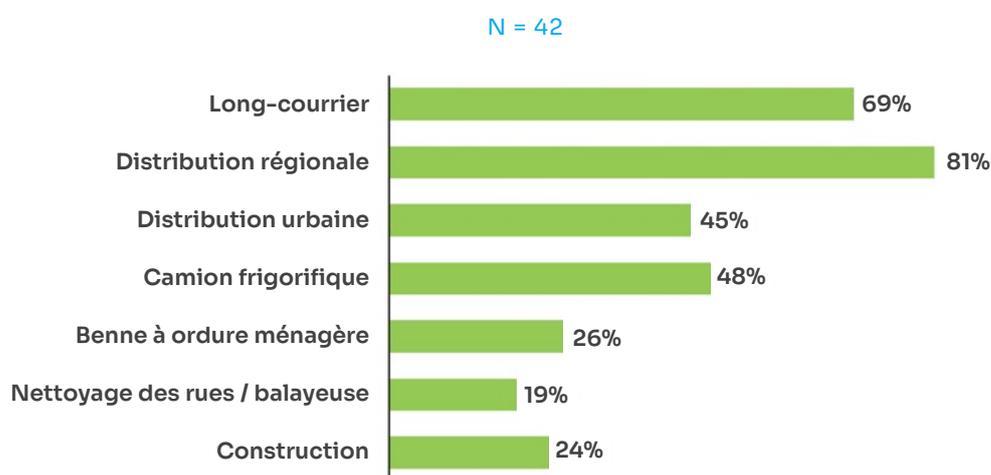


21-Source : Figure adaptée du support présenté lors du Séminaire HUGÉ, en juin 2021, par Reine Alemar, directeur du développement des transports chez Volvo Trucks : « H2 Trucks, An opportunity for Heavy Vehicles Decarbonisation ».

Cette répartition des choix du mode de propulsion présentée ci-dessus reste indicative, et n'a pas vocation à imposer une règle systématique, mais on notera en outre que si l'électrique à hydrogène sera particulièrement adapté au transport long-courrier ou régional, ses avantages opérationnels, moins marqués certes sur le transport urbain, restent un atout clé lorsque la gestion logistique des véhicules ne permet pas de disposer d'un temps important pour la recharge par exemple. A ce titre, certains acteurs de la filière considèrent l'électrique à hydrogène pertinent pour les applications de distribution urbaine.

Les résultats de l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le groupe Mobilité de France Hydrogène²², présentés sur la figure ci-dessous, montrent que 45 % des acteurs interrogés considèrent l'électrique à hydrogène comme une solution pertinente pour la distribution urbaine, et respectivement 81 % et 69 % considèrent qu'il s'agit d'un choix adapté pour le transport long-courrier et la distribution régionale.

Figure 10 - Réponses de 42 acteurs français et européens à la question « Pour quelles principales applications considérez-vous les piles à combustible à hydrogène comme pertinentes ? »²³



22-Source : Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

23-Ministère de la Transition Ecologique, 2019. Objectif zéro émission nette de CO₂ d'ici 2050 : François de Rugy a présenté le projet de loi relatif à l'énergie et au climat en Conseil des ministres.

Dans le même temps, plus de 45 % des transporteurs interrogés lors de cette même enquête déclarent utiliser leurs camions pour effectuer à la fois des missions de distribution urbaine, régionale et long-courrier. L'électrique à hydrogène présente la flexibilité opérationnelle nécessaire à ces commutations d'usages, le rendant adapté aux missions de tout type.

Cependant, pour les développements à court terme, le choix du segment d'usage du transport de marchandises sur lequel déployer de premiers poids lourds électriques à hydrogène est également influencé par le besoin de développer les infrastructures de recharge sur le territoire. Afin de maîtriser la recharge des camions, une vision des choses peut être de considérer que les missions de transport régional doivent être privilégiées pour les premiers déploiements. En effet, il est possible d'installer des points de distribution dans les pôles logistiques, à proximité des entrepôts. Ainsi, privilégier des missions de transport régional caractérisées par un retour au dépôt chaque jour permet d'assurer une recharge sur un site donné et maîtrisé, selon l'approche par flottes captives qui permet de déployer véhicules et infrastructures de recharge de manière simultanée.

Cela étant, on constate aujourd'hui que cette vision peut être dépassée par une planification de développement de l'infrastructure de façon à couvrir notamment les grands axes de transports, et l'on observe ainsi actuellement des projets de déploiements de stations sur les réseaux RTE-T par exemple, entre autres comme visé par le projet Corridor H₂ (voir l'étude de cas correspondante en section 2.4). De plus, les spécialistes du groupage, dénommés « messagers », représentent également une catégorie de transporteurs particulièrement adaptée aux premiers déploiements, qui pourrait favoriser la mise en place rapide d'un réseau de distribution d'hydrogène cohérent. En effet, le fonctionnement en réseau de la messagerie propose déjà un maillage d'agences sur l'ensemble du territoire français, dont la situation géographique répond déjà à un besoin fondamental de la profession : éviter les kilomètres superflus pour la recharge. Des implantations de stations hydrogène et plus généralement multi-énergies à proximité de ces agences permettraient donc de capter facilement une flotte de traction régulière. A titre d'exemple, Schenker France (dont la marque commerciale est DB Schenker), deuxième messenger français en termes de volume après Geodis, réalise plus de 1200 tractions régulières maillant le territoire national chaque nuit. De plus, les flottes concernées présentent des charges utiles généralement faibles (de 7 à 10 tonnes), la consommation en carburant des véhicules concernés est donc en-dessous de la moyenne, ce qui permettrait de réduire le TCO en phase de lancement. Le secteur du retail, aux besoins proches de celui de la messagerie, pourrait facilement se connecter à ce réseau de stations.

Ces développements de stations d'approvisionnement en hydrogène sont encouragés par des politiques environnementales nationales et européennes, comme la réglementation sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs (AFIR, anciennement directive DAFI), présentée dans le prochain chapitre.

1.3 Quels atouts au regard des orientations environnementales actuelles ?

Face à l'urgence climatique, des objectifs de réduction des émissions de CO₂ pour 2050 ont été fixés aux niveaux mondiaux, européens et nationaux, notamment dans le cadre de l'Accord de Paris, conduisant le Gouvernement français à réhausser son ambition, en fixant, au sein du Plan climat de juillet 2017, l'objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 à l'échelle du territoire national²³. Afin de respecter ces engagements, il est nécessaire d'atteindre une réduction de 95 % des émissions dans les transports d'ici 2050. Or, les cibles de cette filière ne pourront être atteintes pour le segment des poids lourds que si les nouvelles ventes de camions Diesel et autres technologies à forte intensité carbone sont entièrement remplacées à partir de 2035, en supposant des cycles de remplacement de 10 à 15 ans pour les camions. En d'autres termes, afin d'atteindre les objectifs de réductions d'émissions fixés par le gouvernement et l'Europe, les poids lourds zéro émission doivent représenter la quasi-totalité des ventes à partir de 2035.

Par conséquent, en France et en Europe, des mesures et politiques environnementales de plus en plus strictes voient le jour afin d'accélérer la transition du secteur de la mobilité. Les politiques les plus notables par leur impact sur la filière du transport de marchandises sont présentées dans ce chapitre, d'abord au niveau européen, puis aux niveaux nationaux et régionaux.

1.3.1 Les principales politiques européennes

L'Europe entend développer de nouvelles politiques environnementales, notamment dans le cadre du Green New Deal, ou pacte vert, dont les grandes lignes ont été présentées par la Commission européenne fin 2019. Il propose des solutions pour orienter les investissements de telle sorte qu'ils aient des retombées environnementales, mais également des impacts positifs sur les plans économiques et sociaux. Dans la filière du transport, le Green New Deal vise en particulier à accélérer le déploiement de véhicules au carburant alternatif et des infrastructures associées.

23-Ministère de la Transition Ecologique, 2019. Objectif zéro émission nette de CO₂ d'ici 2050 : François de Rugy a présenté le projet de loi relatif à l'énergie et au climat en Conseil des ministres.

Ainsi, la loi européenne sur le climat entrée en vigueur le 24 juin 2021, fixe un nouvel objectif de réduction de 55 % de ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport à 1990, objectif revu à la hausse par rapport à l'ancienne cible de 40 %²⁴. Dans ce contexte, Ursula Von der Leyen, présidente de la Commission européenne, a présenté le 14 juillet 2021 le paquet législatif « Fit for 55 »²⁵, englobant les projets de mesures visant à atteindre cette nouvelle ambition. L'interdiction de commercialisation des voitures à moteurs thermiques en 2035 pourrait ouvrir la voie à l'annonce d'une suppression prochaine des poids lourds essence et diesel. De plus, la réforme du marché européen du carbone (réduction drastique de l'allocation de quotas gratuits et extension du marché au bâtiment, au transport routier et au secteur maritime), et l'instauration progressive d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières à compter de 2023, devraient impacter la filière du transport de marchandises.

La législation CO₂ européenne sur les ventes de poids lourds neufs

L'Union Européenne s'est engagée à court et moyen terme sur une réglementation encadrant la réduction des émissions de CO₂ des poids lourds neufs. Elle fixe les objectifs de réduction pour ces véhicules à -15 % en 2025 et -30 % en 2030 par rapport à 2019²⁶. Une pénalisation importante démarrera dès 2025, et augmentera dans le temps : en cas de non-respect de la réglementation, les constructeurs s'exposent à une pénalité de 4 250 euros par gramme de CO₂/tkm en 2025 et à 6 800 euros par gramme de CO₂/tkm en 2030²⁷. Cette mesure vise directement les constructeurs, mais serait alors certainement répercutée sur les transporteurs en cas d'augmentation compensatrice du prix des véhicules.

De plus, le règlement prévoit un mécanisme d'incitation pour la production de véhicules zéro et faibles émissions (ZLEV)²⁸: la vente de ces véhicules permet aux constructeurs d'appliquer un facteur de réduction supplémentaire à leurs émissions, la réduction étant limitée à -3 %. Chaque véhicule zéro émission vendu permettra en outre de déduire du calcul les émissions de deux véhicules Diesel vendus, sur la base des émissions 2019. A partir de 2025, les constructeurs ne seront récompensés par la vente de véhicules ZLEV qu'à condition que le seuil de vente de 2 % de véhicules zéro émission ait été atteint.²⁹

24-Commission européenne, 2021. *Mettre en œuvre le pacte vert pour l'Europe*.

25-Ministère de la transition écologique, 2021. « Fit for 55 » : un nouveau cycle de politiques européennes pour le climat.

26-RÈGLEMENT (UE)2019/1242 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 20 juin 2019.

27-L'unité « tkm », ou tonnes-kilomètres, se calcule en effectuant le produit de la masse transportée exprimée en tonnes (t), par la distance parcourue exprimée en kilomètres (km).

28-Zéro émission désigne l'absence d'émissions à l'échappement, faibles émissions désigne les véhicules de plus de 16 tonnes dont les émissions de CO₂ sont inférieures à la moitié des émissions moyennes de CO₂ de tous les véhicules de son groupe immatriculés au cours de la période de référence 2019.

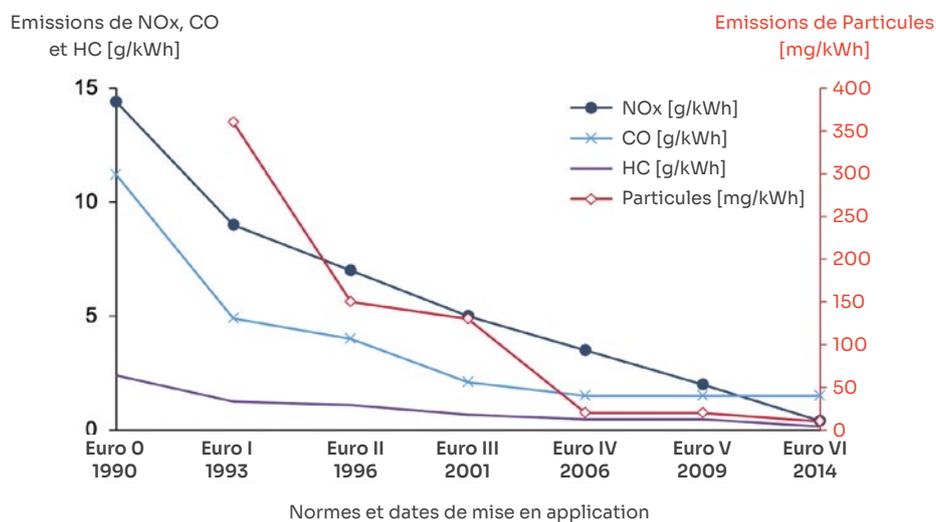
29-European Commission, 2019. *Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles*.

Les normes Euro

Ces politiques arrivent en complément et en soutien à des normes mises en place dès la fin du vingtième siècle, et limitant les émissions de polluants des véhicules : les normes Euro.

Le secteur des transports est réglementé depuis les années 1970 par les normes Euro, qui fixent des limites d'émissions des véhicules, et encadrent notamment les émissions polluantes des poids lourds de plus de 3,5 tonnes. Les normes Euro imposent des valeurs limites de plus en plus contraignantes pour les émissions d'oxydes d'azote (NOx), de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures (HC) et de particules, d'Euro 0 en 1990 à Euro VI depuis le 1er janvier 2014. La Figure 11 ci-dessous illustre l'évolution des restrictions d'émissions de polluants depuis 1990. Les niveaux maximums autorisés de NOx par exemple, ont diminué régulièrement à chaque nouvelle norme, et ont été divisés par 36 entre 1990 et 2014. On observe des tendances similaires sur le niveau de particules toléré, comme sur les niveaux de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures autorisés, respectivement divisés par 36, 7 et 18 depuis 1990.³⁰

Figure 11 – Evolution des normes Euros pour les poids lourds de PTAC > 3,5 t depuis 1990



³⁰ - Ministère de la Transition Ecologique et solidaire, 2017. Normes euros d'émissions de polluants pour les véhicules lourds - Véhicules propres.

Les délibérations autour de la future norme antipollution Euro 7 ont lieu en ce moment, et devraient aboutir courant 2022, pour une entrée en vigueur en 2025. Trois axes d'évolution ressortent des propositions issues des discussions européennes et nationales³¹:

- La mise en place systématique d'une procédure de contrôle des émissions polluantes en conditions réelles de conduite ;
- La mise en place d'un standard unique sur les émissions polluantes des voitures, des VUL et des poids lourds (bus et camions), neutre en matière de carburant et de technologie ;
- La mise en place de valeurs limites d'émissions plus ambitieuses sur les dimensions actuellement réglementées, doublée de l'introduction de limites pour des polluants encore non réglementés, dont les GES.

RED II

La directive RED II (Renewable Energy Directive – Recast to 2030) du 21 décembre 2018 impose des taux de consommation d'énergie d'origine renouvelable pour les transports : au moins 14 % de l'énergie consommée pour le transport routier et ferroviaire devra être renouvelable d'ici 2030. La directive RED II entend également étendre les garanties d'origine à d'autres gaz produits à partir de sources renouvelables, tels que l'hydrogène.

La directive AFIR (anciennement directive DAFI)

Afin de répondre au besoin croissant en infrastructures d'avitaillement en carburant alternatif, près d'un million de stations de recharge seront nécessaires le long des routes européennes d'ici 2030. Le Green New Deal prévoit ainsi la révision de la directive DAFI, devenant la réglementation AFIR (Alternative Fuel Infrastructure Regulation) et de la politique RTE-T (Réseau Trans-Européen de Transport), faisant du déploiement des infrastructures de recharge pour carburants alternatifs, dont l'hydrogène, une priorité. La réglementation AFIR (anciennement DAFI) se décline au niveau national par une demande aux États Membres développant un réseau d'infrastructures de recharge hydrogène de veiller à atteindre un nombre de stations suffisant d'ici le 31 décembre 2025. Le Fit for 55 renforce les objectifs relatifs aux stations hydrogène de cette directive, notamment sur le réseau central du RTE-T, ainsi que dans les centres logistiques, les dépôts et les nœuds urbains. À cette fin, les États membres doivent veiller à ce que, d'ici le 31 décembre 2030, des stations de ravitaillement en hydrogène d'une capacité minimale de 2 t/jour et équipées d'au moins un distributeur de 700 bar, soient déployées, avec une distance maximale de 150 km entre elles le long du réseau complet du RTE-T³².

31-Ministère de la Transition Ecologique et solidaire, 2021. Contrôle des émissions de polluants.

32-Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council, 2021.

Un enjeu pour les constructeurs est donc de proposer une offre – produite en série – de modèles électriques (à batterie ou à hydrogène) présentant des caractéristiques opérationnelles répondant aux besoins de la filière.

1.3.2 Les principales politiques nationales, locales et à l'échelle des entreprises

Au-delà des mesures mises en place au niveau de l'Union Européenne, les mesures prises au niveau national, transcription de mesures européennes ou mesures spécifiquement mises en place dans un pays, contribuent également à enclencher la transition vers des modes de transmission basses émissions pour le transport de marchandises. En France, la Loi Climat et Résilience fixe de nombreux objectifs pour la filière du transport routier de marchandises, notamment la fin des ventes de poids lourds utilisant majoritairement des énergies fossiles d'ici 2040, et la suppression progressive de l'avantage fiscal sur le gazole routier d'ici 2030. La loi impose par ailleurs des formations à l'éco-conduite pour les chauffeurs routiers³³. On notera les mesures particulièrement impactantes présentées ci-dessous.

La composante carbone de la TICPE, ou taxe carbone

La Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques (TICPE) est la principale taxe qui s'applique aux produits pétroliers (en dehors de la TVA). Depuis 2014, une composante carbone de la TICPE a été mise en place par la loi de finances, et vise à moduler la fiscalité des différents produits en fonction des émissions de CO₂ associées³⁴. Il s'agit donc d'une taxe s'appliquant aux carburants gazole et essence, proportionnelle aux émissions de CO₂ qu'ils génèrent.

Comme le montre la Figure 12 ci-dessous, la composante carbone de la TICPE a augmenté régulièrement entre 2014, date de sa première mise en place à hauteur de 7 €/tCO₂, à 2018, date à laquelle sa valeur de 44,6 €/tCO₂ a été gelée dans le projet de loi de finances 2019, par suite des mouvements de protestation sociale. Elle représente en 2021 près d'un quart de la TICPE appliquée au gazole³⁵. La trajectoire de cette taxe a donc été revue, mais son augmentation devrait reprendre dans les prochaines années, et la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) définit une cible de 100 €/tCO₂ pour 2030.

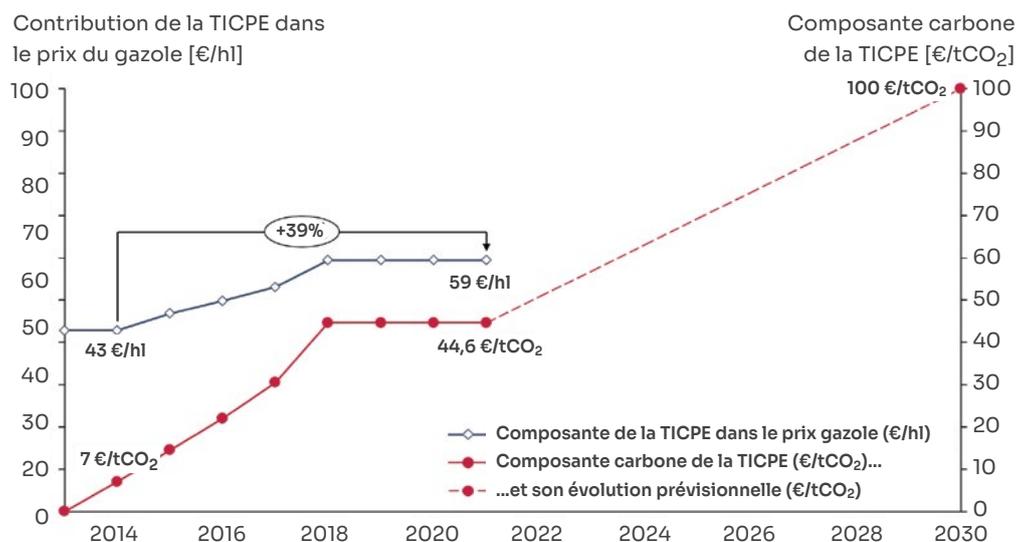
33-Actu Environnement, 2021. Loi climat : ce qui a été voté en matière de transport.

34-Ministère de la Transition Ecologique et solidaire, 2021. Fiscalité des Energies.

35-Sur la base d'un facteur d'émission du gazole de 3,1 kgCO₂e/l, d'après la base carbone ADEME, du prix 2021 de la tonne de carbone de 44,6 €/tCO₂e, et de la valeur 2021 de la TICPE appliquée au gazole de 0,59 €/l.

Cette taxe a ainsi augmenté de 39 % depuis 2014. Ainsi, la TICPE représente en septembre 2021 plus de 40 % du prix du litre du gazole, pour un prix moyen observé à la pompe de 1,47 €/l. L'augmentation du prix du gazole d'ici 2030 due à la TICPE (excluant l'inflation) est estimée 0,138 €/L

Figure 12 - Evolution de la composante carbone de la TICPE et impact sur la contribution TICPE dans le prix du gazole³⁵



A ce jour, plusieurs secteurs d'activité bénéficient de réductions ou d'exonérations de TICPE, dont les transporteurs routiers de marchandises disposant de camions de plus de 7,5 t. Ils peuvent obtenir sur demande de leur part le remboursement d'une fraction d'environ 25 % de la TICPE sur le gazole qu'ils utilisent, selon des modalités prévues par le code des douanes³⁶. Cependant, s'agissant des transporteurs routiers de marchandises, ces exonérations sont régulièrement revues à la baisse. La loi n° 2019-1479 du 28 décembre 2019 de finances pour 2020 a réduit ce remboursement de 2 c€/l³⁵.

Cette mesure devrait donc s'avérer de plus en plus contraignante pour les transporteurs, notamment lorsque les flottes sont importantes et que les véhicules présentent d'importants kilométrages.

Les Zones à Faibles Emissions mobilité ou ZFE-m

Les ZFE font partie d'un des cinq chantiers de la Loi d'Orientation des Mobilités (LOM), publiée en décembre 2019³⁷. Les ZFE dont l'objet de restrictions de la circulation des véhicules routiers (deux roues, voitures, VUL, bus et poids lourds).

35-Sur la base d'un facteur d'émission du gazole de 3,1 kgCO₂e/l, d'après la base carbone ADEME, du prix 2021 de la tonne de carbone de 44,6 €/tCO₂e, et de la valeur 2021 de la TICPE appliquée au gazole de 0,59 €/l.

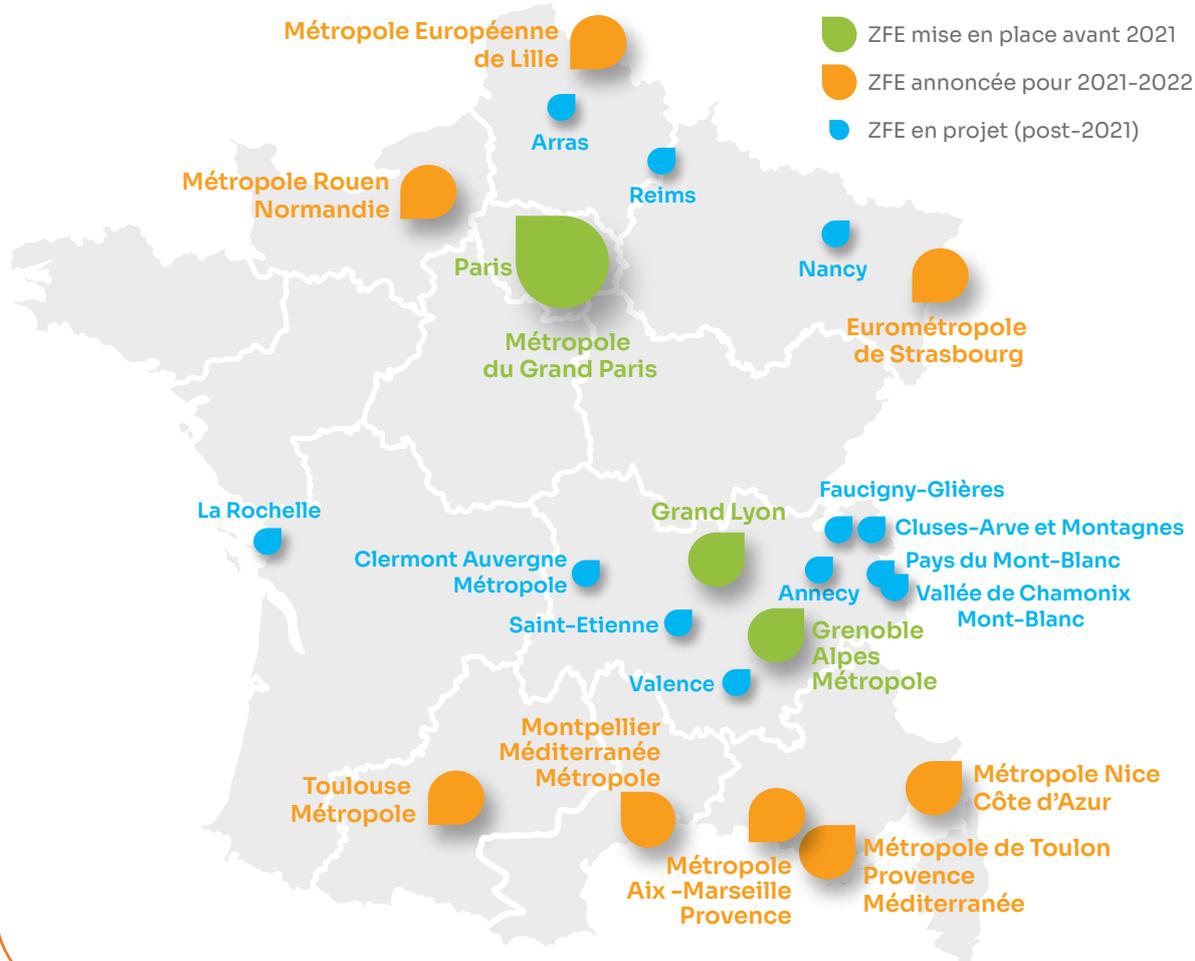
36-Service Public de l'Administration Française, 2021. Remboursement de la taxe de carburant aux transports routiers (TICPE).

37-Ministère de la Transition Ecologique et solidaire, 2019. Les mesures clés de la Loi Mobilité.

Les contraintes sont spécifiées sur une zone et une période donnée (ou de façon permanente), et se basent sur les vignettes Crit'Air, définissant le niveau d'émissions des véhicules. L'ensemble des véhicules les plus polluants identifiés par les vignettes Crit'Air 5, 4 et 3 sont soumis à des restrictions de circulation, mais les collectivités territoriales sont libres de fixer des règles plus strictes.

Les ZFE mises en place au 1er janvier 2021 étaient au nombre de 4, comprenant le Grand Lyon, la métropole de Grenoble, Paris intra-muros et le Grand Paris. De nombreux projets de ZFE devraient également aboutir d'ici 2022, notamment à Nice, Toulon, Marseille, Montpellier, Toulouse, Rouen, Strasbourg et Lille. La Figure 13 ci-dessous présente la carte des ZFE qui devraient être mises en place d'ici 2022. Elles sont réparties sur de nombreuses régions françaises, notamment sur l'axe nord-sud reliant le Benelux à l'Espagne, elles devraient donc couvrir une grande partie des axes autoroutiers empruntés pour le transport de marchandises.

Figure 13 - Carte des ZFE mises en place et en projet en France en 2021³⁸



38-L'Internaute, 2021. Zones à faibles émissions (ZFE) : quelles nouvelles villes et zones concernées ? Les dates.

Le 20 juillet 2021, l'article 27 du projet de loi Climat & Résilience, portant sur la lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, a été adopté, et prévoit de rendre obligatoires les ZFE dans les agglomérations de plus de 150 000 habitants (à l'exclusion des DOM)³⁹ d'ici le 31 décembre 2024, soit 33 nouveaux territoires visés⁴⁰.

Ce maillage en expansion de zones à circulation restreinte pourrait perturber l'activité du transport de marchandises, en particulier dans le cas du fret interurbain. Les zones à faibles émissions touchent à la fois les transporteurs, qui doivent effectuer des livraisons en ville, et les chargeurs situés en zone urbaine, dont l'activité dépend d'un approvisionnement par camion régulier.

Enfin, en anticipation à ces restrictions fermes, la France s'est dotée d'un cadre législatif et réglementaire prenant en compte le pilier environnemental de la responsabilité sociétale des entreprises (RSE), qui concerne l'ensemble de la chaîne de valeur du transport de marchandises.

Les mesures de Responsabilité Sociétale ou Sociale des Entreprises (RSE)

Enfin, on notera le poids dans la transition vers une mobilité faible émission de l'image des sociétés qui dépendent de services de transport de marchandises. Certains chargeurs par exemple, choisissent d'imposer des calendriers de déploiements de véhicules bas carbone à leurs transporteurs. Ces considérations sont reflétées dans les mesures de RSE.

Les politiques de RSE mises en place par les entreprises peuvent prendre des formes très variées. Certains transporteurs proposent par exemple des formations de conduite économique et rationnelle, l'écoconduite permettant de réduire jusqu'à 25 % la consommation de carburant⁴¹. D'autres mettent en place des systèmes de boîtiers télématiques embarqués, permettant de suivre les flottes, communiquer avec les conducteurs, et remonter les données opérationnelles des tournées, afin d'optimiser la conduite et donc la consommation. Certaines entreprises font aussi le choix de la réduction de leur empreinte carbone en participant à des programmes de reforestation, là où d'autres démarrent la transition de leurs flottes aux carburants alternatifs.

De plus, depuis 2008, de nombreux professionnels du transport routier de marchandises s'engagent volontairement via le dispositif « Objectif CO₂ », qui permet d'accompagner les entreprises pour agir durablement sur leur impact environnemental et valoriser leur performance énergétique. Ce dispositif est intégré depuis septembre 2018 dans le programme d'engagements volontaires pour l'environnement (EVE), qui étend la logique d'engagement volontaire à l'ensemble de la chaîne logistique. Ce programme regroupe aujourd'hui plus de 1 500 entreprises, pour 30 % de la flotte française, et permet d'économiser chaque année 1,3 million de tonnes de CO₂⁴².

39-Assemblée Nationale, février 2021.

40-Ministère de la Transition Ecologique et solidaire, 2021. Loi Climat & Résilience

41-Eurotyre, 2020.

42-Données partagées par la FNTR.

En conclusion de la partie 1 : Pourquoi la solution électrique à hydrogène pour ma flotte de véhicules de transport de marchandises ?

- *Les véhicules électriques à hydrogène sont des véhicules zéro émission, c'est-à-dire n'émettant ni dioxyde de carbone ni pollution atmosphérique, et s'inscrivent donc parfaitement comme une solution permettant la décarbonation des transports et l'amélioration de la qualité de l'air. En outre, leur bilan carbone est d'autant plus favorable lorsque l'hydrogène est produit de façon renouvelable ou bas-carbone.*
- *Le développement du poids lourd électrique à hydrogène permettra l'entrée sur le marché d'une solution zéro émission aux caractéristiques opérationnelles évitant les compromis par rapport au diesel. Elle permettra en effet des autonomies aussi importantes que celles des solutions thermiques, et des temps de recharge courts, garantissant une conservation des habitudes organisationnelles actuelles.*
- *Le poids lourd électrique à hydrogène est par conséquent une solution zéro émission particulièrement adaptée pour des utilisations impliquant des kilométrages journaliers de plusieurs centaines de kilomètres, un temps limité pour la recharge, et/ ou une forte consommation énergétique associée à un volume disponible sur le véhicule limité pour les composants nécessaires à la propulsion et au stockage du carburant.*
- *Les poids lourds électriques à hydrogène sont directement en ligne avec les orientations environnementales européennes, nationales, locales et privées : ils permettent aux constructeurs d'atteindre les objectifs de réductions d'émissions CO₂ de leurs véhicules, ils ne sont pas sujets à la taxe carbone, ils peuvent circuler en ZFE et contribuer aux politiques de RSE des entreprises.*

Figure 14 - Principales caractéristiques opérationnelles et environnementales du poids lourd électrique à hydrogène



Emissions de GES :

- Nulles à l'échappement
- De -78 % du puits à la roue si l'hydrogène est produit par électrolyse à partir du mix électrique français



Emissions de polluants atmosphériques :

- Nulles (hors phénomènes d'abrasion des pneumatiques)



Autonomie :

- Jusqu'à 500 km dès les premiers modèles
- Jusqu'à 1000 km sur les modèles annoncés pour la deuxième moitié de la décennie



Durée d'un plein d'hydrogène :

- Comparable aux motorisations thermiques
- Typiquement de 10 à 20 minutes



Nuisances sonores du véhicule :

- Fortement réduites, jusqu'à -10 dB

2 Quelle dynamique actuelle et en construction pour ce secteur en France et en Europe ?

2.1 Quels acteurs impliqués dans le développement du marché ?

Le secteur du poids lourd électrique à hydrogène est en phase d'émergence, et les acteurs de la filière portent l'ambition de développer rapidement une alternative crédible aux énergies fossiles pour les différents segments du poids lourd. Les acteurs de l'ensemble de la chaîne de valeur, notamment les transporteurs et chargeurs, mais aussi les constructeurs et équipementiers (PAC, réservoirs...), ainsi que les fabricants et exploitants d'infrastructures de production et distribution de l'hydrogène, se mobilisent pour l'essor de la filière.

Afin de développer durablement la filière hydrogène en France et en Europe, une synergie entre tous les acteurs de la chaîne de valeur est indispensable. Aujourd'hui, on observe une mobilisation de ces acteurs sous forme de consortiums, de sociétés de projets et d'alliances stratégiques, impliquant énergéticiens, transporteurs et chargeurs, mais aussi constructeurs de véhicules et de piles à combustible.

Parmi les partenariats annoncés, et pour ne citer que quelques exemples :

- Des partenariats entre constructeurs de stations et de réservoirs d'hydrogène, dont l'objectif est d'optimiser le temps de recharge des véhicules, en assurant une bonne compatibilité entre les équipements. Ainsi, Plastic Omnium et McPhy se sont associés en 2021 afin de collaborer sur les protocoles et les interfaces de remplissage entre stations hydrogène et réservoirs haute pression⁴³. En octobre 2021, Air Liquide et Faurecia ont annoncé un accord de développement pour produire des systèmes de réservoirs embarqués d'hydrogène liquide destinés aux poids lourds ;
- H2Accelerate, une collaboration entre les producteurs d'hydrogène, les exploitants d'infrastructures et les constructeurs de véhicules, à savoir Shell, Linde, TotalEnergies, Iveco, Daimler Truck, OMV et Volvo Group, qui travaillent ensemble pour activer le marché sur la voie d'un déploiement de masse ;
- Le constructeur Daimler Truck a conclu plusieurs accords ces dernières années. Depuis 2020, Daimler s'est associé avec Linde pour développer conjointement une solution d'avitaillement en hydrogène liquide pour les camions à pile à combustible⁴⁴. Daimler a également fait appel à Air Liquide en 2021 pour fournir de l'hydrogène liquide et un système de ravitaillement mobile destinés à expérimenter les premiers prototypes du constructeur⁴⁵.

43- H2 Mobile, 2021. Hydrogène : Plastic Omnium et McPhy signent un accord stratégique.

44- H2 Mobile, 2020. Daimler et Linde s'associent pour l'avitaillement en hydrogène liquide.

45- H2 Mobile, 2021. Hydrogène liquide : Daimler s'associe à Air Liquide.

En parallèle, Daimler travaille avec Shell sur le déploiement des stations, avec comme objectif “150 stations d’avitaillement en hydrogène pour 2030, afin d’accueillir les 5 000 poids lourds à PAC H2 siglés Mercedes-Benz en circulation à cette échéance⁴⁶”. Par ailleurs, Daimler Truck et le groupe Volvo se sont associés dans la joint-venture Cellcentric, “dont la finalité est de construire, d’ici 2025, l’une des plus grandes usines européennes de fabrication de piles à combustible⁴⁷”.

Cette alliance vise la fabrication des piles à combustible de manière spécifique, mais ne concerne pas les gammes de véhicules et groupes motopropulseurs. Un accord a également été conclu avec Bosch pour la fourniture d’équipements spécifiques aux piles à combustible⁴⁸;

- En 2019, le constructeur de poids lourds Iveco et le concepteur de véhicules à propulsion alternative Nikola Motor ont créé une coentreprise pour la production de poids lourds zéro émission (électriques à batterie et à hydrogène). Ils fabriquent leurs camions à hydrogène en Allemagne, à Ulm, dans la région du Bade-Wurtemberg⁴⁹;
- Les constructeurs japonais collaborent également : Toyota, Hino et Isuzu, représentant à eux trois 80 % du marché japonais des poids lourds, ont créé la société commune Commercial Japan Partnership Technologies début 2021, afin de mutualiser leurs efforts de R&D et de faire diminuer le prix des véhicules, notamment dans le secteur de l’hydrogène⁵⁰.
- Le constructeur Hyzon Motors, dans lequel TotalEnergies a investi, collabore avec le constructeur Néerlandais DAF, en électrifiant et équipant de piles à combustible toute sa gamme de châssis. Hyzon Motors assemble ses camions dans son usine de Groningen aux Pays-Bas et livrera ses premiers clients de camions porteurs début 2022, mais aussi les premiers camions tracteurs électriques à hydrogène homologués en Europe⁵¹.

D’une manière générale, un processus de consolidation et d’accélération du marché du poids lourd hydrogène est en cours, sur l’ensemble de la chaîne de valeur. Ce chapitre vise à présenter la contribution de certains acteurs phares de chacun de ces groupes, et les actions qu’ils mènent ensemble pour la transition vers l’hydrogène.

2.1.1 Les transporteurs-logisticiens et les chargeurs

En tant qu’utilisateurs des véhicules, les transporteurs-logisticiens et chargeurs ont un rôle clé à jouer dans le développement et la mise en place de la technologie hydrogène pour les poids lourds. En effet, les spécificités de leurs activités doivent être considérées non seulement pour développer une offre de véhicules adaptée, mais aussi un écosystème de stations d’avitaillement et d’ateliers de maintenance aligné avec leurs besoins opérationnels.

