

Premiers déploiements de bus électriques à hydrogène en France



Retours d'expérience

Juin 2024



Objectifs de ce document

En France, les agglomérations de plus de 250 000 habitants sont dans l'obligation réglementaire de déployer des autobus zéro émission¹ – électriques à batterie ou à hydrogène – depuis 2022. Plus précisément, un quart de leurs nouveaux bus déployés doivent être zéro émission depuis juillet 2022². A partir du 1^{er} janvier 2025, c'est la moitié des autobus renouvelés qui devront être électriques à batterie ou à hydrogène dans ces agglomérations. Ces obligations vont progressivement être renforcées pour s'étendre à l'ensemble des territoires, puisque dès 2035, 100 % des bus urbains vendus devront être zéro émission (avec un objectif intermédiaire de 90 % en 2030)³.

Dans ce contexte, la question des caractéristiques techniques, opérationnelles, économiques et environnementales des bus électriques à hydrogène se pose pour un grand nombre de territoires où seront déployés des bus électriques dès les prochains renouvellements. Afin de fournir un maximum d'informations aux collectivités et porteurs de projets intéressés par les bus électriques à hydrogène, un Livre Blanc du bus électrique à hydrogène intitulé « Comment déployer des bus électriques à hydrogène en France ? » avait été publié par France Hydrogène Mobilité dès 2020. Ce document peut être consulté sur le site de France Hydrogène, rubrique [Publications](#)⁴.

Sommaire



P. 02

Objectifs de ce document

p. 04

1. Etat des lieux des développements de la filière bus hydrogène en France

P. 04

1.1 Déploiements effectifs et à venir de bus hydrogène en France

P. 06

1.2 Description succincte de l'offre constructeur

P. 10

2. Retours d'expérience du territoire de La Roche-sur-Yon

P. 11

2.1. Phase de commande / livraison / mise en service

p. 12

2.2. Retours d'expérience sur les véhicules

P. 14

2.3 Retours d'expérience sur la station

P. 15

2.4. Aspect financier

P. 17

2.5. Bilan général et prochaines étapes

P. 20

Conclusion

P. 22

Contacts & Remerciements

Quatre ans après la publication de ce document, France Hydrogène a souhaité poursuivre cette démarche de collecte et mise à disposition d'informations sur le sujet, en réunissant les retours d'expérience des porteurs de projets et exploitants ayant contribué aux premiers projets de déploiements de bus électriques à hydrogène en France.

L'objectif du présent livret est donc de partager un état des lieux des déploiements de bus électriques à hydrogène en France en 2024, et les retours d'expérience collectés par des premières mises en exploitation. Il est important de noter que dans le cadre des déploiements de bus hydrogène qui ont eu lieu ailleurs en Europe et dans le monde depuis le début des années 2010, des retours d'expérience ont été d'ores et déjà partagés⁵, mais les premiers déploiements en France étant plus récents avec les premières mises en service réalisées en 2019, ces premiers projets sont considérés comme précurseurs pour le marché français.

Le présent document a donc pour vocation d'informer et guider les réflexions des collectivités souhaitant s'engager ou travaillant déjà sur la thématique du bus électrique à hydrogène, et de contribuer à l'aide à la décision. Il est structuré en trois parties :

- Une première partie propose une vision d'ensemble des déploiements de bus hydrogène en France, et des modèles déployés ou commercialisés – à savoir les véhicules commercialisés par les constructeurs CaetanoBus, Iveco, Mercedes, Safra, Solaris, et Van Hool.

- Une deuxième partie présente les retours d'expérience de la ville de La Roche-sur-Yon, sous la forme d'une liste de questions-réponses organisées selon les grandes thématiques suivantes :

1. Phase de commande / livraison / mise en service ;
2. Retours d'expérience sur les véhicules ;
3. Retours d'expérience sur la station ;
4. Aspect financier ;
5. Bilan général et prochaines étapes.

- Une conclusion sur les perspectives de développement de la filière du bus hydrogène en France.

Un précédent retour d'expérience partagé par la ville de Pau en 2022 sur ses premiers déploiements en 2019 est disponible sur le site de France Hydrogène, à la rubrique [Publications](#).

1 - Zéro émission de gaz à effet de serre ou de polluant atmosphérique en opération, hors phénomènes d'abrasion des pneumatiques et d'usure des plaquettes de frein.

2 - Ordonnance n° 2021-1490 du 17 novembre 2021, portant sur la transposition de la directive européenne relative à la promotion de véhicules de transport routier propres et économes en énergie.

3 - Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles - European Commission (europa.eu)

4 - AFHYPAC-H2MF_Livre blanc Bus H2_VDEF_15062020.pdf (fuelcellbuses.eu)

5 - Les rapports publiés dans le cadre des principaux projets de déploiement de bus hydrogène européens (notamment CHIC, <https://3emotion.eu/HyTransit>, 3Emotion, JIVE/JIVE 2) sont accessibles aux liens suivants :

Final Report CHIC (Clean Hydrogen in European Cities) | Fuel Cell Electric Buses (fuelcellbuses.eu),

<https://www.fuelcellbuses.eu/projects/hytransit> <https://3emotion.eu/> JIVE | Fuel Cell Electric Buses (fuelcellbuses.eu).

