

# Le train à hydrogène

Par Stéphane KABA et Laurent DUFOR

Alstom

Contributeur majeur du secteur des mobilités, le transport ferroviaire présente un fort potentiel de croissance (passagers, fret) étant donné son rôle fondamental dans la transition écologique. Dans un contexte où plus de la moitié du réseau ferroviaire européen n'est pas électrifié, l'utilisation massive de trains diesel n'est plus compatible avec les objectifs de neutralité carbone à atteindre à l'horizon 2050. Les pouvoirs publics cherchent donc à verdir l'ensemble des mobilités en favorisant le transfert modal des mobilités vers le train et en remplaçant les flottes de trains diesel par des solutions 100 % décarbonées. L'introduction de piles à combustible hydrogène dans le ferroviaire est une alternative pertinente dans cette course à la décarbonation. Les profils des missions constitutives du rail représentent en effet un cas d'usage immédiat et préférentiel de l'hydrogène en réponse à des besoins massifs, prédictifs, localisables et pérennes. Cette technologie offre également des niveaux de performance élevés en termes d'autonomie, de vitesse, de capacité et de confort. Enfin, le déploiement à grande échelle de l'hydrogène sur tout le territoire européen contribuera à renforcer la compétitivité de ces solutions.

Alstom a été pionnier dans l'utilisation de l'hydrogène dans le ferroviaire. Le groupe ferroviaire a conçu, développé et produit le premier train régional 100 % hydrogène, le Coradia iLint, lequel est en service commercial depuis 2018 en Allemagne. Le défi associé à l'intégration des différents éléments (pile à combustible, réservoirs, batteries...) a été relevé tout en maîtrisant les contraintes en matière de sécurité industrielle et d'exploitation. Une accélération des développements est néanmoins nécessaire afin d'étendre cette technologie à d'autres types de trains passagers (par exemple, le régional bi-mode) et aux locomotives de fret, tout en favorisant les synergies avec d'autres types d'applications comme le maritime ou le stationnaire.

## Le rail : un secteur stratégique pour les politiques de décarbonation des mobilités

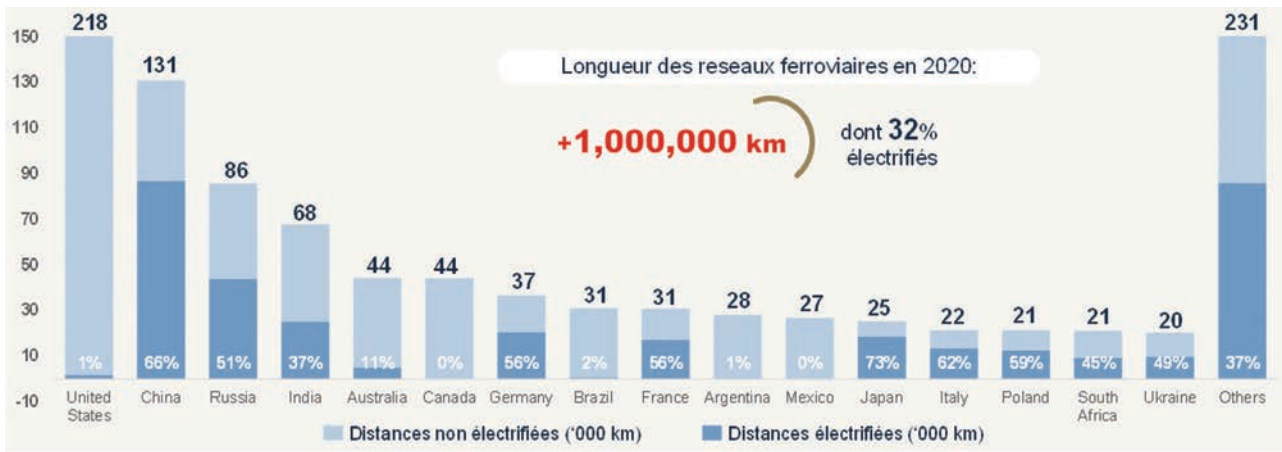
En tant que contributeur majeur du secteur de la mobilité, le transport ferroviaire est reconnu comme étant intrinsèquement vertueux du point de vue écologique. En effet, le rail est le mode de transport de passagers le plus performant en termes environnementaux : la consommation spécifique du transport ferroviaire (énergie par passager-kilomètre) est la plus faible : elle est en moyenne dix fois inférieure à celle de la route ou de l'aérien, et l'est plus encore sur des lignes totalement électrifiées et denses comme celles sur lesquelles circulent les TGV (une consommation cinquante fois moindre). L'intensité moyenne des gaz à effet de serre (GES) (en g de CO<sub>2</sub> eq par passager-kilomètre) est aussi la plus faible. Le rail n'est responsable que de 0,5 % des émissions mondiales directes et indirectes de GES. Mais le transfert modal qui est nécessaire pour réduire fortement les émissions dans le transport (passagers et fret) va accroître significativement la part du rail dans l'ensemble des mobilités.