46- H2 Mobile, 2021. Daimler et Shell partenaires sur l’hydrogène.

47- H2 Mobile, 2021. Daimler et Volvo vont lancer une Gigafactory de piles à hydrogène pour poids lourds.

48- H2 Mobile 2021. Pile à combustible : Cellcentric signe un accord avec Bosch.

49- H2 Mobile, 2020. Iveco et Nikola Motor fabriqueront leur camion à hydrogène en Allemagne.

50- H2 Mobile, 2021. Camions à hydrogène : Toyota, Hino et Isuzu forment une nouvelle alliance.

51- H2 Mobile, 2021. Pays-Bas : Hyzon Motors débute la construction de 15 véhicules à hydrogène pour Groningen.

Ils ont l'expérience en matière de service après-vente, maîtrise du gaz (notamment dans le cas d'expériences antérieures avec les GNV / livraison de gaz), formation des équipes ou encore constitution et montage de chaînes logistiques. Certains transporteurs pourraient également s'impliquer directement dans la maintenance des véhicules en adaptant leurs ateliers et formant leurs techniciens.

En outre, les chargeurs, par la mise en place de politiques RSE parfois très ambitieuses, peuvent imposer des calendriers de déploiements de véhicules bas carbone à leurs transporteurs et s'impliquer dans des projets expérimentaux de déploiements de véhicules électriques à hydrogène. Les chargeurs actionnent les commandes logistiques, déterminant ainsi le prix du transport qu'ils sont prêts à payer pour le zéro émission. Ils ont de ce fait un rôle fondamental à jouer dans le développement initial et futur de la filière. Ils peuvent donc jouer le rôle de moteurs dans le développement d'écosystèmes et faire baisser le poids de l'investissement pour leurs transporteurs partenaires (en acceptant par exemple de supporter une partie du surcoût lié à l'exploitation de véhicules hydrogène).

Cependant, si les transporteurs-logisticiens et chargeurs peuvent participer au développement de la filière en testant les premiers prototypes de camions électriques à hydrogène et en fournissant des retours d'expérience indispensables au développement de la technologie, il leur sera indispensable à moyen terme de se voir proposer une offre complète de véhicules fiables, disponibles et compétitifs par les constructeurs.

2.1.2 Les acteurs de l'offre de véhicules : constructeurs, acteurs du retrofit, équipementiers, ...

L'électrique à hydrogène représente une opportunité majeure pour décarboner la filière des poids lourds. Les grands constructeurs historiques européens sont déjà largement impliqués dans le développement de la filière, et devraient proposer leurs premières pré-séries à partir de 2023. Particulièrement innovante, la technologie électrique à hydrogène favorise également l'apparition de nouveaux entrants sur le marché européen des constructeurs de poids lourds. Ainsi, dans cette phase d'amorçage de marché, les concepteurs de prototypes et acteurs du retrofit joueront un rôle clé pour proposer sur le court terme des premiers modèles de camions électriques à hydrogène. Les nouveaux entrants sont aussi les constructeurs émergents à l'image de Nikola Motor et Hyzon Motors, et certains géants internationaux se repositionnant sur le segment du poids lourd alors même qu'ils ne présentent pas une expertise dans ce secteur. Enfin, des acteurs innovants, tel Gaussin, se positionnent sur le marché pour proposer aux constructeurs historiques des châssis développés et équipés pour la propulsion électrique hydrogène,

et notamment destinés à des usages de niches dans lesquels l'hydrogène est une solution particulièrement pertinente (logistique portuaire, véhicules de BTP etc).

Les concepteurs de prototypes et acteurs du rétrofit

Plusieurs acteurs, par exemple issus du sport automobile, travaillent sur des prototypes de poids lourds électriques à hydrogène. Ils participent au développement de la filière par leurs innovations et expertises spécifiques, mais n'envisagent pas nécessairement des productions grande série.

On citera ici l'exemple de GreenGT, groupe de haute technologie basé en France et en Suisse, dédié à la recherche, au développement et à l'implémentation dans l'univers de la mobilité de systèmes de propulsion électrique à hydrogène de forte puissance (pile à combustible). D'abord concentrée sur le sport automobile, GreenGT s'est lancée dans le domaine du poids lourd et a participé en 2015 à la conception d'un véhicule prototype, le Maxity, livré à la Poste et né d'une collaboration entre Symbio et Renault Trucks. Il y a trois ans, des contrats de développement de véhicules lourds ont été signés avec 2 entités de la grande distribution : Carrefour, en France (pour un 44 t) et Migros, en Suisse (pour un 40 t), ce qui démontre le rôle clé des chargeurs dans le démarrage de la filière. L'entreprise s'est associée avec le constructeur russe KAMAZ (troisième constructeur de camions à l'échelle mondiale), qui présente l'intérêt d'utiliser une cabine Mercedes, très appréciée des transporteurs. Un travail de pré-industrialisation est en cours sur l'ensemble du sujet (traitement des processus, des gammes...).

De plus, le rétrofit, consistant à convertir un véhicule thermique en véhicule électrique à batterie ou à pile à combustible (hydrogène), permet de bénéficier d'un véhicule zéro émission, mais aussi de prolonger le cycle de vie d'un véhicule pour un bénéfice environnemental renforcé. Cette solution présente l'avantage d'être applicable sur le court terme, et est donc susceptible de favoriser une décarbonation rapide du parc. Tout comme les concepteurs de prototypes, les acteurs du rétrofit ont à ce jour des capacités de production de véhicules limitées, mais contribuent à accélérer le développement de la filière. Certains devraient pouvoir fournir une centaine d'unités par an dans les prochaines années.

L'entreprise **e-Néo** par exemple, créée en 2019, travaille à l'électrification des véhicules thermiques, et appuie en parallèle l'évolution de la réglementation française sur la conversion de véhicules thermiques en véhicules électriques. Le système E-Néo contribue au développement d'une économie circulaire poussée. En effet, l'équipement hydrogène proposé peut être installé sur plusieurs types de châssis de poids lourds, permettant ainsi

de prolonger la durée de vie d'une partie de la structure de ces véhicules thermiques, qui sont plus de 500 000 sur les routes françaises. Par ailleurs, les équipements d'électrification ajoutés lors d'un premier retrofit peuvent être transférés par la suite sur un nouveau châssis (de même type). Ainsi, l'amortissement peut être lissé sur plusieurs véhicules, diminuant de cette façon le coût de détention kilométrique. Ces travaux de transformation peuvent être réalisés à l'échelle des territoires, et ainsi soutenir l'activité économique locale et la création d'une filière industrielle française. E-Néo participe notamment à un projet d'écosystème hydrogène en Vendée, VHyGO, et aura la charge du retrofit d'un camion 19 tonnes utilisé par le Syndicat Départemental d'Énergie et d'Équipement de la Vendée (SyDEV) et de 2 tracteurs routiers confiés par des sociétés vendéennes⁵². Les premiers 44 tonnes sont en cours d'homologation, et devraient entrer en opérations au premier semestre 2022.

Le marché du retrofit est actuellement en pleine expansion avec plusieurs acteurs qui se positionnent sur le segment des poids lourds : Ulemco, GCK, Clean Logistics, etc.

Ces acteurs sont très pertinents et intéressants dans une phase de démarrage du marché, mais ils devront trouver des niches applicatives lorsque les constructeurs historiques seront en capacité de délivrer des camions traditionnels avec des effets d'échelle qui les rendront beaucoup plus compétitifs. Par ailleurs, les transporteurs choisissent souvent une marque de camions en fonction de leur proximité immédiate avec des centres de support et maintenance dans lesquels ils ont confiance, dans une relation souvent historiquement ancrée : ce pourrait être un frein majeur au développement de ces offres alternatives basées sur le retrofit si elles ne s'appuient pas sur un réseau de support et maintenance local.

Un autre scénario possible, que l'on peut déduire de l'accord Hyzon Motors et DAF en Europe, serait de voir certains constructeurs de camions choisir de se concentrer sur le développement de leurs châssis en confiant à des retrofitteurs de taille industrielle le soin de développer sur le marché les offres à base de traction hydrogène, tout en leur apportant le support de leurs réseaux de distribution et de maintenance en Europe. Tout particulièrement, les « pure players » tels Nikola Motors et Hyzon Motors ont l'avantage de bénéficier de forts leviers financiers sur la bourse, ce qui leur donne des capacités d'investissement et d'actions que ne possèdent plus certains constructeurs historiques de taille moyenne.

52- Avem, 2020. De l'hydrogène vert pour la mobilité en Vendée dès 2021 avec Lhyfe.

Les grands constructeurs européens

En Europe, 99 % du marché du poids lourd de plus de 16 t est réparti entre 7 constructeurs : Mercedes (Daimler), Scania (Volkswagen), MAN, DAF, Volvo Trucks, Renault et Iveco. Ceux-ci disposent également des réseaux de service et de maintenance sur le territoire péen. Leur positionnement sur la technologie électrique à hydrogène est donc clé pour envisager une transition de la filière à l'échelle.

Iveco et Daimler notamment, testent actuellement des prototypes de véhicules aux autonomies de 800 à 1000 kilomètres, qui devraient être proposés en petites séries dès 2023-2024, pour une production grande série à horizon 2027. Parmi les constructeurs européens qui communiquent d'ores et déjà sur l'hydrogène, on citera donc notamment :

IVECO développe actuellement des camions à hydrogène, en coopération avec Nikola Motors, notamment le Nikola Tre H2. La phase de R&D est en cours⁵³, et le modèle final est en développement. Les premières opérations sur le terrain commenceront en 2022 dans le cadre du projet H2Haul, avec le déploiement de 12 véhicules. Le projet H2Haul permettra à IVECO de définir en détail les normes et caractéristiques techniques avant le déploiement de masse. La première série industrielle est prévue pour 2024. L'usine de fabrication est située à Ulm, en Allemagne.

Figure 15 - Nikola Tre H2, © Iveco



53-INSIDEEVs, 2021. Nikola Teases Tre's Acceleration Testing.

DAIMLER a annoncé un plan ambitieux visant à produire des camions à pile à combustible en grande série, et travaille en partenariat avec des producteurs d'hydrogène sur des solutions d'H₂ liquide, permettant des autonomies importantes. Le prototype du camion Mercedes-Benz GenH2 est testé depuis avril 2021 avec de l'hydrogène gazeux, dans l'attente de l'arrivée à maturité des technologies de compression et de stockage de l'H₂ liquide. C'est une étape importante en vue de la mise en production du véhicule. Les développeurs soumettent les composants à rude épreuve, se concentrant notamment sur le fonctionnement continu, les différentes conditions météorologiques et routières et diverses manœuvres de conduite, dans des conditions de chargement de 25 tonnes. Selon le plan de développement annoncé, les essais sur voie publique débuteront avant la fin de l'année, et les essais clients devraient commencer en 2023, avant la production en série des premiers camions GenH2 prévue à partir de 2027⁵⁴.

Les nouveaux entrants internationaux

Une dynamique importante se développe actuellement en Europe autour du Coréen Hyundai et de l'américain Hyzon Motors, qui proposent les premières offres de déploiements significatifs en termes de nombre d'unités. Ils jouent également un rôle d'accélérateur de la filière, d'autant plus qu'ils sont impliqués dans les projets de déploiements de stations associés. C'est notamment le cas pour Hyundai en Suisse, qui s'est associé avec H2Energy afin de bénéficier d'un regard sur le développement des infrastructures d'approvisionnement en hydrogène. Les premiers déploiements de poids lourds permettront d'avoir un retour sur les caractéristiques opérationnelles des véhicules en conditions réelles d'exploitation (consommation d'hydrogène, coûts de maintenance, etc.).

En Europe, **HYUNDAI** est un des constructeurs les plus avancés en termes de nombre de véhicules électriques à hydrogène déployés (véhicules légers comme la Hyundai Nexo, mais également véhicules lourds avec les camions d'ores et déjà opérationnels en Suisse). L'hydrogène est au cœur de la stratégie de Hyundai, qui a produit plus de 10 000 véhicules à pile à combustible en 2020 et vise les 500 000 véhicules électriques à hydrogène produits par an (tous modèles et tous pays confondus) à horizon 2030. En Suisse, 45 poids lourds électriques à hydrogène (Hyundai XCIENT Fuel Cell) circulent en conditions normales d'exploitation, 140 supplémentaires sont en cours de livraison de fin 2021 à début 2022, 1 000 unités supplémentaires sont annoncées pour 2023 et 1 600 camions Hyundai devraient être en opérations en Suisse en 2025. Les capacités actuelles de production de Hyundai sont de 2000

⁵⁴ Hydrogen Today

camions électriques à hydrogène par an, supérieures aux déploiements annoncés pour la Suisse, et le groupe ambitionne des déploiements dans d'autres régions européennes sur le très court terme, principalement en Allemagne et Europe du nord, mais aussi en France, Italie et Espagne. Ne disposant pas de réseau de support et maintenance, Hyundai cherche à concentrer des commandes d'au moins une vingtaine de véhicules sur un territoire donné pour venir y apporter des ressources spécifiques de support.



Figure 16 - Livraison des premiers camions Hyundai en Suisse, ©HYUNDAI

HYZON MOTORS, bénéficiant d'une capacité d'industrialisation et de la spécificité de la motorisation « Holthausen Clean Technology », multiplie les annonces ambitieuses de déploiements et des commandes de plusieurs centaines de véhicules ont déjà été passées, en Nouvelle-Zélande notamment. Le groupe développe des poids lourds sur l'ensemble des segments du transport de marchandises, porteurs ou tracteurs, et ambitionne de proposer ses véhicules électriques à hydrogène à des TCO comparables à ceux du diesel d'ici 2023. Le prototype HyMax-250 a été testé à l'automne 2021 et le groupe développe en parallèle une usine de production grande capacité à Winschoten aux Pays-Bas (de 700 véhicules en 2022, à 2000 véhicules par an à partir de 2023). A horizon 2023, Hyzon devrait également fournir 80 camions électriques à hydrogène à des clients français de TotalEnergies, avec qui de multiples accords ont été conclus⁵⁵. Le groupe développe par ailleurs un tracteur long-courrier à haute autonomie, et s'est à cette fin associé avec Chart, fabricant mondial d'équipements techniques destinés aux marchés de l'énergie et des gaz industriels⁵⁶.

55- H2 Mobile, 2021. Hydrogène : TotalEnergies accélère avec Hyzon.

56- H2 Mobile, 2021. Hyzon et Chart vont lancer un camion à hydrogène à l'autonomie record.

Les équipementiers et autres acteurs de la chaîne de valeur

Les poids lourds électriques à hydrogène nécessitent le développement et la production à l'échelle d'équipements spécifiques de piles à combustible, de systèmes de stockage et de refroidissement notamment. En France, des acteurs se positionnent et ambitionnent de compter parmi les leaders mondiaux de la mobilité hydrogène. Parmi ceux-ci, on citera notamment :

FAURECIA, l'un des dix premiers équipementiers automobiles mondiaux, s'est engagé dans la technologie hydrogène dans lequel il a investi plus de 240 millions d'euros, à travers la R&D, la production, les partenariats stratégiques et les acquisitions. À ce titre, le groupe se positionne sur deux éléments clés des systèmes de piles à combustible, qui représentent environ 70 % de la chaîne de valeur. Il s'agit des systèmes de stockage de l'hydrogène, développés directement par Faurecia, et des piles à combustible, produites par Symbio, entreprise commune créée avec Michelin. La capacité de production de réservoirs de Faurecia s'élève aujourd'hui à 5 000 réservoirs par an, avec pour objectif l'industrialisation à horizon 2025, pour atteindre plus de 100 000 réservoirs par an (avec des sites de production en France et en Asie).

SYMBIO, coentreprise entre Faurecia et Michelin, conçoit, produit et commercialise des systèmes de piles à combustible pour véhicules légers et commerciaux, bus et camions, ainsi que pour divers autres formats de véhicules électriques. L'entreprise, dont les véhicules qu'elle a équipés ont déjà parcouru plus de trois millions de kilomètres, s'engage à maîtriser la courbe des coûts et à mettre en place les standards automobiles de production d'ici à 2025, ainsi qu'à produire 200 000 StackPack par an en 2030. En ce qui concerne spécifiquement le segment des poids lourds, Symbio propose dans sa gamme H2MOTIVE deux types de StackPack dédiés :

- Le StackPack 150, qui couvre notamment les applications camions de 16 à 32 tonnes, mais également les bus articulés à usage intensif ou encore les cars interurbains ;
- Le StackPack 300, qui cible particulièrement le camion grand routier, notamment la configuration tracteur/semi-remorque 40/44 tonnes.

Figure 17 - Illustration présentant l'intégration du H2MOTIVE StackPack 300 installé dans un tracteur semi-remorque européen - ©Symbio



Comme présenté sur la Figure 17 ci-dessus, le StackPack s'intègre directement sous la cabine avec des réservoirs de stockage d'hydrogène stockés à l'arrière et dans l'empattement du châssis. Les réservoirs sont alimentés en hydrogène via une trappe de remplissage, assurant l'étanchéité à la jonction avec le pistolet durant la recharge. L'hydrogène est ensuite transformé en électricité (et en eau) dans la pile à combustible, qui est refroidie grâce à un échangeur spécifique permettant de maintenir la pile à combustible à une température de fonctionnement optimale.

D'autres équipementiers s'investissent activement dans le développement du poids lourd électrique à hydrogène. C'est le cas du français Gaussin, spécialisé dans l'ingénierie de systèmes de transports et de logistique, qui a mis au point une plateforme modulaire zéro-émission à destination des camions routiers. Le « skateboard » de Gaussin, particulièrement adaptable, est aussi remarqué pour la légèreté de son châssis : 400 kilogrammes en moins par rapport à un châssis standard⁵⁷, même en prenant en compte le poids des équipements spécifiques à la technologie hydrogène. Un premier camion Gaussin à hydrogène s'est engagé au rallye Paris-Dakar en Arabie Saoudite.

Les équipementiers définissent les standards des nouveaux systèmes complexes qui viennent équiper les poids lourds électriques à hydrogène, et jouent donc un rôle absolument clé dans le développement de la filière et l'uniformisation des standards.

57-Gaussin invente le « skateboard » pour poids lourds zéro-émission, Les Echos

Ainsi, start-ups innovantes, concepteurs de systèmes, fabricants et intégrateurs d'équipements de production et distribution d'hydrogène, leaders de la technologie de l'électrolyse, industriels aux grandes capacités de production et distribution, énergéticiens, producteurs d'électricité et porteurs de projets se structurent et favorisent le développement de l'écosystème hydrogène français. Il est important de souligner le caractère multipartenaires (fabricants d'équipements, exploitants, développeurs, etc.) observé dans le cadre de nombreux projets en développement.

2. 2 Quelle offre en construction en termes de véhicules ?

Aujourd'hui, le marché du poids lourd zéro émission est dans une phase d'amorçage, associée à une multiplication des annonces des constructeurs, une accélération de la R&D, et le déploiement des premières unités.

Depuis 2017, plusieurs projets expérimentaux ont été développés, souvent portés par des intégrateurs, fabricants de prototypes ou acteurs du retrofit ayant à ce jour des capacités de productions assez limitées, comme ESORO⁵⁸, PVI⁵⁹, VDL⁶⁰, E-Trucks⁶¹, Gaussin⁶² ou GreenGT⁶² par exemple. Ils fournissent un effort de R&D conséquent permettant d'ouvrir la voie à cette nouvelle technologie. On notera la particularité de l'acteur français Chéreau⁶³, spécialisé dans la fabrication de châssis dédiés aux remorques frigorifiques, et dans le développement complet de ces remorques (50 % du marché français, 23 % du marché européen), et qui a développé une solution complète d'alimentation des semi-remorques frigorifiques en H₂, pour la partie réfrigération uniquement (et non pour la propulsion du tracteur). C'est aussi un marché que vise Bosch, dont le système pile à combustible dédié aux groupes froids en collaboration avec Carrier Transicold Europe et le carrossier Lamberet (25 % du marché français des remorques frigorifiques) est actuellement en phase de test sur une remorque du transporteur STEF dans le cadre du projet Fresh2. Des acteurs du retrofit se positionnent également sur la conversion de véhicules Diesel à une propulsion électrique à hydrogène, comme e-Néo⁶⁴ et Clean Logistics⁶⁵. De plus, le constructeur européen historique Scania⁶⁶ avait déployé un démonstrateur en Norvège dès 2019. Les caractéristiques techniques de ces véhicules sont décrites sur la Figure 18 et la Figure 19 ci-dessous. Malgré leur grande variabilité, des tendances se dégagent au niveau des autonomies de ces premiers véhicules, fluctuant autour de 400 à 800 km, sur des modèles 350 bar.

58-ESORO, *coop.ch*, 2016.

59-PVI, *adi-na.fr*, 2019.

60-E-Trucks, *Fuelcelltrucks.eu*, 2021.

– *e-truckseurope.com*

61-Gaussin, *H2Mobile*, 2021.

62-Entretien GreenGT

63-Chéreau, *France Routes*, 2019.

64-E-Néo, *H2Mobile*, 2020.

65-Clean Logistics, *cleanlogistics.de*, 2021.

66-Scania, *Fuelcelltrucks.eu*, 2021.

Figure 18 - Premiers prototypes de camions embarquant de l'hydrogène déployés en Europe - Des premiers projets sur la période 2017-2019

ESORO a déployé en 2017 le 1er prototype de porteur de livraison régionale 34 t, conçu pour la société de grande distribution Suisse Coop.



Configuration :
 Porteur 4x2 de 18 t + remorque
 PTAC : 34 t
 Autonomie : 375-400 km
 Temps de recharge : 10 min
 Capacité réservoir : 31 kgH₂
 Pression : 350 bar
 Puissance PAC : 100 kW
 Capacité batteries : 120 kWh
 Puissance moteur : 250 kW
 Châssis : MAN TGS
 PAC : PowerCell, SwissHydrogen

2017

Chéreau a présenté la 1ère semi-remorque frigorifique H₂ en 2019 - le tracteur dispose d'une motorisation diesel classique, et la semi-remorque frigorifique est alimentée en H₂.



Configuration :
 Semi-remorque frigorifique
 Autonomie : 3 jours (partie froid uniquement)
 Capacité réservoir : 14 kgH₂
 Pression : 350 bar
 Puissance PAC : 10 kW
 Fournisseur PAC : FC LAB, Tronico
 Production froid : Carrier

E-Trucks propose un châssis pour 26 t, dont la structure est adaptée au transport de marchandises. Les 1er modèles ont été déployés au format BOM aux Pays-Bas dès 2019.



PTAC : 26 t
 Autonomie : Jusqu'à 400 km
 Temps de recharge : 10 min
 Capacité réservoir : 20 kgH₂
 Pression : 350 bar
 Puissance PAC : 40 kW
 Capacité batteries : 154 kWh
 Puissance moteur : 210 kW
 Couple moteur : 2000 Nm
 Châssis : DAF
 PAC : Hydrogenics

Scania a déployé 4 unités de porteurs rigides 6x2 pour le producteur d'électroménager norvégien ASKO, en 2019.



Configuration : Porteur rigide 6x2
 PTAC : 27 t
 Autonomie : 400-500 km
 Capacité réservoir : 33 kgH₂
 Pression : 350 bar
 Puissance PAC : 90 kW
 Capacité batteries : 56 kWh
 Puissance moteur : 290 kW
 Couple moteur : 2200 Nm
 Châssis : Scania
 Fournisseur PAC : Hydrogenics

2019

Figure 19 - Premiers prototypes de camions embarquant de l'hydrogène déployés en Europe

De nouveaux projets sur la période 2020-2022

PVI développe le C-Less H₂ de 27 t, prolongeant l'autonomie du C-Less 100 % électrique produit depuis 2011. Sa structure est en particulier adaptée à l'usage BOM.



Configuration : 2 ou 3 essieux
PTAC / charge utile : 27 t / 17 t
Autonomie : 200 km
Temps de recharge : 15 min
Capacité réservoir : 20 kgH₂
Pression : 350 bar
Puissance PAC : 40 kW
Capacité batteries : 85 kWh
Châssis : PVI C-Less
Fournisseur PAC : Plug Power par Plug Power

La startup allemande Clean Logistics développe un procédé de conversion de poids lourds Diesel, qui devrait être testé dès 2021-2022.



Configuration : Tracteur + remorque
PTAC : 40 t
Autonomie : 400-500 km
Capacité réservoir : 43 kgH₂
Pression : 350 bar
Puissance PAC : 240 kW (2x120 kW)
Capacité batteries : 200 kWh (+ 100 km)
PAC : Proton Motors

GreenGT déploie des démonstrateurs de porteurs avec remorques 40 et 44 t, en Suisse en 2021 et en France à partir de l'été 2022.



Configuration :
6x2-2, Porteur 26 t + remorque
PTAC : 40-44 t
Autonomie : 450-480 km
Temps de recharge : 15 min
Capacité réservoir : 45-50 kgH₂
Pression : 350 bar
Puissance PAC : 170 kW
Puissance moteur : 390 kW
Couple moteur : 2200 Nm
Châssis / Caisse / Cabine / Groupe froid :
Daimler / Chéreau / Kamaz / Carrier
Fournisseur PAC : GreenGT

2020

e-Néo convertit actuellement les Scania G440 et DAF XF 105.460 à l'H₂ (rétrofit). L'entreprise prévoit de convertir ses 50 premiers camions dans les 2 ans, pour différents transporteurs.



PTAC : 40-44 t
Autonomie : Jusqu'à 400 km
Capacité réservoir : 40 kgH₂
Capacité batteries : 50-70 kWh

Gaussin a présenté en 2021 une plateforme prête à l'emploi, ou « skateboard », intégrant l'ensemble des composants moteur, réservoirs, piles à combustible, essieux et entraînement.



Configuration : Plateforme pour porteurs ou tracteurs
PTAC : 18 à 44 t
Autonomie : Jusqu'à 800 km
Châssis / équipement : Gaussin / Magna

2022

Depuis 2020, un premier changement d'échelle est observé, et des projets de déploiements européens en cours prévoient le déploiement de quelques dizaines à centaines d'unités, dont les caractéristiques sont présentées Figure 20.

Ces projets sont portés par les constructeurs européens, comme Iveco⁶⁷ ou VDL⁶⁸, qui prévoient le déploiement de plusieurs dizaines d'unités entre 2020 et 2022. On observe également le positionnement de nouveaux entrants, comme le coréen Hyundai⁶⁹ ou l'américain Hyzon Motors⁷⁰ (dont la joint-venture avec l'entreprise Holthausen Clean Technology a permis une accélération sensible du développement européen), qui proposent d'ores et déjà des modèles fabriqués à plusieurs centaines d'unités, et dont les autonomies tournent autour de 400 à 800 km à ce stade. Hyzon a également annoncé le développement en cours poids d'un lourd électrique à hydrogène longue distance, avec pour objectif d'atteindre plus de 1 500 kilomètres d'autonomie⁷¹.

67-Entretien HyAMMED

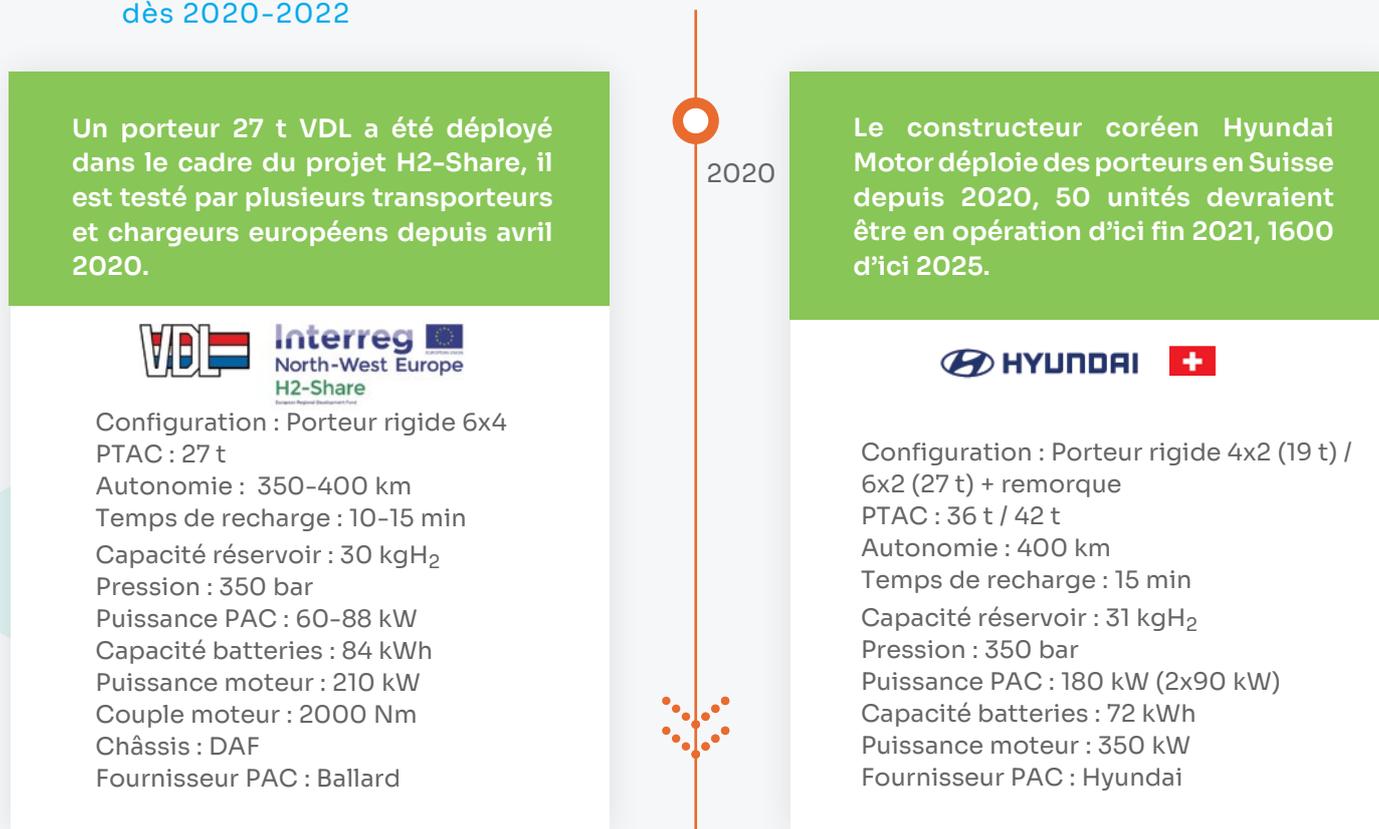
68-VDL, Fuelcelltrucks.eu, 2021.

69-Présentation de Daniel Keller, COO de Hyundai Hydrogen Mobility, lors du Séminaire HUGÉ, juin 2021. « Challenges and opportunities in Switzerland - lessons learnt ».

70-Présentation de Stefan van der Spek, Business Developer, Hyzon Motors & Holthausen Clean Technology, lors du Séminaire HUGÉ, juin 2021. « Hydrogen trucks, the need for a suitable infrastructure ».

71-H2 Mobile, 2021. Hyzon et Chart vont lancer un camion à hydrogène à l'autonomie record.

Figure 20 - En parallèle, projets de déploiements européens en cours, de quelques dizaines à centaines d'unités - Un changement d'échelle initié dès 2020-2022



Le projet H2Haul prévoit le déploiement de 16 démonstrateurs à partir de 2021, 12 IVECO et 4 VDL (caractéristiques VDL non connues).



Configuration : Porteurs et tracteurs
PTAC : 44 t
Autonomie : 800 km
Capacité réservoir : 65 kgH₂
Pression : 700 bar
Puissance PAC : 140-200 kW
Châssis : Iveco
Fournisseurs PAC : Bosch / EKPO

Hyzon prévoit le déploiement des tracteurs routiers HyMax-250 et HyMax-450 en Europe.



Configuration :
Porteur ou tracteur 4x2 ou 6x4
PTAC : 25-44 t
Autonomie : 400-650 km
Temps de recharge : < 20 min
Capacité réservoir : 30-65 kgH₂
Pression : 350 bar
Puissance PAC : 120 kW
Capacité batteries : 140 kWh
Puissance moteur : 250-450 kW
Châssis : DAF CF / DAF XF
Fournisseur PAC : Hyzon

2022

Enfin, la majorité des grands constructeurs historiques européens sont impliqués dans le développement de modèles électriques à hydrogène. L'effort de R&D est actuellement très important et nombreux sont ceux qui misent sur le déploiement de séries industrielles avant la fin de la décennie.

Ainsi, en Europe, la majorité des grands constructeurs de poids lourds, à savoir Iveco⁷², Mercedes (Daimler)⁷³, Scania (Volkswagen)⁷⁴, MAN⁷⁵, DAF⁷⁶, Volvo Trucks⁷⁷ et Renault Trucks⁷⁸, qui totalisent à eux seuls 99% du marché européen, travaillent sur le développement de démonstrateurs, dont les caractéristiques connues sont décrites Figure 21⁷⁸.

Ces constructeurs sont particulièrement attendus puisqu'ils disposent de capacités de production importantes et d'une gamme complète de poids lourds, ainsi que du réseau de distribution et de maintenance associé. Cependant, leurs chaînes de production doivent être adaptées à la technologie hydrogène, de même que leur réseau de sous-traitants et de maintenance, qu'ils ont construit depuis des décennies sur le modèle du diesel.

72-Iveco, Fuelcelltrucks.eu, 2021.

73-Daimler, France Routes, 2020.

74-MAN, H2Mobile, 2020.

75-DAF, daf.fr, 2021.

76-Volvo Trucks, volvotrucks.fr, 2021.

77-Renault, avem, 2021.

78-H2Mobile, trm24, Kenworth T680 Class 8, ZANZEFF

Les premiers véhicules produits en petite série devraient être disponibles auprès de plusieurs constructeurs en 2023-2024, la majorité d'entre eux annonçant une offre pour la seconde moitié de la décennie, et des productions grandes séries sont prévues à horizon 2027-2028. L'autonomie de ces poids lourds, de 800 à 1000 km, devrait satisfaire les besoins opérationnels des véhicules effectuant des missions régionales et long-courriers.

Figure 21 - Offre grands constructeurs de poids lourds électriques à hydrogène à venir – Une tendance qui se dessine pour le développement de la filière post 2022

Nikola et Iveco prévoient le déploiement en Europe de 30 tracteurs Nikola Tre H2 dès 2023-2024 et devraient amorcer le passage à la production en série dans la décennie.



Configuration : Tracteur 6x2
 Autonomie : 500-1200 km
 Capacité réservoir : 40-80 kgH₂
 Pression : 700 bar
 Puissance moteur : Jusqu'à 750 kW
 Couple moteur : 2700 Nm
 Châssis : Iveco S-Way
 Fournisseur PAC : Bosch

Les tests sur le prototype du tracteur GenH2 de ont débuté en avril 2021, les premiers tests clients sont annoncés pour 2023, et la production série devrait être effective en 2027.



Configuration : Tracteur
 PTAC / charge utile : 40 t / 25 t
 Autonomie : 1000 km
 Capacité réservoir : 80 kgH₂
 (hydrogène liquide)
 Puissance PAC : 300 kW (2 x 150 kW)
 Capacité batteries : 70 kWh
 Puissance en continu / max : 460 kW / 660 kW
 Couple en continu / max : 3150 Nm / 4140 Nm
 Fournisseur PAC : Cellcentric

En collaboration avec Toyota et Shell, la société mère de DAF, PACCAR, explore diverses options pour une propulsion à hydrogène. Deux tracteurs sont testés dans le port de Los Angeles depuis 2020, 8 de plus depuis 2021. Les résultats de ces essais seront communiqués à DAF afin de commencer à tester la technologie en Europe.



Configuration : Tracteur 6x4
PTAC : 37 t
Châssis : Kenworth
Fournisseur de PAC : Toyota



Renault Trucks vise la commercialisation de camions électriques à hydrogène dans la décennie.



MAN prévoit le déploiement de démonstrateurs électriques et thermiques à hydrogène dès 2023-2024.



Volvo Trucks prévoit la commercialisation d'un tracteur électrique à hydrogène dès 2025 pour le transport longue distance.



Scania a déjà produit des prototypes de véhicules électriques à hydrogène, et a rejoint l'initiative HyTrucks aux côtés d'Hyzon, Iveco et VDL.

2.3 Quelles infrastructures de recharge nécessaires ?

Les infrastructures de recharge en hydrogène représentent un maillon clé pour le développement du marché de l'hydrogène. En 2021, plusieurs dizaines de stations de distribution d'hydrogène, publiques ou privées, sont d'ores et déjà en service en France, et d'autant plus sont en construction ou en projet (voir la carte des stations hydrogène en France, qui est disponible sur le site de France Hydrogène⁷⁹). Ces stations ne sont pas forcément dédiées aux véhicules du transport de marchandises, mais sont le point de départ de la mobilité hydrogène en France. On observe par ailleurs dans le développement des projets actuels une orientation de plus en plus forte vers le développement des stations hydrogène pour les poids lourds.

La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) fixe des objectifs ambitieux de développement des stations hydrogène de 2019 à 2023 et de 2024 à 2028. Pour les années à venir, la PPE insiste sur la logique de « flottes captives » pour poursuivre le développement du réseau de recharge hydrogène.

⁷⁹-VIG'HY, l'observatoire de l'hydrogène.

Il s'agit d'assurer un déploiement coordonné des usages et des stations d'avitaillement pour pérenniser le modèle économique des infrastructures de recharge et faciliter l'organisation opérationnelle des flottes converties à l'hydrogène (exemple : les transporteurs ne peuvent pas se permettre d'effectuer des kilomètres à vide et une station à proximité immédiate de leur dépôt est indispensable pour soutenir leur transition). En d'autres termes, l'objectif tel qu'affiché par la PPE publiée en 2019, est de déployer les stations d'avitaillement selon la logique d'écosystèmes territoriaux, basés notamment sur des flottes professionnelles, avec pour cible la construction de 100 stations alimentées en hydrogène produit « localement » à l'horizon 2023, et de 1 000 stations à l'horizon 2028⁸⁰. Parmi celles-ci, compte tenu des développements actuels, un nombre important devrait pouvoir alimenter entre autres des camions.