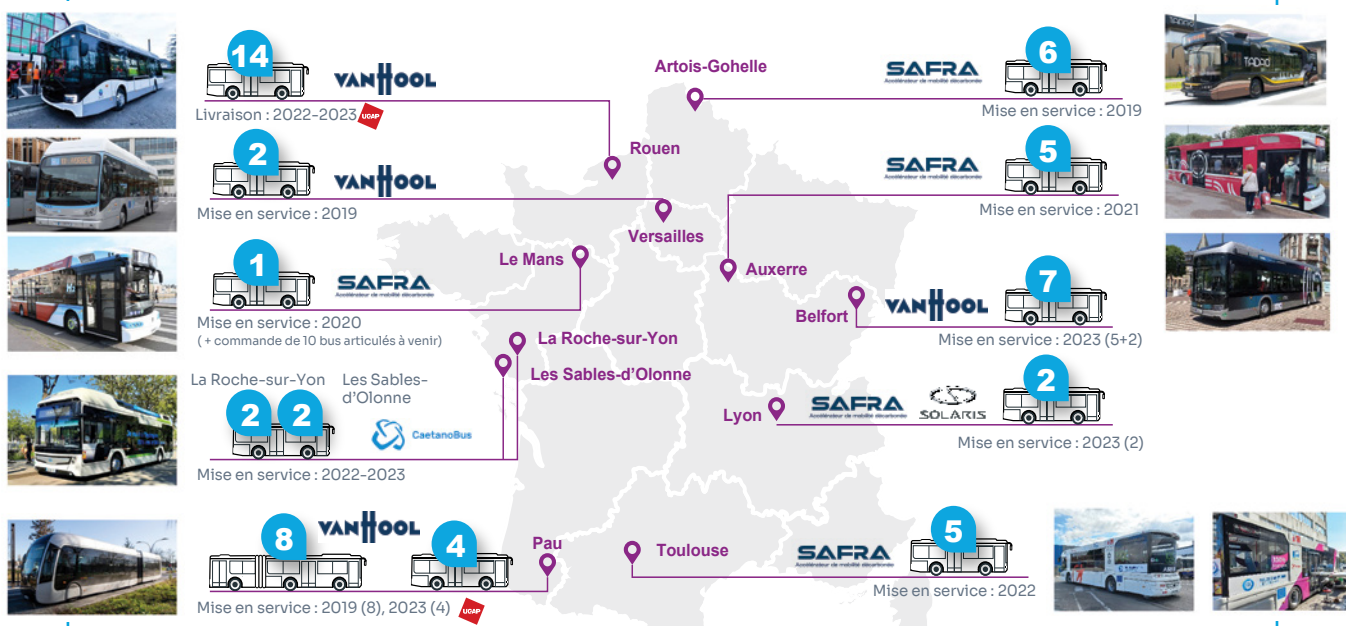
1 ETAT DES LIEUX DES DEVELOPPEMENTS DE LA FILIERE BUS HYDROGENE EN FRANCE

1.1 Déploiements effectifs et à venir de bus hydrogène en France

En mai 2024, on dénombre 58 bus électriques à hydrogène standards et articulés en opération en

France, répartis sur une dizaine de villes ou agglomérations. Pau, Versailles, Lens, Le Mans, Auxerre, La Roche-sur-Yon, Toulouse, Les Sabes-d'Olonne, Rouen, Lyon ou encore Belfort font ainsi figure de précurseurs (voir carte ci-dessous).

Figure 1 - AUTOBUS HYDROGENE EN OPERATION
EN FRANCE EN MAI 2024



Source : ERM pour France Hydrogène Mobilité

Ces premiers déploiements sont marqués par une volonté forte d'évaluer et de confirmer l'intérêt de la technologie hydrogène pour la transition des flottes de transport public, et ce chez tous les types d'opérateurs – la solution hydrogène est identifiée comme une option crédible de décarbonation du secteur par toutes les typologies d'exploitants, à savoir :

Les 3 groupes dominant le marché – Keolis, Transdev et la RATP, respectivement en exploitation de bus hydrogène sur les territoires de Versailles, Rouen et La Roche-sur-Yon par exemple ;

Les collectivités via leurs sociétés publiques locales (SPL) ou sociétés d'économie mixte (SEM) – comme la STAP à Pau, Artois Mobilité, ou la Setram au Mans par exemple ;

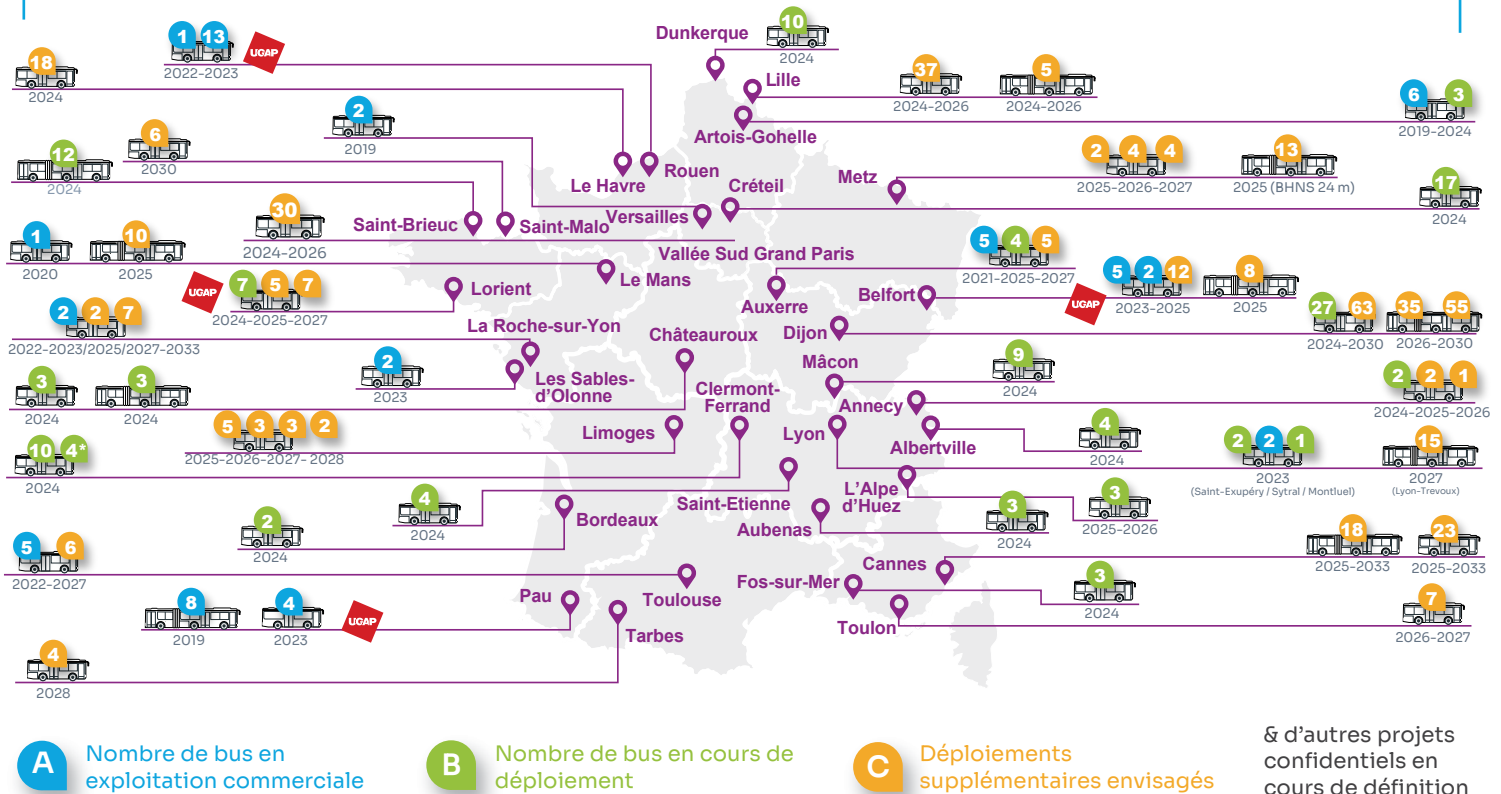
Les PME – comme les sociétés B.E. green et Autocars Dominique, impliquées dans les premiers déploiements d'autobus hydrogène à Versailles, et qui exploiteront des autocars hydrogène rétrofités lors des JO 2024.