Aujourd'hui, seulement 32 % des lignes sont électrifiées au niveau mondial (50 % en Europe). C'est donc une fraction importante du réseau qui n'est pas équipée de caténaires, d'où une exploitation reposant exclusivement sur des trains diesel. Dans ce contexte, il est nécessaire d'accentuer les efforts de décarbonation

du transport ferroviaire pour lui permettre de conserver son avantage de pointe et s'aligner sur les taxonomies « vertes » en respectant les engagements de neutralité carbone pris par les États (voir la Figure 1 de la page suivante).

Dans un objectif de mobilités « Zéro émission », les principales solutions pour remplacer les trains et les locomotives fonctionnant au diesel s'appuient sur trois technologies :

- l'électrification des lignes : compte tenu de la faible densité du trafic sur certaines lignes, cette option peut s'avérer très coûteuse et peu pertinente économiquement en raison des investissements importants que représentent de tels travaux d'infrastructure (de 250 à 500 k€ par km, voire de 1 à 3 M€ du km, selon la typologie des lignes et la tension d'alimentation nécessaire, ou encore lorsque l'installation de sous-stations haute tension s'impose) ;
- l'utilisation de batteries de traction : cette technologie est adaptée pour la desserte d'une partie des lignes, notamment lorsque la section non électrifiée n'est pas d'une longueur trop significative ;
- les trains à hydrogène : cette technologie de rupture permet d'effectuer des missions en totale autonomie sur de longues distances et affichent des performances identiques au train diesel en termes de vitesse et de capacité. Elle offre également un meilleur niveau de confort (réduction des émissions sonores), et elle est en outre totalement décarbonée.



Source UNIFE (données 2020), incluant réseaux grande Vitesse, grandes lignes et fret (hors réseaux urbains)

Figure 1 : Taux d'électrification des réseaux ferroviaires des différents pays – Source : UNIFE, données 2020 incluant les réseaux à grande vitesse, les grandes lignes et le fret, mais hors réseaux urbains (quasi intégralement électrifiés).

Des solutions mixtes combinant ces différentes technologies peuvent s'avérer pertinentes. La solution retenue découlera du profil de la mission du train, qui devra faire l'objet d'une analyse approfondie. L'illustration ci-dessous (voir la Figure 2) précise les critères de pertinence actuels des différentes solutions précitées (autonomie du train et niveau de trafic).

Parier sur l'hydrogène pour en faire le carburant de demain, c'est avant tout proposer un système de production de l'hydrogène qui soit propre. L'hydrogène permettant d'atteindre l'objectif d'une mobilité décarbonée proviendra de l'électrolyse de l'eau, c'est-à-dire de la séparation des atomes d'oxygène et d'hydrogène présents dans l'eau à partir d'une énergie électrique renouvelable ou décarbonée, ce qui représente environ 75 % du coût de l'hydrogène. La production massive d'hydrogène vert grâce à l'augmentation constante du nombre des installations renouvelables (par exemple, des éoliennes ou des centrales solaires) doit permettre d'accélérer le remplacement des flottes de trains diesel par des solutions hydrogène.

Le rendement actuel de la propulsion hydrogène (Power-to-H2-to-Power) est de l'ordre de 25 % (rendement de l'électrolyse de 50 % cumulé à celui de la pile à combustible qui est lui aussi en moyenne de 50 %), ce qui n'est pas très éloigné de celui d'un moteur diesel (du puits à la roue). Les coûts de maintenance s'avérant moins onéreux pour l'hydrogène, le coût total de possession des trains utilisant cette molécule sur leur durée de vie est, dans de nombreux cas, déjà compétitif face au diesel et le sera encore plus lorsque le coût de l'hydrogène baissera. De nombreux programmes de recherche et développement visent à améliorer encore le rendement de l'hydrogène, en particulier au niveau de l'électrolyse de l'eau.