Il est important de souligner que les prévisions de la PPE sont dans une certaine mesure conservatrices au regard des développements d'ores et déjà annoncés et sécurisés, et il est possible que les déploiements effectifs soient supérieurs aux totaux actuellement projetés. Par ailleurs, pour rappel, la révision de la directive DAFI en 2021, devenant la réglementation AFIR, impose le déploiement d'un maillage de stations de ravitaillement en hydrogène avec une distance maximale de 150 km entre elles le long du réseau complet du RTE-T d'ici le 31 décembre 2030.

Dans tous les cas, les infrastructures de recharge déployées devront être adaptées aux usages ciblés. Les stations doivent ainsi être pensées en fonction des usages prioritaires et des perspectives de développement identifiées. De fait, une station dédiée aux poids lourds ne présentera pas les mêmes caractéristiques techniques qu'une station intégralement pensée pour les véhicules légers. Cela étant, les stations multi-usages représentent une opportunité intéressante pour favoriser des synergies et augmenter le taux de charge des stations déployées grâce à des systèmes flexibles (systèmes dual-pressure par exemple, permettant la distribution de l'hydrogène aux véhicules fonctionnant à 350 bar et à 700 bar).

La planification du déploiement des stations peut être pensée pour servir des usages de type :

- **Les missions « Point A – Point A »** concernant les véhicules qui retournent au dépôt chaque jour après la fin de leur circuit. Dans ce cas, une station déployée à proximité de leur dépôt est adaptée à leur fonctionnement opérationnel.

80-Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2020. Stratégie française pour l'énergie et le climat, Programmation pluriannuelle de l'énergie.

- **Les missions « Point A – Point B »** nécessitant un maillage de stations plus important afin de permettre un fonctionnement opérationnel optimal. Ainsi, les véhicules doivent pouvoir trouver une station d’avitaillement à proximité de leur site de destination. Les projets régionaux (à l’instar de Zero Emission Valley en région Auvergne-Rhône-Alpes) visent à garantir une sécurité d’approvisionnement grâce à une distance inter-station d’environ 50 à 100 kilomètres maximum.

- **Les missions long-courriers**, nécessitant un maillage transnational régulier qui implique des déploiements coordonnés sur les grands corridors. Ainsi, des stations devront être implantées tous les 40 à 50 kilomètres sur les grands réseaux autoroutiers. Les réseaux de recharge en électricité comme en hydrogène pourront être implantés au même endroit que les stations gazole et GNV, afin de faciliter la transition. Des projets de déploiements de stations sur les réseaux RTE-T sont en cours en France et en Europe, notamment l’initiative Corridor H2, soutenue notamment par la Région Occitanie (voir section 2.4.1).

Les constructeurs et exploitants d’infrastructures de production et d’avitaillement en hydrogène sont au cœur de ces développements, et travaillent de concert avec les constructeurs de véhicules, les équipementiers et les clients finaux, pour mettre en place un réseau d’infrastructures adapté aux caractéristiques des poids lourds. En France, de nombreux acteurs sont impliqués dans ce secteur, couvrant un spectre d’activités et de compétences : construction et exploitation de capacités de production ou de distribution d’hydrogène, mais également la création ou la coordination d’écosystèmes hydrogène, etc.

Parmi ceux-ci, on citera notamment :

- Les fabricants d’équipements, comme Air Liquide, Air Products, HRS, ITM Power, McPhy, PlugPower, etc. qui développent les équipements clés pour la production ou la distribution de l’hydrogène, voire pour les deux (production et distribution) comme McPhy par exemple, et qui peuvent pour certains d’entre eux également se positionner en tant qu’exploitants ;

- Les énergéticiens traditionnels et spécialisés, qui couvrent l’ensemble de la chaîne de valeur, de la production de l’électricité à l’exploitation des infrastructures et la vente de l’hydrogène (Engie, EDF via sa filiale Hynamics, TotalEnergies, etc.), en s’approvisionnant auprès des fabricants d’équipements ;

- Les développeurs de projets d’énergies renouvelables, qui voient en l’hydrogène une opportunité de diversification et de complémentarité avec leur activité (Qair, Enertrag, Valorem, EDPR, Vent d’Est, etc.) ;

- Les start-ups, nouvelles entrantes, spécialisées dans le développement et l’exploitation de projets d’hydrogène (Arhyze, Verso, etc.).

On notera enfin l'organisation sous forme de sociétés de projet, souvent initiées par les acteurs précédemment cités, qui peuvent rassembler des acteurs variés, dont des acteurs publics. Ces sociétés sont créées spécifiquement dans le but de développer et d'exploiter un ou des projets. C'est par exemple le cas de la société HyPort, créée par Engie et l'Agence Régionale Energie Climat (AREC) de la Région Occitanie afin de développer l'hydrogène bas carbone et renouvelable sur des écosystèmes locaux, principalement aéroportuaires. C'est également le cas de la société DMSE (Dijon Métropole Smart EnergyHy), de la société CP3 à Auxerre, etc. La Banque des Territoires est souvent associée à ces sociétés de projets qui regroupent collectivités territoriales et acteurs privés.

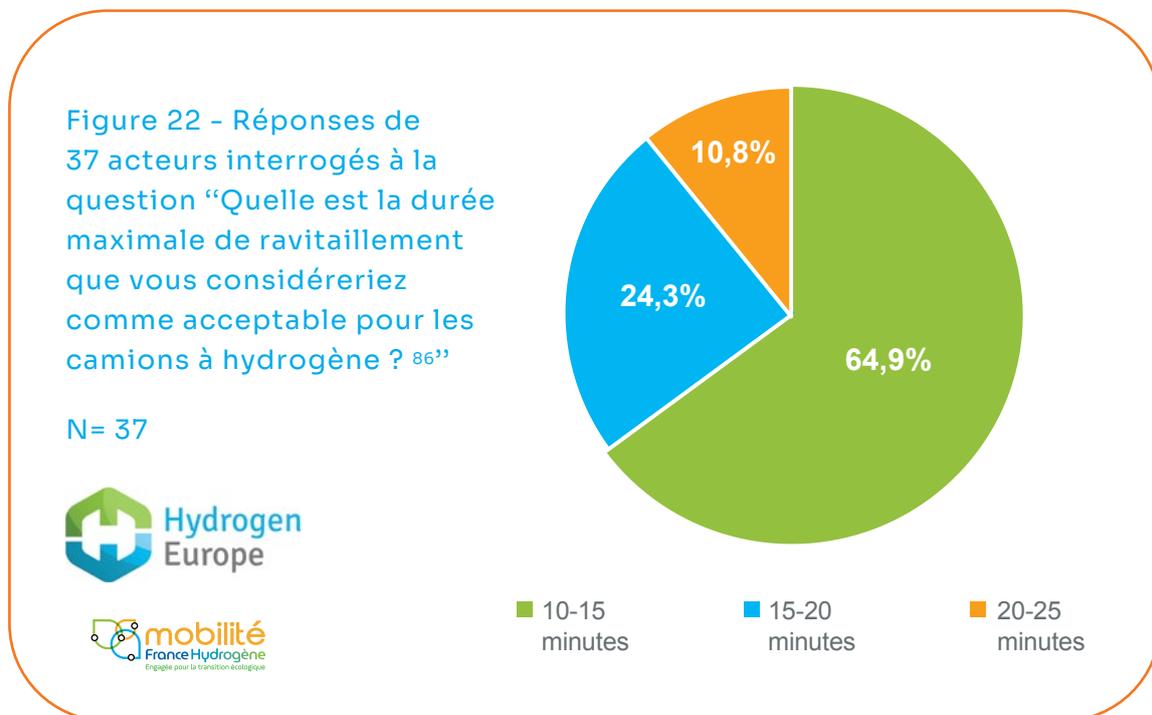
Les gestionnaires de voiries ont également un rôle à jouer, puisqu'ils disposent de multiples leviers pour favoriser le transport zéro émission. Vinci Autoroutes par exemple, souhaite s'engager dans la filière hydrogène, en particulier pour les poids lourds⁸¹. L'entreprise prévoit notamment le déploiement de stations, et échange avec des énergéticiens et acteurs de la production et/ou distribution d'hydrogène. Les gestionnaires d'autoroutes pourraient également mettre en place des mesures favorables aux véhicules électriques à hydrogène, comme des diminutions de frais de péages. ATMB par exemple, propose l'Offre Mobilitis pour les particuliers, qui permet 80 % de réduction au péage pour les véhicules électriques. Certains organismes privés proposent déjà des réductions de frais de péage pour les poids lourds. Ce type d'offre adaptée au transport de marchandises pourrait avoir un impact positif sur le déploiement de véhicules zéro émission en diminuant leur TCO. Pour un tracteur semi-remorque parcourant 140 000 km par an pendant 10 ans par exemple, et des coûts de péage moyens s'élevant à 0,17 €/km, le péage représente près de 24 000 € par an.

Enfin, l'interaction entre les constructeurs et exploitants d'infrastructures de production et de distribution et les constructeurs de véhicules est indispensable pour assurer la création d'un réseau fiable et adapté aux besoins des futurs opérateurs. Ainsi, le « back-to-back » (capacité à enchaîner les recharges d'hydrogène de plusieurs véhicules) est une dimension particulièrement importante pour assurer une fluidité des remplissages et donc un fonctionnement opérationnel optimal pour les flottes de véhicules. C'est aujourd'hui une caractéristique clé du dimensionnement des stations d'avitaillement pour les poids lourds.

Par ailleurs, les infrastructures déployées doivent répondre aux besoins spécifiques de la filière du transport de marchandises, notamment en termes de durées de recharge.

81-H2 Mobile, 2021. Comment Vinci Autoroutes prépare l'arrivée de la mobilité hydrogène.

La Figure 22 ci-dessous présente les résultats de l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le groupe France Hydrogène Mobilité⁸², relative à la durée maximale de ravitaillement considérée comme acceptable pour la recharge d'un poids lourd électrique à hydrogène. Si plus de 10 % des acteurs interrogés accepteraient des temps de recharge de 20 à 25 minutes, et près de 25 % de 15 à 20 minutes, ce sont des durées de 10 à 15 minutes maximum qui sont attendues par près de deux tiers des acteurs du transport et de la logistique interrogés. L'objectif est donc d'atteindre un temps de recharge de 15 minutes maximum. Le projet européen PRHYDE, financé par le FCH JU, vise à développer un protocole de remplissage rapide, avec pour objectif de réaliser un plein de 80 kg d'hydrogène en 10 minutes.



Or, si la distribution haut débit jusqu'à 120 g/s est aujourd'hui permise par arrêté ministériel pour la distribution en 350 bar, elle est encore limitée à 60 g/s pour du 700 bar : il faudra que la législation évolue pour accompagner le développement de la filière, notamment à travers le pack réglementaire mis en place par le CNH2 (voir section 3.3). Il faudra également développer les équipements appropriés, notamment les organes de distribution et en particulier les pistolets de distribution. Ce travail a déjà commencé à travers l'initiative d'un groupe d'industriels aux Etats-Unis.

⁸²-Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

Cependant, le temps de recharge ne dépend pas simplement de la capacité du réservoir et du flux maximum du pistolet recharge. Il dépend également de nombreux facteurs, comme la température et la pression dans le réservoir et l'environnement extérieur, et la recharge n'est pas linéaire. Durant la recharge, le gaz contenu dans le réservoir doit passer d'une faible pression, de l'ordre de 30 bar, à 350 ou 700 bar. En 350 bar, le processus est fluide, et on observe des temps inférieurs à une minute par kilogramme pour remplir un réservoir de 33 kg. En 700 bar, en revanche, le début de la recharge peut être très rapide, mais le passage de 600 à 700 bar est plus long, et un refroidissement important est nécessaire. Des efforts techniques comme réglementaires sont donc nécessaires pour atteindre les objectifs de 10 à 15 minutes de durée de recharge.

Afin de donner une vision d'ensemble sur les développements en cours sur le marché des stations d'avitaillement, la section suivante présente la contribution sous forme d'un entretien de la part d'un membre du groupe de travail auteur du présent document, McPhy, le concepteur fabricant français d'unités de production et distribution d'hydrogène (électrolyseurs et stations). L'entreprise McPhy développe depuis 2008 des solutions systèmes intégrées de production et distribution d'hydrogène, pour véhicules légers et véhicules lourds. McPhy a notamment équipé en 2021 la station hydrogène AuxHYGen - Ecosystème hydrogène de l'Auxerrois - à Auxerre, exploitée par Hynamics, filiale d'EDF (voir Figure 23 ci-dessous⁸³). Cette station, équipée d'un électrolyseur d'une capacité de production journalière de 400 kgH₂, alimente depuis septembre 2021 cinq bus exploités par l'opérateur de mobilité Transdev Auxerrois. Elle est également dimensionnée pour alimenter d'autres usages : bus supplémentaires, véhicules utilitaires légers, des camions, etc.

Figure 23 - Station hydrogène AuxHYGen – Auxerre – © IDXPROD / Séverine Renault



83-© IDXPROD / Séverine Renault

”

*Entretien avec un constructeur de stations hydrogène
- 30/06/2021 - Nenad NIKOLIĆ, McPhy, Responsable
Développement Commercial | Business Development Manager*

*Quels sont les principaux équipements présents dans une
installation de production et distribution d'hydrogène ?*

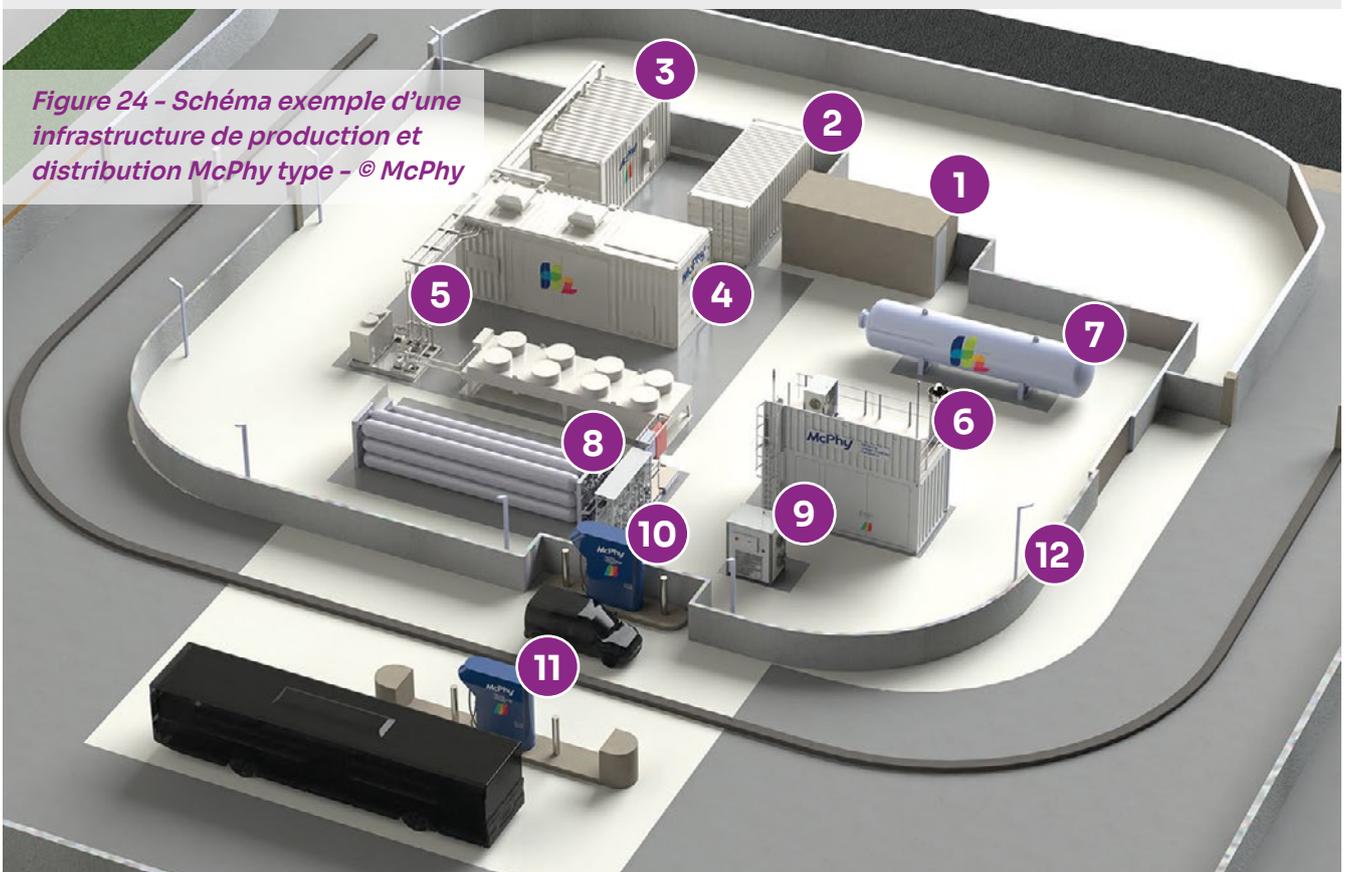


Figure 24 - Schéma exemple d'une infrastructure de production et distribution McPhy type - © McPhy

1 - Tableau Général Basse Tension

2 - Transformateur / Redresseur électrique

3 - Container auxiliaires

4 - Container process

5 - Refroidisseurs

6 - Station de compression

**Electrolyseur
McLyzer®**

7 - Stockage basse pression - 30 bar

8 - Stockage moyenne pression - 495 bar

9 - Refroidisseurs de la partie distribution de l'H₂

10 - Bornes de distribution véhicules légers - 350 bar

11 - Bornes de distribution véhicules lourds - 350 bar

12 - Événements

La Figure 24 ci-dessus présente un exemple de station McPhy. L'hydrogène est produit par un électrolyseur McLyzer®, associé à des équipements électriques de puissance. L'hydrogène est ensuite refroidi, comprimé puis stocké. Dans cet exemple, deux types de stockages sont disponibles :

- Le stockage basse pression, à 30 bar ;
- Le stockage moyenne pression, à 495 bar.

L'hydrogène est ensuite distribué à des véhicules légers ou des véhicules lourds (bus ou camions) via des bornes dédiées, en 350 bar dans cet exemple.

Ce même type d'infrastructure peut être décliné avec une station de distribution 350 & 700 bar (McFilling® Dual Pressure) munie de bornes refroidies à -40 °C (pour véhicule légers ou utilitaires légers) et de bornes 350 bar haut débit (pour les poids lourds).

Les principales étapes de la distribution en hydrogène à un poids lourd sont les suivantes :

- Un stock d'hydrogène gazeux est généralement stocké à basse/moyenne pression, en attente de la distribution.
- L'étape 1 consiste à comprimer l'hydrogène pour le préparer à la distribution : l'hydrogène est comprimé par le compresseur, puis stocké dans des buffers spécifiques, ce qui permet d'atteindre la pression nécessaire à la distribution pour les véhicules.
- L'étape 2 consiste à distribuer l'hydrogène au véhicule : le remplissage repose sur un équilibrage de pression entre le réservoir du véhicule et le stockage buffer, selon le principe des vases communicants. Le transfert de l'hydrogène sous pression dans le réservoir initialement vide entraîne une élévation de la température du gaz. Suivant la pression de distribution, l'hydrogène doit être refroidi avant d'être envoyé dans le véhicule.

Afin de répondre aux préoccupations d'aujourd'hui tout en permettant de satisfaire les besoins futurs, McPhy a fait le choix de stations évolutives en première génération permettant d'adapter leurs capacités de distributions : entre 100 kgH₂/j à 1 400 kgH₂/j. Cette flexibilité permet d'adresser tous les Marchés de la Mobilité : véhicules légers (VL et VUL) et véhicules lourds (Bus et Cars, camions porteurs et tracteurs, trains et bateaux, voire avions à venir).

▪ **Quels sont les points communs et différences entre l'hydrogène et le GNC pour la recharge d'un poids lourd ?**

Contrairement aux véhicules thermiques classiques alimentés en carburant liquide, généralement essence ou gazole, une grande partie des véhicules GNC sont alimentés par du gaz naturel comprimé. Se pose donc la problématique de la distribution et du stockage d'un gaz sous pression, comme pour l'hydrogène.

Cependant, les pressions typiques rencontrées pour le gaz naturel ne dépassent pas les 250 bar, en-deçà des pressions requises pour les systèmes électriques à hydrogène (350 à 700 bar dans le réservoir). Les applications jusqu'à 500 bar sont aujourd'hui facilement maîtrisées, la distribution de l'hydrogène en 350 bar implique donc des technologies bien connues. En revanche, pour de la distribution aux véhicules lourds 700 bar, nécessitant des pressions de stockage en station proches de 1000 bar, les équipements sont fonctionnels mais encore sujets à des activités de R&D, déjà avancées dans le cadre des travaux sur les stations pour véhicules légers.

Enfin, le carburant liquide distribué aux véhicules thermiques est déjà un produit fini, distribuable en l'état, alors que le GNC comme l'hydrogène doivent être comprimés sur site en amont de leur distribution. La différence majeure entre le GNC et l'hydrogène est que le GNC trouve sa source dans le réseau de Gaz Naturel (GRDF ou GRTgaz par exemple) alors que les pipelines hydrogène sont rares, l'hydrogène est donc produit sur site ou acheminé par camion sur la station de distribution.

▪ **Quelle différence entre les stations de recharge en hydrogène pour poids lourds, notamment bus et camions ?**

Toutes les stations d'avitaillement ne sont pas identiques en fonction des usages ciblés. Ainsi, les bus et les camions ne sont pas équipés avec les mêmes types de réservoirs, ce qui influe sur les besoins en refroidissement de l'hydrogène à la distribution. En effet, l'hydrogène étant, comme le gazole, l'essence et le gaz naturel un carburant hautement inflammable, il ne faut pas dépasser un certain seuil de température dans le réservoir.

Les bus peuvent être équipés en réservoirs stockant l'hydrogène à une pression de 350 bar, de type 3, qui nécessitent rarement un refroidissement, ou de type 4, pour lesquels

Le refroidissement peut s'avérer nécessaire afin d'obtenir un temps de recharge court. Dans les deux cas, les stations de distribution en hydrogène présentent un pic de débit de 120 gH₂/s.

Les poids lourds dédiés au transport de marchandises, notamment les tracteurs à semi-remorques, auront des réservoirs beaucoup plus volumineux nécessaires pour atteindre des autonomies supérieures à 500 km. Ils seront donc probablement pour la majorité d'entre eux équipés d'un réservoir stockant l'hydrogène à une pression de 700 bar. Il faudra prévoir des stations à haute capacité, qui soient capables de les recharger le plus rapidement possible, et à 700 bar, avec des débits pouvant monter à plus de 120 gH₂/s.

Ainsi, la distinction entre deux stations ne se fait pas entre approvisionnement de véhicules légers ou lourds, mais dans la pression de stockage et de délivrance de l'hydrogène. Afin de permettre l'accueil de tout type de véhicules, les stations peuvent être développées en « dual-pressure » afin de délivrer aussi bien des pressions de 350 bar et de 700 bar. C'est une dimension aujourd'hui particulièrement importante dans la mesure où il n'y a pas de consensus sur une pression à privilégier à ce stade.

En outre, il est important de souligner l'importance des problématiques de « back-to-back », c'est-à-dire la capacité des stations à accueillir successivement des véhicules pour le ravitaillement en hydrogène. Le délai à respecter entre deux doit être le plus court possible.

▪ Quels sont les principaux dangers de la station ?

Le principal facteur de risque sur le site de distribution est la fuite de l'hydrogène, qui est un gaz inflammable sous haute pression. L'inflammabilité de l'hydrogène est définie par une plage de limites d'explosivité ou limites d'inflammabilité (LIE-LES), qui est plus large pour l'hydrogène que pour le Gaz Naturel Compressé (GNC) : l'explosivité de l'hydrogène se situe entre 4,1 % et 74,8 % de concentration, en pourcentage du volume dans l'air. Ainsi, des systèmes de sécurité drastiques sont mis en place, et passent notamment par l'installation de détecteurs de fuite, dans les stations de distribution mais également dans les dépôts et ateliers de maintenance.

▪ **Quelle formation est-elle nécessaire ?**

Une habilitation électrique minimum est demandée, mais elle est accessible même pour des non-électriciens. A ce stade, il n'existe pas d'habilitation à l'hydrogène similaire à celles qui ont été mises en place pour le GNC. Une formation de sensibilisation à l'hydrogène est cependant dispensée par McPhy (sur les dangers liés à la pression, l'inflammabilité...), et des tests pratiques sur les équipements sont proposés. McPhy forme le personnel exploitant intervenant sur ses stations : McPhy possède à cet effet l'agrément Organisme de Formation.

▪ **Quelles sont les contraintes réglementaires ?**

Il existe des protocoles pour la recharge des véhicules légers, mais pas pour les poids lourds (camions, bus, cars, etc.), le sujet est à l'étude. A terme, une harmonisation au niveau européen sera nécessaire. Cependant, il ne s'agit pas d'un point bloquant pour le déploiement de camions électriques à hydrogène, puisque malgré l'absence de protocoles uniformisés pour les bus, des projets voient le jour sans problème particulier sur ce point.

Par ailleurs, la réglementation limite actuellement le haut débit à 120 gH₂/s (et n'autorise pas le haut débit pour les véhicules 700 bar). Elle doit évoluer au niveau européen afin de favoriser une recharge plus rapide des réservoirs et ainsi de maximiser la fluidité dans le ravitaillement des véhicules, afin d'atteindre l'objectif d'une vitesse de remplissage équivalente au gazole. Dans le cadre d'une démarche d'amélioration continue, McPhy travaille avec plusieurs fournisseurs de composants pour optimiser la vitesse de recharge dans ses stations.

En outre, la durée d'avitaillement dépend de très nombreux critères en plus du flux maximal autorisé par le pistolet. Elle dépend d'une part du véhicule, du type de réservoir, de sa taille, de sa conductivité thermique, de son design, etc. D'autre part, elle dépend de la température extérieure, ainsi que de la température et de la pression dans le réservoir du véhicule lorsqu'il arrive à la station. Ainsi, McPhy travaille également en partenariat avec Plastic Omnium, fabricant de réservoirs, pour établir des modes de recharge efficaces adaptés à leurs réservoirs afin d'optimiser la recharge.

Dans l'objectif de favoriser un développement rapide et conséquent de la filière hydrogène pour poids lourds, il sera indispensable d'uniformiser les standards de

remplissage au niveau européen, afin de favoriser une fluidité dans l'utilisation des équipements, y compris lors des déplacements transfrontaliers.

▪ **Où en est le développement des stations multi-énergies ?**

La réglementation des stations multi-énergies est également amenée à évoluer. A ce stade, en France, la distance réglementaire minimale entre les bornes de recharge de carburants différents est bien plus importante que dans d'autres pays, comme les Pays-Bas ou la Belgique par exemple. Cependant, pour des stations adaptées aux poids lourds de 44 t, les stations multi-énergies ne sont pas particulièrement pertinentes étant donné la quantité importante de carburant distribuée chaque jour.

▪ **Quelle est l'empreinte au sol d'une station en fonction du nombre de poids lourds alimentés ?**

L'empreinte au sol des infrastructures de production et de distribution peut être très variable en fonction de la capacité des infrastructures déployées, du type d'usages considérés, de l'accessibilité du site. Les équipements pour une station de distribution avec production par électrolyse sur site (de 1 à 4 MW) ont une empreinte au sol variant entre 550 et 950 m², répartis entre :

- La partie électrolyse : 240 m² pour 1 MW, 315 m² pour 2 MW, 415 m² pour 4 MW ;
- La partie distribution : 41 m², en tenant compte de la surface nécessaire pour la maintenance ;
- La partie équipements de stockage : très variable suivant le type de stockage, 1 0 m x 2,5 m typiquement.

Néanmoins, l'empreinte au sol des équipements ne reflète pas la superficie totale du foncier nécessaire. En effet, le design de la station de production / distribution doit également considérer la création des voies d'accès pour les véhicules (que cela soit pour les véhicules venant s'approvisionner ou les véhicules participant à la logistique du transport de l'hydrogène), mais également intégrer l'ensemble des enjeux de sécurité, et notamment les distances réglementaires par rapport aux éventuels bâtiments situés à proximité. Ainsi, la superficie totale d'une parcelle à considérer pour l'implantation d'infrastructures hydrogène peut varier assez significativement en fonction du type de station et de l'environnement considérés.

▪ **Est-il stratégique de déployer des électrolyseurs sur station ?**

Il s'agit d'une décision très variable selon les cas considérés, l'essentiel étant de distribuer de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone, et d'obtenir un bon équilibre économique sur la station. Par exemple, il s'avère parfois plus judicieux de déployer un électrolyseur sur le site de la station, car le coût total de possession global peut être plus avantageux que dans le cas d'une importation d'hydrogène produit sur un autre site distant.

Le premier facteur à prendre en compte pour évaluer le coût de l'hydrogène produit par électrolyse est le prix de l'électricité. Ainsi, si des opportunités d'autoconsommation existent et permettent de faire baisser significativement le coût du MWh d'électricité, grâce par exemple à des capacités de production renouvelable déployées sur site, la colocation des équipements de production d'électricité et d'hydrogène doivent être privilégiés.

Par ailleurs, si une capacité d'électrolyse importante est déjà déployée à proximité, il peut être pertinent de l'utiliser. Le projet Djewels (Nouryon et Gasunie) par exemple, prévoit le déploiement de 20 MW d'électrolyse au nord des Pays-Bas, ce qui correspond à 8,6 tonnes d'hydrogène qui pourront être produites chaque jour, et acheminées sur les sites de distribution par pipe.

▪ **Et l'hydrogène liquide ?**

L'hydrogène liquide est une technologie en phase de recherche et développement chez McPhy pour un usage en station, qui pose de nombreux défis sécuritaires et réglementaires, notamment dus à la température de stockage requise (de -253 °C, contre -140 à 160 °C pour du GNL par exemple).

Cependant, McPhy se tient prêt à relever le défi notamment avec son partenaire technologique CHART, leader mondial dans la fourniture d'équipements de liquéfaction et cryogénie pour l'hydrogène.

2.4 Quels projets phares en phase d'émergence de la filière ? – Etudes de cas

On assiste aujourd'hui à une multiplication rapide de projets de déploiements de poids lourds électriques à hydrogène, en France comme en Europe. On peut notamment citer les projets H2-Share, CATHyOPÉ et HyAMMED s'inscrivant dans le cadre plus large de H2Haul, les déploiements Hyundai en Suisse, VHyGO, Corridor H2, DBeaut'Hy Truck, ou encore Hy-Trucks par exemple. A cette liste non exhaustive s'ajoutent de nombreux projets supplémentaires sélectionnés dans le cadre des IPCEI, comme Black Horse. Afin de donner une vision d'ensemble des types de projets qui se développent, aux ambitions et aux objectifs variés, cette section décrit un échantillon de 5 projets phares qui voient le jour en Europe.

Les projets suivants (que l'on pourrait qualifier selon les cas d'initiatives, projets démonstrateurs et premiers déploiements) seront détaillés dans cette section :

- Les projets démonstrateurs / prototypes CATHyOPÉ et HyAMMED (déclinaison française du projet européen H2Haul), H2-Share et Corridor H2 ;
- Le projet de déploiements suisse de véhicules Hyundai ;
- L'initiative Hy-Trucks, 1000 camions.



2.4.1 HyAMMED et CATHyOPÉ

Aperçu du projet :

Coordonné par Air Liquide, le projet HyAMMED vise à valoriser de l'hydrogène bas carbone co-produit par l'industriel Kem One à Fos-Sur-Mer dans des applications de mobilité zéro émission de véhicules lourds longue distance. Le consortium de partenaires s'appuie sur la mise en place d'infrastructures de transport et de distribution de l'hydrogène opérées par Air Liquide, et sur la fourniture de véhicules par le constructeur Iveco. Le projet permet d'initier le déploiement des camions électriques à hydrogène en France, notamment en zones logistiques denses, comme les ports. Une grande diversité d'acteurs sont

rassemblés et engagés, notamment cinq transporteurs (Jacky Perrenot, ID Logistics, Air Liquide, Transport Blondel et Malherbe) associés à des chargeurs (comme Carrefour, Coca-Cola ou Monoprix). Des financements européen, national et régional viennent subventionner l'infrastructure de distribution et les camions exploités par les transporteurs se rechargeant sur le site Air Liquide.

Le projet CATHyOPÉ est un projet indépendant sur l'axe camion, soutenu par l'ADEME, qui vise à déployer un véhicule démonstrateur et montrer la pertinence de la technologie électrique à hydrogène en conditions réelles. Il s'agit d'un consortium industriel entre acteurs privés, incluant GreenGT pour la construction du camion, Carrefour et Transport Chabas, en convention avec l'ADEME. Le projet est né d'un besoin de l'acteur de la grande distribution Carrefour, soucieux de l'empreinte carbone de sa flotte de camions, et s'est greffé à HyAMMED pour la distribution de l'hydrogène bas carbone.

Ainsi, le déploiement de sept camions électriques à hydrogène de 44 tonnes est prévu à partir de 2022. Les camions effectueront des missions de livraisons régionales de 650 à 750 km/jour en moyenne, et présenteront des kilométrages annuels de 140 000 à 280 000 km/an. Les transporteurs et chargeurs ont sélectionné des missions spécifiques, aux kilométrages particulièrement élevés, afin d'obtenir des TCO les plus favorables possibles. Par ailleurs, chaque transporteur fait l'acquisition d'un à deux camions maximum, et l'effort économique est partagé avec le chargeur. Pour chaque client, le prix d'achat de l'hydrogène dépendra du nombre de kilomètres parcourus annuellement par le camion, et sera compris entre 7 et 9 €/kgH₂.

Les principaux objectifs de ce projet sont de démontrer la sûreté et la fiabilité de la solution globale et "séduire" les chauffeurs, chargeurs et clients des différentes enseignes. Le projet permettra également d'affiner les courbes de TCO (coûts de maintenance, coûts indirects...), d'évaluer la consommation réelle des véhicules et d'étudier le vieillissement des composants.

Caractéristiques des véhicules :

Les véhicules déployés seront des tracteurs 44 tonnes, à l'exception du premier véhicule déployé par GreenGT - qui sera un porteur remorquant de 26 tonnes destiné à être attelé pour un ensemble 44 tonnes. Les camions présenteront des autonomies de 500 à 800 km, en fonction du chargement du véhicule en circulation, et les temps de recharge sont estimés entre 15 et 20 minutes.

Les principales caractéristiques techniques des véhicules sont décrites ci-dessous.

Tableau 2 – Caractéristiques des véhicules déployés dans le cadre des projets HyAMMED et CATHyOPÉ

HyAMMED	CATHyOPÉ
6 tracteurs de PTAC 44 t 	1 porteur + remorque 6x2-2, de PTAC 44 t 
Constructeur : IVECO	Constructeur : 
Fournisseurs PAC :  POWERCELL  BOSCH	Fournisseur châssis / cabine : 
Autonomie : 800 km	Fournisseur PAC : (170 kW brut) 
Pression du réservoir : 700 bar	Autonomie : 450-480 km
	Capacité du réservoir : 46 kgH ₂
	Pression du réservoir : 350 bar
	Puissance batteries : 250 kW
	Puissance / couple moteur : 390 kW / 2200 Nm

Production et distribution de l'hydrogène :

L'hydrogène sera un coproduit par électrolyse de l'industrie KEM ONE, à partir d'une électricité bas carbone, puis collecté par canalisation pour être utilisé par les poids lourds. Il sera ainsi acheminé puis distribué dans une station Air Liquide, qui conçoit, construit et opère la station, hébergée sur son site de Fos-sur-Mer.

La zone de recharge comportera deux bornes de distribution double (350 bar et 700 bar) pour les véhicules lourds (camions et bus) et une borne de distribution 700 bar pour les véhicules légers. Chaque borne 700 bar véhicules lourds permettra d'ici fin 2023 de recharger 65 kg d'hydrogène en 20 minutes. Afin d'assurer la fiabilité de la station, une redondance complète des équipements de compression est retenue.

Figure 25 – Vue 3D de la station de distribution en hydrogène d'Air Liquide à Fos-sur-Mer

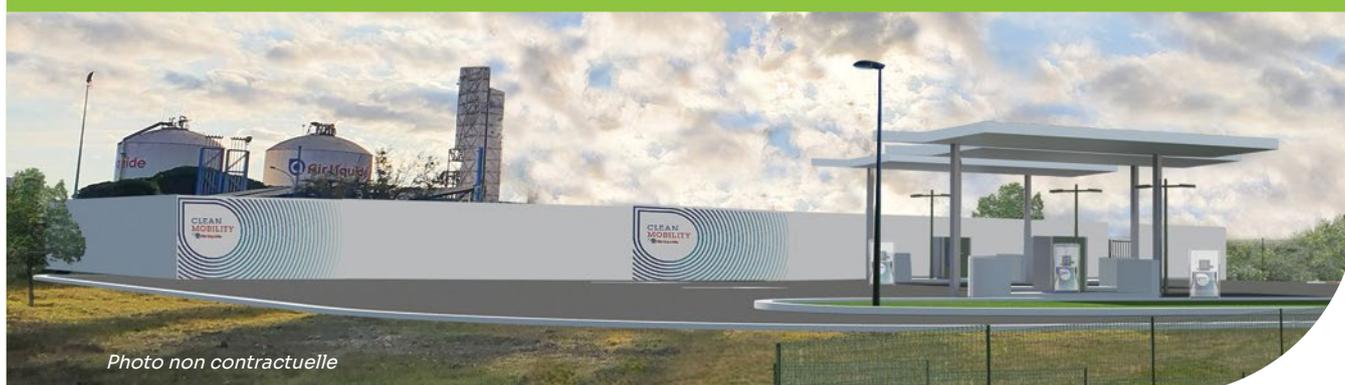


Photo non contractuelle

Retours d'expérience de la phase de montage du projet :

L'engagement sur le long terme de tous les acteurs impliqués est indispensable pour assurer la réussite du projet. Aujourd'hui, le déploiement de poids lourds électriques à hydrogène est mené par des pionniers, qui doivent fortement s'investir pour construire ces projets, convaincre d'autres de les rejoindre et de s'engager pendant plusieurs années sur le dossier.

Il faut également anticiper les délais intrinsèques au développement de tout projet innovant. Même après la signature des conventions de financement, beaucoup d'efforts sont encore nécessaires pour assurer l'opérationnalité.