Cette dynamique se poursuit, et plusieurs centaines de bus hydrogène supplémentaires devraient être déployés dans les mois et années à venir, puisque l'on observe d'une part une multiplication des annonces de projets et d'autre part un nombre grandissant de concrétisations avec commandes fermes de bus hydrogène. Ces projets en cours de développement sont illustrés sur la carte ci-dessous : les travaux de France Hydrogène Mobilité permettent de recenser plus de 550 déploiements annoncés publiquement, auxquels s'ajoutent plus de 100 bus additionnels dans le cadre de projets encore confidentiels à ce stade, soit près de 1000 bus à venir dans les prochaines années.

Après les premiers déploiements français dès 2019, la technologie hydrogène est désormais pleinement intégrée dans la stratégie de décarbonation de ces territoires pionniers. En effet, la quasi-totalité ont d'ores et déjà validé une deuxième vague de mise en service d'autobus hydrogène : les annonces de déploiements se multiplient, et la formation des équipes locales s'accélère, afin d'inscrire dans la durée la maîtrise de la technologie hydrogène.

Figure 2 - ETAT DES LIEUX DES PROJETS DE DEPLOIEMENT DE BUS HYDROGENE EN FRANCE EN MAI 2024

Total projets bus hydrogène : 736 bus (58 + 133 + 417 + 128)
 Total (en exploitation + en cours de déploiement + annoncés + confidentiels)



Source : ERM pour France Hydrogène Mobilité

Pour tous les projets en cours de développement, il sera central de pouvoir bénéficier de retours d'expérience collectés dans le cadre des premiers déploiements de bus hydrogène. C'est tout l'objectif de ce document : s'il ne remplace pas les échanges directs entre collectivités, il a pour but de proposer au sein d'une même référence des informations collectées auprès de plusieurs porteurs de projets clés. Leurs apprentissages et partages d'expériences réelles de cette technologie pourront permettre aux déploiements en cours et futurs de se

dérouler de façon fluide, et de progresser sur la maturité du marché. Ainsi, l'ensemble des métropoles françaises qui se penchent actuellement sur leurs objectifs de transition de leurs flottes d'autobus pourront bénéficier d'une part de ces partages sur les plans pratique et opérationnel, et d'autre part des avancées technologiques permises par les retours d'expérience issus des déploiements des villes pionnières qui ont éprouvé cette nouvelle technologie.

1.2 Description succincte de l'offre constructeur

Dans la continuité des déploiements et annonces de collectivités françaises et européennes, l'offre constructeur a connu un fort essor depuis 2019, de sorte que six constructeurs proposent désormais un ou plusieurs modèles de bus hydrogène à leur catalogue français. Ainsi, le marché du bus hydrogène initialement occupé par de nouveaux entrants

ou de petits constructeurs réunit désormais des acteurs majeurs européens, dont les deux premiers constructeurs en termes de ventes de bus en Europe, Iveco et Mercedes, et le constructeur polonais Solaris. Les paragraphes suivants proposent une description succincte de l'offre développée par ces six constructeurs⁶. Par ordre alphabétique :

CaetanoBus – H2.City Gold⁷

CaetanoBus est un constructeur portugais proposant une offre d'autobus et d'autocars en Europe. En 2019, l'OEM a commercialisé le H2.City Gold, son premier modèle de bus standard électrique à hydrogène. Le véhicule a été développé en collaboration avec Toyota, partenaire historique de Caetano, qui fournit la pile à combustible d'une puissance de 60 kW à 70 kW.

L'autobus dispose d'une autonomie pouvant atteindre de 400 à 600 km en fonction des conditions d'opération, grâce à ses cinq réservoirs (Hexagon Purus), permettant le stockage de 37,5 kgH₂ à 350 bar, et une durée d'avitaillement de l'ordre de 10 minutes.

Le constructeur portugais a déjà livré 4 bus en France, 2 à La Roche-sur-Yon et 2 aux Sables-d'Olonne. Plus globalement en Europe, CaetanoBus multiplie les commandes avec notamment 10 bus qui seront livrés en 2025 à Vienne, 10 à Madrid, 8 à Barcelone, et 60 en Allemagne.



⁶ - A noter que seules les offres commercialisées en France sont décrites : le constructeur Wrightbus par exemple, n'est pas présenté, car ses autobus H₂ ne sont pas disponibles en France en mai 2024, malgré de nombreux déploiements au Royaume-Uni et des commandes en Allemagne.