Même si l'hydrogène vert peut souffrir d'une certaine rareté à court terme, le ferroviaire constitue néanmoins un cas d'usage immédiat et préférentiel au même titre que certaines autres industries qui devront, comme lui, réduire massivement leurs émissions de gaz à effet de serre (ciment, acier, raffinage, engrais, pétrochimie,



Figure 2 : Les critères de pertinence actuels des différentes solutions existantes – Source : Alstom 2019, en collaboration avec l'Université de Dresde.

etc.). En effet, les profils des missions du ferroviaire sont parfaitement adaptés à l'utilisation de l'hydrogène en réponse à des besoins massifiés, prédictifs, localisables et pérennes (la durée de vie d'un train étant d'au moins trente ans). De plus, les quantités d'hydrogène nécessaires pour satisfaire les besoins du ferroviaire sont compatibles avec une production locale d'hydrogène, permettant ainsi de s'affranchir d'une production centralisée qui pâtit encore d'un manque d'investissements et d'infrastructures de transport. À noter que l'utilisation d'hydrogène fatal (récupération d'hydrogène coproduit dans des processus industriels comme la production de chlore ; de l'hydrogène qui n'est pas utilisé, mais brûlé) constitue à court terme une solution intéressante.

## Le train hydrogène : une expérimentation réussie en Allemagne

Conscient des enjeux du verdissement des flottes de trains diesel, Alstom a lancé, dès 2013, un vaste plan d'innovation dédié au verdissement des mobilités, qui soutenu notamment par des études de faisabilité, visait au développement d'un train équipé de piles à combustible à hydrogène. Conçus par les équipes d'Alstom, à Tarbes (en France) et à Salzgitter (en Allemagne), les deux premiers prototypes transportant des passagers ont été mis en service commercial dès septembre 2018 sur des dessertes régionales en Allemagne (en Basse-Saxe). Ce train régional, le Coradia iLint, qui a bénéficié du soutien du ministère allemand de l'Économie et des Transports, a été conçu à partir de la plateforme régionale Coradia Lint qui fonctionnait initialement avec une propulsion diesel. D'une longueur totale de 54 mètres, il est composé de deux voitures identiques. L'architecture de ces deux voitures est schématisée dans le dessin ci-dessous (avec le détail des principaux équipements) (voir la Figure 3 ci-après).

Les réservoirs de stockage d'hydrogène sont installés en toiture et ont une capacité de l'ordre de 270 kg (à 350 bars), ce qui permet de parcourir jusqu'à 1 000 km

selon les profils de la mission, et cela sans aucune émission de CO<sub>2</sub> ni de particules. La conception initiale des réservoirs du iLint et leur intégration dans le train ont nécessité un travail collaboratif avec deux fournisseurs concernés. Afin d'optimiser les réservoirs destinés aux trains à hydrogène, Alstom a récemment signé avec Plastic Omnium un accord portant sur le développement de systèmes embarqués de stockage de l'hydrogène innovants, compétitifs et utilisables par le secteur ferroviaire. Ces systèmes devront être conformes aux futures normes concernant les réservoirs d'hydrogène destinés aux trains.

Le temps de recharge en hydrogène de ces deux premières rames est aujourd'hui un peu plus élevé que celui nécessaire pour faire le plein de diesel sur ce même type de train. L'optimisation du protocole de ravitaillement est donc essentielle pour l'atteinte des performances souhaitées en termes de recharge (sécurité, rapidité et dimensionnement). À ce titre, ont été engagés des travaux de modélisation, et des calculs et simulations ont été réalisés en fonction des différentes typologies de réservoirs et d'autres conditions spécifiques (par exemple, météorologiques). De même, des campagnes d'essais ont été conduites. Dans ce cadre, Alstom a signé un partenariat avec Hynamics, filiale du groupe EDF, pour optimiser le remplissage en hydrogène des trains de voyageurs, notamment dans le but de réduire le temps nécessaire à leur ravitaillement. À terme, l'objectif est de définir un standard international de ravitaillement qui permettra de limiter le temps d'immobilisation des trains à hydrogène lors de leur remplissage, et ce dans le respect de la réglementation et des règles de sécurité en vigueur.