Enfin, ce type de projet ne peut voir le jour que si les constructeurs, les transporteurs, les chargeurs et le producteur/distributeur d'hydrogène sont réunis et travaillent ensemble. Par ailleurs, il est important de penser très tôt dans le déroulement du projet :

- Aux besoins en maintenance des véhicules ;
- Au dimensionnement des infrastructures de distribution et de production de l'hydrogène ;
- Au positionnement sur des tournées ou missions pour lesquelles l'hydrogène est incontournable (tonnage élevé des charges à transporter, longue distance...).

Calendrier des projets :

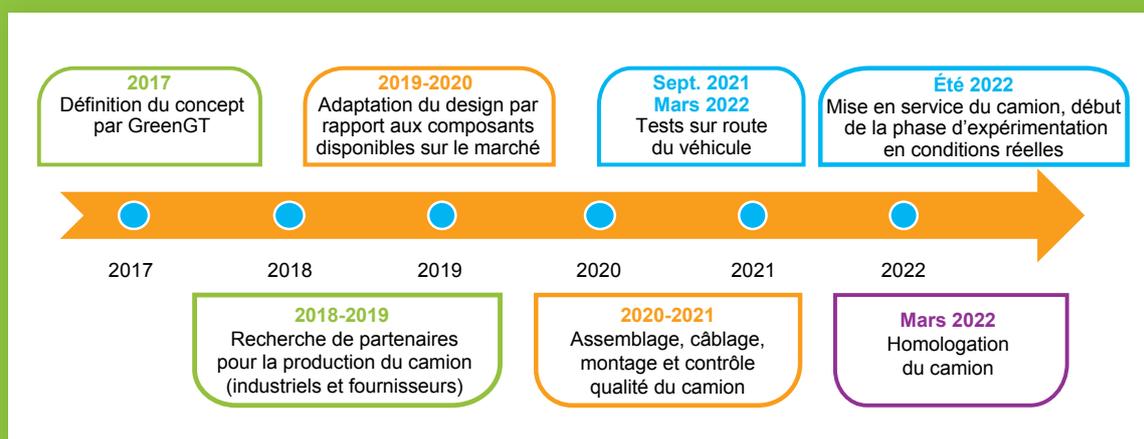
• Conception et déploiement d'un poids lourd électrique à hydrogène : l'exemple de CATHyOPÉ

La définition du concept de camion a commencé dans les ateliers de GreenGT dès 2017. En parallèle, un travail de recherche de partenaires industriels et de fournisseurs a débuté, pour une durée d'un an. Ce travail s'est avéré particulièrement complexe, dans la mesure où il était difficile d'identifier des composants certifiés, disponibles et abordables sans effet de volume. Il a ensuite été nécessaire d'adapter le design du véhicule par rapport aux composants disponibles sur le marché. De plus, comme il n'existait pas de fournisseurs de systèmes PAC suffisamment puissants, certifiés et économiquement abordables pour le camion à l'époque, GreenGT a choisi de concevoir lui-même le système PAC. S'en suivent les phases d'assemblage, de câblage, de montage et de contrôle qualité du véhicule.

Par la suite, le camion doit être testé pendant 6 mois. C'est une étape critique puisqu'elle prépare à l'homologation du véhicule. Durant cette phase, des tests d'utilisation de la station sont menés, différents trajets types sont réalisés afin d'effectuer des mesures extrapolables et de résoudre de possibles dysfonctionnements.

Aucune livraison n'est effectuée par le camion en phase de test, mais le véhicule peut transporter des gueuses qui simulent la charge. Le camion devrait entrer en phase d'homologation en mars 2022, pour une durée qui pourra varier de quelques semaines à plusieurs mois, en fonction des difficultés rencontrées et des remarques formulées par l'homologateur. C'est une étape exigeante, qui se prépare très en amont, et a débuté il y a plusieurs années. Durant cette phase, le véhicule sera immobilisé et testé dans un laboratoire accrédité par la DREAL. Enfin, à l'été 2022, le véhicule devrait entrer en exploitation pour le compte de Carrefour, en conditions réelles.

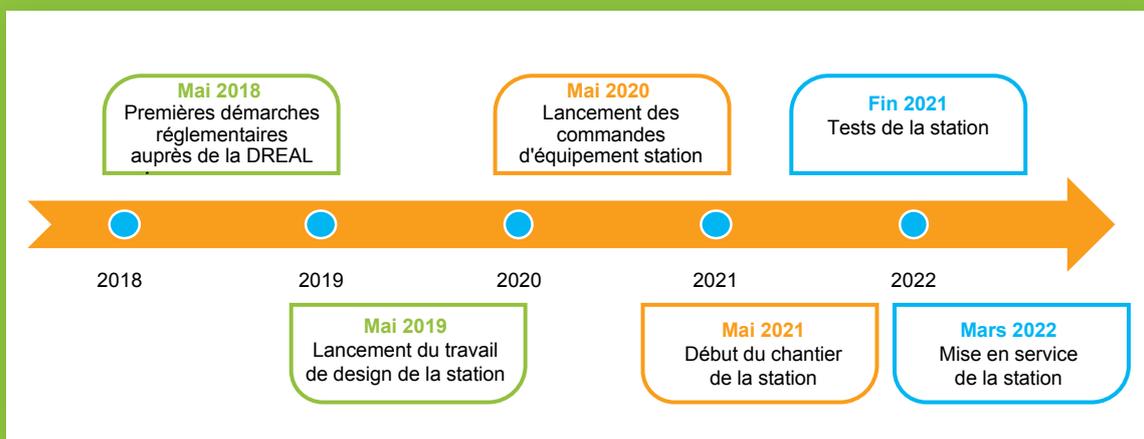
Figure 26 – Exemple du calendrier de conception et déploiement d'un camion électrique à hydrogène – Projet CATHyOPÉ



• Design et déploiement d'une station de distribution hydrogène : l'exemple de HyAMMED

La partie production et distribution de l'hydrogène a été développée dans le cadre de HyAMMED, dans lequel le projet CATHyOPÉ a pu s'inscrire. Le projet d'infrastructure a été développé par Air Liquide pour une implantation à Fos-sur-Mer. La mise en place de la station est divisée en 3 phases : conception, construction et installations/tests. Le chantier de la station en lui-même ne dure que quelques mois, mais les phases de design peuvent être relativement étendues, en particulier pour des stations innovantes. En effet, il s'agit de la première station grande capacité et haute pression en France, capable de délivrer 1 tonne d'hydrogène par jour à une pression de 700 bar pour les véhicules lourds. De plus, le cahier des charges de la station a été modifié dans sa phase de design, pour intégrer des adaptations des véhicules Iveco, dont la conception avait lieu en parallèle. La durée de développement des premières stations poids lourds doit être anticipée, mais tend à diminuer avec la multiplication de projets similaires.

Figure 27 - Exemple du calendrier de déploiement d'une station de distribution d'hydrogène - Projet HyAMMED



▪ Recherche de subventions : l'exemple de HyAMMED

La recherche de financements aux niveaux européens comme nationaux et régionaux nécessite de réunir tous les acteurs de la chaîne de valeur. Aux niveaux national et régional notamment, les appels à projets encouragent à la présentation de projets sous forme d'écosystèmes complets.

Cette phase de recherche de financements est particulièrement chronophage. La plupart des délais (signature de conventions, etc.) sont incompressibles.



Etude de cas



2.4.2 H2-Share

Aperçu du projet :

H2-Share est un projet de démonstration européen, visant à présenter le poids lourd électrique à hydrogène en Europe, et notamment en Allemagne, aux Pays-Bas, en Belgique et en France. Les démonstrations ont débuté en 2020.

L'objectif est de faire découvrir aux transporteurs et logisticiens le fonctionnement de la technologie électrique à hydrogène, notamment ses caractéristiques opérationnelles, de la recharge en station au processus de démarrage du camion. Ces tests doivent également permettre d'évaluer l'autonomie d'un véhicule lourd électrique à hydrogène sur le terrain, et de rassurer sur les craintes relatives à la sécurité. D'autre part, cette expérimentation permettra au constructeur d'obtenir des retours d'expérience sur sa technologie prototype pour l'améliorer.

Le camion testé est un porteur 27 tonnes, fourni par le constructeur néerlandais VDL. Il dispose d'un système de pile à combustible, ainsi que d'une batterie électrique permettant de prolonger l'autonomie du véhicule d'une centaine de kilomètres.

Afin de permettre à un grand nombre de transporteurs et logisticiens de tester ce véhicule, l'entreprise allemande Wystrach a conçu une station d'avitaillement en hydrogène mobile, qui peut être déplacée d'un pays à l'autre. Elle est exploitée par H2 MOBILITY Deutschland en Allemagne ou Air Liquide aux Pays-Bas, en Belgique et en France. Cette station comporte deux systèmes de stockage.

Tableau 3 - Caractéristiques du véhicule déployé dans le cadre spécifique du projet H2-Share

H2-Share	
1 porteur rigide 6x4, PTAC 27 t	
Constructeur :	
Fournisseur châssis :	
Fournisseur PAC :	
(88 kW brut, 60 kW net)	
Autonomie : 400 km	
Capacité du réservoir : 30 kgH ₂	
Pression du réservoir : 350 bar	
Temps de recharge : 10 minutes	
Capacité batteries : 84 kWh	
Puissance / couple moteur :	
210 kW / 2000 Nm	

Un petit container est utilisé directement pour la recharge, et un container plus conséquent, permet de stocker des quantités importantes d'hydrogène pendant la période de démonstration. Ainsi, la station est approvisionnée par camion en hydrogène renouvelable, produit en Allemagne ou aux Pays-Bas, en fonction du site de démonstration.

Le camion sera mis à disposition et exploité par divers transporteurs et logisticiens allemands, néerlandais, belges et français, notamment par DHL, BREYTNER BV et Colruyt Group.

Le projet est soutenu par l'Union Européenne, qui le subventionne à hauteur de 1,69 millions d'euros, sur un budget total de 3,52 millions d'euros.

Un premier retour d'expérience : Breytner Zero Emission Transport, aux Pays-Bas⁸⁴

Le camion a été utilisé d'avril 2020 à juin 2020 par Breytner Zero Emission Transport, transporteur néerlandais engagé dans une démarche de transport zéro émission.

Breytner Zero Emission Transport a ciblé trois cas d'utilisation différents pour tester le camion :

1. Le transport de ligne de Schelluinen à Rotterdam. Les marchandises étaient transportées depuis Schelluinen, par caisses mobiles. Ces caisses mobiles étaient ensuite transférées à un camion électrique à batterie à Rotterdam pour effectuer la livraison derniers kilomètres dans la ville.
2. Le transport de ligne vers un centre logistique dans la région de Brabant (livraison et ramassage de caisses mobiles).
3. Les flux de retours de produits par les clients. Cette activité a été relativement faible suite à la pandémie de Coronavirus, qui a impacté le nombre de jours de conduite.

Les stations de recharge utilisées durant cette partie de l'expérimentation se sont avérées fiables, et aucun problème majeur n'a été rencontré.

D'une manière générale, Breytner a bénéficié d'un très bon service et temps de réaction de la part de VDL, malgré quelques dysfonctionnements, principalement au début de la démonstration, ce qui est fréquent, un temps de rodage est en effet nécessaire. Pour VDL, Breytner Zero Emission Transport a été un partenaire de démonstration très flexible, ce qui crée une bonne courbe d'apprentissage pour le constructeur.

84- Wouter vd Laak (WaterstofNet), Octobre 2020. Rapport sur les données de suivi et d'expérience de l'utilisateur final par démonstration.

Au cours de l'expérimentation, l'un des tests s'est avéré peu concluant : Breytner a testé un trajet d'une longueur de 340 kilomètres, prenant habituellement 4,5 heures avec un camion Diesel. La pile à combustible s'est avérée insuffisante pour répondre aux besoins énergétiques du camion pour ce trajet. Malgré l'absence d'infrastructure de recharge en hydrogène sur le trajet, la mission a pu être réalisée en rechargeant la batterie embarquée. La recharge de la batterie a duré 3 heures, le trajet total a donc duré 7,5 heures au lieu de 4,5 heures pour un modèle diesel.

Ces premiers retours d'expérience permettent à VDL d'identifier les améliorations qui doivent être apportées pour les prochaines expérimentations.

Une deuxième démonstration : ABC Logistik en Allemagne⁸⁵

En novembre et décembre 2020, le camion a été exploité par le transporteur ABC Logistik, basé à Düsseldorf, en Allemagne. Il s'agissait de la deuxième des six démonstrations devant être réalisées dans le cadre du projet international H2-Share. Le camion a transporté jusqu'à huit tonnes de marchandises diverses (produits du commerce électronique), principalement sur les autoroutes et dans les zones industrielles. Le camion s'approvisionnait en hydrogène sous la supervision d'Air Liquide, à la station de Düsseldorf-Holthausen, exploitée par H2 MOBILITY Deutschland.

La démonstration a permis de mettre en évidence plusieurs points à améliorer pour la prochaine étape de développement. Les zones présentant de forts dénivelés par exemple, ont parfois constitué des défis et un moteur électrique plus puissant pourrait être nécessaire. Par ailleurs, les retours d'expériences sur ce projet permettent d'identifier une amélioration à apporter sur l'entrée d'air du haut du compresseur, afin de réduire encore davantage les nuisances sonores liées au véhicule.

De manière générale, la configuration du camion H2-Share est le fruit de compromis, étant donné la nécessité de procéder à de multiples démonstrations auprès de différents utilisateurs finaux. ABC Logistik a conclu que la plupart de ces défis peuvent être surmontés et souhaite poursuivre les tests dans une phase suivante.

85-Communiqué de presse, Février 2021. La démonstration de ABC Logistik, un succès à Düsseldorf.

Michael te Heesen, directeur général d'ABC Logistik, s'est exprimé sur le sujet : *“En tant que prestataire de services logistiques privé s'intéressant de près aux concepts et technologies de logistique durable, nous avons été très heureux d'être invités à participer à cette phase de tests. Bien que le véhicule soit encore un prototype, son utilisation a laissé de nombreuses impressions positives. Nous sommes convaincus que la technologie de l'hydrogène sera bientôt prête pour une utilisation opérationnelle quotidienne. Il reste maintenant à améliorer l'approvisionnement en hydrogène et le réseau de stations de ravitaillement, tout en réduisant les prix du carburant.”*

Une expérimentation à venir en France et en Belgique : Colruyt Group

Colruyt est une chaîne de supermarchés belge qui s'est également implantée en France en 1997, et compte aujourd'hui une centaine d'enseignes sur le territoire. Le groupe compte également des stations-services en Belgique et en France (une quarantaine en France), sous l'enseigne DATS 24. L'entreprise est propriétaire d'un parc offshore de 200 éoliennes en Belgique, et d'infrastructures photovoltaïques sur l'ensemble de ses magasins.

Lors des expérimentations en France et en Belgique, Colruyt mettra un camion électrique à hydrogène à disposition de ses transporteurs, pour qu'ils puissent tester la technologie. En France, les tests du camion VDL auront lieu dans la région de Dole. Les enseignes Colruyt françaises étant relativement proches (à une quarantaine de kilomètres les unes des autres, dans un rayon de 300 km autour de Dole), le véhicule remplira des missions de type « livraison des derniers kilomètres ». En Belgique en revanche, les missions seront de type « transport régional », et pourront présenter des kilométrages d'environ 180 km.

Point réglementation et décrets :

La réglementation concernant les stations multi-énergies varie selon les pays, et est particulièrement stricte en France.

En Belgique, la réglementation multi-énergie est relativement souple : sur 600 m² en Belgique, il est possible d'installer à la fois des pompes hydrogène, gazole, GNV et une borne de recharge électrique. Seuls des murs coupe-feux sont requis entre chaque type d'infrastructure de distribution. En France, la réglementation est plus stricte, il faudrait 10 000 m² pour proposer une offre équivalente. Cela incite certains exploitants de stations-services en France à une transition directe du diesel à l'hydrogène, sans passer par le GNV.



2.4.3 Corridor H2

Aperçu du projet :

Corridor H2 est un projet d'ambition européenne, soutenu par la Région Occitanie, qui vise à décarboner le transport de marchandises mais également de passagers sur l'axe Nord/Sud du réseau transeuropéen de transport (RTE-T) allant de la Méditerranée à la Mer du Nord, en développant les usages de l'hydrogène renouvelable et bas carbone pour les camions, les groupes frigorifiques et les autocars.

Ainsi, le projet doit amener à équiper l'ensemble des corridors européens en stations à hydrogène à terme. Dans un premier temps, les infrastructures seront déployées sur les corridors régionaux, afin de créer les premiers éléments de ce réseau, en adressant des usages régionaux pour lesquels l'approvisionnement en hydrogène sera sécurisé localement.

Afin de tenir compte des niveaux de maturité différents selon les régions, le déploiement du projet se déroule par phases, à commencer par le corridor Occitan. L'hydrogène fait partie de la stratégie de transition énergétique de la Région Occitanie et de son ambition de devenir la première Région à énergie positive d'Europe. Ainsi, un budget de 150 millions d'euros a été alloué à cette technologie d'ici 2030.

En Occitanie, l'objectif est de déployer, d'ici fin 2023 :

- 2 unités de production d'hydrogène renouvelable (de 5 à 20 MW) ;
- 8 stations de distribution d'hydrogène (de capacités allant de 600 à 1200 kgH₂/jour) ;
- 40 camions à propulsion hydrogène, 22 unités réfrigérées, 40 remorques frigorifiques et 15 autocars H₂ en rétrofit.

Les infrastructures se situeront le long du réseau RTE-T, à une distance de moins de 10 kilomètres des axes principaux ou secondaires du réseau, le long de l'A9, de l'A61, et de l'A68, desservant principalement d'importants périmètres logistiques tels que Montpellier, Narbonne, Perpignan, Toulouse, Albi...

Portage du projet :

L'action de la Région s'étend au-delà de la mobilisation des acteurs régionaux, puisqu'elle participe pleinement au financement du projet, que ce soit via l'achat des autocars rétrofités, ou la sécurisation de financements auprès de guichets européens. Ainsi, le projet est soutenu par la Banque Européenne d'Investissement via un prêt de 40 millions d'euros, et par la Commission européenne, à travers une subvention de 14,5 millions d'euros.

Le 16 avril 2021, le conseil régional a voté la mise en place de deux dispositifs destinés à sélectionner les différentes entreprises qui participeront au projet :

- Un appel à projet dédié aux fournisseurs d'hydrogène. Celui-ci vise à sélectionner et à soutenir les acteurs qui s'engageront dans le déploiement d'infrastructures pour produire, conditionner, transporter et distribuer de l'hydrogène aux futurs usagers.
- Un appel à manifestation d'intérêt à destination des acteurs du transport de marchandises, qui bénéficieront d'un soutien financier pour acquérir des véhicules hydrogène (camions, remorques, unités frigorifiques fonctionnant à l'hydrogène).

Ces dispositifs ont permis d'identifier et d'annoncer les premiers partenaires du projet.



Etude de cas



2.4.4 Hyundai, Suisse

Aperçu du projet :

La joint-venture Hyundai Hydrogen Mobility fait naître un projet majeur de déploiement de 1600 camions électriques à hydrogène sur le territoire suisse, dont la mise en service sera étalée de 2020 à 2025.



Les collaborateurs principaux de ce projet de déploiement sont H2 Mobility Switzerland Association, opérateur de stations hydrogène, et Hydrospider, qui forment la joint-venture. L'association H2 Mobility est composée d'entreprises et d'industriels engagés dans la mobilité hydrogène, et louera une partie des camions. Hydrospider est une entreprise commune entre Alpiq (fournisseur d'électricité renouvelable), H2 Energy (distributeur) et Linde. Hyundai Hydrogen Mobility sera en charge de la partie construction et location des camions, Hydrospider de la partie production et logistique de l'hydrogène, et l'association H2 Mobility Switzerland de la partie exploitation des infrastructures de distribution de l'hydrogène.

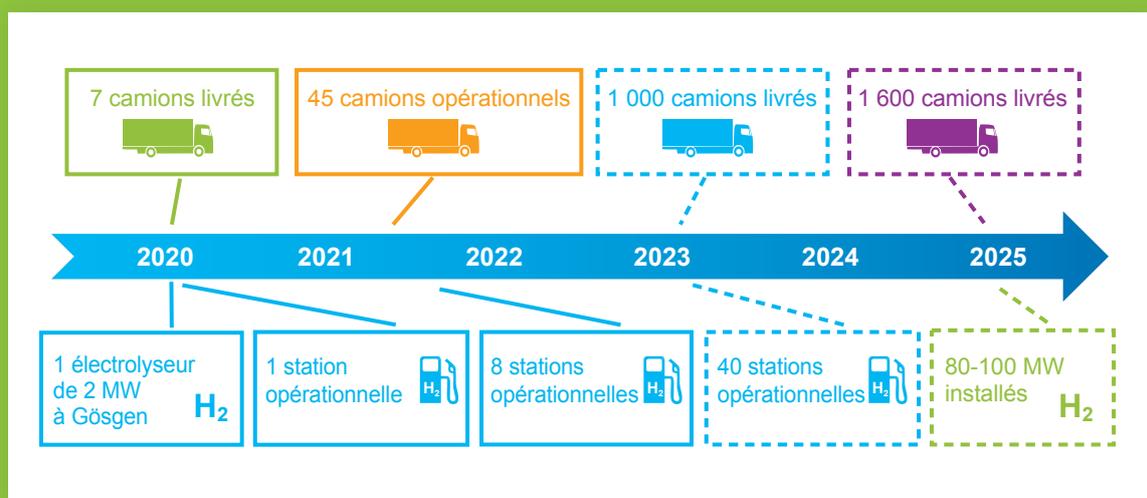
Ce projet s'inscrit sur un territoire marqué par une politique fiscale particulièrement désavantageuse pour le diesel, qui permet la compétitivité économique de l'électrique à hydrogène dès les premières unités. En effet, le territoire suisse est sujet à la redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP). Il s'agit d'une redevance fédérale qui dépend du poids du véhicule en transit, de sa catégorie d'émission et du nombre de kilomètres qu'il parcourt en Suisse et dans la principauté de Liechtenstein.

A titre d'exemple, cela représente un montant de 41 050 €/an, pour un camion Euro VI de 18 tonnes, parcourant 100 000 km par an⁸⁶.

Planning de mise en service des poids lourds, stations et électrolyseurs :

Les premiers camions ont été livrés en 2020 à sept chargeurs et transporteurs suisses, et sont en circulation. Ils ont été produits en Corée et transportés jusqu'en Europe. Comme le montre le calendrier de déploiement Figure 28, ils sont suivis par de nombreux déploiements supplémentaires, de véhicules, qui totalisent plus d'un million de kilomètres parcourus en cumulé à l'été 2021, mais également d'infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène.

Figure 28 – Calendrier des déploiements de véhicules et d'infrastructures en Suisse



Caractéristiques des véhicules :

Les véhicules déployés sont des porteurs 4x2 et 6x2, dont les PTAC varient de 36 à 40 tonnes. Ils peuvent atteindre la vitesse de 85 km/h.

⁸⁶-Administration fédérale des douanes AFD, 2021. RPLP - Généralités / Tarifs

Les principales caractéristiques des poids lourds Xcient Fuel Cell déployés en Suisse sont décrites sur le schéma de Hyundai Mobility, Figure 29 ci-dessous⁸⁷.

Figure 29 – Caractéristiques du Hyundai Xcient Fuel Cell, Suisse - © HYUNDAI⁸⁷

Réservoir H₂ de type 4, capacité de 31 kgH₂, stockés à 350 bar, rechargeables en 8 à 20 minutes

Caisses frigorifiques, caisses sèches ou bâches / rideaux de monteurs certifiés en Suisse, en Allemagne et dans d'autres pays européens

2 PAC de 90 kW chacune

ADR (sauf EX II/ III, AT, FL)



Batteries de 72 kWh au total

Autonomie du 4x2 entièrement chargé avec une caisse réfrigérée et une remorque : environ 400 km (dans la Hyundai Xcient de Lausanne à St-Gall avec un seul réservoir de carburant)

Moteur électrique 350 kW, couple de 2237 Nm

Caractéristiques du réseau de recharge et de service :

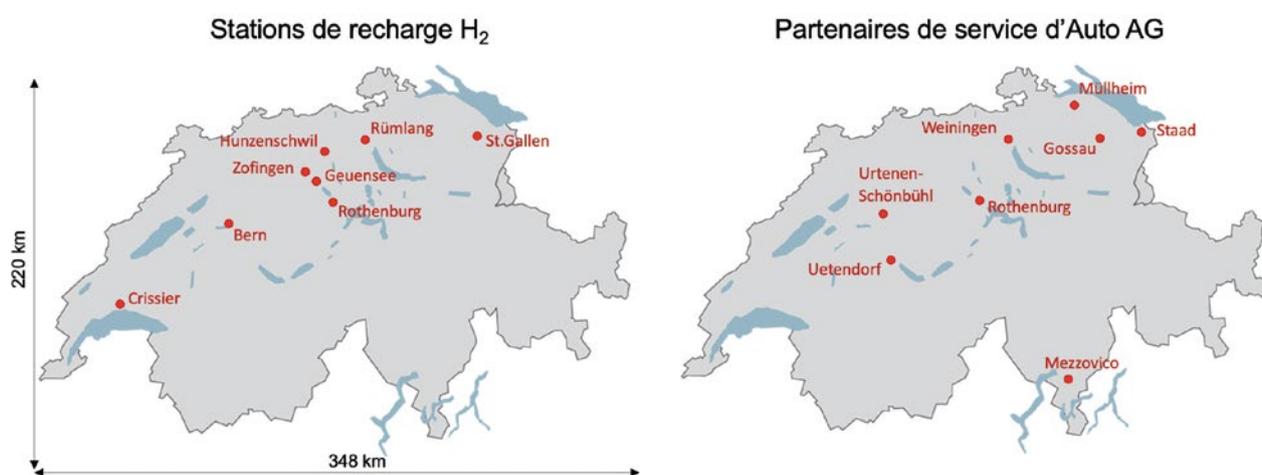
Les centrales hydroélectriques, les parcs éoliens et les systèmes photovoltaïques fournissent de l'électricité renouvelable pour l'électrolyse.

L'hydrogène produit est stocké dans des conteneurs spécialement conçus pour la manipulation des gaz et livrés aux stations-services.

87- Illustration présentée par Daniel Keller, COO de Hyundai Hydrogen Mobility, lors du Séminaire HUGÉ : « Challenges and opportunities in Switzerland - lessons learnt », Juin 2021.

A ce stade, huit stations ont été déployées sur le territoire suisse. Un réseau de partenaires de service se développe en parallèle (voir carte Figure 30).

Figure 30 - Emplacement des stations hydrogène et partenaires de service en Suisse - © HYUNDAI



87-Illustration présentée par Daniel Keller, COO de Hyundai Hydrogen Mobility, lors du Séminaire HUGÉ : « Challenges and opportunities in Switzerland - lessons learnt », Juin 2021.



Etude
de cas



HyTrucks

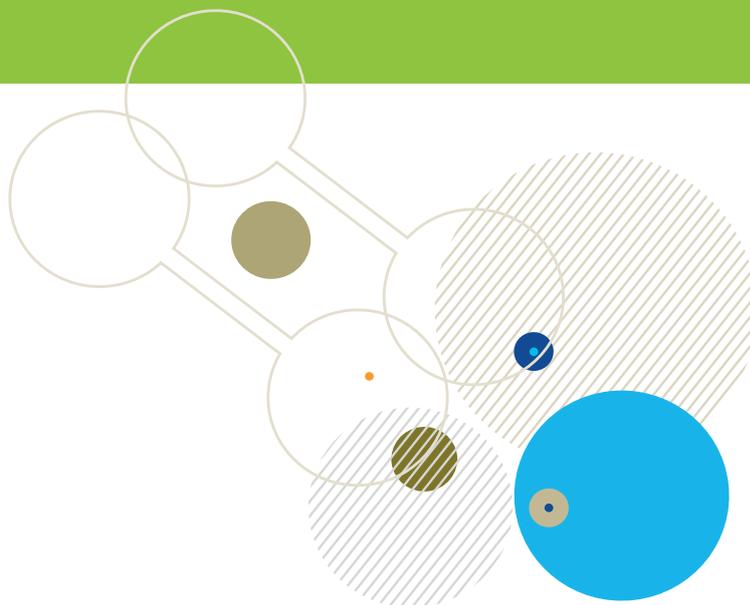
2.4.5 HyTrucks

Aperçu du projet :

Le consortium HyTrucks, formé à l'initiative d'Air Liquide autour des ports de Rotterdam, Anvers, et Duisbourg, est l'une des plus grandes initiatives européennes visant à déployer des flottes de véhicules lourds à zéro émission dans les corridors de transport les plus fréquentés du continent.

Plusieurs fournisseurs de véhicules lourds européens et internationaux soutiendront l'objectif du programme, qui consiste à mettre en circulation 1 000 camions électriques à hydrogène et à créer 25 nouvelles stations de ravitaillement d'ici à 2025, afin de faciliter les déplacements routiers sans émissions entre la Belgique, les Pays-Bas et l'ouest de l'Allemagne. Plus de 100 000 tonnes de CO₂ par an, soit l'équivalent de 110 millions de kilomètres parcourus, pourraient être évitées grâce à ce projet⁸⁸.

88- Communiqué de presse Hyzon, juillet 2021. Hyzon Motors signe un accord pour participer au programme HyTrucks de 1.000 véhicules





Entretien avec un membre du consortium HyTrucks

20/07/2021 – Stéphane GREE, Air Liquide, Directeur Business Marketing

Quelles sont les caractéristiques principales des véhicules et stations qui seront déployés ?

HyTrucks se concentre sur l'activité de transport de marchandises des ports de Rotterdam, d'Anvers et de Duisbourg (interne et entre les ports). Les marchandises transportées pouvant être très variées, les principaux types de véhicules déployés seront des tracteurs à semi-remorques 40 tonnes, mais des porteurs rigides pourraient également être envisagés.

Les infrastructures d'approvisionnement, 20 à 25 stations, seront installées progressivement, en fonction de l'arrivée des camions. L'hydrogène qui alimentera ces stations devra être bas carbone à minima.

Les véhicules assureront dans un premier temps des missions de transport régional. Cependant, le projet est susceptible d'être dupliqué dans d'autres centres de logistique, ce qui permettra par la suite d'adresser à fortiori les grands corridors, entre pôles équipés.

Comment s'organise le portage du projet ?

L'initiative HyTrucks est portée par un consortium, dont les parties prenantes occupent toute la chaîne de valeur, incluant la production et la distribution de l'hydrogène, la construction des véhicules, l'usage (transporteurs et chargeurs), mais aussi les acteurs du support public et des financements.

Le choix des constructeurs, transporteurs et chargeurs n'est pas encore entièrement officialisé à date d'écriture de ce document. Des annonces ont cependant été faites :

▪ Le communiqué de presse du 06/07/2020 d'Air Liquide et du Port de Rotterdam indique les parties prenantes suivantes aux Pays-Bas : VDL et Iveco/Nikola du côté des constructeurs, Vos Logistics, Jongeneel Transport du côté des sociétés de transport ;

- Le communiqué de presse du 06/05/2021 annonce en plus de la participation d'Air Liquide en Belgique, celles du Port d'Anvers et de DATS 24 (stations-services Colruyt) ;
- Le constructeur Hyzon Motors est également partenaire du projet.

Afin de financer les projets, chaque entreprise pourra obtenir des fonds individuellement (notamment au niveau national) pour ses investissements, et le consortium pourra déposer des dossiers communs, notamment au niveau européen.

Quels sont les éléments qui ont encouragé le choix de l'hydrogène pour ce projet ?

D'une part, le lancement de l'IPCEI hydrogène par la Commission européenne a motivé cette initiative. La labellisation IPCEI permet aux Etats européens de financer sur fonds publics jusqu'à 100 % du surcoût des projets jugés essentiels pour la compétitivité européenne. Ainsi, le concept HyTrucks a été présenté à l'IPCEI par Air Liquide, sur le segment des infrastructures - comprenant la production, le transport et la distribution de l'hydrogène dans des stations innovantes, de grandes capacités et permettant une recharge rapide - et par d'autres partenaires du consortium, notamment sur le segment des véhicules. Le projet a été présélectionné en Belgique et aux Pays-Bas et associé à un autre projet sélectionné en Allemagne. La recherche de financements aux niveaux nationaux et européens est en cours en 2021.

D'autre part, la réglementation européenne imposant aux constructeurs de poids lourds de réduire les émissions de GES des véhicules vendus de 15 % en 2025 et de 30 % en 2030 par rapport à 2019 a encouragé cette initiative. En effet, cette politique européenne impose la décarbonation d'une part importante des véhicules vendus, et une pénalisation augmentant dans le temps sera mise en place dès 2025. Ainsi, d'ici 2030, les véhicules zéro émission pourraient représenter une part significative du marché des 300 000 à 400 000 poids lourds de plus de 12 tonnes produits chaque année en Europe ; par exemple Hydrogen Europe estime que 100 000 poids lourds à hydrogène pourraient circuler en Europe à cet horizon. Par conséquent, les constructeurs doivent être prêts bien avant 2030, ce qui implique qu'une commercialisation issue d'une production en série doit commencer probablement avant 2027-2028.



Les projets assurant le déploiement des infrastructures adaptées à cette technologie sont donc clé pour le secteur.

A ce stade, quel retour d'expérience souhaitez-vous partager sur la phase de montage du projet ?

L'intérêt des opérateurs de flottes pour les poids lourds électriques à hydrogène est fort, mais il est difficile de sécuriser des engagements de déploiements sur les 1000 unités annoncées à ce stade, car les coûts restent élevés. Les niveaux d'engagement pour la suite du projet dépendront des financements sécurisés par les partenaires, puisque le principal facteur influençant le positionnement des opérateurs et exploitants de flottes sur la technologie électrique à hydrogène est le coût total de possession du véhicule. Un surcoût d'environ 10 % par rapport au diesel serait acceptable à terme. L'objectif est donc de sécuriser des prix de l'hydrogène à la pompe et un prix d'achat des véhicules proches de la parité diesel après subvention, ce qui nécessite un passage à l'échelle des différents systèmes sur toute la chaîne de valeur.

Ainsi, afin de mettre en place des projets économiquement viables, il est indispensable de réunir des acteurs de l'ensemble de la chaîne de valeur, pour assurer des investissements concertés, et une mutualisation des usages. Cela permettra d'assurer le déploiement d'infrastructures de taille significative et de les charger rapidement afin de bénéficier des effets d'échelle. Les prix d'achat de l'hydrogène par exemple, pourront diminuer si les coûts de production baissent. Cela passe notamment par la mise en place d'une production massive centralisée, pouvant adresser plusieurs marchés, soit sous forme d'hydrogène gazeux et un acheminement par réseau de canalisations ou trailers haute-pression, soit sous forme d'hydrogène liquide et acheminement par trailers liquide.

En parallèle, la mise en place des mécanismes de marché favorisant l'hydrogène, comme la taxe carbone, les avantages aux péages pour les véhicules zéro émission ou les restrictions d'accès, doit être activée.

Les modèles économiques associés aux premiers projets de déploiements sont également clés. Une offre de leasing, tout inclus, hydrogène compris, peut permettre d'atténuer la perception du risque par les transporteurs durant la phase d'amorçage de la filière.

Quels sont les points de vigilance réglementaire identifiés lors du montage de ce projet ?

Il est important d'identifier les décrets et les objectifs fixés par les gouvernements de chaque pays où ont lieu les déploiements, car ils diffèrent entre Etats européens. Des points de vigilance sont à signaler sur les éléments suivants :

- *Les critères d'éligibilité aux subventions nationales sont différents selon les pays (caractéristiques des véhicules et production de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone...);*
- *Les décrets locaux imposant une transition aux véhicules zéro émission varient selon les pays ;*
- *La quantité maximale d'hydrogène stockable sur un site peut varier (en France par exemple, le stockage d'une quantité d'hydrogène inférieure à 1 tonne est seulement soumis au régime de déclaration) ;*
- *Il est nécessaire de faire évoluer la réglementation pour permettre l'implémentation d'une chaîne de fourniture d'hydrogène liquide pour rendre encore plus compétitives les stations de grosse capacité dédiées aux camions.*





Etude
de cas

H2Accelerate

2.4.6 H2Accelerate

Aperçu du projet :

L'alliance H2Accelerate réunit des producteurs d'hydrogène, des exploitants d'infrastructures et des constructeurs de véhicules, à savoir Shell, Linde, TotalEnergies, Iveco, Daimler Truck, OMV et Volvo Group, qui travaillent ensemble pour activer le marché sur la voie d'un déploiement de masse⁹⁴.

Le groupe travaille en collaboration sur 3 axes principaux :

- La recherche de soutiens publics pour le financement des premiers projets ;
- Le développement d'une base de données publique et probante sur la viabilité technique et commerciale du camion électrique à hydrogène à l'échelle ;
- Les échanges avec les décideurs et les régulateurs afin d'encourager les politiques de soutien.

La vision H2Accelerate des phases de déploiement du camion électrique à hydrogène :

Le groupe prévoit un déploiement des camions et des réseaux de ravitaillement en trois phases progressives :

▪ Phase 1 - « R&D and deployment » :

Cette première étape doit permettre le déploiement de centaines de camions et de dizaines de stations de ravitaillement à haute capacité dans des pôles d'activité régionaux.

▪ Phase 2 - « Industrial scale up » :

Dans un deuxième temps, le passage à l'échelle industrielle doit favoriser le déploiement de milliers de camions, et une extension du réseau de ravitaillement le long des corridors RTE-T.

▪ Phase 3 - « Sustainable growth » :

Cette dernière étape doit permettre d'assurer la croissance durable d'un marché de plusieurs dizaines de milliers de camions sur les routes européennes, et de centaines de stations de ravitaillement les approvisionnant.

89-<https://h2accelerate.eu/>

Conclusion de la partie 2 : Quelle dynamique actuelle et en construction pour ce secteur en France et en Europe ?