⁷ - Urban Zero-Emissions – Caetanobus

Iveco – E-Way H2⁸

Iveco est le premier constructeur européen d'autobus et autocars à traction alternative en termes de nombre de véhicules vendus chaque année, sous les marques Iveco bus et Heuliez.

En propulsion électrique à batteries, depuis sa première présentation à la COP21 en 2015, son offre s'est enrichie et occupe désormais environ 2/3 du marché français.

Cette gamme est complétée par une version pile à combustible : le E-WAY H2, autobus standard alimenté à l'hydrogène.

Les premiers déploiements sont attendus en 2025, et Iveco s'est d'ores et déjà positionné comme fournisseur pour les collectivités ayant répondu à l'appel à projets Ecosystèmes Territoriaux Hydrogène de l'ADEME de 2023.

Equippé d'une pile à combustible de marque Hyundai et de quatre réservoirs (Luxfer) permettant de stocker 31 kgH₂ à 350 bar, le E-Way H2 peut atteindre une autonomie de 400 km, pour une durée d'avitaillement de l'ordre de 15 minutes.

Le véhicule sera entièrement assemblé en France, dans les usines d'Annonay en Région Auvergne-Rhône-Alpes.



Mercedes – eCitaro Fuel Cell⁹

Daimler Truck AG est l'un des leaders mondiaux de la construction d'autobus, et commercialise sous la marque Mercedes-Benz une large gamme de véhicules allant du minibus à l'autobus articulé, et incluant également l'autocar pour le transport interurbain et le tourisme.

Mercedes-Benz propose dans son catalogue le eCitaro Fuel Cell depuis 2023, disponible en versions standard ou articulé. Le bus est équipé d'une pile à combustible Toyota de 60 kW qui agit comme prolongatrice d'autonomie¹⁰. Ses réservoirs permettent de stocker à 350 bar 25 kgH₂ en version bus standard, et 30 à 35 kgH₂ en version bus articulé, afin d'atteindre une autonomie pouvant aller jusqu'à 400 km.

Les premières livraisons ont commencé fin 2023 : trois bus articulés ont été livrés en Allemagne à la société Rhein-Neckar-Verkehr GmbH pour une mise en service à Mannheim et Heidelberg, et 45 autobus similaires seront livrés d'ici à la mi-2025.



8 - E-Way H2 | Iveco (ivecobus.com)

9 - Le nouvel eCitaro fuel cell – Mercedes-Benz Autobus/Autocar (mercedes-benz-bus.com)

10 - L'eCitaro fuel cell utilise à la fois des batteries et de l'hydrogène comme source d'énergie. L'ajout de la partie hydrogène permet une autonomie plus importante que celle d'un véhicule électrique à batterie classique.

Safra – HYCITY®¹¹

Safra est un acteur historique de la rénovation des matériels de transport de personnes et un pionnier de la mobilité hydrogène. Son modèle BUSINOVA H2 a fait partie des premiers déploiements de bus hydrogène en France en 2019. Au total, 23 véhicules de cette première génération ont été déployés en France : à Versailles, Le Mans, Auxerre, ou encore en Artois-Gohelle ou à l'aéroport de Toulouse-Blagnac.



A la suite des premières années de roulage, des remises à niveau technique ont été effectuées sur ces véhicules, principalement en intégrant une nouvelle génération de pile à combustible Symbio, et en améliorant à la fois son système de refroidissement et la structure qui la supporte.

En juin 2022, lors du salon European Mobility Expo, Safra a lancé officiellement sa deuxième et nouvelle génération de bus hydrogène : le HYCITY®. Ce nouveau bus, qui existe en version standard (12 m), et dont la version articulée (18 m) est en développement, présente des évolutions importantes :

- Châssis et chaîne de traction améliorés :
 - Plancher plat intégral sur 2 essieux, intégrant un essieu arrière directement motorisé ;
 - Positionnement de la pile à combustible de nouvelle génération en pavillon, permettant d'une part la réduction de la ligne H₂ basse pression¹², et d'autre part l'optimisation de son système de refroidissement.
- Expériences voyageurs et conducteurs améliorées :
 - Environnement intérieur spacieux, lumineux, et plus silencieux ;
 - Nouveau poste de conduite repensé, plus spacieux et ergonomique.
- Intégration des dernières technologies de sécurité pour assurer la protection des passagers, des conducteurs, et des piétons (Règlement UE n°2019/2144 GSR II).

Le véhicule HYCITY est fabriqué en France. Il est le seul bus hydrogène à intégrer une pile à combustible française (45 kW), fournie par Symbio. D'autres composants de sa chaîne de traction sont de provenance française ou européenne, tels que les réservoirs du groupe français OPmobility, ou l'essieu motorisé de l'équipementier allemand ZF. Dans sa version standard, le véhicule embarque 35 kgH₂ à 350 bar, permettant d'assurer une autonomie pouvant varier de 350 km à 500 km, selon les conditions d'exploitation. Le temps d'avitaillement est de l'ordre de 15 minutes avec les technologies des stations de distribution actuelles.

Les premières livraisons du HYCITY sont prévues pour la fin de l'année 2024. A ce jour, plus de 50 véhicules devront être produits pour une dizaine de clients, dont Keolis, la Région Auvergne-Rhône-Alpes, la Communauté Urbaine de Dunkerque, la Métropole d'Aix-Marseille-Provence, et l'Eurométropole de Metz.

11 - SAFRA BUS - HYCITY : Bus hydrogène - Safra - Albi

12 - La ligne H₂ basse pression désigne le système permettant à l'hydrogène de circuler entre les réservoirs et la pile à combustible.