La pile à combustible est au cœur du système en tant que source d'énergie : elle génère de l'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène provenant de l'air ambiant ; en outre, elle ne rejette que de l'eau pure et de la chaleur, qui est du reste utilisée pour le chauffage des voitures passagers. Cet équipement, d'une puissance supérieure à 200 KW, est également installé en toiture, sur chacune des deux voitures de la rame iLint. Le choix d'Alstom s'est porté sur des piles à combustible

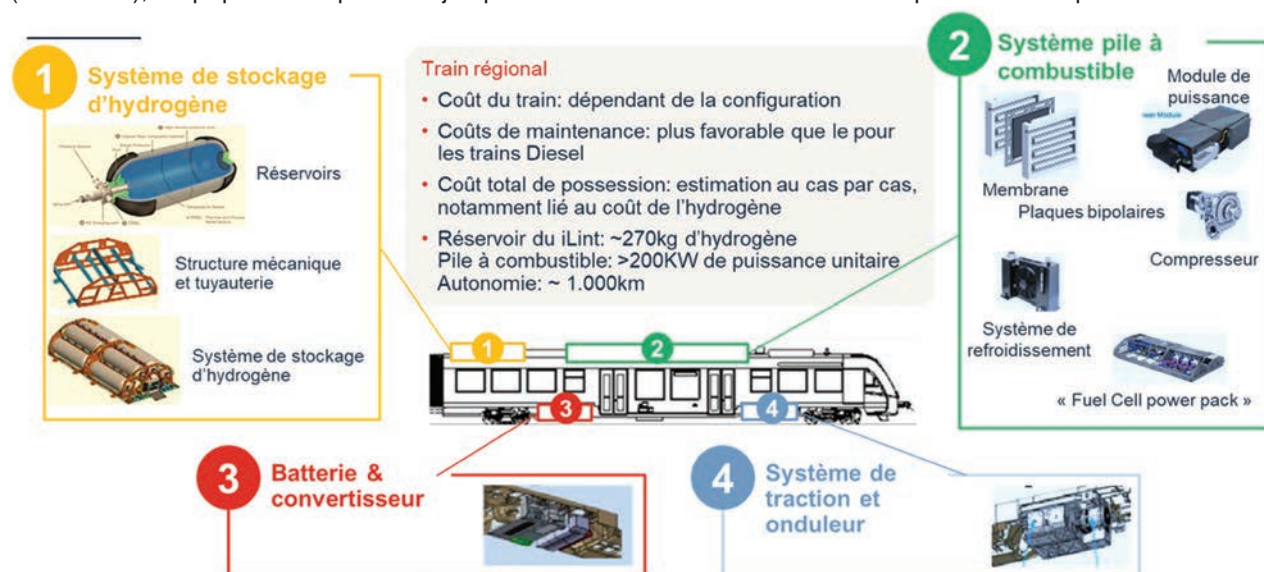


Figure 3 : L'architecture d'une voiture composant le train régional Coradia iLint – Source : Alstom.

à plaques composites (graphite), cette solution présentant des avantages supérieurs en termes de durabilité par rapport aux plaques métalliques.

Pour répondre aux enjeux liés à l'intégration de la pile dans le système train, Alstom a acquis la société Helion, ce qui lui a permis non seulement de disposer d'une seconde source d'approvisionnement, mais aussi et surtout de mieux maîtriser les différents sous-ensembles constitutifs de la pile utilisée dans l'environnement ferroviaire. Alstom/Helion travaille notamment sur l'amélioration des performances thermiques de la pile, ainsi que sur l'intégration de celle-ci conformément aux normes ferroviaires dans les différents types de matériels roulants, tout en favorisant les synergies avec d'autres secteurs utilisant l'hydrogène, en particulier le maritime et les générateurs stationnaires.