- Les premiers poids lourds électriques à hydrogène pour le transport de marchandises voient actuellement le jour en France et en Europe. Ils sont développés par des constructeurs historiques européens, mais également par des concepteurs de véhicules innovants, des acteurs du retrofit et de nouveaux entrants internationaux, soutenus par des équipementiers se positionnant également sur cette filière, notamment français.
- Aujourd'hui, la phase d'émergence de cette filière s'accélère, et des constructeurs se mettent en ordre de marche pour livrer plusieurs dizaines d'unités par an, aux caractéristiques opérationnelles permettant d'atteindre de 400 à 800 km d'autonomie, adaptées à des usages régionaux par exemple, mais bientôt interrégionaux également.
- La majorité des constructeurs européens se penchent aujourd'hui sur la technologie électrique à hydrogène, et certains d'entre eux proposeront une offre complète dans la seconde moitié de la décennie, après de premières pré-séries dès 2023-2024. Les caractéristiques opérationnelles de ces véhicules seront encore améliorées par rapport aux premiers véhicules déployés, et permettront d'atteindre 1000 km d'autonomie.
- En parallèle, l'offre d'infrastructures de distribution de l'hydrogène se développe. Les premières stations dédiées aux poids lourds de transport de marchandises sont implantées au cœur des bassins logistiques, initiant de premiers pôles hydrogène régionaux. En parallèle, la construction d'un réseau au maillage le long des réseaux RTE-T débute, et devrait couvrir à terme l'ensemble du territoire français et frontalier, permettant d'adresser le transport long-courrier. La révision de la directive DAFI en 2021, devenant la réglementation AFIR, impose le déploiement d'un maillage de stations de ravitaillement en hydrogène avec une distance maximale de 150 km entre elles le long du réseau complet du RTE-T d'ici le 31 décembre 2030.
- Dans le même temps, des collaborations fortes entre les constructeurs de poids lourds, d'infrastructures de recharge et les énergéticiens résultent en un nombre grandissant d'initiatives françaises et européennes, qui permettent une forte accélération de la filière. Au-delà des directives et autres outils réglementaires, le déploiement de ces infrastructures est notamment accompagné par le nouveau mécanisme pour l'interconnexion en Europe (MIE, CEF en anglais), visant à financer les infrastructures de carburants alternatifs, et doté de 1,2 Md€. Celui-ci sera détaillé au même titre que les principales aides européennes et nationales dans la prochaine partie.

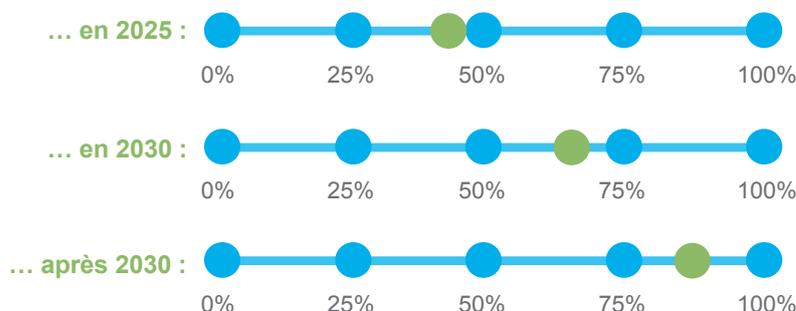
3 Comment construire un projet de déploiement de poids lourds électriques à hydrogène pour le transport de marchandises ?

Dans le cadre de l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le Groupe France Hydrogène Mobilité⁹⁰, les acteurs de la filière du transport routier ont exprimé et confirmé leur souhait d'intégrer à leur flotte des véhicules zéro émission. Ils ont pour objectif de faire basculer plus d'un tiers de leur flotte sur du zéro émission dès 2025, et de poursuivre leurs efforts pour atteindre les deux tiers de véhicules zéro émission en 2030 (voir Figure 31).

Figure 31 - Réponses de 38 acteurs français et européens aux questions

«Pour quelle part de votre flotte envisagez-vous d'atteindre l'objectif zéro émission (à l'échappement) dans les 5 prochaines années ? D'ici 2030 ? Après 2030 ?»

Part moyenne des véhicules à émission zéro dans les flottes de camions des répondants...



En 2021, on assiste aux premiers déploiements permettant la mise en exploitation de prototypes de camions électriques à hydrogène en démonstration ou en conditions d'exploitations commerciales. Les objectifs de cette phase sont d'une part, de concrétiser et mettre à l'épreuve cette nouvelle technologie pour pouvoir en améliorer les performances techniques, et d'autre part, de permettre aux chargeurs et transporteurs de comprendre les implications de ce type de véhicules en termes d'organisation du parc et d'utilisation, pour disposer d'une logistique déjà optimisée lorsque les déploiements se généraliseront.

⁹⁰-Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

A ce stade, les surcoûts impliqués sont importants, car ils comprennent les efforts de R&D du côté des véhicules comme des stations et ne bénéficient pas encore d'effet d'échelle dans la production des équipements. Les acteurs pionniers qui s'engagent actuellement assument en partie ce surcoût car ils souhaitent mener des expériences préliminaires, dans le but de maîtriser le sujet lorsque la solution sera mature. Ils sollicitent également des supports financiers, notamment français et européens. Ils acceptent de s'investir fortement pour la construction d'un projet, et s'engagent pendant plusieurs années sur le dossier.

L'offre en infrastructures de distribution étant limitée à ce stade, ces déploiements de véhicules sont organisés en alignement avec la mise en place d'infrastructures de recharge, notamment autour de bassins logistiques, au cœur desquels sont implantées les stations de production et de distribution de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone. Ainsi, pour les activités permettant le retour au dépôt chaque jour d'une partie des camions qui pourront être sélectionnés pour expérimentation, l'approvisionnement en hydrogène sera sécurisé. Cela pourra par exemple concerner le marché de vrac, la messagerie, ou encore le dégroupage, qui permettent dans certains cas un retour du véhicule au centre logistique chaque jour.

De nombreux projets de poids lourds ont été annoncés publiquement en France. Ces projets permettent la mise en place progressive d'écosystèmes régionaux, séparés par de grands corridors autoroutiers encore non équipés en infrastructures de recharge. Le projet DBeaut'Hy truck par exemple, coopération entre Schenker France, Engie, E-Néo et L'Oréal, vise à construire un nouveau modèle économique disruptif grâce à la solution de retrofit, en partenariat avec de grandes sociétés de leasing.

Ce chapitre vise à donner un aperçu des éléments nécessaires au montage d'un projet, en complément aux études de cas présentées en section 2.4, et regroupe des informations visant à aider et faciliter leur développement. Il présente notamment les points de vigilance clés identifiés par les porteurs de projets pionniers, les coûts totaux de possession actuels, associés aux décroissances attendues dans la décennie, et aux mécanismes d'aides mis en place pour favoriser l'amorçage de la filière, ainsi que les considérations réglementaires à connaître lors du montage d'un projet.

L'objectif dans ce premier temps sera de voir apparaître une offre petite série de véhicules, et un réseau de stations de distribution couvrant la plupart des grands pôles logistiques du territoire.

Dans un second temps, des projets de types corridors de transport permettront les développements pour le transport long-courrier. En effet, une fois les grands centres logistiques équipés en infrastructures, des stations pourront être déployées sur les corridors pour les relier. La phase expérimentale en cours laisse le temps à la réglementation des stations multi-énergies d'évoluer, ce qui permettra d'envisager plus facilement le déploiement de bornes de recharge hydrogène sur des stations déjà existantes.

En parallèle, l'offre des constructeurs devrait se développer progressivement, avec les productions petites séries à horizon 2023-2024 et les productions séries à horizon 2027-2028. A ce stade, le coût total de possession (TCO pour Total Cost of Ownership, en anglais) des véhicules devrait diminuer sous les effets de volumes (voir section 3.2).

3.1. Quelles clés pour construire un projet de déploiement ?

Les premiers déploiements de poids lourds électriques à hydrogène ont un rôle majeur à jouer dans le développement de la filière. En effet, il s'agit de favoriser une montée en compétence rapide, par les interactions entre les acteurs de la filière, et de démontrer opérationnellement la pertinence de la technologie hydrogène pour les différents segments de poids lourds. Il s'agit en outre de communiquer auprès des opérateurs de camions afin de favoriser l'adoption de la technologie. De fait, les premiers déploiements ont également une responsabilité importante puisqu'ils sont et seront scrutés par les acteurs du transport routier lourd pour évaluer cette technologie innovante. Afin d'assurer le succès des premiers déploiements expérimentaux de poids lourds électriques à hydrogène, l'une des clés est de s'appuyer sur des acteurs ayant déjà réalisé ce type de projets, afin de partager les retours d'expériences, positifs comme négatifs, et ainsi dé-risquer les investissements autant que possible.

A ce jour, les différents retours d'expérience sollicités dans le cadre de la rédaction de ce document soulignent trois facteurs clés pour favoriser des premiers déploiements de camions électriques à hydrogène, présentés ci-dessous.

1. Réunir et mobiliser conjointement des acteurs intervenant sur l'ensemble de la chaîne de valeur

Le développement de projets nécessite l'implication d'acteurs sur l'ensemble de la chaîne de valeur, ayant la volonté de s'impliquer dans des premiers projets de déploiements ambitieux et structurants. Ainsi, les chargeurs, transporteurs, constructeurs de véhicules, fabricants d'équipements, exploitants de stations, énergéticiens et producteurs d'hydrogène doivent être identifiés et impliqués dans l'initiative dès le début du projet.

La prise en compte des différentes parties-prenantes est indispensable :

- **Les utilisateurs des véhicules au sens large** : pour les transporteurs, la transition vers l'électrique à hydrogène peut constituer un changement dans la gestion des flottes (formation des techniciens, support et maintenance des véhicules, cycle de renouvellement des véhicules, montant des investissements, etc.). Leur implication est clé pour obtenir leur retour d'expérience sur l'utilisation des véhicules et favoriser le développement d'une offre adaptée à leurs besoins. Les chargeurs, clients finaux de la prestation, doivent également adhérer dès le début à la solution proposée, en comprendre les contraintes et les performances, sur les plans économiques, opérationnels et environnementaux, puisqu'ils assument le risque lié à l'exploitation.
- **Les constructeurs de camions électriques à hydrogène et fournisseurs d'équipements associés** : qui vont proposer respectivement une offre de véhicules, permise par une offre d'équipements spécifiques, PAC et réservoirs à hydrogène, mais également contribuer à développer en parallèle une offre de maintenance et de SAV spécifique à l'électrique à hydrogène, qui nécessite le développement d'un ensemble de compétences adaptées, notamment en électromécanique.
- **Les constructeurs et exploitants d'infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène** : des financeurs du projet au constructeur de station, ils jouent un rôle central dans la conception des solutions les plus adaptées aux usages identifiés. Chaque projet nécessite une étude approfondie du besoin, afin de concevoir les infrastructures les plus pertinentes.

2. Mettre en place l'ensemble des éléments permettant de favoriser le TCO (ou coût total de possession)

Comme précédemment souligné, les surcoûts observés sur les premières unités de camions électriques à hydrogène sont importants, mais les perspectives de réductions des coûts nécessaires à l'adoption massive de la technologie par les opérateurs sont nombreuses. Sur le court terme, le déploiement des poids lourds électriques à hydrogène peut être favorisé par l'attribution de subventions européennes, nationales et régionales pour les véhicules, mais également pour les infrastructures de production et de distribution d'hydrogène. A ce jour, les guichets de financements (au niveau national notamment) insistent sur une approche en écosystème afin de favoriser le déploiement coordonné d'infrastructures de production, de distribution, et d'usages, si possible multiples, publics et privés. Les subventions attribuées par ces guichets ont un double impact : elles permettent à la fois de réduire l'écart de coût d'investissement (en diminuant le prix d'achat des véhicules pour les opérateurs) et de diminuer le surcoût opérationnel (en tirant le prix de l'hydrogène à la pompe vers le bas).

Si ces financements ne gommant pas entièrement le surcoût de l'électrique à hydrogène par rapport au diesel, ils viennent supporter l'effort de transition des acteurs engagés dans le développement d'une filière décarbonée et d'avenir. L'ensemble des partenaires impliqués dans les premiers projets prennent part à l'effort financier, en partageant les surcoûts (les transporteurs et les chargeurs peuvent par exemple éventuellement cofinancer les surcoûts liés aux véhicules). Le succès de ces premiers projets de déploiements, qui reposent sur la coopération et la coordination d'acteurs engagés sur l'ensemble de la chaîne de valeur, permettra d'initier le développement d'un véritable marché du poids lourd électrique à hydrogène, en France et en Europe. Dans cette phase d'amorçage, les acteurs qui s'engagent bénéficieront d'une montée en compétence rapide sur la technologie hydrogène et pourront à leur tour participer à l'accélération du marché de l'hydrogène.

Les projections des coûts totaux de possessions de 2021 à 2030 seront présentées en section 3.2, et les aides disponibles pour absorber une partie du surcoût initial seront détaillées.

3. Anticiper les calendriers et délais relatifs à la mise en place de toute technologie innovante

Les premiers projets de déploiements nécessitent de bien appréhender les impératifs de calendrier. En effet, les différentes étapes du montage de projet impliquent des temps qui doivent être considérés pour la recherche de partenaires, préparation des demandes de subventions par les porteurs de projets, signature des conventions de financement, démarches d'obtention de permis et de conformités réglementaires, puis concrètement construction des infrastructures et des véhicules, etc.

La période de **montage de projet** est à ce titre aujourd'hui variable en fonction des projets considérés. Elle se déroulera typiquement sur plusieurs années, dépendamment de la complexité du projet, de ses dimensions, de son caractère innovant et du nombre de parties prenantes impliquées. En outre, la **recherche de financements** peut avoir lieu en parallèle de la phase de montage de projet. Il faut noter à ce propos qu'entre le dépôt du dossier et la signature d'une convention de financement, il faut en général compter près d'un an.

Il faut également considérer le temps de **construction et de mise en service des infrastructures de recharge**. De la planification à la mise en service, l'installation d'une station de distribution (voire également de production d'hydrogène sur site) prend actuellement environ 2 ans, dont une année dédiée à la phase de construction, livraison, essais et mise en service. Ainsi, on peut typiquement observer un délai de 10 mois à partir de la commande :

- 6 ou 7 mois pour la phase d'approvisionnement en composants et ingénierie projet ;
- Environ 2 mois pour la phase de construction de la station de distribution ;
- 1 ou 2 mois pour la phase d'installation et mise en service.

En ce qui concerne les véhicules, la durée nécessaire pour leur déploiement est aujourd'hui très dépendante des constructeurs et peut varier de quelques mois à plus d'un an. Le passage de la démonstration à la production en série permettra d'accélérer sensiblement le processus.

3.2 Quels modèles économiques associés ? Les dispositifs de soutien et guichets de financement

3.2.1 Coût total de possession et évolution au cours de la décennie

Les entreprises du transport et de la logistique sont évidemment contraintes par des impératifs économiques et disposent souvent d'une marge de manœuvre limitée pour assurer la rentabilité de leur activité. Pour que les poids lourds électriques à hydrogène deviennent une solution adoptée à grande échelle par les acteurs du transport de marchandises et de la logistique, il sera donc essentiel que leur coût total de possession soit compétitif avec les autres options sur le marché, aujourd'hui principalement le diesel, mais en notant que la nécessité de la sortie du diesel est une perspective maintenant largement partagée, et la vente de camions thermiques neufs sera interdite en France dès 2040⁹¹. Le coût total de possession d'un poids lourd électrique à hydrogène devrait alors être comparable aux alternatives au thermique existantes sur le marché.

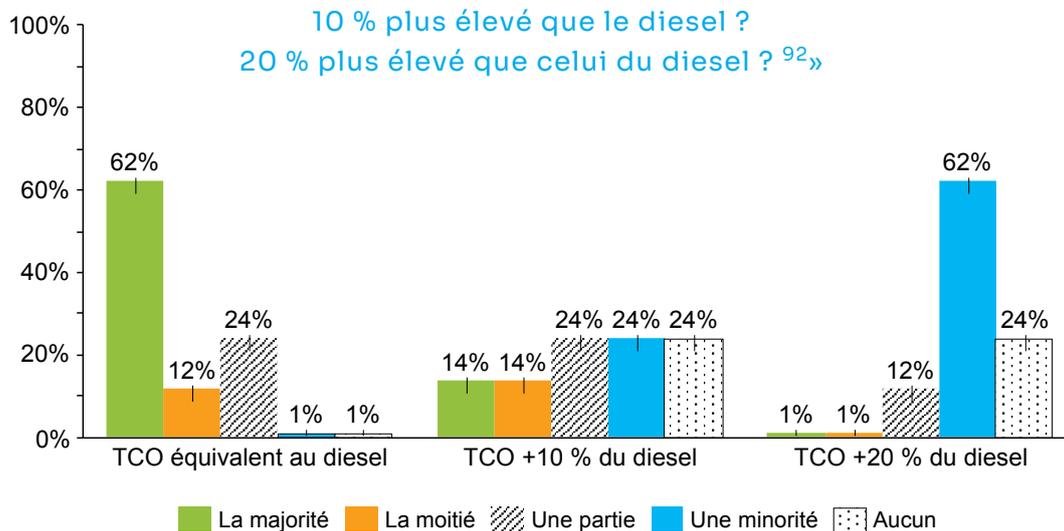
Dès lors, quels seraient les surcoûts acceptables dans le cadre d'une transition vers l'hydrogène ?

D'après l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le groupe France Hydrogène Mobilité dont les résultats sont illustrés Figure 32 ci-dessous, 62 % des opérateurs français interrogés seraient prêts à convertir dès aujourd'hui la majorité de leur flotte à l'électrique à hydrogène si les coûts totaux de possession (TCO) des poids lourds électriques à hydrogène étaient équivalents à ceux des poids lourds Diesel, 12 % en convertiraient la moitié et 24 % au moins une partie. Dans le cas d'un TCO qui serait 10 % plus élevé que celui des véhicules Diesel, 14 % convertiraient la majorité de leur flotte, 14 % la moitié de leur flotte et 24 % une partie, soit au total une conversion d'au minimum une partie de la flotte pour plus de 50 % d'entre eux. Enfin, dans le cas d'un TCO qui serait 20 % plus élevé que celui des véhicules Diesel, 12 % des opérateurs seraient prêts à convertir une partie de leur flotte et 62 % envisagent uniquement la conversion d'une minorité de leur flotte, pour des applications de niche principalement. Ces résultats soulignent que le TCO des poids lourds électriques à hydrogène doit être aussi proche que possible de celui du diesel afin d'assurer une pénétration maximale du marché, et limité à 10 % pour qu'une partie significative des acteurs entament une transition.

91-Ministère de la transition écologique, 2021. Loi Climat et Résilience.

Figure 32 - Réponses des acteurs français interrogés à la question

«Quelle partie de votre flotte seriez-vous prêt à convertir pour un TCO des camions électriques à hydrogène équivalent à celui du diesel ?
10 % plus élevé que le diesel ?
20 % plus élevé que celui du diesel ? ⁹²»



Par conséquent, le TCO des poids lourds électriques à hydrogène est un élément fondamental, qui doit être maîtrisé, et il est indispensable d'avoir une bonne visibilité sur le prix d'achat du véhicule d'une part, et de l'hydrogène d'autre part, mais également des autres postes de coûts associés (maintenance, etc.) et de leur évolution au cours des prochaines années.

Dans cette section, les modèles économiques et TCO des camions électriques à hydrogène seront décrits en considérant que l'évolution du marché se fera selon trois grandes phases, illustrées Figure 33 :

- Une première phase d'amorçage du marché avec principalement des déploiements pilotes ;
- Une deuxième phase que l'on situe dès le milieu de la décennie et qui devrait voir des productions en petites séries ;
- Une troisième phase enfin, qui devra aboutir à 2030 à l'atteinte d'un marché mature, permis par des productions de véhicules en séries importantes.

⁹²-Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

Figure 33 – Évolution de la filière en trois phases attendues entre 2020 et 2030



On notera que cette vision phasée du développement de la filière est reflétée par l'intention annoncée et décrite par le groupe de constructeurs et énergéticiens réunis dans H2Accelerate (Daimler Truck AG, IVECO, OMV, Shell, TotalEnergies, and Volvo Group) dans leur White Paper publié en août 2021⁹³. Dans ce document les trois phases décrites sont la Phase 1 «Learning by deployment» entre 2021 et 2025, puis la Phase 2 «Industrial scale up» entre 2025 et 2028, et une troisième phase «Sustainable Growth» post 2028.

Les déploiements pilotes – de 2020 à 2025

La filière du poids lourd électrique à hydrogène est dans une phase d'amorçage, c'est-à-dire que les projets de déploiements qui se concrétisent actuellement mettent en service des premiers véhicules, qui peuvent être pour la plupart qualifiés de prototypes. En 2021, on notera de façon générale que ces premières unités présentent un TCO deux à trois fois plus élevé que celui du diesel. A titre d'exemple :

- Un porteur à utilisation régionale, parcourant 200 à 250 km par jour, 5 jours par semaine, présente un surcoût de 50 000 à 60 000 €/an, sur une durée d'exploitation de 8 ans ;
- Un exercice d'évaluation de ce que serait ce surcoût sur un trajet inter-régional réel Clermont-Ferrand - Bordeaux a été réalisé avec l'aide de COMBRONDE, transporteur multimodal. Ce surcoût a été évalué entre 70 000 et 80 000 €/an⁹⁴.

A ce stade, les surcoûts concernent les différents postes du coût total de possession, à savoir principalement le véhicule, le carburant et la maintenance, mais aussi certains postes de coûts secondaires, comme les assurances. Les paragraphes suivants reviendront sur les diminutions de coûts attendues dans les prochaines années.

93-H2Accelerate, 2021. Whitepaper - Expectations for the fuel cell truck market.

94-Le calcul fait par le transporteur se base sur les hypothèses retenues dans l'Etude Roland Berger pour le FCH JU, « Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition. » Les hypothèses sont adaptées à la réalité opérationnelle de ce flux.

▪ **Le coût du véhicule** : le coût des poids lourds électriques à hydrogène produits pour les premiers déploiements est important, puisque ces premiers camions sont des prototypes ou premières très petites séries, qui demandent de forts investissements en R&D et dont les composants ne sont pas produits en série à ce jour. Les camions électriques à hydrogène, quel que soit leur type – véhicule urbain de livraison, véhicule régional de livraison ou véhicule long-courrier – ont présenté un prix à l’achat, pour les premiers déploiements constatés, en ordre de grandeur trois fois plus élevé qu’un poids lourd Diesel équivalent.

▪ **Le coût de production et la distribution de l’hydrogène** : le prix du carburant a un fort impact sur le coût total de possession d’un véhicule parcourant des distances importantes et a fortiori pour des camions électriques à hydrogène. Or, le prix d’achat de l’hydrogène renouvelable ou bas carbone reste élevé : en France, les projets qui se développent en 2021 à travers l’appel à projet « Écosystèmes Territoriaux » de l’ADEME visent un coût de l’hydrogène de 9 €/kgH₂. En considérant les consommations des premiers poids lourds électriques à hydrogène mis en service, cela représente des prix du carburant un peu plus de deux fois supérieurs au diesel. Par exemple, les frais annuels de carburant d’un porteur électrique à hydrogène parcourant 80 000 kilomètres par an seraient de 43 000 €/an (pour une consommation de 6 kgH₂/100 km), contre 20 000 €/an pour un modèle Diesel équivalent (pour une consommation de 25 l/100 km et un prix du gazole de 1 €/l).

▪ **Le coût de maintenance** : pour les premières mises en service de camions électriques à hydrogène, le coût de la maintenance est de l’ordre de deux fois plus élevé que pour les poids lourds Diesel⁹⁵, pour des services de maintenance nouveaux et dédiés. En raison du nombre de véhicules déployés encore faible fin 2021, le savoir-faire de la maintenance des camions électriques à hydrogène n’est pas encore généralisé et présente donc un surcoût par rapport à une technologie mature.

Certains autres postes de coûts, comme les assurances, présentent également un surcoût en 2021, qui devrait être gommé progressivement avec l’adoption croissante de la technologie.

95-Hypothèse issue de l’analyse TCO menée par le groupe de travail camions de France Hydrogène Mobilité.

Les déploiements à l'échelle : la phase de décroissance des coûts par passage à la production petite série et série – de 2025 à 2030

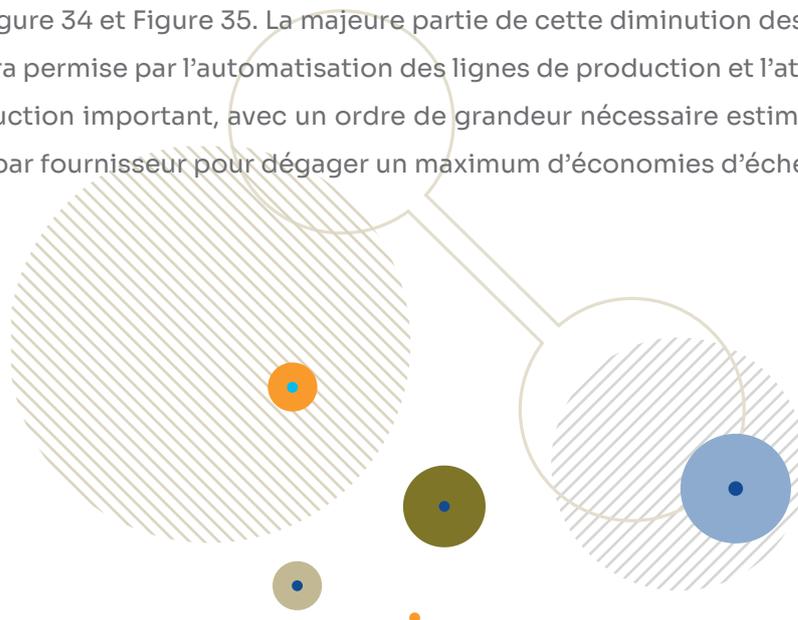
Afin de permettre aux poids lourds électriques à hydrogène de se développer de manière significative d'ici à 2030, l'ensemble des postes impactant le coût total de possession devront être optimisés pour permettre un modèle économique compétitif, et donc notamment comme détaillé dans ce paragraphe, les coûts des véhicules, du carburant et de la maintenance.

Baisse du coût des véhicules

Pour assurer une convergence du coût des poids lourds électriques à hydrogène et de ceux des poids lourds Diesel, plusieurs leviers devront être actionnés, et on constate en réalité que la filière se met d'ores et déjà en ordre de marche pour cela.

Tout d'abord, on notera que le premier facteur expliquant le surcoût à l'achat des poids lourds électriques à hydrogène est le faible volume de véhicules produits, associé à l'absence de lignes de production dédiées. Comme décrit dans la section 2.2 de ce document, les principaux constructeurs de camions européens se mettent en ordre de marche pour la production en série de poids lourds électriques à hydrogène, prévue pour la deuxième partie de la décennie.

Cela étant, un deuxième facteur essentiel est le coût des équipements spécifiques à la technologie hydrogène : les piles à combustible et les réservoirs de stockage de l'hydrogène. Ces équipements présentent un coût important, car les volumes produits sont encore limités, et les lignes de production ne sont pas automatisées. Ainsi, une division par un facteur quatre du coût des piles à combustible et par un facteur deux du coût des réservoirs est attendue d'ici à 2030 (par rapport aux niveaux de 2020), comme illustré par les Figure 34 et Figure 35. La majeure partie de cette diminution des coûts des équipements sera permise par l'automatisation des lignes de production et l'atteinte d'un volume de production important, avec un ordre de grandeur nécessaire estimé à 10 000 unités par an et par fournisseur pour dégager un maximum d'économies d'échelle.



Enfin, à plus long terme, une fois les lignes de production automatisées et la majorité des réductions de coûts débloquées, les paramètres suivants permettront de poursuivre la baisse de coût des équipements spécifiques :

- L'augmentation des volumes devrait permettre d'obtenir des réductions du coût des matières premières ;
- En parallèle, la R&D permettra l'optimisation de la fabrication des technologies hydrogène et de leur mode de fabrication ;
- Enfin, les coûts des PAC et des systèmes de stockage sont largement dépendants du coût des composants utilisés (compresseurs, convertisseurs DC/DC, ...). La filière de production de ces composants n'est pas mature non plus, et son évolution devrait permettre des réductions de coûts.

Ces objectifs de production de véhicules comme d'équipements spécifiques à la technologie hydrogène sont accompagnés par des actions concrètes des filières française et européenne (voir section 2.1). Elles se mettent d'ores et déjà en ordre de marche pour augmenter leur capacité de production en investissant dans des lignes de production automatisées qui permettront d'atteindre les volumes nécessaires pour bénéficier de réductions importantes des coûts des équipements. Trois acteurs français, constructeurs de réservoirs ou de piles à combustible, ont été interrogés sur leurs objectifs : Plastic Omnium, Faurecia et Symbio. Plastic Omnium est un groupe industriel français, équipementier automobile. Le groupe a investi 200 millions d'euros depuis 2015 pour accroître son expertise sur toute la chaîne de valeur de l'hydrogène, et produit notamment des réservoirs et des piles à combustible. Faurecia est un groupe français d'ingénierie et de production d'équipements automobiles. Faurecia est fortement impliqué dans le développement des technologies pour la mobilité durable. Le groupe a investi à ce titre plus de 240 millions d'euros dans la technologie hydrogène au cours des trois dernières années, en R&D, production, partenariats stratégiques et acquisitions. Faurecia se positionne notamment sur les systèmes de stockage de l'hydrogène, qu'elle développe et produit, et les piles à combustible produites par Symbio, coentreprise entre Faurecia et Michelin. Symbio conçoit, produit et commercialise des systèmes hydrogène pour véhicules légers et lourds depuis plus de dix ans. Les véhicules équipés par l'entreprise ont déjà parcouru plus de trois millions de kilomètres.

En particulier, comme le montrent la Figure 34 et la Figure 35 :

- L'objectif de Faurecia est d'atteindre 100 000 réservoirs produits par an, ce qui correspond au point 1 de la Figure 34 ;
- L'objectif de Plastic Omnium est d'installer une quinzaine de lignes de production de PAC, réservoirs et systèmes intégrés, ce qui correspond au point 2 de la Figure 34 ;
- L'objectif de Symbio est de produire 20 000 Stackpack (PAC et composants) d'ici 2025, et 200 000 d'ici 2030, ce qui correspond aux points 3 de la Figure 35.

Figure 34 : Evolution du coût des réservoirs en fonction de la production annuelle (source : France Hydrogène Mobilité)

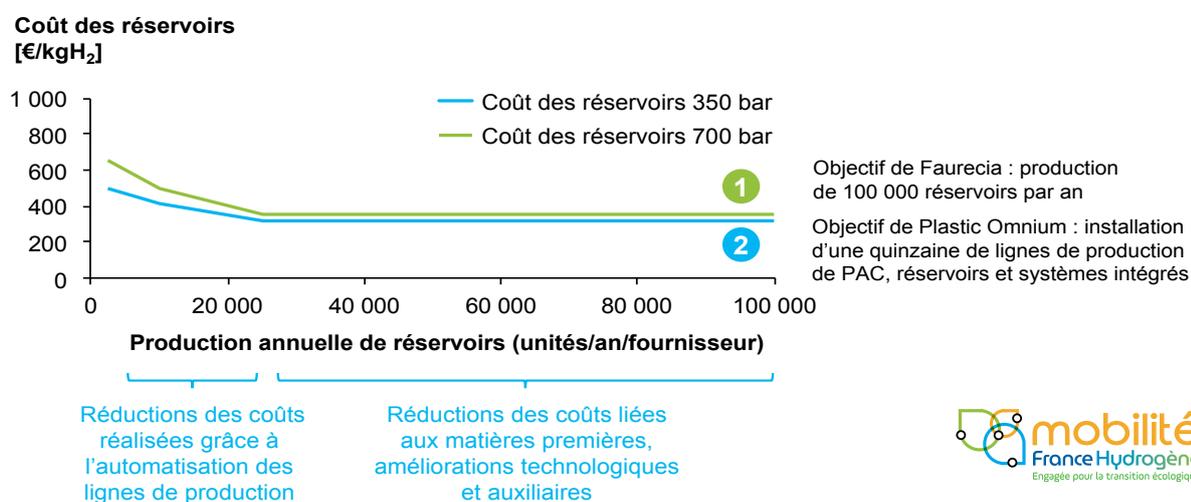
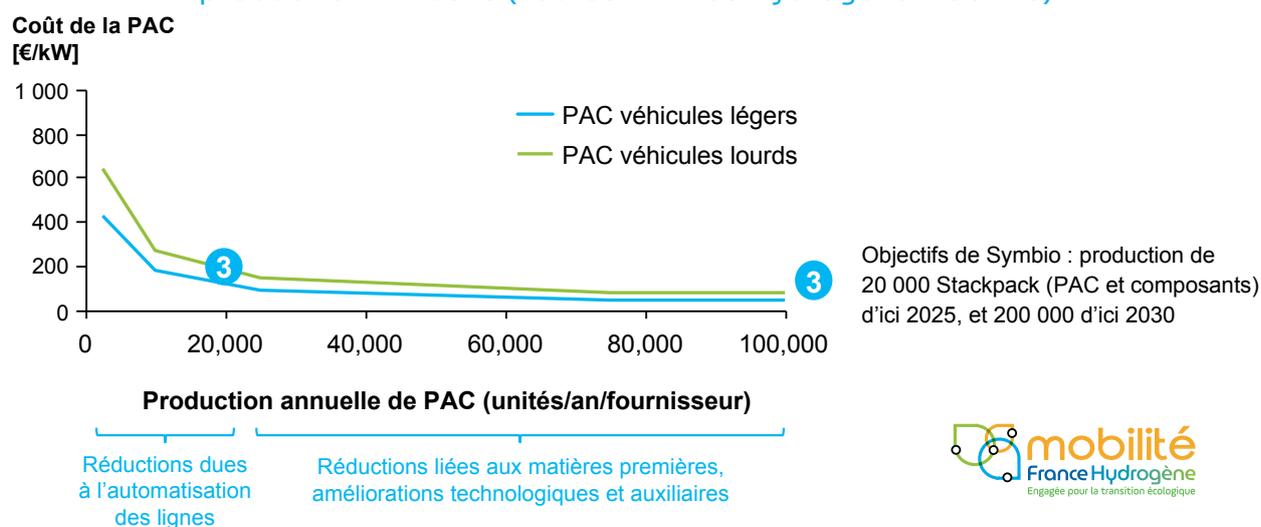


Figure 35 - Evolution du coût des piles à combustible en fonction de la production annuelle (source : France Hydrogène Mobilité)



La diminution du coût de ces systèmes, couplée à l'industrialisation de l'assemblage des poids lourds électriques à hydrogène devraient permettre d'atteindre un marché mature, avec un prix d'achat qui se rapprochera du prix actuel des poids lourds Diesel. En effet, les objectifs de production affichés ci-dessus suggèrent une division par huit du coût des PAC pour véhicules lourds et par deux du coût des réservoirs 700 bar, en passant de 2 500 à 100 000 unités produites par année et par constructeur. Une telle évolution représenterait une diminution de 200 000 € du coût des équipements d'un véhicule lourd embarquant un réservoir d'une capacité de 60 kgH₂ et une PAC de 300 kW. A titre de comparaison, le coût d'investissement actuel des tracteurs électriques à hydrogène est estimé à 400 000 € l'unité.

Concernant les courbes de décroissance des coûts, et cette vision d'un coût d'investissement du poids lourd électrique à hydrogène qui se rapprochera de celui du Diesel, les études économiques de référence sur le sujet présentent des résultats globalement alignés avec ceux travaillés par le groupe France Hydrogène Mobilité, soit similaires soit présentant des réductions des coûts plus importantes. On citera notamment à ce titre les travaux du FCH JU, estimant les TCO des poids lourds électriques à hydrogène à 2030⁹⁶.

Baisse du coût du carburant

La diminution du coût de production et de distribution de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone est également un paramètre essentiel à la compétitivité du poids lourd électrique à hydrogène, d'autant plus que les kilométrages des véhicules sont élevés.

Un des principaux leviers identifiés pour une baisse du coût de l'hydrogène est le passage à l'échelle de la production et de la distribution : une augmentation massive de l'offre et de la demande est nécessaire pour une baisse des coûts des technologies de production, de transport et de stockage. Les baisses du coût de la production d'hydrogène par électrolyse passeront notamment par un accès à un prix de l'électricité le plus compétitif possible. Elle sera favorisée par les productions grande capacité, permettant l'obtention du statut électro-intensif, l'optimisation des plages de fonctionnement, ou encore la suppression du coût d'acheminement de l'électricité en connectant directement l'électrolyseur à un actif de production d'électricité. Les efforts des filières européennes et françaises doivent permettre de diviser le coût de l'hydrogène par deux d'ici 2030, et ainsi d'atteindre le prix de 5 €/kgH₂ à la pompe.

96-FCH JU, 2020. « Fuel Cells Hydrogen Trucks – Heavy-Duty's High Performance Green Solution ».

Pour cela, les filières européenne et française se sont fixé des objectifs ambitieux qui traduisent ce passage à l'échelle nécessaire de la production et de la distribution, avec des déploiements de 80 GW d'électrolyse à l'échelle européenne (40 GW dans l'UE et 40 GW dans les pays frontaliers) et 6,5 GW à l'échelle française à horizon 2030⁹⁷. En parallèle, 1000 stations de distribution, dédiées au transport lourd et/ou aux véhicules légers, doivent être déployées en France d'ici 2030, afin d'assurer une bonne couverture du territoire, et notamment du réseau RTE-T. Des mises en service de manière concertée, favorisant la mutualisation des usages entre les différentes applications (mobilité, industrie, stationnaire), permettront de maximiser l'utilisation des stations déployées, et d'accentuer ces effets d'échelle.

La majorité des études chiffrant l'évolution du prix de l'hydrogène s'accordent sur les projections à 2030 : les rapports de l'IEA⁹⁸, de BloombergNEF⁹⁹, du Hydrogen Council¹⁰⁰, du FCHEA¹⁰¹ et du FCH JU⁹⁶ estiment qu'il est possible d'atteindre un prix de l'hydrogène produit par électrolyse à 5 €/kgH₂ à la pompe à l'échéance 2030.