Solaris¹³

Solaris est un constructeur polonais d'autobus et de trolleybus. Solaris propose à la vente deux bus électriques à hydrogène : le Urbino 12 (bus standard, commercialisé depuis 2019) et le Urbino 18 (bus articulé commercialisé depuis 2022). L'autonomie de ces deux véhicules est estimée au minimum à 350 km. L'autobus Urbino 12 est équipé d'une pile à combustible de 70 kW fournie par Ballard, et de 5 réservoirs permettant de stocker jusqu'à 37,5 kgH₂ (pour un avitaillement d'une durée de l'ordre de 10 minutes). L'autobus Urbino 18 embarque une pile à combustible Ballard de 100 kW et 8 réservoirs permettant de stocker plus de 50 kgH₂ à 350 bar (et un avitaillement en moins de 20 minutes).



Solaris est le 1^{er} fournisseur de bus hydrogène en Europe : en 2023, les ventes de l'entreprise ont représenté 44,5 % des parts de marché sur le segment du bus hydrogène. Le carnet de commandes pour 2024-2026 fait état de plus de 500 véhicules, qui viennent s'ajouter aux 180 bus hydrogène Solaris déjà en circulation dans 24 villes de 10 pays européens¹⁴. A Cologne en Allemagne, une 4^{ème} commande a ainsi été annoncée en mars 2024, pour une flotte totale de 84 bus Solaris. En France, un bus Urbino 12 est déjà en circulation à Lyon, et 22 Urbino 12 doivent également être livrés à Île-de-France Mobilités d'ici 2025.

Van Hool – Série A Fuel Cell et Exqui.City¹⁵

Van Hool est un constructeur d'autobus, autocars, et véhicules industriels, disposant de deux usines d'assemblage en Belgique et en Macédoine du Nord, d'une capacité de production de 400 à 1000 véhicules par an chacune.

La société propose deux véhicules hydrogène dans son offre :

- La série A Fuel Cell, disponible en versions 12, 13 et 18 m, bus standards ou articulés équipés d'une pile à combustible Ballard de 80 à 100 kW et permettant une autonomie de 350 km grâce à environ 38 kgH₂ comprimés à 350 bar.
- Le Exqui.city, bus articulé 18 m existant également en version 24 m, également équipé d'une pile à combustible Ballard de 100 kW, et présentant une autonomie pouvant atteindre 350 km.



En France, Van Hool a déjà fourni 8 bus 24 m à Pau, et 30 bus standards répartis entre Belfort, Pau, Rouen et Versailles.

En 2024, Van Hool est entré en redressement judiciaire. La livraison des véhicules déjà commandés par les collectivités françaises est retardée, mais ne semble pas annulée à date de mai 2024. Le constructeur néerlandais VDL a déposé une offre de reprise de la division bus et autocars, qui aurait été officiellement validée d'après la RTBF. Cette reprise devrait permettre la continuité des activités de Van Hool.

13 - Hydrogen (solarisbus.com)

14 - Press (solarisbus.com)

15 - Hydrogène | Van Hool

2 RETOURS D'EXPERIENCE DU TERRITOIRE DE LA ROCHE-SUR-YON



François CHALLET,
Chargé de mission Hydrogène
au SYDEV

Alexandre GALVEZ,
Directeur CTY
– filiale de RATP Dev



Résumé du projet

57 bus

Taille totale de la flotte (toutes motorisations comprises)

2 bus standards

Nombre de bus hydrogène en service en mai 2024

- Date de déploiement du premier bus H₂ : **2021**
- Constructeur (modèle) : **CaetanoBus (H2.City Gold)**
- Fournisseur de la pile à combustible : **Toyota**
- Exploitant : **Compagnie des Transports Yonnais (CTY), filiale de RATP Dev**
- Autorité organisatrice de la mobilité : **La Roche-sur-Yon Agglomération**

230 km/j
(objectif : 260-280 km/j,
puis : 300 km/j)

Kilométrage journalier maximum assuré par les bus

450 km/j
(2 bus)

Kilométrage journalier cumulé des bus

40 000 km/an/bus en moyenne,
57 000 km/an/bus à pleine charge

**Pourcentage du trafic assuré par les bus H₂ :
environ 3-4 % du trafic passagers**

- Déploiements de bus hydrogène à venir :
9 bus supplémentaires d'ici 2033 :
2 en 2025, puis 1 chaque année entre 2027 et 2033
- Exploitant du site de production d'hydrogène : **Lhyfe**
- Exploitant des stations de distribution de l'hydrogène : **SYDEV – Vendée Energie**
- Fournisseur des équipements de distribution de l'hydrogène : **HRS**

2.1. Phase de commande / livraison / mise en service

Lors des consultations préalables aux passages de commande des bus, avez-vous trouvé dans l'offre de bus H₂ actuelle un bus répondant bien à votre cahier des charges ?

La Roche-sur-Yon a sélectionné le constructeur portugais CaetanoBus pour la fourniture de ses deux premiers bus standards (12 m) électriques à hydrogène. L'offre correspondait parfaitement au cahier des charges de l'autorité organisatrice des transports, privilégiant le confort des voyageurs et l'accessibilité du véhicule.

En particulier, le cahier des charges imposait trois conditions de configuration des véhicules :

- ▶ Trois portes pour permettre une meilleure gestion des flux de passagers ;
- ▶ Un plancher plat pour garantir l'accessibilité du véhicule sur toute sa longueur ;
- ▶ Au minimum 80 places passagers pour permettre le transport de nombreux voyageurs.

Au moment de la commande en 2020, quatre offres de bus standards électriques à hydrogène étaient disponibles sur le marché, proposées par les constructeurs Safra, Van Hool, Solaris, et CaetanoBus.

- ▶ L'offre Safra Businova n'était pas alignée avec le critère « plancher plat » du cahier des charges,

en raison des marches dans le véhicule ;

- ▶ L'offre Van Hool n'était pas disponible en 3 portes en 2020 ;
- ▶ Solaris ne disposait pas encore de références ni de retours d'expérience en France en 2020, et ne pouvait pas s'engager pour la maintenance de la pile à combustible en France.

L'offre CaetanoBus en revanche, répondait parfaitement aux critères imposés dans le cahier des charges, et a été sélectionnée.