Ces développements ont pour objectifs :

- d'accroître la durée de vie des *stacks* (de 10 000 h à plus de 25 000 h) ;
- d'augmenter sa puissance spécifique ainsi que sa densité de puissance ;
- d'accroître les performances et la durée de vie des composants de la pile à combustible ;
- d'augmenter la compacité de l'unité d'alimentation (*Fuel Cell Power Unit*) et d'en baisser les coûts (en réduisant le nombre des équipements, par exemple).

Le train iLint dispose également dans chaque voiture d'une batterie Li-Ion (installée en sous-châssis), dont la fonction est de récupérer l'énergie électro-dynamique,

notamment durant les phases de freinage, avant de la restituer en phase d'accélération. La batterie agit en tant que « boost » et permet d'optimiser le fonctionnement de la pile à hydrogène et donc d'en améliorer l'efficacité. L'utilisation intelligente de ce système permet de réduire de 15 à 20 % l'énergie totale nécessaire.

Les deux premiers opérateurs ayant choisi le Coradia iLint disposent, pour l'un, de deux stations de recharge (dont l'une est mobile/transportable) couplées à un électrolyseur local et, pour l'autre, d'une seule station qui, aujourd'hui alimentée par de l'hydrogène fatal provenant d'une usine voisine, le sera bientôt par de l'hydrogène vert.

Le train iLint offre des performances similaires à celle du Coradia dans sa version diesel (vitesse maximale de 140 km/h, capacité d'accueil de 120 à 150 sièges, autonomie de 1 000 km), tout en restant accessible aux personnes à mobilité réduite et en proposant une zone flexible pour l'accueil des vélos. Par ailleurs, il offre un niveau de confort amélioré, notamment avec une réduction significative du niveau de bruit (équivalent à celui d'un train électrique).

Ce programme a franchi une nouvelle étape majeure, le 24 août 2022, avec la mise en service commercial de quatorze rames appartenant à LNVG (Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen), sur la ligne assurant la liaison entre Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde et Buxtehude (voir la Figure 4 ci-dessous).



L'une des quatorze rames mises en service le 22 août 2022 en Basse-Saxe.



Remplissage d'une rame iLint.



Équipements installés en toiture (réservoirs et piles H<sub>2</sub>).

Figure 4 : Présentation d'une rame iLint – Source : Alstom.

## D'autres programmes ont été depuis lancés

En Europe, ce sont plus de 6 000 trains régionaux qui sont équipés de chaînes de traction diesel. L'appétence du marché pour le déploiement de flottes régionales « vertes » est aujourd'hui une réalité. L'intérêt des solutions hydrogène pour les trains régionaux a en effet été confirmée par de nouvelles commandes de rames à Alstom pour le développement de trains destinés à circuler sur des lignes non électrifiées (solution 100 % hydrogène) ou partiellement électrifiées (solution bi-mode caténaire-hydrogène) (voir la Figure 5 ci-après).

Certains concurrents d'Alstom se sont lancés plus tardivement sur le marché des trains régionaux à hydrogène : ces programmes de développement en cours s'adressent principalement au marché européen. Les premiers prototypes ne sont pas annoncés avant fin 2024. Si les choix technologiques de ces concurrents sont inspirés des solutions développées par Alstom, leur intégration dans le système train reste à démontrer et elles devront également réussir les tests nécessaires pour obtenir l'homologation indispensable à leur future mise en service en toute sécurité.

À noter que deux concurrents ont annoncé le développement de tramways à hydrogène, à l'instar de la Chine, qui a mis en service commercial une rame de ce type de tramway. La pertinence de cette solution technologique est sujette à questionnement dans un contexte urbain quasi intégralement électrifié (où, pour de courtes sections, elle coexiste avec de nombreuses autres solutions d'alimentation (par exemple, par caténaire, par le sol ou par batterie).

## Le déploiement du train à hydrogène : un catalyseur de la mobilité décarbonée

Le déploiement du train à hydrogène constitue un levier majeur de la massification de cette énergie pour couvrir l'ensemble des mobilités.

L'exemple de l'utilisation de piles à combustible pour différents modes de transport (voir le schéma ci-dessous) permet de regrouper les besoins selon la puissance de ces piles et d'envisager une utilisation massive de l'hydrogène (voir la Figure 6 de la page suivante).