En parallèle, des mécanismes mis en place par le gouvernement permettront d'augmenter la compétitivité économique de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone par rapport aux carburants carbonés :

- D'une part, l'hydrogène renouvelable ou bas carbone pourrait être produit à des coûts similaires à ceux de l'hydrogène carboné, grâce à des dispositifs de compléments de rémunérations qui seront mis en place dès 2022 (voir détails section 3.3.2).
- D'autre part, le prix de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone pourrait concurrencer celui du gazole, par une évolution de la fiscalité de ce carburant fossile, et en particulier par l'augmentation de la composante carbone de la TICPE (voir section 1.3).

Baisse du coût de la maintenance

En parallèle, le coût de maintenance des poids lourds électriques à hydrogène devrait baisser significativement au cours de la décennie, voire devenir plus compétitif que celui de la maintenance d'un camion Diesel, en raison du moindre entretien requis par un moteur électrique par rapport à un moteur thermique.

97-Ministère de la transition Ecologique et Solidaire, Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique.

98-IEA, 2019. *The Future of Hydrogen*.

99-BloombergNEF, 2020. *Hydrogen Economy Outlook*.

100-Hydrogen Council, 2020. *Path to hydrogen competitiveness, A cost perspective*.

101-FCHEA, 2019. *Roadmap to a US hydrogen economy*.

Les réseaux de maintenance pour les véhicules électriques à hydrogène vont également se déployer, ce qui permettra de généraliser le savoir-faire de l'entretien de ces véhicules, et de réduire d'autant plus les coûts de maintenance.

La courbe de décroissance du coût total de possession au cours de la décennie

Les actions décrites ci-dessus doivent permettre aux camions électriques à hydrogène de devenir compétitifs avec leurs équivalents diesels d'ici à la fin de la décennie. La Figure 36 décrit l'évolution attendue des coûts totaux de possession (hors coûts de rémunération du conducteur) des quatre segments présentés en section 1.2 de ce document :

- Les porteurs de distribution urbaine, de 7,5 à 16 tonnes, parcourant dans cet exemple 50 000 km/an ;
- Les porteurs de distribution régionale, de 16 à 32 tonnes, parcourant dans cet exemple 80 000 km/an ;
- Les tracteurs à semi-remorque de distribution régionale, de 32 à 44 tonnes, parcourant dans cet exemple 80 000 km/an ;
- Les tracteurs à semi-remorque long-courriers, de 32 à 44 tonnes, parcourant dans cet exemple 140 000 km/an.

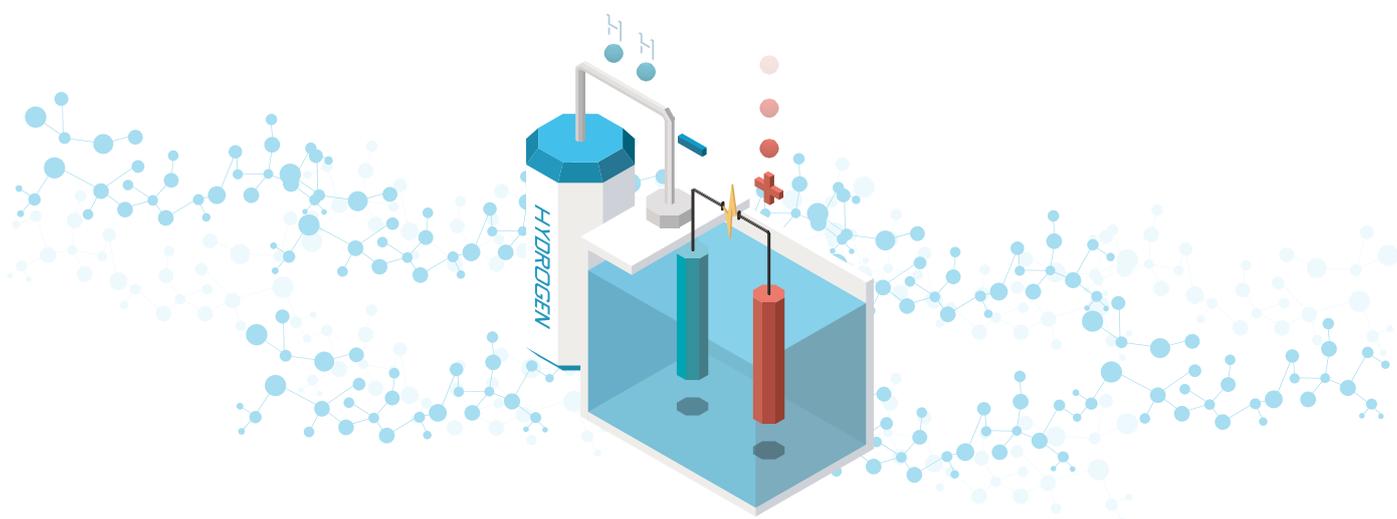
Les coûts totaux de possession sont donnés par camion et par an, en supposant une durée de vie du véhicule de 10 ans. Ils ne comprennent pas la rémunération du conducteur, qui est a priori indépendante du mode de propulsion du véhicule, mais qui représente un poste de coût important et qui, si pris en compte dans le calcul, réduit significativement l'écart entre diesel et électrique à hydrogène. La valeur résiduelle des véhicules n'est pas non plus considérée, devant la grande incertitude sur l'évolution de ce facteur dans la décennie. Le reste des hypothèses utilisées dans ce modèle sont présentées en annexe 5.

L'évolution des coûts totaux de possession illustrée sur les graphiques ci-dessous présente donc les trois points de repères projetés suivants :

- En 2021, les coûts totaux de possession des premiers camions électriques à hydrogène déployés sont environ 2 à 3 fois plus élevés que leur équivalent diesel sur tous les segments.
- En 2027, en prenant l'hypothèse de la mise en place des premières lignes de production en série des véhicules et systèmes hydrogène ainsi que celle du développement de nombreux usages, le prix des véhicules et du carburant devraient avoir diminué, réduisant ainsi significativement les coûts totaux de possession. En parallèle, il est attendu que le prix du gazole augmente au cours de la décennie, ce qui permet d'estimer le surcoût de possession d'un camion ou tracteur électrique à hydrogène à 60 à 80 % par rapport à un modèle Diesel.

▪ En 2030, la filière mobilité hydrogène devrait être compétitive économiquement avec le diesel, en additionnant le prix d'achat des véhicules, les frais de carburant et de la maintenance. En parallèle, les coûts de possession des poids lourds Diesel devraient être amenés à augmenter : d'une part une augmentation du prix du gazole est attendue, notamment conséquence de l'augmentation de la composante carbone de la TICPE, et d'autre part, en raison de l'évolution des normes d'émissions, et notamment de l'Euro VII attendue en 2025, le prix des moteurs Diesel devrait également augmenter au cours de la décennie, d'environ 10 %¹⁰². Une augmentation plus importante des coûts du gazole permettrait aux tracteurs long-courriers électriques à hydrogène d'être économiquement plus compétitifs que leurs équivalents diesels.

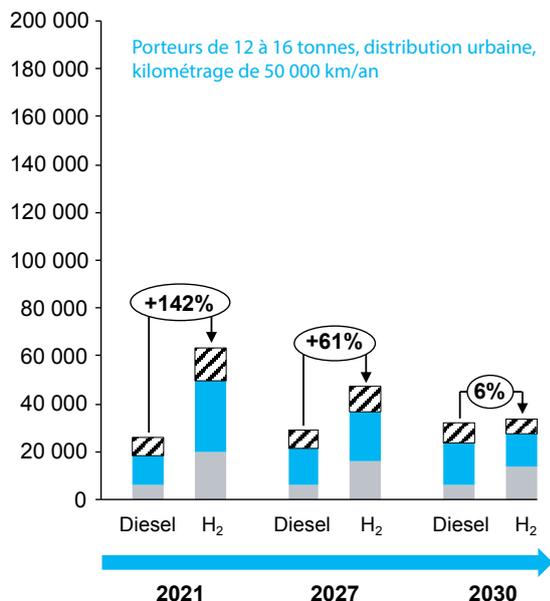
Ainsi, les résultats des analyses de coût total de possession réalisées par le groupe de travail dédié au poids lourd électrique à hydrogène de France Hydrogène Mobilité suggèrent que l'écart du TCO entre diesel et électrique à hydrogène devrait être de +/-5 % en fonction des segments d'utilisation. Les porteurs électriques à hydrogène devraient présenter un surcoût de l'ordre de 5 à 6 % par rapport au diesel en 2030, et les porteurs de distribution régionale pourraient même bénéficier de coûts totaux de possession identiques voire légèrement inférieurs au diesel. Les tracteurs à semi-remorque devraient également présenter des coûts totaux de possession similaires au diesel, dépendant du kilométrage annuel, soit un surcoût de +5 % pour de la livraison régionale au kilométrage annuel plafonnant à 80 000 km, et un bénéfice de 2 % par rapport au diesel pour le long-courrier, autour de 140 000 km/an. Ces résultats illustrent la tendance selon laquelle plus le kilométrage des véhicules sera élevé, plus la solution électrique à hydrogène sera compétitive, à condition que le prix d'achat de l'hydrogène soit suffisamment compétitif, et atteigne la cible de 5 €/kgH₂.



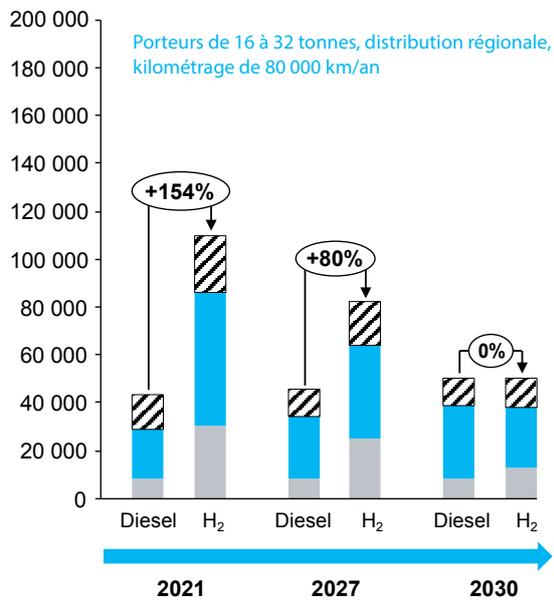
102-FCH JU, 2020. « Fuel Cells Hydrogen Trucks – Heavy-Duty's High Performance Green Solution ».

Figure 36 - Evaluation de l'évolution du coût total sur le cycle de vie [en €/véhicule/an] pour les quatre segments étudiés, sur la base d'une durée de vie de 10 ans (source : France Hydrogène Mobilité, Fuel Cell Hydrogen Trucks, FCH JU)

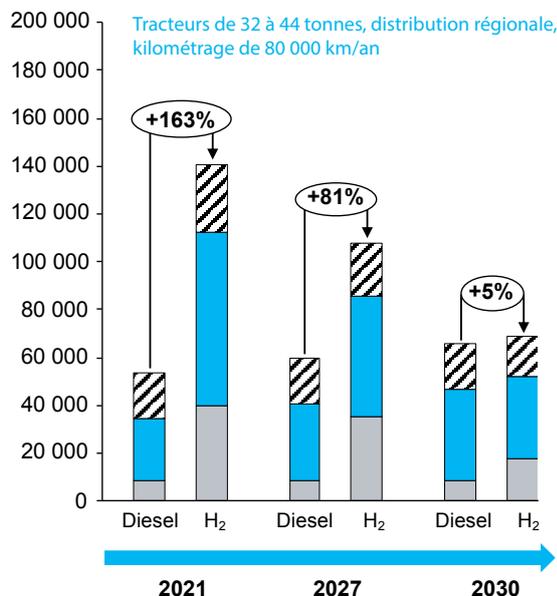
Coût total de possession [€/véhicule/an]



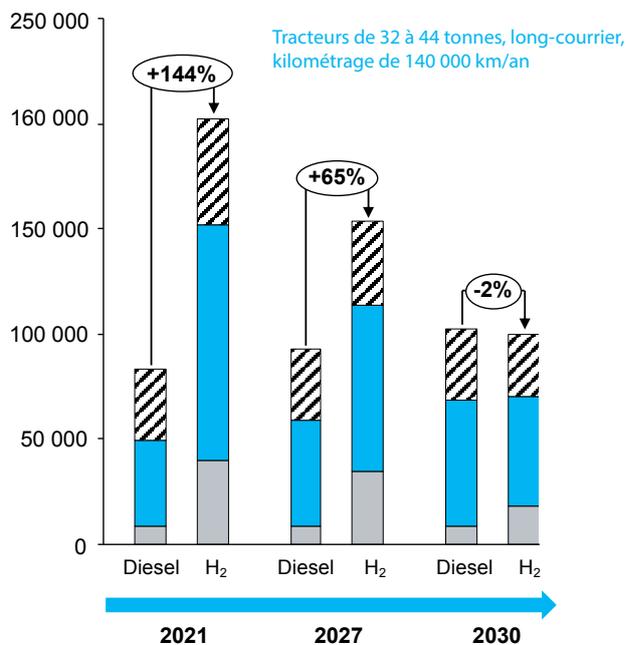
Coût total de possession [€/véhicule/an]



Coût total de possession [€/véhicule/an]



Coût total de possession [€/véhicule/an]



Acquisition du véhicule
 Carburant
 Maintenance, taxes et assurance, etc.

Les travaux réalisés par le groupe France Hydrogène Mobilité montrent ainsi que les coûts totaux de possession des poids lourds Diesel et électriques à hydrogène devraient être proches à horizon 2030, avec un écart de +/-5 %. Le croisement des courbes de TCO des poids lourds électriques à hydrogène et Diesel confirme le potentiel d'atteinte de la maturité du marché, puisque deux tiers des transporteurs et logisticiens interrogés lors de l'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et le groupe France Hydrogène Mobilité annoncent être prêts à convertir une majorité de leur flotte à l'électrique à hydrogène si une telle réduction du TCO est observée¹⁰³.

3.2.2 Les mécanismes de subventions et de mitigation du risque financier pour la phase d'amorçage du marché

Comme présenté précédemment, le coût total de possession des premiers camions électriques à hydrogène est aujourd'hui largement supérieur à celui d'un véhicule thermique traditionnel. Afin d'appuyer le développement de la filière, et de soutenir les opérateurs de flottes dans la transition de leurs véhicules, des mécanismes de soutien sont mis en place au niveau national comme au niveau européen. Ces mécanismes prennent des formes variées (subventions, fiscalité, etc.) mais visent un même objectif : diminuer le surcoût total de possession des camions électriques à hydrogène par rapport à leur équivalent diesel. En France et en Europe, les opérateurs de camions peuvent bénéficier de plusieurs types d'aides dont les principales sont détaillées ci-dessous.

Les dispositifs disponibles au niveau français

De nombreuses aides financières et des programmes de supports à l'investissement sont disponibles au niveau national. Les plus pertinents pour la filière du poids lourd électrique à hydrogène sont présentés dans cette section.

Les subventions au niveau national gérées par l'ADEME

Les appels à projet de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) s'inscrivent dans la mise en œuvre de la stratégie nationale hydrogène, annoncée en septembre 2020 par le gouvernement français, et qui vise un investissement de 7,2 milliards d'euros dans la filière hydrogène d'ici 2030.

103-Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité, (2019). Enquête utilisateurs interrogeant 44 acteurs de la filière du transport routier par poids lourds.

Ces appels à projets de l'ADEME constituent un mécanisme clé pour promouvoir le développement de l'hydrogène en France, tant sur le plan de la R&D que sur le plan opérationnel. Ainsi, il convient de distinguer :

- L'appel à projet « écosystèmes territoriaux hydrogène », qui vise à soutenir le déploiement de projets d'écosystèmes hydrogène bas carbone et renouvelable complets intégrant production, distribution et usages dans les territoires (doté d'une enveloppe de 275 M€ d'ici 2023¹⁰⁴) ;
- L'appel à projet « briques technologiques et démonstrateurs hydrogène », qui vise à appuyer l'effort de recherche et développement (doté d'une enveloppe de 350 millions d'euros d'ici 2023) en insistant sur quatre axes clés : les briques technologiques – composants et systèmes innovants, les projets pilotes (ou premières commerciales) innovants – industriels ou réseaux, la conception et la démonstration de nouveaux véhicules, et enfin les grands démonstrateurs d'électrolyse.

Comme présenté ci-dessus, les appels à projet de l'ADEME visent à la fois l'accélération des travaux de recherche et développement, mais également le soutien dès à présent de développements effectifs afin d'amorcer le marché de l'hydrogène bas carbone et renouvelable, à la fois sur des usages en mobilité, mais également industriels et en support du réseau. En ce qui concerne spécifiquement les opérateurs de poids lourds qui souhaiteraient réaliser des déploiements sur le court terme, l'appel à projet « écosystèmes territoriaux hydrogène » est le plus pertinent et permet aux lauréats de toucher une aide variant entre 35 % et 55 % du surcoût par rapport aux modèles de diesels équivalents (hors cas spécifiques des bus et des BOM) en fonction de la taille de l'entreprise réalisant l'acquisition du véhicule.

Les aides complémentaires au niveau régional ou local

En complément des aides attribuées par l'ADEME, d'autres aides peuvent être débloquées au niveau régional ou local, dans la limite des plafonds d'aides d'État tel que défini par l'article 36 du Règlement Général d'Exemption par Catégorie (RGEC). Ainsi, plusieurs régions françaises ont préparé des appels à projets complémentaires, souvent en partenariat avec l'ADEME, afin de fluidifier le processus de candidature des projets. C'est par exemple le cas des Régions Occitanie ou Pays-de-la-Loire pour n'en citer que deux dont les appels à projet prévoyaient en 2021 un soutien jusqu'à 50 % du surcoût éligible, et dont la clôture était fixée en même temps que l'AAP « écosystèmes territoriaux hydrogène » de l'ADEME.

¹⁰⁴<https://www.economie.gouv.fr/presentation-strategie-nationale-developpement-hydrogene-decarbone-france>

Les compléments de rémunération

Un mécanisme de soutien à la production d'hydrogène renouvelable, par complément de rémunération, sera mis en place dès 2022, et permettra de soutenir le déploiement de projets d'électrolyse de grande envergure et de réduire le coût du carburant pour la mobilité lourde¹⁰⁵. Cette prime devrait compenser l'écart entre les revenus de marché de référence et un niveau de rémunération fixé par le producteur dans le cadre d'une procédure de mise en concurrence, par un mécanisme dont les modalités restent encore à définir. Le complément de rémunération pourrait par exemple être octroyé au producteur d'hydrogène renouvelable, en €/kg, afin de combler le déficit de compétitivité par rapport à la production d'hydrogène carboné.

Le suramortissement

En France, un dispositif spécial du suramortissement¹⁰⁶ a été mis en place pour soutenir la transition des poids lourds vers des alternatives zéro ou basses émissions. Ainsi, les entreprises peuvent bénéficier d'un taux de déduction exceptionnelle (ou suramortissement) de 40 à 60 % de la valeur des véhicules zéro et faibles émissions dont le PTAC est supérieur à 3,5 tonnes. Initialement prévu jusqu'au 31 décembre 2019, le dispositif de suramortissement des poids lourds zéro et faibles émissions est prolongé jusqu'à 2030, et inclut les véhicules électriques à hydrogène¹⁰⁷. Concrètement, les poids lourds (camions, bus, autocars...) électriques à hydrogène font l'objet d'une déduction d'impôts extra-comptable comme suit :

- PTAC entre 3,5 tonnes et 16 tonnes : déduction extra-comptable de 60 % ;
- PTAC supérieur à 16 tonnes : déduction extra-comptable de 40 %.

Ces taux sont également applicables pour des véhicules GNV, bio-GNV, ED95 ou électriques à batterie. Le dispositif concerne toutes les entreprises soumises à un régime réel d'imposition (IS ou IR). Dans le cadre d'un contrat de crédit-bail ou de location avec option d'achat, c'est le locataire qui bénéficie du suramortissement, pas le crédit-bailleur ou propriétaire. À compter des exercices ouverts au 1er janvier 2022, le taux d'IS sera de 25 % pour toutes les sociétés. En retenant ce taux, l'avantage fiscal global en cas d'acquisition d'un camion électrique à hydrogène de PTAC entre 3,5 et 16 tonnes, l'entreprise se verra déduire 15 % de la valeur du véhicule ($60 \% \times 25 \% = 15 \%$) en déduction d'impôt. Pour un camion au PTAC supérieur à 16 tonnes, la déduction sera de 10 % de la valeur du véhicule ($25 \% \times 40 \%$).

105-Ministère de la Transition écologique, 2021. L'hydrogène et ses avantages.

106-République française, 2021. BIC - Base d'imposition - Déductions exceptionnelles - Dispositif applicable aux poids lourds et aux véhicules utilitaires légers utilisant des énergies propres.

107-Article 133 de la LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1).

Le bonus écologique

Les aides à l'achat, ou bonus écologique, ont été mises en place dans le cadre du plan de relance. Elles représentent 50 000 € par camion, et seront valables jusqu'à janvier 2023¹⁰⁸. Cette aide est cumulable avec le dispositif du suramortissement pour les véhicules lourds utilisant des énergies propres, dans la limite d'un plafond de 100 000 €, et cumulable avec les aides spécifiques relevant d'appels à projets qui sont, elles, soumises au régime du cumul des Aides d'État (les aides non discriminatoires telles que le bonus écologique ou le suramortissement sont exclues du calcul du plafond des aides).

Les deux leviers que sont le bonus écologique et le suramortissement ne s'appliquent pas aux véhicules rétrofités en 2021, le matériel coûteux intégré aux anciens véhicules thermiques pour leur électrification ne permet pas de réévaluation de la valeur résiduelle des camions. Une définition juridique du véhicule rétrofité, au-delà du simple véhicule d'occasion, pourra permettre à cette filière de bénéficier de ces aides.

Le soutien de la Banque des Territoires et de Bpifrance

La Banque des Territoires est une entité de la Caisse des Dépôts investissant dans des projets territoriaux hydrogène, sur quatre volets principaux : la production d'hydrogène renouvelable, le déploiement de pipelines, la construction de stations de distribution et la mobilité. Elle investit notamment via des sociétés de projets lancées par des consortium de collectivités et/ou d'industriels). La Banque des Territoires investit principalement en fonds propres dans les infrastructures de production et de distribution d'hydrogène renouvelable ou bas carbone généralement à hauteur de 1 à 5 millions d'euros, et en restant minoritaire. Elle participe également au cofinancement des études préalables à l'investissement, propose des locations longues durées d'équipements hydrogène, ou des prêts aux collectivités pour l'achat de véhicules électriques à hydrogène, et joue le rôle de partenaire opérationnel dans le cadre de demandes de subventions européennes.

Bpifrance, banque publique d'investissement française, participe également au financement de projets hydrogène. De manière complémentaire à la Banque des Territoires qui investit dans les équipements, Bpifrance investit dans les sociétés produisant les systèmes hydrogène. Elle organise notamment des appels à projets visant à financer des projets de R&D ambitieux pour renforcer la position des industries et des entreprises françaises sur les marchés porteurs, dont celui de l'hydrogène.

108-France Relance, 2020. Mise en place d'un bonus pour l'achat d'un véhicule lourd.

Les IPCEI (Important Project of Common European Interest)

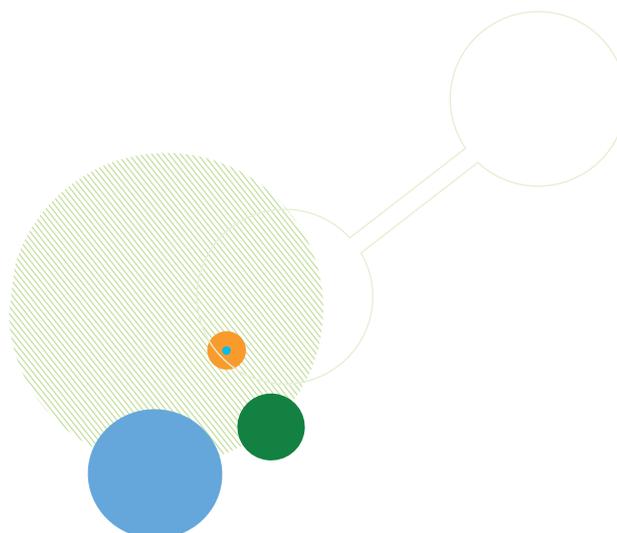
Le dispositif IPCEI (PIIEC en français) est un mécanisme clé pour soutenir le déploiement de projets d'envergure. Il vise notamment à encourager spécifiquement le déploiement d'une filière industrielle compétitive en Europe, de manière complémentaire aux aides adressées aux opérateurs de camions, des dispositifs de soutien à l'industrialisation. Un IPCEI dédié à la technologie hydrogène, à l'instar du projet européen sur les batteries, est en cours d'élaboration. Il visera par exemple à soutenir la recherche, le développement et l'industrialisation d'électrolyseurs de très grande capacité pour produire de l'hydrogène bas carbone et déployer ces solutions dans l'industrie. Ce projet pourra également concerner le développement de projets d'électrolyseurs de nouvelles générations, ainsi que l'industrialisation d'autres briques technologiques dans une logique d'intégration de la chaîne de valeur au niveau européen. La France réservera une dotation financière exceptionnelle de 1,5 Md€ dans le cadre de cette action.

Les dispositifs disponibles au niveau européen

En complément des aides disponibles au niveau national, divers guichets européens permettent de soutenir le déploiement de l'hydrogène, parmi lesquels :

L'Innovation Fund

Il s'agit d'un important programme de financement de l'Union Européenne conçu pour soutenir les projets de démonstration de technologies innovantes à faibles émissions carbone, susceptibles de contribuer de manière significative à la réalisation de l'objectif «net zero» en Europe. Une série d'appels à projets est prévue entre 2020 et 2030. Le budget de l'Innovation Fund provient du système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SEQE-UE) ainsi que des fonds non dépensés du programme NER300 (le prédécesseur du programme). Le Fonds d'innovation prévoit d'ouvrir deux appels à projets par an : un premier dédié aux projets à grande échelle avec un budget supérieur à 7,5 millions d'euros, un second réservé aux projets dont les investissements sont compris entre 2,5 à 7,5 millions d'euros.



Connecting Europe Facility (CEF)

Ce guichet vise à soutenir le développement de réseaux transeuropéens performants, durables et interconnectés dans les domaines des transports, de l'énergie et des services numériques. Les objectifs du CEF sont notamment de faciliter les transports et de les rendre plus durables, de renforcer la sécurité énergétique de l'Europe et de permettre une utilisation plus large des énergies renouvelables dans les États membres.

Entre 2014 et mars 2021, l'Agence exécutive pour l'innovation et les réseaux (INEA) était responsable des financements CEF, mettant en œuvre des budgets de 28,7 milliards d'euros. L'INEA a cessé ses activités le 31 mars 2021, remplacée par l'Agence exécutive européenne pour le climat, les infrastructures et l'environnement (CINEA) créée le 1er avril 2021 pour reprendre le portefeuille de projets hérité ainsi que d'autres programmes de financement de l'UE. En mars 2021, un accord provisoire entre le Conseil et le Parlement européen a été conclu sur la deuxième édition du CEF. Le CEF 2.0 continuera à financer des projets dans les domaines des transports, de l'énergie et du numérique, en mettant l'accent sur les synergies entre ces secteurs. Il encouragera également les travaux intersectoriels dans des domaines tels que les mobilités connectées et automatisées, ainsi que les carburants alternatifs.

La plupart des financements du CEF seront accordés sous la forme de subventions, avec différents niveaux de financement. Le CEF 2.0 se déroulera de 2021 à 2027, avec un budget total de 33,7 milliards d'euros¹⁰⁹, selon la répartition suivante : transport (25,8 milliards d'euros), énergie (5,8 milliards d'euros), numérique (2,1 milliards d'euros). Dans le cadre du CEF, les infrastructures de recharge en hydrogène en France sont éligibles au guichet AFIFGEN¹¹⁰ et peuvent être soutenues à hauteur de 30 % des montants éligibles. Point important à noter cependant, le dernier cahier des charges (publié en septembre 2021) ne prévoit pas de subventions pour les véhicules, donc les poids lourds hydrogène, à l'exception de ceux opérant exclusivement dans les zones portuaires.

¹⁰⁹<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2021/03/11/connecting-europe-facility-informal-agreement-with-european-parliament-on-the-post-2020-programme/>

¹¹⁰https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/cef/wp-call/2021/call-fiche_cef-t-2021-afifgen_en.pdf#page=13&zoom=100,102,129

European Clean Hydrogen Partnership (ex FCH JU)

En février 2021, la Commission européenne a présenté une proposition visant à établir dix nouveaux partenariats européens et à investir près de 10 milliards d'euros pour la transition verte et numérique. Le dispositif s'appuiera sur les travaux antérieurs du FCH JU (*Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*) pour accélérer le développement et le déploiement d'une chaîne de valeur européenne pour les technologies de l'hydrogène renouvelable et bas carbone. Un budget d'un milliard d'euros de fonds publics a été proposé pour le Clean Hydrogen Partnership, qui est soumis à l'approbation du Parlement européen.

L'objectif principal du partenariat sera de soutenir la production, la distribution et le stockage d'hydrogène propre ainsi que l'approvisionnement des secteurs difficiles à décarboner, tels que les applications de transport lourd. Le processus de demande de financement auprès du *European Clean Hydrogen Partnership* sera probablement similaire à celui utilisé pour les demandes du FCH JU, c'est-à-dire des appels à projets périodiques avec une série de sujets spécifiques à traiter par des consortiums. Le premier cycle de financement devrait être lancé fin 2021 - début 2022 ¹¹¹.

The Recovery and Resilience Facility

Le mécanisme de relance et de résilience fait partie d'un ensemble de mesures de relance de 2 000 milliards d'euros voté par l'UE en réponse à la pandémie de coronavirus. Ce plan se compose d'un budget à long terme pour la période 2021-2027, d'un montant de 1 200 milliards d'euros, complété par 807 milliards d'euros par l'intermédiaire de NextGenerationEU, un instrument temporaire destiné à alimenter et soutenir la reprise. Au total, 30 % du budget sera consacré à la lutte contre le changement climatique. Le mécanisme de relance et de résilience mettra à disposition 672,5 milliards d'euros de prêts et de subventions pour soutenir les réformes et les investissements dans les États membres.

Afin d'accéder au soutien financier, les pays doivent préparer des plans de redressement et de résilience pour détailler les réformes et les projets d'investissement publics qu'ils prévoient. Les plans de relance et de résilience préparés par les États membres sont destinés à présenter des ensembles cohérents de réformes et d'initiatives d'investissement à mettre en œuvre au cours de la période allant jusqu'en 2026.

¹¹¹<https://www.h2bulletin.com/the-clean-hydrogen-partnership-to-start-funding-round-later-this-year/>

Le financement au titre du *Recovery and Resilience Facility* sera géré par les gouvernements nationaux, et les détails de la procédure de demande de soutien devraient être publiés par les gouvernements nationaux.

LIFE

Ce programme est le principal cadre de financement de l'Union européenne pour les politiques liées à l'environnement et au dérèglement climatique. Le prochain programme LIFE concernera la période 2021-2027 et voit son budget augmenter, à hauteur de 5,4 milliards d'euros. Parmi les principales nouveautés figurent un soutien accru à la réalisation du Pacte vert pour l'Europe et à la transition énergétique, pour lequel un sous-programme spécifique devrait être créé. Le sous-programme dédié à la transition énergétique est doté d'une enveloppe de 997 millions d'euros¹¹² sur la période 2021-2027.

En mars 2021, France Hydrogène a mis à disposition de ses membres, la cartographie des financements publics, un outil recensant plus de 200 aides et dispositifs de financements publics proposés par les Régions, l'Etat ou l'Union européenne, et pour lesquels les technologies de l'hydrogène sont éligibles. Un nouveau volet de la cartographie consacré aux financements privés a été ajouté en novembre 2021. Cet outil répond à un besoin des porteurs de projets d'obtenir plus de visibilité des multiples dispositifs et sources de financements proposés par les autorités régionales, nationales et européennes, ainsi que les acteurs privés.

Ces aides ont pour objectifs d'amorcer et d'accélérer la filière, permettant le déploiement des premiers projets dans l'attente d'une diminution significative des TCO, qui devrait être observée dans la deuxième moitié de la décennie. Elles sont un support indispensable à l'émergence des premiers projets, mais n'absorbent pas la totalité du surcoût. Pour des groupes de transport et de logistique, le surcoût à l'achat reste problématique et à intégrer dans des budgets d'investissement en matériel limités. Pour Schenker France par exemple, qui doit transformer un parc de plus de 3000 véhicules très rapidement, un investissement de 400 000 à 500 000 € dans un seul véhicule reste un effort financier considérable. Cela limite le nombre de camions dans lequel l'entreprise est en capacité d'investir à court terme. Le développement dans les prochains mois et années de financements à l'usage, en fonction du nombre de kilomètres parcourus, pourrait être la clé de l'émergence de la filière.

112- <https://www.ecologie.gouv.fr/programme-europeen-financement-life>

Des premières offres des constructeurs pouvant faciliter la gestion des surcoûts

En parallèle de ces aides, certains constructeurs (voire des sociétés de projet tierces) envisagent de proposer des modèles de location des véhicules permettant de limiter les risques d'investissement dans la technologie électrique à hydrogène. Par exemple pour les premiers déploiements conséquents de plusieurs centaines de véhicules annoncés par Hyundai et Hyzon, ceux-ci

proposent des modèles de leasing, comprenant notamment la maintenance et le carburant, permettant ainsi de dé-risquer les déploiements. Même si la diversité des formules proposées est à ce stade réduite par rapport aux catalogues des sociétés de leasing en place, ces contrats permettent d'apporter une assurance aux logisticiens et transporteurs, notamment lorsque les véhicules sont exploités de manière intensive, entraînant des kilométrages importants et une durée de vie réduite. Les sociétés de leasing leader sur le marché ne sont pas encore positionnées sur le poids lourd électrique à hydrogène pour le transport de marchandises, notamment car elles travaillent habituellement avec les grands constructeurs de poids lourds européens, qui proposeront des offres à partir de 2024-2025 pour la plupart. Les loueurs travaillent en revanche activement à faire intégrer les véhicules rétrofités dans leurs offres, ce qui laisse présager de la mise en place d'un nouveau modèle économique favorisant la technologie électrique à hydrogène à court terme.

En Suisse, Hyundai propose une offre de leasing full-service sur huit ans, avec tarification au kilomètre parcouru, calculée en fonction du kilométrage annuel et de la consommation prévue en hydrogène (estimation basée sur la consommation des véhicules Diesel équivalents).

Elle comprend le prix de l'hydrogène, qui varie chaque mois en fonction de l'évolution des prix du pétrole. Cette tarification kilométrique inclut également l'assurance, tous les

Figure 38 : Modèle de leasing proposé pour les premières unités en exploitation



frais d'immatriculation et de vérification annuelle des véhicules, les taxes et l'entretien des pneus. Elle ne comprend pas le chauffeur, les consommables (comme l'eau ou les ampoules), les réparations causées par le client ou le conducteur et non couvertes par l'assurance, l'auto-déduction de l'assurance ou encore les contraventions pour infraction au code de la route¹¹³.

La Suisse fait figure de pionnier dans le déploiement de poids lourds électriques à hydrogène, qui sont compétitifs avec les modèles diesels compte tenu des taxes au poids et au kilométrage qui s'appliquent sur les véhicules lourds qui traversent le pays (RPLP). Un TCO similaire à celui du diesel est atteint à partir d'un kilométrage de 80 000 km/an (voir étude de cas Hyundai, Suisse). En France, une prestation complète de leasing est en cours de développement par Hyliko (<https://hyliko.com/>).

3.3. Quelles réglementations à prendre en compte lors du montage d'un projet ?

La mise en œuvre de la stratégie nationale et européenne pour l'hydrogène conduit les institutions à des évolutions réglementaires pour les nouvelles applications de l'hydrogène. Cette réglementation se met en place depuis plusieurs années pour accompagner notamment le développement de la mobilité hydrogène, avec des évolutions supplémentaires attendues au fur et à mesure du développement de la filière, visant à assurer la sécurité de la technologie tout en mettant en place un contexte favorable à son développement.

Pour la filière de la mobilité hydrogène pour le transport de marchandises, les aspects réglementaires à prendre en compte concerneront essentiellement trois volets, développés dans cette section :

- Les véhicules ;
- Les infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène ;
- Les dépôts et ateliers de maintenance.

France Hydrogène, à travers son groupe de travail dédié à la réglementation, dont les coordinateurs ont informé cette partie du document, est engagée dans des discussions avec les services de l'État afin d'accompagner une évolution du cadre réglementaire au fur et à mesure que la mobilité hydrogène se développe, permettant de répondre aux besoins remontés par les membres de la filière.

113-Daniel Keller, COO de Hyundai Hydrogen Mobility, Séminaire HUGÉ : « Challenges and opportunities in Switzerland - lessons learnt », Juin 2021.

A cet égard, comme mentionné lors du Conseil National de l'Hydrogène du 30 septembre 2021, France Hydrogène et la DGPR ont élaboré une feuille de route conjointe sur les travaux d'évolutions à mener à court et moyen terme¹¹⁴.

3.3.1 Réglementation relative aux véhicules lourds électriques à hydrogène

Comme pour tout nouveau carburant qui se développe, l'adaptation de la réglementation se fait de manière progressive, en s'assurant d'abord de la sécurité des véhicules puis de la sécurité liée à leur utilisation et à leur circulation sur les réseaux routiers. Celle des véhicules est garantie par le constructeur qui fait homologuer et certifier (normes CE) ses véhicules auprès des services publics concernés. Des éléments relatifs aux réglementations applicables sont présentés en annexe 6. En complément de cela, les constructeurs ont généralement la charge de la maintenance des véhicules ou forment les mainteneurs de sorte que toutes les procédures de sécurité soient respectées et les garanties maintenues. De plus, les véhicules électriques à hydrogène sont soumis à des contrôles techniques réguliers (tout comme les véhicules thermiques classiques), qui sont réalisés par des centres agréés.