Suite au déploiement de ces 2 bus standards, l'agglomération poursuit sur sa lancée avec la commande de nouveaux bus hydrogène pour fin 2025 (la procédure de sélection du constructeur est en cours).

Comment s'est déroulé le déploiement des bus, de leur immatriculation à leur mise en service ? Avez-vous constaté des contraintes de déploiement des bus H₂ comparé à d'autres types de bus, comme les électriques à batteries ou les GNV ?

Les services de la DREAL (Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) avaient la charge du bon déroulé de l'immatriculation des véhicules, spécifique car il s'agissait des premiers véhicules vendus en France par le constructeur portugais CaetanoBus. Cela n'a engendré aucun délai ni aucune complication pour La Roche-sur-Yon.

Le premier bus a ensuite été livré en 2021. La livraison des bus et leur mise en service se sont parfaitement déroulées, comme pour tout autre bus, diesel ou autre.

“ Tout s'est déroulé comme un long fleuve tranquille.

En effet, le déploiement s'est effectué de manière similaire à tout déploiement impliquant un nouveau type de motorisation : les aspects propres à la transition ont été identifiés et traités au fur et à mesure.

C'est notamment le cas de la maintenance et du service après-vente (SAV), qui demandent de mettre en place de nouvelles procédures, les locaux existants pour des véhicules diesel n'étant pas adaptés aux véhicules hydrogène. Les conducteurs ont été formés à l'emploi du matériel, à l'avitaillement et aux spécificités liées à l'usage de l'hydrogène.

Ainsi, aucune difficulté propre à l'hydrogène n'a été rencontrée, et l'affectation des bus a été réalisée en prenant en compte les spécificités liées à ce nouveau type de véhicule.

Comment se sont déroulées la livraison et la mise en service de l'infrastructure d'avitaillement associée ?

La station hydrogène de La Roche-sur-Yon, intégrée dans une station multi-énergies, dispose



d'une capacité de distribution de 200 kgH₂/j (actuellement environ 100 kgH₂/j sont distribués). Elle est exploitée par la SEM Vendée Energie, une Société d'Economie Mixte filiale du SYDEV, le Syndicat Départemental d'Énergie et d'équipement de Vendée. Les différents équipements de distribution ont été fournis par l'entreprise française HRS, qui est également en charge de la maintenance de la station.

L'hydrogène est produit par l'entreprise française Lhyfe, sur son site de Bouin en Vendée, à partir d'un électrolyseur alimenté en électricité renouvelable produite par Vendée Energie, qui déploie sur le territoire des actifs de production d'énergie renouvelable. L'hydrogène est ensuite transporté jusqu'à la station de distribution par la route (camions tube trailers).

Après une période d'observation de 1 à 3 mois permettant de réaliser les paramétrages et de s'assurer du bon fonctionnement de l'avitaillement pour les différents types de véhicules, la station a été mise en service en décembre 2021.

L'excellente disponibilité des techniciens de HRS a permis d'assurer que l'infrastructure soit disponible dans les temps, et qu'elle réponde aux usages. Depuis la mise en service, le fonctionnement de la station se déroule très bien et aucune difficulté spécifique n'a été rencontrée.

Certaines modifications correctives ont dû être apportées, sans que la disponibilité ni l'utilisation de la station ne soient impactées.

2.2 Retours d'expérience sur les véhicules

Comment qualifieriez-vous la fiabilité des bus ?
Rencontrent-ils des pannes, et si oui de quels types ?
Comment se déroule le service après-vente ?

“ La fiabilité de ces bus hydrogène est équivalente à celle de tout autre bus diesel classique.

La seule difficulté liée à ces bus réside dans les périodes d'indisponibilité des véhicules en raison des délais de livraison de pièces. Ces délais sont en effet plus longs pour les premiers bus hydrogène que pour des modèles Diesel, et cela est dû à la présence limitée de CaetanoBus sur le sol français. Pour certains changements de pièce, les délais peuvent s'étendre sur une dizaine de jours, contre 24 h pour un véhicule thermique Iveco de modèle largement répandu (ce véhicule compose la majeure partie de la flotte de La Roche-sur-Yon). A ce stade, les pannes ou changements de pièces n'ont jamais été liés à un défaut sur la partie spécifique à l'hydrogène. De plus, ceci n'a pas affecté le service proposé par RATP Dev : lorsqu'une maintenance du

véhicule est nécessaire, la flotte de réserve de La Roche-sur-Yon (10 % de la flotte actuelle) permet de couvrir la période d'indisponibilité.

Afin d'accélérer les diagnostics de pannes et de mieux s'appropriier les nouvelles techniques de maintenance, les équipes de l'exploitant suivent une formation. Grâce à cette formation, les pannes rencontrées seront diagnostiquées et résolues plus rapidement dans le futur, car la technologie sera maîtrisée. De plus, en conséquence du développement de la filière, les pièces détachées seront rapidement disponibles en plus grande quantité et à proximité, ce qui diminuera les temps de livraison actuels. Enfin, pour les prochains déploiements de bus hydrogène, La Roche-sur-Yon privilégiera les constructeurs disposant d'un réseau de SAV développé sur le territoire français afin de réduire les délais de livraison de pièces.

Quelle est la fiabilité des composants (durabilité des piles à combustible, des réservoirs, etc.) ?

La fiabilité des composants est au rendez-vous : la marque Toyota notamment, pour la pile à combustible, est un gage de confiance et de qualité, d'autant plus que cette pile à combustible équipant les véhicules est la 6^{ème} génération développée par Toyota.

“ **Aucun souci n'a été rencontré avec les systèmes hydrogène.**

Ceci comprend l'intégralité de la chaîne de traction, dont les réservoirs hydrogène, la pile à combustible, le moteur, etc.

Le problème le plus proche du système hydrogène rencontré est celui du *battery management system* (BMS), dont la résolution a uniquement requis une mise à jour logicielle.

Comment se déroule l'opération des bus ?
Quelle est la consommation constatée des bus ?
Quel est le temps de recharge observé ?