Coradia iLint FCMU  
LNVG and RMV (Allemagne)  
41 trains vendus



Coradia Stream FCMU  
Ferrovie Nord Milano (Italy)  
6 trains vendus



Coradia H<sub>2</sub> bi-mode FCEMU\*  
Régions (France)  
12 trains vendus



Aventura FCMU  
Eversholt Rail (UK)  
Protocole d'accord

(\*) La plate-forme Coradia Polyvalent et le site de Reichshoffen ont été cédés à CAF le 1<sup>er</sup> août 2022 (engagement pris par Alstom auprès de la Commission européenne dans le cadre de l'acquisition de Bombardier Transport). Alstom continuera de fournir pour ce train l'expertise hydrogène avec la chaîne de traction.

Figure 5 : Les différents trains régionaux à hydrogène développés par Alstom – Source : Alstom.

Par ailleurs, la chaîne de valeur du train à hydrogène va au-delà du matériel roulant lui-même. Privilégier une approche systémique du train et de son environnement est essentiel pour permettre aux exploitants de maximiser l'efficacité de l'écosystème hydrogène dans sa globalité.

En effet, pour fonctionner, le train « Zéro émission » a besoin d'une infrastructure lui assurant la fourniture de l'hydrogène. L'intégration du train dans l'écosystème hydrogène contribuera donc à l'émergence d'une chaîne de valeur performante allant de la génération d'électricité renouvelable jusqu'au remplissage des réservoirs du train (stations de production, de transport, de distribution et de ravitaillement).

Enfin, la mutualisation des stations de recharge en hydrogène avec d'autres consommateurs (bus, camions, véhicules utilitaires...), autour d'un même point d'avitaillement, peut être envisagée en fonction des besoins locaux.

## Une accélération des développements est nécessaire

Les avancées du secteur ferroviaire permettront à d'autres cas d'usage de surmonter plus facilement certaines contraintes, notamment celles liées à la sécurité au regard notamment des fuites potentielles d'hydrogène. Le train iLint homologué en Allemagne avec plus de 200 000 km de service commercial assuré sur le réseau régional en toute sécurité, a démontré que ces risques sont maîtrisables et, en l'espèce, maîtrisés.

Si le volume par quantité d'énergie de l'hydrogène reste encore une limite pour certains usages, ainsi que la puissance et la compacité des piles à combustible, des innovations, en particulier en matière de stockage et de technologie des piles, sont d'ores et déjà identifiées et en cours d'étude pour différentes applications (locomotives, poids lourds...).

## L'hydrogène pour les locomotives

La flotte mondiale de locomotives diesel estimée à plus de 130 000 unités représente un marché majeur pour le secteur de la mobilité verte. Les principaux marchés sont l'Europe et l'Amérique du Nord, avec des feuilles de route « Net Zéro » différentes (l'arrêt du diesel par les opérateurs ferroviaires européens pourrait s'étendre principalement de 2035 à 2040, et possiblement à l'horizon 2050 en Amérique du Nord).