L'utilisation de ces véhicules pour le transport et leur circulation fait également l'objet d'une évaluation des risques. Par exemple, afin de permettre l'utilisation de camions à hydrogène pour le transport de marchandises dangereuses, un groupe de travail européen au sein de l'ADR a été lancé pour réaliser l'analyse de risques et définir les mesures de maîtrises de risques nécessaires à un transport en toute sécurité. Enfin, compte tenu des caractéristiques des véhicules électriques à hydrogène, des travaux complémentaires (ex : projet Hytunnel) sont également menés pour évaluer les risques liés à la circulation ou au stationnement dans les espaces confinés (tunnels, parkings souterrains...). En France, le CETU (Centre d'Étude des Tunnels) du Ministère des Transports anime un groupe de travail depuis fin 2019 dédié aux nouvelles énergies pour prendre en compte la spécificité des véhicules utilisant des gaz comprimés (GNV, hydrogène...). La DGSCGC (Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises) travaille également à la gestion de risques additionnels dus à ces nouvelles alternatives énergétiques, afin de définir une stratégie d'intervention appropriée lors des accidents impliquant ces camions.

114-DGPR, France Hydrogène, (2021). Accompagnement du développement de la filière hydrogène – stratégie réglementaire en matière de prévention des risques.



© GreenGT - Camion CATHyOPÉ



© Hyundai Hydrogen Mobility - Camion XCIENT Fuel Cell

A date d'écriture de ce document, plusieurs centaines de véhicules légers et plusieurs dizaines de bus électriques à hydrogène circulent d'ores et déjà sur les routes françaises, et plusieurs dizaines de milliers de véhicules électriques à hydrogène circulent dans le monde¹¹⁵, sans qu'aucun accident majeur n'ait été à déplorer. Ces véhicules circulent de façon similaire aux véhicules thermiques ou autres modes de propulsion alternatifs.

En résumé, comme pour tout nouveau carburant, la réglementation est en cours d'adaptation afin de permettre son utilisation en toute sécurité. Les évolutions en cours de la réglementation doivent définir un cadre précis s'appliquant aux véhicules neufs comme aux véhicules rétrofités.

3.3.2 Réglementation relative aux infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène

En France, afin de maîtriser les risques et les impacts relatifs aux installations pouvant présenter des dangers ou des nuisances pour la santé, la sécurité, l'environnement, etc., la loi définit et encadre la notion d'ICPE (installation classée pour la protection de l'environnement) et d'IOTA (Installations, Ouvrages, Travaux et Activités).

En matière d'hydrogène, les IOTA concernent essentiellement les prélèvements d'eau pour les électrolyseurs et les rejets d'eau à la suite de la combustion d'hydrogène. Les prélèvements sur le réseau d'eau potable n'étant pas concernés par la réglementation, les seuils de déclaration pour des prélèvements dans les nappes ou dans les cours d'eau ne sont susceptibles d'être dépassés que pour des électrolyseurs présentant des puissances de quelques MW. Les démarches peuvent être faites dans le même dossier que pour les ICPE, en précisant les rubriques IOTA dans la demande.

116-CEA, 2021. Dossier Hydrogène, filière d'avenir.

Il existe trois régimes de classement ICPE, à savoir déclaration (ou déclaration contrôlée), enregistrement et autorisation, qui correspondent à des niveaux croissants d'impacts potentiels. Dans le cas du régime de Déclaration (D, DC), il s'agit d'une télédéclaration à réaliser avant la mise en service de l'installation sans obligation liée à sa construction (cf. Article R512-47 du Code de l'Environnement). Les demandes d'enregistrement ou d'autorisation quant à elles doivent être adressées à la DREAL (direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) avant la construction de l'installation, qui donne récépissé de la demande et communique à l'exploitant les prescriptions générales applicables à l'installation, spécifique au régime auquel elle est soumise. Les niveaux d'exigence plus ou moins élevés de ces démarches sont décrits ci-dessous¹¹⁷.

- **La Déclaration (D) ou Déclaration Contrôlée (DC)** : la déclaration est une démarche simplifiée pour les installations de plus petites tailles. Les installations relevant du régime déclaration contrôlée (DC) sont soumises à des contrôles périodiques.

- **L'Enregistrement (E)** : l'enregistrement est une démarche intermédiaire d'autorisation simplifiée. Elle n'exige pas la réalisation d'études d'impact, de danger, ni d'enquête publique. Toutefois, ce régime est également soumis à une consultation simplifiée du public.

- **L'Autorisation (A)** : l'autorisation est une démarche plus complexe concernant des installations de grandes tailles ou présentant des risques plus élevés. Le requérant doit établir un dossier de demande d'autorisation comportant entre autres une étude de dangers et une étude d'impact, examinant notamment les conséquences du projet d'installation classée sur la santé des populations. Les services de l'État analysent le dossier et demandent si besoin des éléments complémentaires et/ou une expertise du dossier par un tiers. Tous les éléments sont présentés aux riverains par une procédure d'enquête publique, qui donne lieu à un avis consultatif. Le préfet décide ensuite d'accorder ou non l'autorisation d'exploiter et définit dans son arrêté d'exploitation les prescriptions particulières applicables à l'exploitation.

Les porteurs de projets doivent se rapprocher de la DREAL de leur région pour identifier les rubriques ICPE concernées pour leur projet et réaliser les démarches nécessaires simultanément au dépôt auprès de la commune du permis de construire.

112- Ministère de la Transition Ecologique, 2020. *Tout savoir sur les ICPE : nomenclature, gestion et déclaration.*

Les dossiers sont généralement portés par l'exploitant du site avec un support éventuel de ses prestataires pour la fourniture de certains équipements, et doivent aboutir avant de pouvoir commencer les travaux d'installation. De manière générale, il est conseillé d'entamer le dialogue avec les autorités concernées (avec la préfecture tout d'abord puis les pompiers et services de sécurité des personnes et enfin les autorités de sûreté, police et gendarmerie) dès le lancement des projets pour les informer et ainsi faciliter et accélérer les différentes procédures administratives. Ces démarches doivent être prises en compte dans le planning du projet : quelques mois pour une déclaration, et plutôt de l'ordre d'un an pour une autorisation.

Les principales rubriques ICPE relatives à la production et distribution d'hydrogène sont ici décrites.

La réglementation relative à la production d'hydrogène

Rubrique ICPE 3420 (régime A)¹¹⁸

La production d'hydrogène par électrolyse est régie par la rubrique ICPE 3420 (régime A), transposition dans la réglementation française de la directive européenne IED 2010/75/CE (Industrial Emission Directive), relative aux émissions industrielles. A ce titre, la production d'hydrogène par électrolyse est soumise à autorisation lorsque l'hydrogène est fabriqué en quantité industrielle. Cette notion est précisée dans une note d'interprétation, mais à date d'écriture de ce document, chaque projet reste soumis à une étude au cas par cas de la part des services de l'Etat afin de déterminer si le projet est soumis à cette rubrique ICPE ou non. Afin de clarifier ce point et ainsi simplifier l'instruction des projets de production d'hydrogène par électrolyse, France Hydrogène travaille avec la DGPR à la mise à jour de cette note d'interprétation¹¹⁹ par l'instauration d'un seuil à 6 MWe (voir feuille de route France Hydrogène - DGPR¹²⁰).

De plus, la directive européenne IED 2010/75/CE, dont la retranscription dans le corpus réglementaire français a donné lieu à la rubrique ICPE 3420, est également en cours de révision au niveau européen. La France a fait part de son souhait d'exclure la production par électrolyse de cette directive ou que des seuils soient fixés.

¹¹⁸- INERIS, Rubrique ICPE 1416.

¹¹⁹- INERIS, Notion de fabrication en quantité industrielle.

¹²⁰- GPR, France Hydrogène, (2021). Accompagnement du développement de la filière hydrogène – stratégie réglementaire en matière de prévention des risques.

Ainsi, cette réglementation est amenée à se transformer à deux niveaux, français et européen, et France Hydrogène travaille à une évolution de cette réglementation qui permette de simplifier les procédures pour l'électrolyse.

Garanties d'Origine et de Traçabilité de l'hydrogène

A ce stade de développement de la mobilité hydrogène en France et en Europe, un intérêt clair est identifié pour la mise en place de garanties d'origine et de traçabilité de l'hydrogène, permettant de simplifier la compréhension de quel hydrogène est utilisé où et pour quelles applications pour la mobilité. Jusqu'à présent, les fournisseurs d'hydrogène proposent bilatéralement une description précise de la provenance de l'hydrogène, mais une façon uniformisée et encadrée de faire cette description apportera un niveau supplémentaire de transparence et de clarté pour la filière. En ce sens, des travaux sur la définition des Garanties d'Origine (GO) et Garanties de Traçabilité (GT) de l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone sont en cours, notamment suite à l'Ordonnance n° 2021-167 du 17 février 2021 relative à l'hydrogène. Des textes d'application pour le décret sur la traçabilité de l'hydrogène renouvelable et bas-carbone sont attendus d'ici fin 2021.

Ils devraient définir les conditions d'émission, de transfert, d'annulation des garanties d'origine et de traçabilité de l'hydrogène ainsi que les enjeux des critères pour l'émission de GO H₂ renouvelable et de GO H₂ bas-carbone (approches physique et contractuelle). La désignation de l'organisme gestionnaire du registre des GO et des GT est attendue pour 2022.

La réglementation relative à la distribution de l'hydrogène

Rubrique ICPE 1416 (régime DC) ¹²¹

La distribution de l'hydrogène gazeux est régie par la rubrique ICPE 1416 (régime DC), définissant les prescriptions techniques à respecter dans une station-service hydrogène, ouverte ou non au public, lorsque la quantité journalière d'hydrogène gazeux transféré dans des réservoirs de véhicules est supérieure ou égale à 2 kgH₂ par jour.

¹²¹-INERIS, Rubrique ICPE 1416.

Parmi les prescriptions, on notera les seuils de pression en sortie des bornes de distribution, le débit maximal durant la recharge ou encore les distances de sécurité par exemple (entre les équipements, avec les limites du site et avec les modules de stockage de matières inflammables autres que l'hydrogène).

Cette réglementation a été mise en place en octobre 2018 avec la publication du Décret n°2018-900¹²² et a d'ores et déjà permis de mieux encadrer les stations de distribution d'hydrogène pour la mobilité en France. Cela étant, les développements de la filière et notamment celle du poids lourd électrique à hydrogène pourront amener à considérer de nouvelles évolutions réglementaires permettant de clarifier et encadrer les points réglementaires spécifiques à ces usages.

Ces évolutions devraient être favorables à la mobilité lourde, qui requiert des quantités d'hydrogène pour la distribution et de stockage plus conséquentes que les véhicules légers. Pourront notamment être révisés les seuils prévus pour les pressions d'usage, ainsi que les débits de distribution (maximum 120 gH₂/s en distribution haut débit à 350 bar). Cette limite n'est pas seulement réglementaire mais aussi technique. En effet, l'échauffement des tuyauteries et des réservoirs constitue souvent une limite et peut nécessiter un protocole adapté ainsi qu'un pré-refroidissement. Ainsi, au même titre que pour la production par électrolyse, des discussions sont en cours avec la DGPR, pour faire évoluer certaines prescriptions techniques. Elles prévoient notamment d'augmenter de l'ordre de 50 % le seuil maximal du flux de distribution haut débit, et d'étendre le haut débit à la technologie 700 bar, aujourd'hui limité à 60 gH₂/s.

Une contrainte spécifique à la réglementation française actuelle, que l'on ne retrouve pas chez nos voisins européens, est cependant susceptible de freiner le déploiement de stations multi-énergies, qui sont pourtant l'une des clés du déploiement harmonieux et efficace des carburants alternatifs. Il s'agit de la distance minimale de 10 à 14 mètres (selon les débits) imposée entre le distributeur d'hydrogène et les dispositifs contenant d'autres énergies, distance qui dans certaines conditions peut être réduite à 8 mètres¹²³ ou être encore réduite par l'installation d'une paroi.

¹²²Décret n° 2018-900 du 22 octobre 2018

¹²³Article 2.2. de l'arrêté du 22 octobre 2018 : dans le cas d'une « aire de distribution implantée à l'extérieur, ses équipements susceptibles de contenir de l'hydrogène sont à une distance minimale de 14 mètres pour un débit maximal de 120 g/s et de 10 mètres pour un débit maximal de 60 g/s (...) de tout stockage ou implantation de matières inflammables, combustibles ou comburantes autres que l'hydrogène ».

Plus précisément, d'après l'arrêté du 22/10/18 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE soumises à déclaration sous la rubrique n° 1416¹²⁴, les équipements susceptibles de contenir de l'hydrogène doivent être à une distance minimale de 14 mètres pour un débit maximal de 120 gH₂/s et de 10 mètres pour un débit maximal de 60 gH₂/s, y compris en cas de rupture du flexible, à compter des limites du site, des dispositifs d'aération, et de tout stockage ou implantation de matières inflammables, combustibles ou comburantes autres que l'hydrogène¹²⁵.

En tout point où l'exploitant ne peut respecter les distances d'isolement précitées, il peut mettre en place une paroi (respectant les conditions suivantes : pleine sans ouverture, construite en matériaux ayant des caractéristiques minimales de tenue au feu REI 120, dont la hauteur excède de 0,5 mètre celle du point le plus haut des équipements de l'aire de distribution, hors évier, sans être inférieure à 3 mètres).

Par ailleurs, les équipements susceptibles de contenir de l'hydrogène doivent être à une distance de 2 mètres des autres bornes de distribution d'hydrogène, et de 5 mètres des issues ou des ouvertures des locaux administratifs ou techniques de l'installation avec présence humaine, des places de stationnement à l'exclusion des emplacements utilisés par les véhicules en remplissage ou en attente de remplissage et des véhicules utilisés dans le cadre de l'exploitation de l'installation, des bornes de recharge électrique de véhicules ou autres bornes de distribution de carburant.

Des études de risque visant à faciliter le déploiement de stations multi-énergies sont menées par France Hydrogène, dont l'objectif est de permettre le rapprochement des distributrices hydrogène et des distributrices d'autres carburants à moins de 5 mètres, point crucial pour l'implantation de bornes hydrogène sur des sites stratégiques déjà équipés pour la distribution d'autres carburants.

Par ailleurs, la réglementation relative au remplissage liquide-liquide des véhicules, devra également s'étendre à l'hydrogène, notamment via les **rubriques 1435** (relative aux volumes de carburant liquide), **4734** (relative au stockage de produits pétroliers) et **1434-1435** (relatives au remplissage de réservoirs ou récipients mobiles).

124-INERIS, Arrêté du 22/10/18.

125-Ces distances de 14 mètres et 10 mètres sont réduites à 10 mètres pour un débit maximal de 120 gH₂/s et à 8 mètres pour un débit maximal de 60 gH₂/s, y compris en cas de rupture du flexible si le système anti-arrachement prévu au II de l'article 2.7.2 est conçu pour assurer une orientation à plus de 45° vers le haut du flux de gaz ou si des moyens techniques assurent automatiquement que le flux de gaz est stoppé au niveau du point de rupture éventuelle du flexible dans un délai inférieur à 2 secondes.

La réglementation relative au stockage de l'hydrogène

Rubrique ICPE 4715 (régime A ou D) ¹²⁶

La rubrique ICPE 4715 définit le seuil d'une tonne d'hydrogène stocké sur site en-dessous duquel le régime de déclaration s'applique et au-dessus duquel une demande d'autorisation est nécessaire. Au-dessus de 5 tonnes, l'installation passe sous le statut Seveso seuil bas¹²⁷, et la procédure d'autorisation requiert des pièces supplémentaires et une instruction plus poussée.

Comme décrit précédemment, le régime d'autorisation requiert le montage d'un dossier d'Autorisation Environnementale, dossier relativement exigeant, comprenant entre autres une étude de dangers et une étude d'impact et le cerfa n° 15964*01¹²⁸. Or, le seuil des 1000 kg d'hydrogène stockés devrait être atteint pour la plupart des projets de mobilité lourde. Par exemple, dès qu'une flotte atteint en ordre de grandeur 20 véhicules lourds (bus ou camion), le besoin de stockage nécessite une quantité totale présente dans l'installation qui peut être typiquement supérieure à 1 000 kgH₂.

Compte tenu des ambitions de la filière en termes de mobilité lourde, une réflexion est donc menée sur les possibilités d'évolution des seuils et de modification du régime ICPE applicable. En effet, dans le cadre de l'élaboration de la feuille de route cosignée par France Hydrogène et la DGPR, le passage à un régime d'enregistrement pour des stockages supérieurs à 1 tonne (jusqu'à un seuil supérieur à définir) est envisagé, sous réserve que suffisamment d'éléments prouvant que la sécurité n'est pas impactée soit apportés (études de dangers...). Cela permettrait d'accélérer nettement l'instruction des dossiers et donc le développement des projets.

▪ Métrologie légale

De manière générale, la filière a œuvré depuis plusieurs années à la mise en place d'une métrologie (ensemble des techniques permettant la mesure des quantités d'hydrogène transférées au cours d'un plein) adaptée pour la filière mobilité hydrogène. Les notions de métrologie sont notamment centrales pour une quantification précise et une tarification juste de l'énergie distribuée.

La mise à jour le 18/12/2020 de l'arrêté ministériel du 30 octobre 2009 traitant de la métrologie des ensembles de mesurage de masse de gaz comprimé pour les véhicules

¹²⁶-INERIS, Rubrique ICPE 4715

¹²⁷-Au sens de l'article R. 511-10 du décret n°2014-285

¹²⁸-Art. R.181-13 et suivants du Code de l'Environnement

intègre maintenant les exigences spécifiques aux stations de distribution hydrogène pour leurs certifications, leurs vérifications, et leurs réparations. Ainsi, la filière s'est mise en ordre de marche pour assurer la mise en conformité des stations existantes et futures, notamment par :

- Le développement des technologies des ensembles de mesurage de masses de gaz comprimé ainsi que les bancs d'étalonnage associés, notamment adaptés à la mobilité lourde ;
- Une mobilisation des acteurs de la chaîne de contrôle légale pouvant assurer les exigences réglementaires prescrites.

En attendant que la chaîne de contrôle et les équipements s'adaptent à la nouvelle réglementation, il est nécessaire d'obtenir des délais de mise en conformité des stations existantes. A date d'écriture de ce document, des échanges sont en cours avec les services de l'État sur ce sujet, et devraient apporter de la visibilité aux porteurs de projets.

3.3.3 Réglementation relative aux ateliers de maintenance et dépôts

Rubrique ICPE 2930 (régime DC ou E)¹²⁹

Les ateliers de réparation et d'entretien de véhicules et engins à moteur, y compris les activités de carrosserie et de tôlerie, sont soumis à la rubrique ICPE 2930, sous le régime de l'enregistrement ou de la déclaration, en fonction de la surface de l'atelier et de la quantité de produits de types vernis, peinture ou apprêt utilisée.

Cette rubrique a fait l'objet d'une modification par le Décret n°2020-559 du 12 mai 2020, qui a notamment redéfini le régime ICPE des ateliers ayant une surface supérieure à 5 000 m² ou une utilisation de vernis, peintures ou autres, supérieure à 100 kg/jour. Anciennement sous le régime de l'autorisation, ces ateliers sont désormais sous le régime de l'enregistrement.

Rubrique ICPE 2915 (D ou E)¹³⁰

La rubrique ICPE 2915 peut s'appliquer à la gestion des ateliers lorsqu'ils sont sujets à des procédés de chauffage utilisant comme fluide caloporteur des corps organiques combustibles.

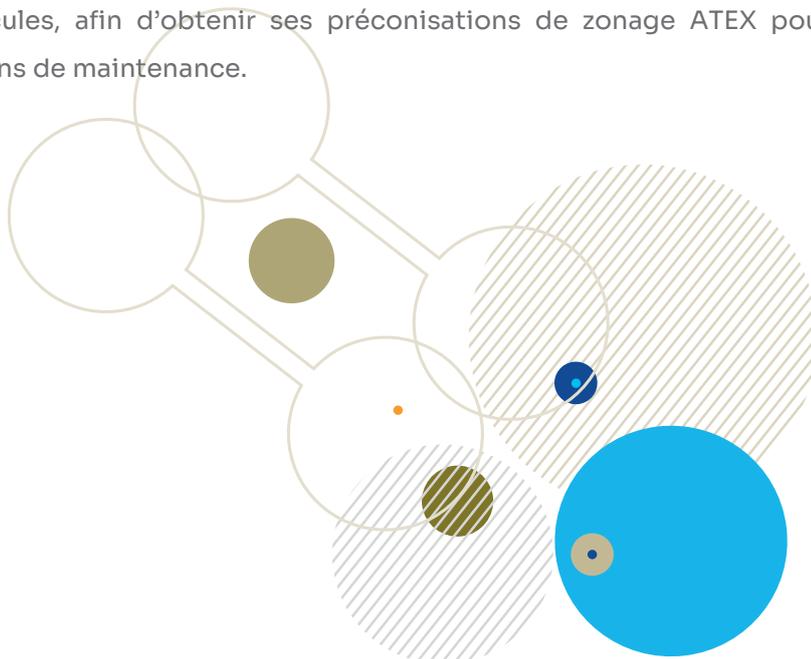
¹²⁹-INERIS, Rubrique ICPE 2930.

¹³⁰-INERIS, Rubrique ICPE 2915.

D'autres rubriques peuvent s'appliquer en fonction des activités de l'atelier :

- **Rubrique ICPE 2560** : Travail mécanique des métaux et alliages, pour les machines-outils par exemple ;
- **Rubriques 2563 et 2564** : Nettoyage et dégraissage de surface quelconque, pour les machines à laver de pièces, d'essieux ou de roulements par exemple ;
- **Rubrique 2910** : Combustion, pour les chaudières par exemple ;
- **Rubrique 2940** : Peinture, pour le tunnel de peinture par exemple ;
- **Rubrique 2925** : Charge d'accumulateur, pour les zones de chargement des batteries par exemple ;
- **Rubrique 2575** : Emploi de matière abrasive, pour les grenailleuses par exemple ;
- **Rubrique 2410** : Atelier de travail du bois, pour la menuiserie par exemple ;
- **Rubrique 4725** : Oxygène, pour les stockages d'oxygène par exemple ;
- **Rubrique 4719** : Acétylène, pour les stockages d'acétylène par exemple.

Les prescriptions techniques associées à ces ICPE nécessitent la mise en place d'équipements adaptés dans les dépôts et ateliers de maintenance. Il peut être envisagé d'adapter ou aménager un dépôt existant, ou d'en construire un nouveau. Dans les deux cas, une étude dédiée doit être réalisée, afin de s'assurer que le dépôt ou l'atelier de maintenance ait toutes les caractéristiques nécessaires pour l'exploitation d'une flotte de poids lourds électriques à hydrogène, à savoir (liste non exhaustive) : des installations permettant d'accéder aux toits des véhicules (où se situent généralement des équipements hydrogène dont les réservoirs), des détecteurs d'hydrogène, des équipements de ventilation du bâtiment, un sol antistatique, des éclairages certifiés ATEX, éventuellement des fenêtres ou portes coupe-feux, etc. (liste non exhaustive). Il est également important de disposer au plus tôt des documents techniques du fournisseur de véhicules, afin d'obtenir ses préconisations de zonage ATEX pour les différentes opérations de maintenance.



Tout personnel travaillant dans une zone ATEX doit être formé au niveau requis en fonction du type d'opération réalisée. L'habilitation ATEX délivrée par l'employeur est donc en lien étroit avec la formation de maintenance délivrée par le fournisseur des véhicules, pour laquelle il existe trois niveaux :

- **Niveau 0** : Personnel évoluant dans l'environnement sans intervention technique directe (techniciens de surface, personnes non accompagnées, conducteurs, etc.) ;
- **Niveau 1** : Personnel technique d'intervention de maintenance de premier niveau sur les véhicules (techniciens non spécialisés, cadres, etc.) ;
- **Niveau 2** : Personnel technique d'intervention de maintenance des établissements et des poids lourds capable de démonter et remonter un appareil hydrogène en toute sécurité (techniciens spécialisés, cadres, etc.).

Conclusion de la partie 3 : Comment construire un projet de déploiement de poids lourds électriques à hydrogène pour le transport de marchandises ?

• En cette phase d'amorçage de la filière, le succès des premiers déploiements de camions électriques à hydrogène repose sur trois éléments clés. D'abord, il est indispensable de mobiliser les acteurs de l'ensemble de la chaîne de valeur, qui doivent agir de concert pour permettre le développement de cette technologie innovante. Ensuite, les surcoûts en coûts totaux de possession des véhicules doivent être accompagnés et diminués, grâce d'une part à des subventions et autres soutiens financiers, et d'autre part par la création de synergies entre les usages, visant à maximiser la dimension des infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène, contribuant ainsi à une baisse des coûts par effets d'échelle. Enfin, durant la phase de démonstration, les calendriers des projets, incluant l'instruction des dossiers de financements, des procédures réglementaires et de la livraison des équipements doivent être anticipés, en s'appuyant sur les premiers retours d'expérience.



▪ Ainsi, la synergie entre les acteurs de la filière, les mécanismes de soutien financier et le partage des premiers retours d'expérience devraient permettre une multiplication des déploiements de camions électriques à hydrogène et d'infrastructures de production et de distribution associées. Dans un second temps, les effets d'échelles, la maîtrise du coût de l'électricité, et la R&D, devraient assurer une diminution des coûts de production et de distribution de l'hydrogène comme de fabrication des véhicules. Ainsi, les offres de camions électriques à hydrogène devraient être compétitives d'ici la fin de la décennie, la convergence des courbes de coûts totaux de possession de l'électrique à hydrogène et du diesel étant attendue à horizon 2030.

▪ La France et l'Europe investissent massivement pour soutenir le développement rapide de la filière et soutenir l'implantation forte de nombreuses entreprises européennes sur ce secteur. La Commission européenne a ouvert un nouvel appel à propositions dans le cadre du volet transports du Mécanisme pour l'Interconnexion en Europe afin de financer les infrastructures de carburants alternatifs, et doté de 1,2 Md€ contre les 300 M€ précédemment alloués. Lors du Conseil National de l'Hydrogène réuni à Bercy le 30 septembre 2021, a été annoncé l'engagement prochain de près de 2 milliards d'euros de subventions, qui s'ajoutent aux 7,2 milliards déjà engagés et qui permettront de soutenir au total plus d'une centaine de projets. Dans le cadre des PIIEC (Projets Important d'Intérêt Européen Commun), 15 projets d'envergure français ont été déjà pré notifiés à la Commission début septembre 2021, et représentent un potentiel d'investissement de 5,8 milliards d'euros, qui concerne des gigafactories de production d'électrolyseurs, des gigafactories de production des équipements pour la mobilité (piles à combustible, réservoirs, matériaux...) ou des trains à hydrogène, la décarbonation de l'industrie lourde (raffineries, cimenteries, aciéries).

▪ Enfin, afin de contribuer à l'accélération de la filière, la réglementation relative à la mobilité hydrogène a évolué au cours de ces dernières années, et cette évolution se poursuit afin de favoriser et encadrer les développements du transport lourd électrique à hydrogène.

Conclusion : Quelles seront les clés pour la concrétisation d'une filière du transport de marchandises à l'hydrogène et à quels horizons de temps ?

L'enquête utilisateurs menée par Hydrogen Europe et France Hydrogène a montré l'appétence des acteurs de la filière du transport de marchandises, prêts à s'engager en nombre sur la voie de l'électrique à hydrogène, technologie zéro émission à l'échappement, comparable aux véhicules thermiques sur le plan opérationnel. Cette enquête ayant été réalisée fin 2019, cet intérêt s'est probablement encore amplifié depuis, étant donné l'actualité sur le secteur de l'hydrogène ces deux dernières années et les annonces plus concrètes des constructeurs. Le gouvernement français a notamment annoncé en septembre 2020, dans le cadre du Plan de Relance, la Stratégie nationale hydrogène, à travers laquelle une dotation globale de plus de 7,2 Md€ a été attribuée pour le développement de la filière jusqu'à l'horizon 2030, dont 3,4 Md€ sur la période 2020-2023. Le Plan « France 2030 » annoncé le 12 octobre 2021 renforce encore davantage l'importance du sujet hydrogène avec un effort supplémentaire de 1,9 Md€.

En effet, une transition vers des véhicules zéro émission est devenue incontournable pour les transporteurs : ils sont à la fois poussés par une conscience grandissante de leur responsabilité environnementale, confrontés à une pression sociétale forte, qui se traduit aussi par des exigences de plus en plus fortes de leurs clients à travers leurs cahiers des charges RSE, et enfin confrontés à des impératifs réglementaires de plus en plus contraignants et en faveur du zéro émission. Ils sont donc fortement incités au remplacement progressif de leurs véhicules thermiques, dont l'offre est amenée à disparaître d'ici 2040 au plus tard, mais en demande de plus de visibilité sur l'évolution des conditions techniques et économiques de cette transition proposée par le vecteur hydrogène.

Afin de répondre à cette demande, et de proposer une feuille de route viable pour la filière, on observe actuellement un fort développement de l'offre de véhicules et la fourniture de carburant hydrogène, qui devra s'intensifier :

- Le marché a besoin d'une offre de camions disponibles, fiables et produits en grande série afin de diminuer à la fois les prix et les délais de livraison des véhicules. L'enquête utilisateurs a souligné que les opérateurs de poids lourds sont globalement favorables à la solution hydrogène, mais veulent voir se matérialiser des offres adaptées à leurs besoins opérationnels.

- Les opérateurs soulignent l'importance de combler rapidement l'écart avec les véhicules Diesel en termes de coût total de possession. Le marché ne pourra pas se développer significativement sans une réduction importante du surcoût actuel. Sur ce dernier plan, une valeur de +10 % par rapport au diesel semble un objectif maximum pertinent et réaliste à terme. La diminution du prix des véhicules comme de l'hydrogène à la pompe sera donc primordiale, avec un prix de l'hydrogène stable et prédictible : en effet, l'hydrogène porte la promesse d'une énergie relativement immune aux fluctuations des marchés spéculatifs des énergies fossiles, une caractéristique que les transporteurs peuvent transformer en atout de compétitivité et de rentabilité.
- Le développement d'un réseau de stations structurant et maillant l'ensemble des hubs et grands axes du transport logistique sera nécessaire. Les transporteurs ne se lanceront dans l'hydrogène que s'il existe un réseau de stations d'avitaillement performant, fluidifiant le fonctionnement opérationnel. Sur ce dernier plan, les perspectives d'évolution concernant les remplissages haut débit laissent présager des temps de remplissage accélérés, alignés sur celui des équivalents diesels.
- Enfin, le développement d'un marché du poids lourd électrique à hydrogène passera également par la création d'une offre de maintenance pertinente et adaptée aux besoins des transporteurs, et d'une manière générale de tous les services supports et de financement nécessaires au fonctionnement optimal de cette filière.

Cette offre, dans une phase d'amorçage, s'apprête à connaître un développement rapide qui devrait lui permettre d'atteindre la maturité suffisante pour constituer une alternative crédible au diesel dans les années à venir. Elle pourra se matérialiser grâce à un développement coordonné de la filière, assurant la création d'un marché national et européen structurant, intégrant les besoins des acteurs de l'ensemble de la chaîne de valeur (producteurs et distributeurs d'hydrogène, constructeurs de véhicules et équipements associés, transporteurs et logisticiens, chargeurs etc.).

Sur le plan temporel, la décennie en cours sera déterminante pour le développement du marché, avec une phase critique d'innovation et de premiers développements suivie d'une accélération sensible du marché permettant d'accéder à un marché mature :

▪ **Jusqu'à 2025** : une phase d'amorçage marquée par le déploiement de premiers prototypes, de pré-séries de véhicules en 2023-2024, et d'un certain nombre de stations hydrogène adaptées aux poids lourds. Ces déploiements concernent en majorité des segments de poids lourds répandus (les véhicules plus spécifiques arriveront dans un second temps), et tout particulièrement les premiers camions porteurs ciblant des usages régionaux. Dans cette première phase, les déploiements sont largement soutenus par des subventions dans le but de contribuer à la réduction du surcoût par rapport aux modèles Diesel, autour d'écosystèmes de production et distribution eux aussi soutenus pour la plupart par des financements publics. Les premiers véhicules concernent donc essentiellement des flottes captives afin d'accompagner le développement du réseau d'infrastructures de recharge et de garantir un taux d'utilisation important aux stations. Les spécialistes du groupage, dénommés « messagers », représentent également une catégorie de transporteurs particulièrement adaptée aux premiers déploiements, qui pourrait favoriser la mise en place rapide d'un réseau de distribution d'hydrogène cohérent. Les déploiements de véhicules au cours de cette première phase permettent de bénéficier de retours d'expérience stratégiques et d'assurer une montée en compétence rapide de la part des acteurs de la filière. Ils jouent également un rôle important pour communiquer auprès des sociétés de transports routiers et favoriser l'adoption de la technologie hydrogène.

▪ **De 2025 à 2028** : des déploiements plus conséquents, d'ores et déjà en cours de planification, et marqués par une augmentation de la capacité de production des véhicules et des premières séries industrielles, notamment de constructeurs européens. Cette phase sera également marquée par une diversification du catalogue de modèles disponibles, avec de nouveaux segments de véhicules adressés par les constructeurs. Cette période devrait voir une consolidation des chaînes de production sur le territoire européen avec des investissements significatifs des constructeurs pour conserver leur part de marché. Cette deuxième phase devrait être celle du passage à l'échelle avec une industrialisation de la production et une conversion de l'industrie sur l'ensemble des maillons de la chaîne de valeur. En outre, cette seconde phase devrait être marquée par une accélération du développement du réseau d'infrastructures, conformément aux objectifs fixés par l'Europe dans la nouvelle réglementation Carburants Alternatifs, et plusieurs plans nationaux en Europe de l'Ouest.

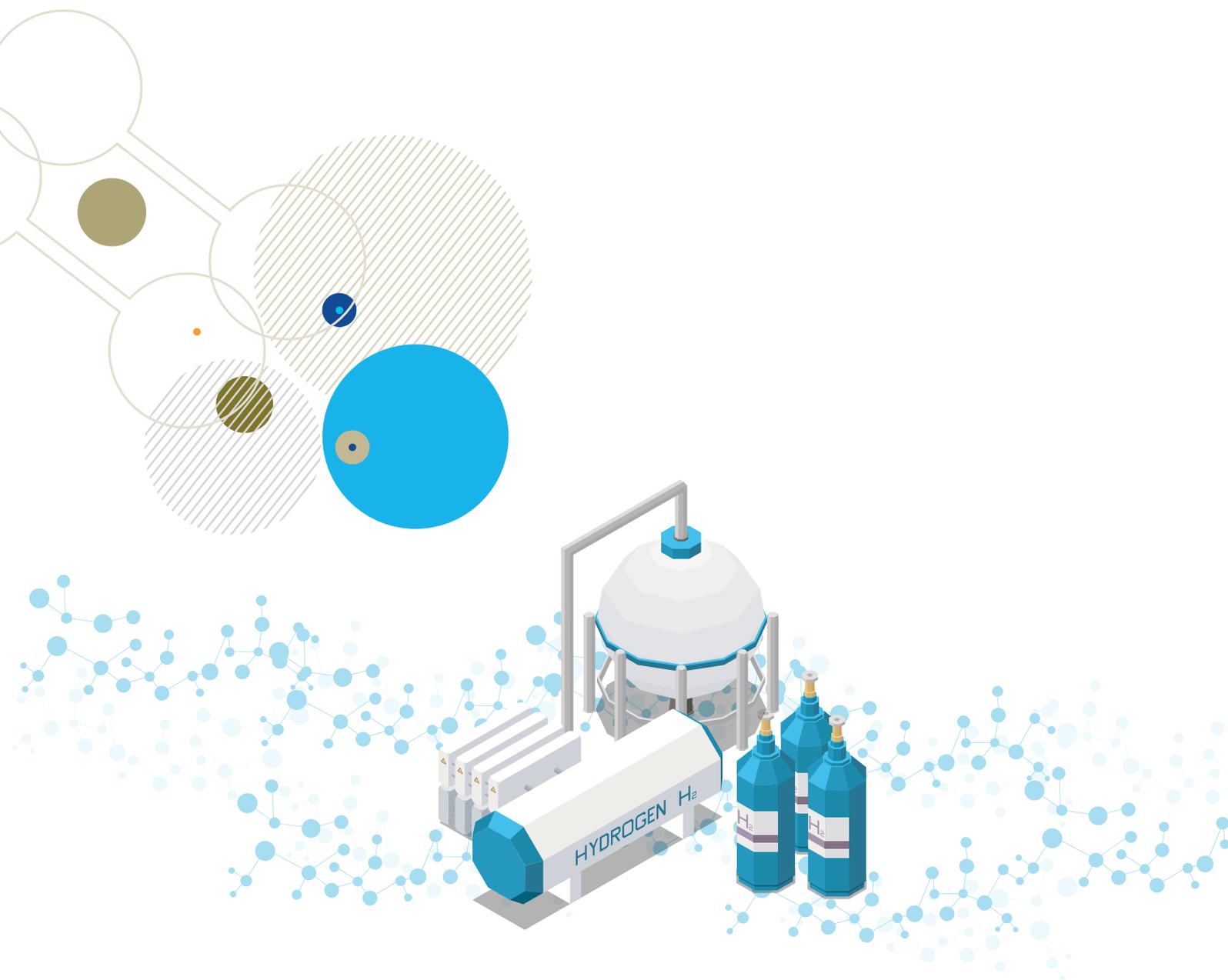
L'objectif sera d'assurer un déploiement coordonné des véhicules et des stations pour maximiser la compétitivité de l'hydrogène à la pompe et assurer un maillage structurant sur l'ensemble des points et axes clés permettant de réaliser des trajets transrégionaux et transeuropéens.

▪ **De 2028 au début de la décennie 2030** : l'atteinte de la maturité du marché, marquée par le développement de grandes séries industrielles par les constructeurs et l'accès à un prix de l'hydrogène à la pompe diminué (avec 5 €/kgH₂ en ordre de grandeur). Les déploiements de véhicules devront s'accélérer sur les corridors régionaux, nationaux et européens avec un réseau de plus en plus conséquent de stations hydrogène (objectif de 1000 stations déployées en France en 2028). Cette période devra être marquée par la continuation de l'effort national et européen, et par une législation favorable au développement de l'hydrogène. L'industrie devrait également être amenée à fournir un effort de recherche et développement toujours important, sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Afin d'atteindre les objectifs fixés par ce calendrier ambitieux, l'ensemble des acteurs de la filière se mettent d'ores et déjà en ordre de marche pour assurer le passage à l'échelle de la production de véhicules et de carburants, mais aussi pour le déploiement des réseaux de recharge et de maintenance associés.