Les bus électriques à hydrogène présentent une autonomie « très confortable », permettant d'assurer sans contrainte le trajet journalier de 300 km à haute vitesse moyenne de croisière, sans restriction sur le chauffage ou la climatisation. Le confort apporté au conducteur par le silence des véhicules électriques est ainsi doublé d'une plus grande sérénité vis-à-vis de l'autonomie, par rapport à des véhicules électriques à batterie.

Les performances opérationnelles du bus hydrogène assurent un service qui n'aurait pas pu être rendu par les bus électriques à batterie disponibles sur le marché sur la ligne sélectionnée. En effet, les véhicules du réseau de La Roche-sur-Yon circulent dans

des zones non urbanisées, ce qui engendre des pointes de vitesse et des appels de puissance importants, et donc une consommation d'énergie élevée. La masse de batterie embarquée nécessaire au fonctionnement du véhicule sur cette distance et aux plages de vitesses requises réduirait la charge utile du véhicule. La solution électrique à batterie n'aurait donc pas été compatible avec les conditions d'opération actuelles, avec des pics de fréquentation nécessitant une capacité importante des véhicules.

Comme annoncé par CaetanoBus lors de la commande, la consommation moyenne observée est d'environ 7 à 7,5 kgH₂/100 km (et 8 kgH₂/100 km dans des conditions moins favorables), contre 33 à 34 L/100 km pour un diesel équivalent circulant actuellement sur la même ligne. Cette valeur est très positive pour la filière, car largement en deçà des consommations observées il y a quelques années sur des projets démonstrateurs, plus proche de 10 kgH₂/100 km et témoigne d'une amélioration significative de l'efficacité énergétique des bus hydrogène.

Cette performance est obtenue grâce aux nombreuses améliorations déjà apportées par Toyota à la pile à combustible (6^{ème} génération) et au choix de réservoirs type IV (structure intérieure en plastique), plus légers que le type III (structure intérieure en acier ou en aluminium).

L'avitaillement du véhicule est effectué par les conducteurs, après qu'une courte formation leur a été dispensée. **Contrairement au GNV, l'avitaillement en hydrogène est réalisé sans appui constant du conducteur sur le bouton de remplissage.**

Ceci permet aux conducteurs d'effectuer d'autres opérations en temps masqué. **Le temps de recharge est d'environ une dizaine de minutes, et permet une autonomie de 400 km.**

En exploitation, quel niveau de performances constatez-vous (capacité d'accélération, vitesse en montée, autonomie) dans des conditions d'utilisation particulières (journées très chaudes / très froides, bus affectés à des lignes à fort dénivelé, ou sur des lignes très fréquentées) ?

Les retours d'expérience ont été très positifs y compris dans les conditions d'opération plus difficiles.

L'aménagement intérieur étant similaire à celui d'un autobus thermique, l'autobus hydrogène est tout aussi adéquat pour le transport de passagers, y compris sur des lignes très fréquentées grâce à ses trois portes et son plancher plat intégral. Les véhicules hydrogène présentent également toutes les caractéristiques positives des véhicules électriques :



- ▶ Confort sonore ;
- ▶ Vibrations amoindries ;
- ▶ Couple-moteur plus élevé qui permet des accélérations efficaces (dans les zones à forts dénivelés ou lors d'insertions, comme sur les ronds-points par exemple) ;
- ▶ Frein-moteur plus important, ce qui permet une conduite plus souple et linéaire.

A ces avantages, s'ajoute l'autonomie importante permise par la solution hydrogène.

Enfin, aucune différence liée à une météo spécifique n'a été remarquée, y compris lors des opérations en conditions de température plus difficiles.

Comment s'est déroulée (voire se poursuit) la formation des personnels ?

La formation proposée aux conducteurs inclut simplement une session d'une heure, permettant une première prise en main du véhicule du dépôt à la station, et la réalisation d'un avitaillement. Elle est réalisée directement par l'équipe d'encadrement de la CTY, qui a elle-même été formée par le SYDEV et CaetanoBus.

L'équipe de maintenance a quant à elle également suivi une formation d'une semaine chez le constructeur, et continue à se former lorsqu'une difficulté technique survient. **En complément, et afin d'anticiper les futurs déploiements sur le territoire,**

Le groupe RATP va déployer d'ici 2025 un centre de formation. Destiné en premier lieu aux agents RATP, le centre proposera des sessions de 5 jours, qui permettront de former des techniciens spécialisés dans la technologie hydrogène.

Comment a été accueilli le bus électrique à hydrogène ? Par le personnel exploitant le véhicule (chauffeur, etc.) et les usagers.

Les conducteurs comme les usagers ont accueilli très favorablement le déploiement de bus hydrogène dans l'agglomération.

Les véhicules ont été accueillis positivement et fièrement par les conducteurs, ce qui est clé dans un contexte de recrutement difficile. Cet accueil positif est notamment lié au fait que le véhicule est silencieux, agréable à conduire, et qu'il bénéficie d'une excellente réponse à l'accélération et au freinage grâce à son moteur électrique.

Une contrainte liée au système de direction a été identifiée par les conducteurs de La Roche-sur-Yon : un effort supplémentaire est nécessaire pour tourner le volant, par rapport à un véhicule thermique. Cette problématique est rencontrée pour tous les autobus électriques (à batterie et à hydrogène), et des développements sont en cours du côté des constructeurs pour limiter cet inconvénient. Une amélioration a déjà été apportée par CaetanoBus,

afin de faciliter les manœuvres pour le conducteur. Ceci est peu contraignant sur des lignes de Bus à Haut Niveau de Service (BHNS), pour lesquelles les véhicules évoluent principalement en ligne droite, mais l'impact est plus important lorsque les bus circulent via de nombreux ronds-points, ce qui est le cas à La Roche-sur-Yon.

« Ces premiers véhicules à hydrogène d'origine renouvelable sont une fierté pour les conducteurs. »

Suite à une enquête, les voyageurs ont exprimé des retours positifs, notamment concernant le faible niveau sonore du bus. Ce retour positif est également dû au choix de La Roche-sur-Yon de ne pas faire de compromis sur l'accessibilité et le confort des passagers, ce dernier s'en retrouvant amélioré.