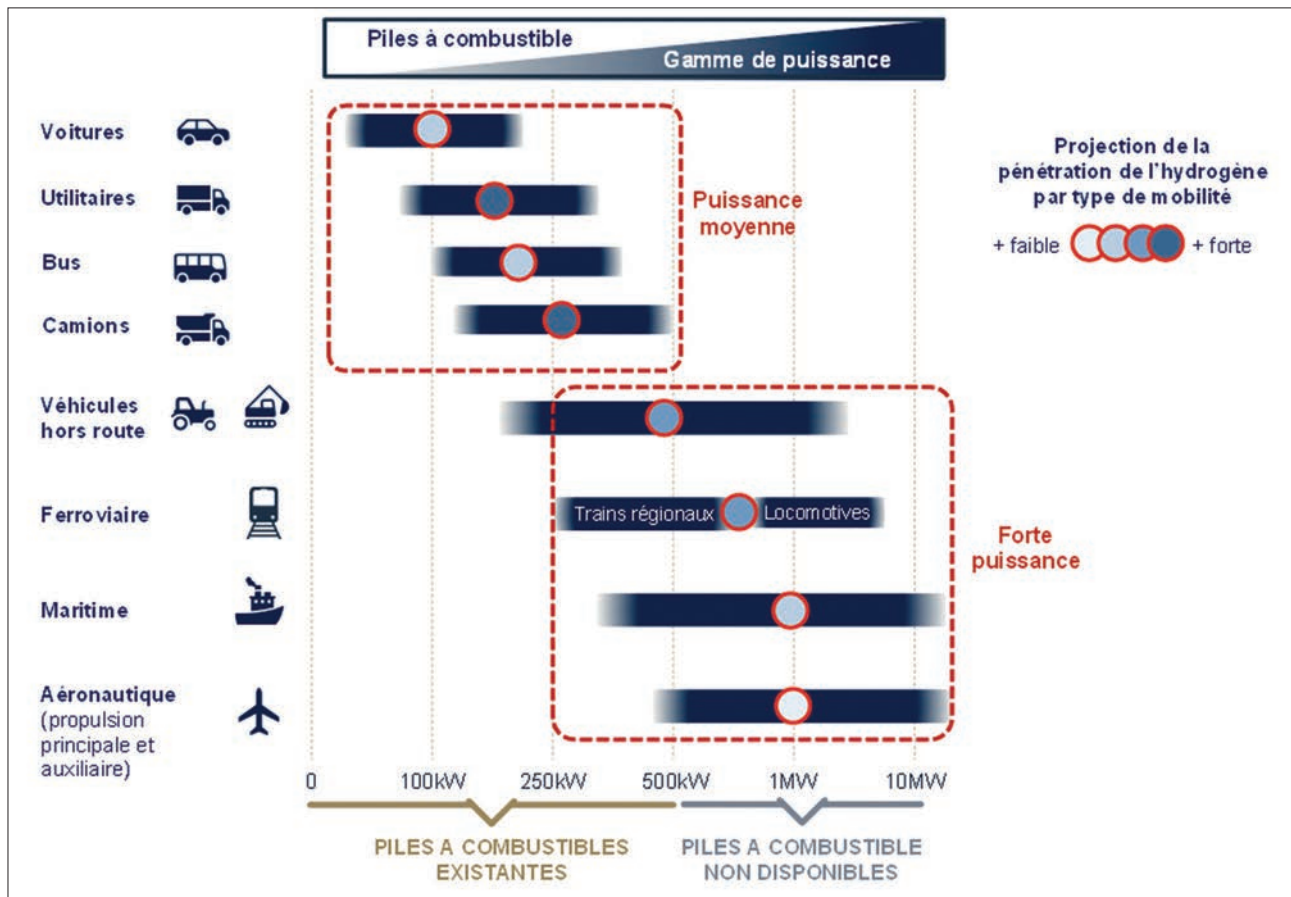


Figure 6 : L'utilisation de piles à combustion pour différents modes de transport – Source : Alstom/Helion.

En Europe, plus de 15 000 locomotives diesel sont encore en service. Des solutions « vertes » sont envisagées pour remplacer les locomotives de manœuvre, dont la puissance est inférieure à 1 MW (les « shunters » ou « switchers » qui représentent deux tiers des locomotives en service).

S'agissant des besoins pour le fret lourd, le marché ne dispose pas encore de matériel « Zéro émission » pour assurer les longues distances ou les grandes lignes de fret ou de passagers, mais des solutions de rupture à base d'hydrogène sont à l'étude, à l'instar du concept envisagé par Alstom et Engie : celui d'un système de pile à combustible pouvant alimenter les locomotives électriques dans les secteurs non électrifiés (sur la base d'un modèle clé en main incluant des solutions de logistique et d'avitaillement en hydrogène renouvelable). En effet, beaucoup de locomotives diesel sont exploitées sur des lignes principales qui sont dans les faits électrifiées : ainsi, 80 % des trains-kilomètres diesel parcourus le sont sous caténaires, générant une pollution et des émissions inutiles, alors que le recours au diesel ne s'avère justifié que pour les 20 % correspondant aux lignes non électrifiées (les derniers kilomètres, notamment).

La première étape de la feuille de route de la décarbonation des locomotives est l'optimisation des alimentations en énergie et de leurs utilisations (hybridation avec le recours à des batteries, écoconduite, optimisation de la gestion de la flotte, etc.), en préparant les

solutions de demain qui incluront l'électrification, les piles à combustible à hydrogène, les batteries, voire des moteurs à combustion interne d'hydrogène, en particulier pour les rénovations ; toutes ces solutions pouvant être combinées entre elles. Investir aujourd'hui est nécessaire pour permettre un déploiement à grande échelle de l'hydrogène dans le ferroviaire à partir de 2030.