Les institutions et les pouvoirs publics sont également engagés pour favoriser le développement accéléré de la filière, tant sur les aspects réglementaires, qui ne doivent pas freiner les déploiements, que sur le plan financier. En premier lieu, l'Union Européenne se mobilise pour la mise en place de réglementations homogènes sur l'ensemble du territoire européen afin d'encadrer le transport de marchandises par des véhicules électriques à hydrogène. En outre, des mécanismes de soutien à la R&D, au déploiement des infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène, et à l'acquisition des camions, sont mis en place, et représentent une aide clé pour l'accélération de la filière et la diminution du surcoût du coût total de possession. Enfin, la fiscalité favorisant l'hydrogène, couplée à une augmentation continue de la taxe carbone, devrait permettre de faire de la technologie électrique à hydrogène une alternative zéro émission compétitive avec le diesel, en plus d'être comparable sur le plan opérationnel.

Un croisement des courbes de coût total de possession entre combustibles fossiles, à la hausse, et hydrogène, à la baisse, est un scénario hautement probable : dans une production massifiée, les véhicules électriques à hydrogène pourraient à terme être, moins chers que les véhicules diesel. La vitesse à laquelle ces courbes se croiseront dépendra surtout de l'évolution des prix dans les marchés de l'énergie, entre énergies fossiles et énergies renouvelables.



Annexes

1. Enquête utilisateurs Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité

Afin d'appréhender le positionnement des acteurs de la filière du transport de marchandises européenne et de confronter les performances des solutions bas carbone ou zéro émission à la réalité terrain, une enquête utilisateurs a été conduite conjointement par Hydrogen Europe et France Hydrogène Mobilité.

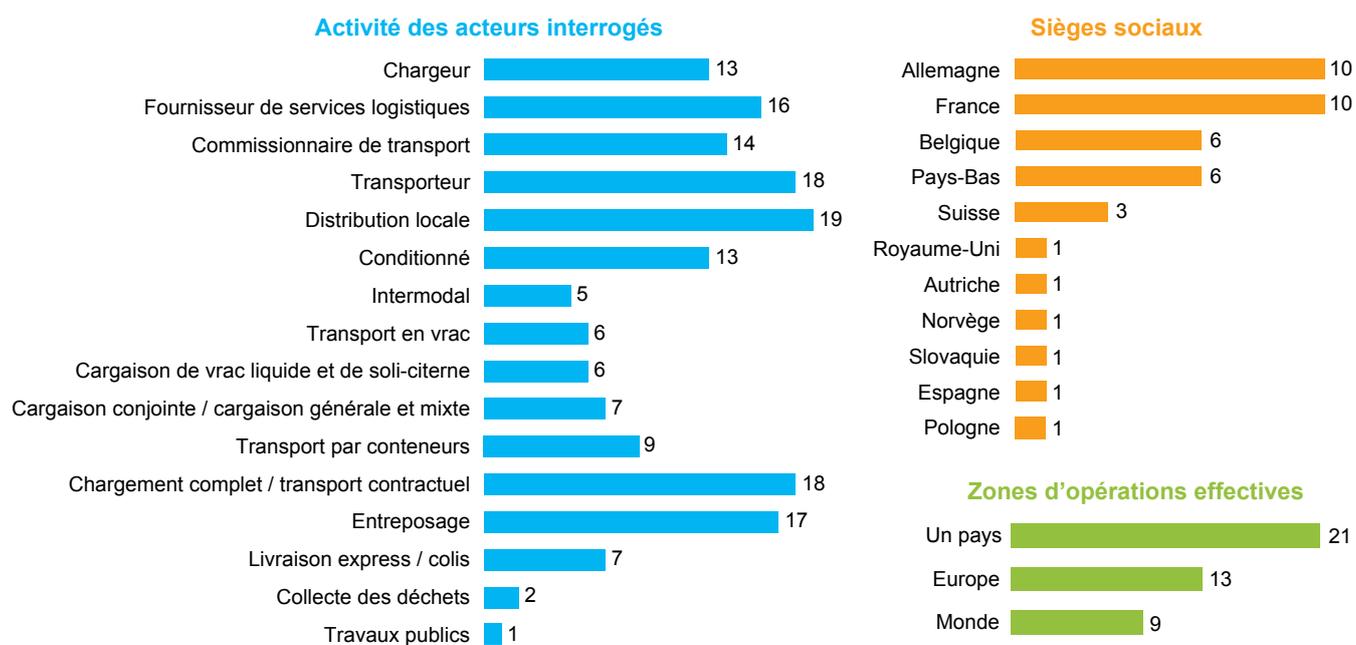
Dans le cadre de cette étude, 44 entreprises¹³¹ ont été interrogées au cours des troisième et quatrième trimestres 2019, avec pour objectif de comprendre le point de vue des acteurs du transport et de la logistique sur l'état actuel du marché des camions électriques à hydrogène, sur les évolutions attendues pour la prochaine décennie et sur le rôle de l'hydrogène.



Les acteurs européens interrogés sont répartis sur l'ensemble de la chaîne de valeur du transport de marchandises, des chargeurs aux transporteurs, et sont positionnés sur des types de transport et de marchandises variés, incluant par exemple le transport en vrac, par conteneurs, en distribution locale ou en intermodal (voir Figure 39).

¹³¹Liste des entreprises ayant contribué l'enquête, hors 5 d'entre elles ayant décidé de garder l'anonymat : Albert Heijn, ALDI, ALFAFLEX, ASKO, Auto1, Biocoop, Bioway, BMW Group, bpost, Breytner, Carrefour Supply Chain, COOP, DB SCHENKER, Deutsches Post DHL Group, DON-Trucking, FAHRNER, FM LOGISTIC, Group GTS, H. ESSERS, H2 TRANSPORTE, HARY, Heineken, HUETTEMANN, Intermarché, MIGROS, MIRATRANS, MPREIS, NINATRANS, P&O FERRYMASTERS, PETER APPEL Transport, PREMAT, REMITRANS, SNEL, STEF, SUEZ, Transportes Insausti, TRANSPORTS CHABAS, Unilever, Veolia.

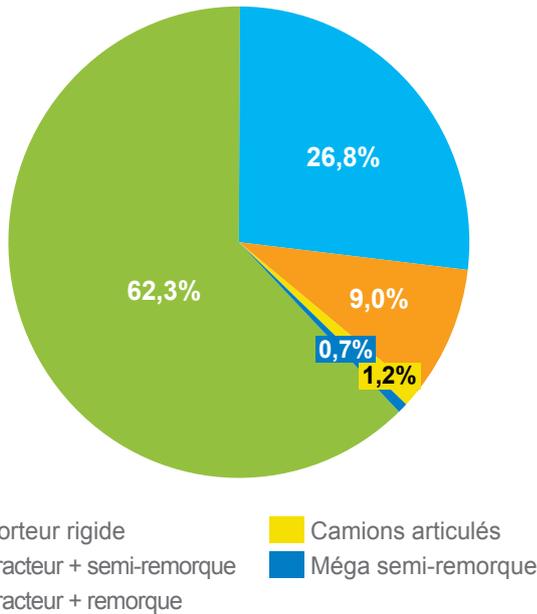
Figure 39 - Les acteurs interrogés sont actifs sur les différents segments de la chaîne d’approvisionnement logistique, dans plusieurs pays d’Europe



La flotte de véhicules concernée par cette enquête s’élève à 67 000 camions.

Comme le montrent la Figure 40 et la Figure 41 ci-dessous, cette flotte est essentiellement composée de porteurs rigides (62 %) et de tracteurs, à remorque ou semi-remorque (35 %), qui effectuent des missions aux kilométrages variés. Ainsi, 30 % des missions effectuées sont de type livraison urbaine, représentant 100 à 200 km par jour, 66 % sont des missions de distribution régionale, entre 200 et 500 km par jour, et seulement 5 % sont du transport long-courrier, à plus de 500 km par jour.

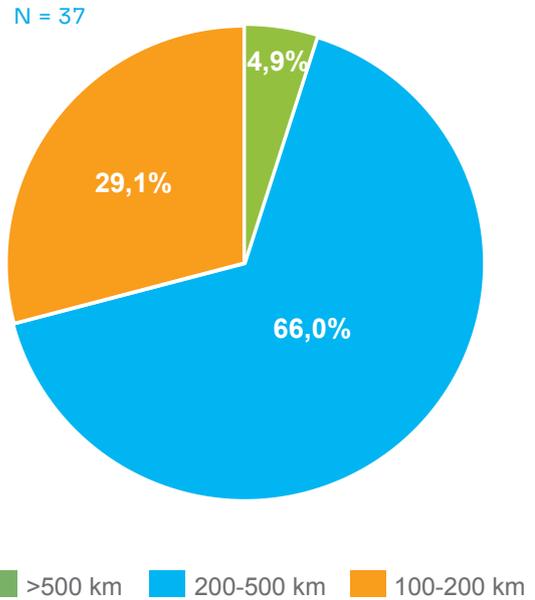
Figure 40 - Répartition de la flotte des entreprises interrogées par type de camion



* Taille totale de la flotte : 67 000 camions



Figure 41 - Parts des opérations de transport urbain, régional et national/international dans les flottes des acteurs interrogés



2. Hypothèses relatives aux composants embarqués

Tableau 4 – Hypothèses relatives à la densité massique des composants embarqués en 2023 et 2030*

	2023	2030
Densité grande batterie (pour véhicule électrique à batterie)	0,176 kWh/kg	0,233 kWh/kg
Densité petite batterie (pour véhicule électrique à hydrogène)	0,141 kWh/kg	0,186 kWh/kg
Densité réservoir hydrogène	0,06 kgH ₂ /kg	0,07 kgH ₂ /kg
Masse StackPack 300 kW	280 kg	280 kg

* Données issues de l'étude FCH JU, « Fuel Cells Hydrogen Trucks », 2020, et des travaux de France Hydrogène Mobilité.

Tableau 5 – Hypothèses sur les caractéristiques des composants embarqués par un tracteur semi-remorque de 44 t, et de 500 km d'autonomie*

Capacité embarquée grande batterie tracteur électrique à batterie	750 kWh
Capacité utile grande batterie tracteur électrique à batterie	635 kWh
Capacité embarquée petite batterie tracteur électrique à hydrogène	110 kWh
Puissance pile à combustible tracteur électrique à hydrogène	300 kW
Capacité embarquée réservoir tracteur électrique à hydrogène	45 kgH ₂
Capacité utile réservoir tracteur électrique à hydrogène	40 kgH₂

* Données issues de l'étude FCH JU, « Fuel Cells Hydrogen Trucks », 2020, et des travaux de France Hydrogène Mobilité.

Tableau 6 – Hypothèses relatives à la masse des composants embarqués d'un tracteur Diesel 44 t, de 500 km d'autonomie, en 2023 et 2030*

	2023	2030
Masse du moteur Diesel	1000 kg	1000 kg
Masse totale des composants embarqués	1000 kg	1000 kg

* Valeur en ordre de grandeur et utilisée comme donnée de base pour comparaison avec les autres solutions.

Tableau 7 – Hypothèses relatives à la masse des composants embarqués d'un tracteur électrique à batterie 44 t, de 500 km d'autonomie, en 2023 et 2030

	2023	2030
Masse du moteur électrique	350 kg	350 kg
Masse de la batterie	4260 kg	3220 kg
Masse totale des composants embarqués	4610 kg	3570 kg

Tableau 8 – Hypothèses relatives à la masse des composants embarqués d'un tracteur électrique à hydrogène 44 t, de 500 km d'autonomie, en 2023 et 2030

	2023	2030
Masse du moteur électrique	350 kg	350 kg
Masse de la batterie	780 kg	590 kg
Masse du système pile à combustible (stackpack 300 kW)	280 kg	280 kg
Masse du réservoir à hydrogène	750 kg	640 kg
Masse totale des composants embarqués	2160 kg	1860 kg

Les données présentées dans les tableaux 6, 7 et 8, relatives aux masses des composants des véhicules, sont issues de plusieurs entretiens avec des spécialistes de la filière, notamment avec des membres du groupe France Hydrogène Mobilité.

3. Hypothèses relatives aux impacts environnementaux

Tableau 9 - Facteur d'émission des différents types de carburant

Type de Carburant	Facteur d'émission (amont + échappement)
Hydrogène électrolyse, mix France ¹³⁷	3,6 kgCO _{2e} /kgH ₂
Hydrogène électrolyse, mix 100 % EnR ^{*132}	2,2 kgCO _{2e} /kgH ₂
Hydrogène électrolyse, éolien ¹³⁷	1,4 kgCO _{2e} /kgH ₂
Electricité, mix français pour le transport ¹³³	0,06 kgCO _{2e} /kWh
Electricité, mix 100 % EnR ^{*139 137}	0,02 kgCO _{2e} /kWh
Electricité issue de l'éolien ¹³⁴	0,014 kgCO _{2e} /kWh
GNL ¹³⁵	3,28 kgCO _{2e} /kg
GNC ¹³⁶	2,96 kgCO _{2e} /kg
BioGNC ¹³⁷	0,61 kgCO _{2e} /kg
Gazole ¹³⁸	3,1 kgCO _{2e} /L

* Le « mix 100 % EnR » désigne un mix entre électricité d'origine éolienne à 63 %, solaire à 17 %, hydraulique à 13 %, et thermique à 7 %, proportions permettant de techniquement satisfaire la demande française, d'après le rapport « un mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations », Ademe, 2015.

Tableau 10 – Consommations moyennes des véhicules de chaque segment, considérées pour le calcul des émissions de GES de chaque mode de propulsion (voir annexe 4)

Segments de véhicules	Porteurs, transport urbain	Porteurs, transport régional	Tracteurs (semi-remorques), transport régional	Tracteurs (semi-remorques), long-courrier
Consommation Gazole	23 L/100 km	25 L/100 km	31 L/100 km	28 L/100 km
Consommation (bio) GNV (GNC ou GNL)	23 kg/100 km	25 kg/100 km	31 kg/100 km	28 kg/100 km
Consommation H ₂	5,5 kg/100 km	6 kg/100 km	8 kg/100 km	7 kg/100 km
Consommation électricité	110 kWh/100 km	118 kWh/100 km	132 kWh/100 km	127 kWh/100 km

132-ADEME, 2020. Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène.

133-<https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element/categorie/690>

134-<https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element/categorie/71>

135-<https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element/categorie/405>

136-https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?new_liquides.htm

137-<https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter/liste-element/categorie/462>

138-https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?new_liquides.htm

Tableau 11 - Emissions GES du puits à la roue des véhicules de chaque segment par type de carburant*

Segments de véhicules	Porteurs, transport urbain	Porteurs, transport régional	Tracteurs (semi-remorques), transport régional	Tracteurs (semi-remorques), long-courrier
Emissions par type de carburant (kgCO₂e/100 km)				
Hydrogène électrolyse, mix France	19,8	21,6	28,8	25,2
Hydrogène électrolyse, mix 100 % EnR	12,1	13,2	17,6	15,4
Hydrogène électrolyse, éolien France	7,7	8,4	11,2	9,8
Electricité, mix France	6,6	7,1	7,9	7,6
Electricité, mix 100 % EnR	2,2	2,4	2,7	2,6
Electricité éolienne France	1,6	1,7	1,9	1,8
GNL	75,4	82	101,7	91,8
GNC	68,1	74	91,8	82,9
BioGNC	14,0	15,2	18,8	17,0
Gazole	71,3	77,5	96,1	86,8

* Données résultant des hypothèses présentées dans les tableaux 9 et 10.

4. Hypothèses relatives aux aspects opérationnels

Les caractéristiques opérationnelles telles que la consommation, l'autonomie et puissance / couple moteur des véhicules de chaque segment du transport de marchandises varient grandement en fonction de l'alternative énergétique sélectionnée.

Tableau 12 - Consommation des véhicules de chaque segment par type de carburant¹³⁹

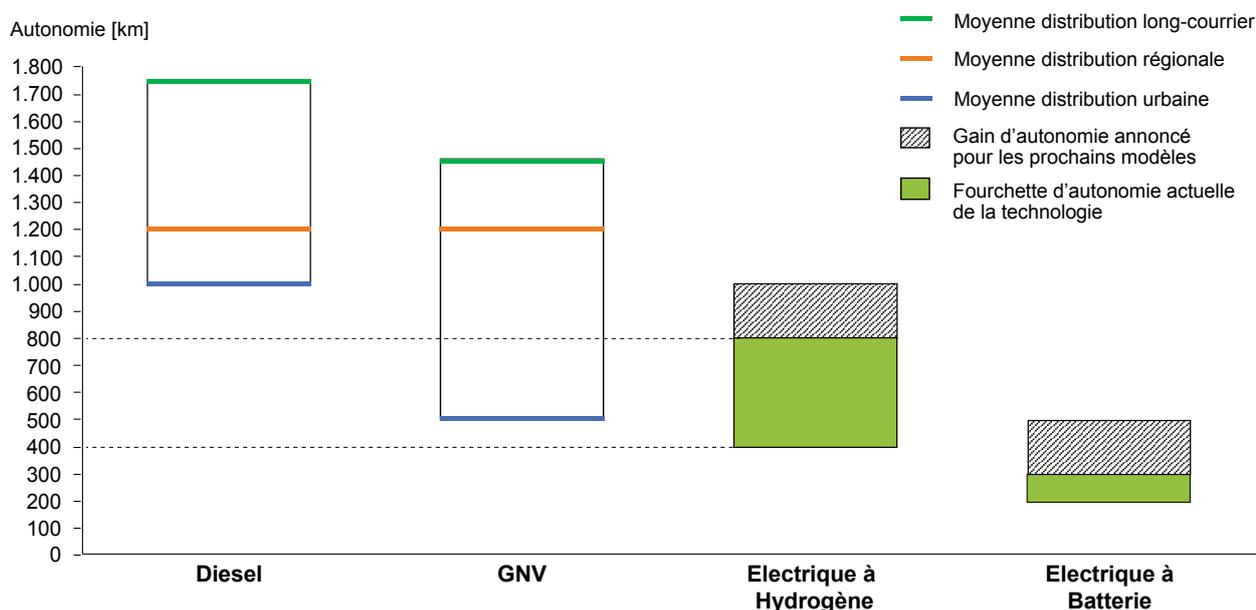
Segments de véhicules	Porteurs, transport urbain	Porteurs, transport régional	Tracteurs (semi-remorques), transport régional	Tracteurs (semi-remorques), long-courrier
Consommation				
Consommation Gazole	15-26 L/100 km	23-30 L/100 km	28-32 L/100 km	28-32 L/100 km
Consommation (bio) GNV (GNC ou GNL)	14-26 kg/100 km	23-30 kg/100 km	25-29 kg/100 km	25-29 kg/100 km
Consommation H ₂	4-6,5 kg/100 km	6-7,5 kg/100 km	7-10 kg/100 km	7-10 kg/100 km
Consommation électricité	40-110 kWh/100 km	80-140 kWh/100 km	80-180 kWh/100 km	80-160 kWh/100 km

139- Les fourchettes de consommation des véhicules Diesel et GNV sont issues des retours terrain synthétisés et partagés par la FNTR, celles des véhicules électriques à batterie et à hydrogène sont adaptées de l'étude FCH JU, 2020. « Fuel Cells Hydrogen Trucks – Heavy-Duty's High Performance Green Solution », et de l'équipe Transport d'Element Energy.

Tableau 13 – Autonomie des véhicules de chaque segment par type de carburant

Segments de véhicules	Porteurs, transport urbain	Porteurs, transport régional	Tracteurs (semi-remorques), transport régional	Tracteurs (semi-remorques), long-courrier
Véhicule Diesel	500-1500 km	880-1560 km	1500-1960 km	1690-2290 km
Véhicule GNV (GNC ou GNL)	140-800 km	880-1560 km	560-1550 km	1350-1550 km
Véhicules électriques à hydrogène	400-800 km pour les modèles actuels, 800-1000 km annoncés pour les modèles en cours de prototypage			
Véhicules électriques à batterie	170-180 km	< 260 km	-	-

Figure 42 – Intervalles d'autonomies observées par les exploitants de camions Diesel et GNV, en comparaison aux véhicules électriques à batterie et à hydrogène¹³⁹



139- Les fourchettes de consommation des véhicules Diesel et GNV sont issues des retours terrain synthétisés et partagés par la FNTR, celles des véhicules électriques à batterie et à hydrogène sont adaptées de l'étude FCH JU, 2020. « Fuel Cells Hydrogen Trucks – Heavy-Duty's High Performance Green Solution, et de l'équipe Transport d'Element Energy.

5. Hypothèses de coûts des camions électriques à hydrogène et diesel des quatre segments étudiés

Tableau 14 – Hypothèses générales relatives aux carburants*

		2021	2027	2030
Prix hydrogène	€/kg	10	7	5
Prix Diesel	€/l	1,02	1,26	1,5
Prix AdBlue	€/l		0,28	
Taux de dilution AdBlue	%		8,5	

* Les hypothèses ont été élaborées dans le cadre de travaux du Groupe de Travail Camions H₂ de France Hydrogène Mobilité au cours de l'année 2020, certaines données pourront faire l'objet de révisions dans le cadre des travaux de 2022.

Tableau 15 – Hypothèses relatives aux porteurs de distribution urbaine*

		Diesel			Electrique à hydrogène		
		2021	2027	2030	2021	2027	2030
Coût d'investissement (dont moteur, PAC, réservoir, etc)	€/camion	62 000	64 000	64 000	200 000	160 000	137 880
Consommation gazole	l/100km	23					
Consommation hydrogène	kg/100km				5,9	5,9	5,4
Maintenance	€/km	0,12			0,24	0,17	0,09
Péages	€/camion/an	0			0		
Taxe à l'essieu	€/camion/an	124			124		
Assurances	€/camion/an	2000			2000		

* Les hypothèses ont été élaborées dans le cadre de travaux du Groupe de Travail Camions H₂ de France Hydrogène Mobilité au cours de l'année 2020, certaines données pourront faire l'objet de révisions dans le cadre des travaux de 2022.

Tableau 16 – Hypothèses relatives aux porteurs de distribution régionale*

		Diesel			Electrique à hydrogène		
		2021	2027	2030	2021	2027	2030
Coût d'investissement (dont moteur, PAC, réservoir, etc)	€/camion	80 000	82 000	82 000	300 000	250 000	128 640
Consommation gazole	l/100km	25					
Consommation hydrogène	kg/100km				7	7	6,3
Maintenance	€/km	0,12			0,24	0,17	0,09
Péages	€/camion/an	2500			2500		
Taxe à l'essieu	€/camion/an	224			224		
Assurances	€/camion/an	2000			2000		

* Les hypothèses ont été élaborées dans le cadre de travaux du Groupe de Travail Camions H₂ de France Hydrogène Mobilité au cours de l'année 2020, certaines données pourront faire l'objet de révisions dans le cadre des travaux de 2022.

Tableau 17 – Hypothèses relatives aux tracteurs de distribution régionale*

		Diesel			Electrique à hydrogène		
		2021	2027	2030	2021	2027	2030
Coût d'investissement (dont moteur, PAC, réservoir, etc)	€/camion	85 000	87 500	87 500	400 000	350 000	179 550
Consommation gazole	l/100km	31					
Consommation hydrogène	kg/100km				9	9	8,5
Maintenance	€/km	0,12			0,24	0,17	0,09
Péages	€/camion/an	7000			7000		
Taxe à l'essieu	€/camion/an	516			516		
Assurances	€/camion/an	2000			2000		

* Les hypothèses ont été élaborées dans le cadre de travaux du Groupe de Travail Camions H₂ de France Hydrogène Mobilité au cours de l'année 2020, certaines données pourront faire l'objet de révisions dans le cadre des travaux de 2022.

Tableau 18 – Hypothèses relatives aux tracteurs long-courriers*

		Diesel			Electrique à hydrogène		
		2021	2027	2030	2021	2027	2030
Coût d'investissement (dont moteur, PAC, réservoir, etc)	€/camion	85 000	87 500	87 500	400 000	350 000	179 550
Consommation gazole	l/100km	28					
Consommation hydrogène	kg/100km				8	8	7,5
Maintenance	€/km	0,12			0,24	0,17	0,09
Péages	€/camion/an	13 000			13 000		
Taxe à l'essieu	€/camion/an	516			516		
Assurances	€/camion/an	3250			3250		

* Les hypothèses ont été élaborées dans le cadre de travaux du Groupe de Travail Camions H₂ de France Hydrogène Mobilité au cours de l'année 2020, certaines données pourront faire l'objet de révisions dans le cadre des travaux de 2022.



6. Réglementation véhicules lourds électriques à hydrogène constructeurs

Les éléments présentés dans cette section sont issus du « Guide pour l'évaluation de la conformité et la certification des systèmes à hydrogène », réalisé par l'INERIS avec France Hydrogène et l'ADEME, publié en juillet 2021. Ils traitent d'un certain nombre de réglementations applicables aux véhicules électriques à hydrogène, qui concernent essentiellement les constructeurs qui doivent homologuer les véhicules.

Règlement (CE) n° 79/2009

Le règlement européen (CE) 79/2009 qui fixe les exigences générales applicables pour la réception des véhicules à hydrogène et de leurs composants est en vigueur jusqu'au 5 juillet 2022, date à laquelle, conformément au règlement (UE) 2019/2144 du Parlement européen et du conseil du 27 novembre 2019, il sera remplacé par l'application du règlement ONU n° R134 complété par une série d'actes de mise en œuvre à publier 15 mois avant la date d'application de juillet 2022, en l'occurrence, le règlement d'exécution (UE) 2021/53588 qui a été publié le 31 mars 2021.

Le règlement 79/2009 et son règlement d'application UE 406/2010 établissent des exigences pour la réception par type des véhicules à moteur en ce qui concerne la propulsion par l'hydrogène et pour la réception par type des composants hydrogène et des systèmes hydrogène.

Le règlement 79/2009 traite aussi bien des véhicules utilisant de l'hydrogène stocké sous forme comprimé que sous forme liquide.

Règlement ONU n°R134

Le règlement ONU N° R134 définit des prescriptions de sécurité s'appliquant :

- Aux systèmes de stockage d'hydrogène comprimé pour véhicules (partie I du règlement) ;
- Aux composants spécifiques des systèmes de stockage d'hydrogène comprimé pour véhicules (partie II du règlement) ;
- Aux véhicules fonctionnant à l'hydrogène des catégories M (transport de passagers) et N (transport de marchandises) comportant un système de stockage d'hydrogène comprimé (partie III du règlement).

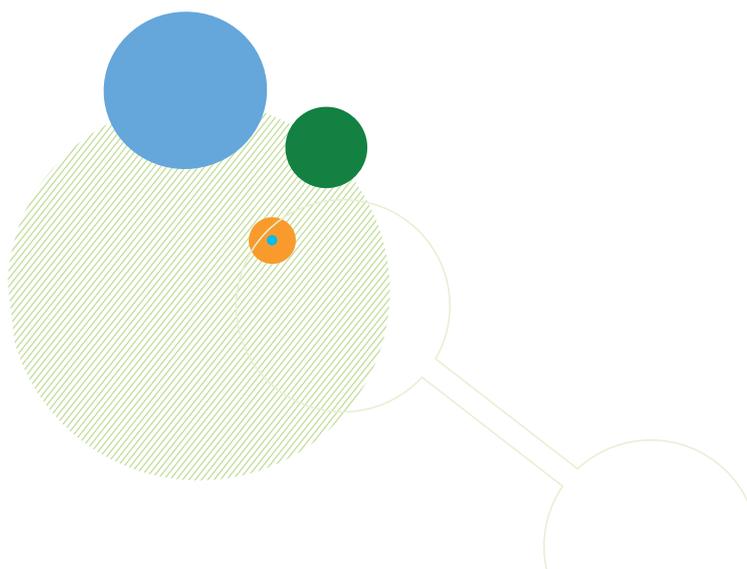
Ainsi, contrairement au règlement (CE) 79/2009, le règlement ONU N° R134 ne s'applique pas à la réception des composants autres que le système de stockage et de ses accessoires directs. Des exigences sur ces composants sont toutefois spécifiées de manière indirecte au travers des exigences de performance du système hydrogène intégré dans le véhicule (partie III du règlement). Cette différence est significative puisqu'elle implique notamment qu'à partir de juillet 2022, les composants autres que le système de stockage et le véhicule dans son ensemble ne seront plus soumis à homologation en Europe.

UN Global technical regulation n°13

Le règlement technique mondial n°13 (GTR 13) est le document à l'origine du règlement R134. Il émane, comme le règlement R134 du *WP29 World Forum for the harmonization of vehicle regulations* de l'UNECE, mais a été élaboré dans le cadre de l'accord de 1998/96. Contrairement au règlement R134, le GTR 13 ne définit aucune procédure de certification, qui sont laissées à discrétion des états parties.

Les exigences applicables au système de carburant à hydrogène comprimé dans le cadre du GTR 13 sont similaires à celles définies dans le R134. En revanche, le GTR 13 définit également des exigences facultatives pour les véhicules équipés d'un système de stockage d'hydrogène liquide. Ces exigences semblent néanmoins limitées en termes de couverture des éventuelles situations dangereuses qui pourraient être rencontrées. Le retour d'expérience sur les véhicules électriques à hydrogène liquide restant limité, le GTR 13 précise que ces spécifications sont indicatives. Le GTR 13 comprend également des exigences applicables à la sécurité électrique du véhicule.

Le GTR 13 s'applique à tous les véhicules à hydrogène des catégories 1-1 et 1-2 ayant un poids total en charge inférieur ou égal à 4 536 kg. Il est à noter que cette limite de capacité n'a pas été retenue dans le règlement R134, qui est applicable à l'intégralité des catégories M et N. Le GTR 13 est en cours de révision.



Ce document a été rédigé par Element Energy, pour le groupe France Hydrogène Mobilité.

Contacts des auteurs :

Aurélie Deshons

Consultante, Element Energy

aurelie.deshons@element-energy.eu

elementenergy

an ERM Group company

Elise Ravoire

Principal Consultant, Element Energy

elise.ravoire@element-energy.co.uk

Avec le support de l'ensemble de l'équipe Element Energy, en particulier Benjamin Wolff et Hugo Signollet.

Avec nos remerciements pour l'accompagnement tout au long de la rédaction de :

Bertrand Chauvet

Président de Seiya Consulting

bertrand.chauvet@seiya-consulting.com



Disclaimer

Ce rapport a été commandé par le groupe Mobilité de France Hydrogène. Bien que tous les efforts aient été faits pour assurer son exactitude, les éléments présentés et les conclusions ne représentent pas nécessairement l'opinion de l'ensemble des membres de ces groupes d'acteurs, et ni eux, ni Element Energy ou Seiya Consulting ne garantissent cette exactitude, et n'assumeront aucune responsabilité pour toute utilisation prévisible ou imprévisible de son contenu.



Remerciements

Nous tenons en particulier à remercier pour leur participation à des entretiens dédiés ayant permis d'argumenter, d'informer, et de compléter la rédaction de ce document :

- Ivan Baturone, Direction Supply Chain, Responsable Innovation, Michelin
- Rémi Berger, Directeur Axe Innover, DRA AURA France Hydrogène, CARA
- Jean-Luc Brossard, Directeur du Programme pour les véhicules à faible empreinte environnementale, PFA, et VP Recherche et Innovations, Stellantis
- Erwan Celerier, Délégué aux Affaires Techniques, à l'Environnement et à l'Innovation, FNTR
- Rémi Courbun, Chargé de Mission France Hydrogène, coordinateur du Groupe de Travail Réglementation de France Hydrogène
- Kevin Dehan, Chef de département Energie & Mobilité, Colruyt
- Patrick Dilly, Directeur développement H2 Mobilité France, Air Liquide
- Jean-Marc Ducros, Directeur des plateformes de développement produits, Iveco
- Alexandre Germaine, BG Market Analyst, Faurecia Clean Mobility
- Stéphane Grée, Director Business Marketing, Air Liquide
- Thomas Justin, Marketing produits, Symbio, coentreprise entre Faurecia et Michelin
- Nenad Nikolić, Responsable Développement Commercial, McPhy
- Géraud Pellat-De-Villedon, Direction Opérationnelle de la Supply Chain, RSE pour la Supply Chain, Michelin
- Fabien Perdu, Département de l'Electricité et l'Hydrogène pour les Transports, CEA
- Pierre-Eloi Piganeau, Cost Roadmap Manager, Symbio, coentreprise entre Faurecia et Michelin
- Thierry Priem, Département de l'Electricité et l'Hydrogène pour les Transports, CEA
- Julien Roussel, Directeur Programmes et Innovations, GreenGT
- Jean-François Weber, Directeur général - Chef de la R&D, GreenGT

Nous tenons aussi à remercier pour la relecture détaillée, les compléments et améliorations apportés à la rédaction de ce document :

- Rémi Berger, Directeur Axe Innover, DRA AURA France Hydrogène, CARA
- Jean Betremieux, Responsable HSE, Linde
- Loïc Bonifacio, Marketing Analyst, Plastic Omnium
- Marc Buffenoir, Chief Technical Officer, PROVIRIDIS

- ● ●
- Jeremy Cantin président de e-Néo
- Laurent Chauvin, Product Marketing Director, Symbio
- Antoine Coste, Marketing Analyst, Symbio
- Rémi Courbun, Chargé de Mission France Hydrogène, coordinateur du Groupe de Travail Réglementation de France Hydrogène
- Patrick Dilly, Directeur développement H2 Mobilité France, Air Liquide
- Thomas Gauby, Chargé de mission France Hydrogène
- Alexandre Germaine, BG Market Analyst, Faurecia Clean Mobility
- Stéphane Grée, Director Business Marketing, Air Liquide
- Julien Gueit, Développement Hydrogène France, Direction Mobilités Nouvelles Energies, TotalEnergies
- Xavier Haffreingue, Directeur Développement H2 Mobilité France, Air Liquide
- Thomas Justin, Marketing produits, Symbio, coentreprise entre Faurecia et Michelin
- Béatrice Lacout, Division Marketing Director, Plastic Omnium
- Arthur Mayeur, CVI Marketing lead, Faurecia
- Eric Michineau, Coordination de la stratégie bas-carbone, DB Schenker
- Martial Migne, Coordinateur sécurité Groupe des transports ferroviaires et du réseau CSTMD, TotalEnergies
- Nenad Nikolić, Responsable Développement Commercial, McPhy
- Fabien Perdu, Département de l'Electricité et l'Hydrogène pour les Transports, CEA
- Pierre-Eloi Piganeau, Cost Roadmap Manager, Symbio, coentreprise entre Faurecia et Michelin
- Bérangère Préault, Directrice du développement chez ENGIE Solutions France
- Julien Roussel, Directeur Programmes et Innovations, GreenGT
- Christophe Schramm, Vice-President of Products, Marketing, and Strategy, Symbio
- Nathanaël Sueur, Business Developer - Hydrogen Energy, Air Liquide

Enfin, un grand merci pour le suivi de l'ensemble de la réalisation de ce document aux coordinateurs du Groupe Camions Hydrogène de France Hydrogène Mobilité, notamment Valérie Bouillon-Delporte, Directrice Ecosystème Hydrogène chez Michelin, et Vice-présidente de France Hydrogène, Patrick Dilly, Directeur Développement H2 Mobilité France chez Air Liquide, et Bérangère Préault, Directrice du développement chez ENGIE Solutions France.

Liste des acronymes et des abréviations

- AAP** : Appel A Projets
- ADEME** : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
- ADR** : Accord pour le transport des marchandises Dangereuses par la Route
- AFGNV** : Association Française du Gaz Naturel Véhicules
- AFIR** (anciennement DAFI) : Alternative Fuels Infrastructure Regulation
(règlementation sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs)
- CCUS** : Carbon Capture, Utilization, and Storage (capture, utilisation et stockage du carbone)
- CEA** : Commissariat à l'Energie atomique et aux énergies Alternatives
- CEF** : Connecting Europe Facility (ou Mécanisme pour l'interconnexion en Europe)
- CH₄** : Méthane
- CO₂-eq** : Equivalent CO₂
- DAFI** (évoluant en AFIR) : Directive on Alternative Fuels Infrastructure
(directive sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs)
- DGSCGC** : Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises
- DGPR** : Direction Générale de la Prévention des Risques
- DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
- EnR** : Energie Renouvelable
- EPL** : Entrepôts et Plate-formes Logistiques
- FCH JU** : Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, nouvellement renommé European Clean Hydrogen Partnership
- FNTR** : Fédération Nationale du Transport Routier
- GES** : Gaz à Effet de Serre
- GNC** : Gaz Naturel Compressé
- GNL** : Gaz Naturel Liquéfié
- GNV** : Gaz Naturel pour Véhicules
- ICPE** : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
- LTECV** : Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte
- NOx** : Oxydes d'azote
- PAC** : Pile A Combustible
- PIIEC** : Projets Importants d'Intérêt Européen Commun
(ou IPCEI : Important Projects of Common European Interest)
- PPE** : Programmation Pluriannuelle de l'Energie
- PTAC** : Poids Total Avec Charge
- ROI** : Return On Investment
- RPLP** : Redevance Poids lourds Liée aux Prestations
- RSE** : Responsabilité Sociétale ou sociale des Entreprises
- RTE-T** : Réseau Trans-Européen de Transport
- SDES** : Service de la Donnée et des Etudes Statistiques
- SOx** : Oxydes de soufre
- TCO** : Total Cost of Ownership (coût total de possession)
- TEN-T** : Trans-European Transport Network (réseau transeuropéen de transport)
- TICPE** : Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques
- UE** : Union Européenne
- VASP** : Véhicule Automoteur Spécialisé
- VUL** : Véhicule Utilitaire Léger
- ZLEV** : Zero and Low-Emission Vehicles (véhicules zéro et faibles émissions)



www.france-hydrogene.org



**France
Hydrogène**

Engagée pour la transition écologique

50 avenue Daumesnil - 75012 Paris
Contact : info@france-hydrogene.org
T. +33 (0)1 44 11 10 04

Edition: Février 2022 - Textes : France Hydrogène, Element Energy
Conception graphique - illustrations : © Cap Interactif agency 1028