### Les moteurs à injection directe d'hydrogène

Au-delà de la pile à combustible, le développement par certains industriels de moteurs à combustion interne d'hydrogène est en cours et pourrait constituer une solution intermédiaire à la décarbonation, notamment, des flottes ferroviaires. Certes, cette solution permettra comme les piles à combustible de supprimer les émissions de  $\text{CO}_2$ , mais elle n'en égalera pas les performances, en raison de sa surconsommation d'hydrogène, de deux tiers par rapport à celle des piles à combustible (liée à la différence entre le rendement du cycle de Carnot et celui de la pile à combustible), et des émissions de  $\text{NO}_x$  qu'elle génère. Or, sur la durée de vie d'un train, le surcoût lié à la consommation accrue d'hydrogène s'avère préjudiciable en termes d'objectifs économiques, le coût total de possession étant très dégradé. Toutefois, dans le cadre de rénovations à mi-vie des trains diesel, cette solution, plus économique en termes d'investissement (simple modification des kits d'injection et ajout d'un réservoir),

peut présenter une certaine pertinence pour la durée de vie résiduelle du train. Afin de ne pas dépendre uniquement de motoristes dont le marché ferroviaire n'est pas la priorité, Alstom a pris l'initiative de travailler avec l'institut de recherche WTZ pour pouvoir proposer ce type de technologie à ses clients.

## Conclusion

Le transport ferroviaire a un rôle fondamental à jouer dans la transition écologique. Au-delà du nécessaire report modal de la route et de l'aérien vers le rail (passagers et fret), le secteur ferroviaire doit relever le défi de rendre le rail toujours plus attractif, plus performant et plus vert. Dans ce cadre, les mesures de bannissement du diesel, qui pourraient aussi concerner le rail dans la plupart des pays dans le monde, incitent à accélérer le développement de solutions alternatives.

La filière ferroviaire est reconnue pour ses capacités à structurer les mobilités durables dans les territoires en apportant des innovations en matière de digitalisation, de sécurité, de fiabilité..., en développant des solutions de propulsion sobres et décarbonées... Elle apporte aujourd'hui, grâce à l'hydrogène, une solution pour remplacer la motorisation diesel dans un grand nombre de cas d'usage, notamment pour le marché régional ; et cela en tirant parti de complémentarités avec d'autres types de mobilité.

Au-delà de la disponibilité de l'hydrogène vert, son prix constitue un facteur décisif de son développement ; ce prix doit être considéré dans le temps par rapport à l'évolution des prix des autres sources d'énergie afin de garantir la compétitivité du coût total de possession des

trains à hydrogène sur la totalité de leur durée de vie. Les investissements du secteur ferroviaire dans l'hydrogène auront clairement un effet stimulant, qui devrait permettre l'émergence des innovations nécessaires au développement d'un écosystème hydrogène viable et mutualisé. L'action de la puissance publique, à travers l'accélération du déploiement d'un cadre réglementaire s'inscrivant dans la trajectoire de neutralité carbone, ainsi que les politiques de soutien en faveur des acteurs de la filière ferroviaire et de la production d'hydrogène vert seront déterminantes dans l'atteinte des objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050. La validation par la Commission européenne du soutien public apporté à l'hydrogène par quinze États membres, dont la France, à travers l'intégration de quarante-et-un projets hydrogène dans le programme IPCEI H2, s'inscrit dans cette logique. Tout comme l'amendement récemment adopté par les Eurodéputés, lequel permet de considérer comme durable une molécule d'hydrogène même si elle provient d'une électricité issue du gaz ou du charbon (moyennant compensation en électricité renouvelable ailleurs en Europe). Décrit par beaucoup car pouvant accentuer la demande d'énergies fossiles carbonées, cet amendement constitue un coup de pouce à la filière hydrogène, au même titre que la tentative française de faire labelliser un hydrogène « bas-carbone » produit à partir d'un réseau électrique national disposant d'un mix déjà largement décarboné.

Dans un contexte d'urgence écologique et d'une nécessaire restauration de la souveraineté énergétique européenne, cet effort collectif est essentiel pour permettre à l'Europe de jouer un rôle de premier plan dans la transition durable.