2.3 Retours d'expérience sur la station

Comment qualifieriez-vous la fiabilité de la station ? Des pannes sont-elles rencontrées ?

Comment se déroule le service après-vente ?

Aujourd'hui, le taux de disponibilité de la station dépassant les 96 % est très satisfaisant, et supérieur à l'objectif fixé lors de l'établissement du contrat avec HRS. Cette tendance continue à s'améliorer, et aucun aléa majeur n'est à déplorer.

Afin d'obtenir ce résultat, le SYDEV travaille en collaboration avec ses prestataires (dont HRS, le fournisseur des équipements de distribution) qui se rendent disponibles pour assurer le bon fonctionnement de la station.

La surveillance des installations et la vigilance des usagers permettent d'agir rapidement lorsqu'un aléa survient, et HRS intervient à distance ou en se déplaçant grâce à son équipe technique locale afin de résoudre le problème. De plus, le niveau de fiabilité aujourd'hui est tel que les incidents sont peu fréquents, et les procédures en place permettent de maintenir un fonctionnement sans impact sur les usagers. En particulier, la maintenance régulière des stations (dont notamment un contrôle technique hebdomadaire) permet de s'assurer de l'intégrité des équipements. Pour chaque plein, un protocole de test permet également de vérifier que l'ensemble du système de distribution est fonctionnel.

“ Les usagers et les conducteurs ont confiance dans le système. ”

Comment s'est déroulée (voire se poursuit) la formation des personnels ?

Le SYDEV et Vendée Energie accompagnent chaque nouvel usager lors du 1^{er} ravitaillement sur la station. Le badge d'accès leur est alors remis, et une

présentation est réalisée sur le fonctionnement de la station et les précautions liées à son usage.

Une signalétique permanente sur l'ensemble de la station (tout comme sur une station de carburant classique) permet également de rappeler les différentes règles de sécurité.

2.4 Aspect financier

Quel a été le prix d'achat des bus ?

Le prix d'achat d'un véhicule CaetanoBus en 2020 s'élevait à 600 000 €HT.

Les deux véhicules ont bénéficié d'un soutien financier important, notamment de la part de l'ADEME, de la Région Pays de la Loire, et du Département de la Vendée, qui a permis de couvrir plus de 70 % du surcoût du prix d'achat par rapport à un bus GNV équivalent. **Par ailleurs, des signaux positifs d'évolution des prix des bus hydrogène ont été notés, avec une diminution du prix d'achat entre les deux premières commandes.**

Les projections établissent une baisse du prix à 500 000 €HT dans les prochaines années, c'est-à-dire une valeur similaire à des bus électriques à batterie. Cela étant, il faut noter que cela représente un surcoût par rapport aux véhicules thermiques.

Quel a été le coût d'adaptation des ateliers de maintenance ?

La collectivité de La Roche-sur-Yon souhaite mettre en place un atelier de maintenance à horizon 2025. Cet atelier appartient à un pôle d'innovation sur l'énergie et la mobilité durable, qui vise à fédérer différents acteurs de l'écosystème (production, distribution, usagers, RATP Dev, organismes de formation et de recherche, professionnels de l'assemblage du véhicule, etc.) et sera complètement opérationnel à horizon 2027.

Le coût du nouvel atelier est estimé entre 200 000 et 300 000 €¹⁶, mais il sera amorti sur de très longues durées.

D'ici à 2027, la collectivité est également attentive à l'émergence de nouvelles réglementations spécifiques à l'hydrogène qui devront être prises en compte d'ici à la mise en service de cet atelier. En effet, il n'y a pas, en mai 2024, de normes spécifiquement définies guidant ou réglementant l'usage sécurisé d'un véhicule hydrogène dans un dépôt ou un atelier. A ce stade, la démarche adoptée dans les ateliers existants est de cumuler les normes relatives au GNV et à l'électrique à batterie, sans plus de spécificité pour l'hydrogène (excepté un changement des détecteurs de méthane en détecteur hydrogène).

16 - Il s'agit du coût global du nouvel atelier, et pas seulement de la part spécifique à l'hydrogène.



Quel est le coût de maintenance des bus ?

Le coût du contrat de maintenance établi avec CaetanoBus est fixé à 20 000 €/an par véhicule (tout compris, notamment le déplacement de techniciens depuis le Portugal ou Bruxelles), ce qui revient à un coût moyen kilométrique actuel de 0,50 €/km. Ce contrat permet également de prolonger la période de garantie de la pile à combustible sur les 6 premières années d'opération des véhicules (à la manière d'une extension de garantie).

Compte tenu du haut niveau de fiabilité des composants, le coût de maintenance global réel devrait être similaire (voire inférieur) aux coûts de maintenance d'un véhicule électrique à batterie. En effet, compte tenu des performances observées pour les piles à combustible (PAC), ce coût pourrait être diminué, car il n'est pas certain que le changement de la PAC soit nécessaire sur la durée de vie du bus.

Pour les futurs bus hydrogène déployés par le territoire, la maintenance sera assurée directement par les techniciens RATP, et le coût de maintenance global devrait être largement réduit. Il devrait s'élever au maximum à

0,40 €/km (tout compris, c'est-à-dire les coûts de maintenance préventive, de maintenance corrective et de main d'œuvre) et rapidement être inférieur à celui d'un véhicule thermique.

Quel a été le coût de l'infrastructure de recharge ? Quel est le prix final de l'hydrogène à la pompe ?

Le CAPEX de la station de distribution s'élève à 1,85 M€. Ce montant est relativement bas pour une station de cette taille, grâce à la mutualisation des coûts de génie civil au moment de la construction de la station multi-énergies dont fait partie la station hydrogène.

Cependant, la station de distribution ne fonctionnant au mieux qu'à la moitié de sa capacité journalière, les frais fixes (dont notamment le coût d'investissement de la station) sont répercutés sur des faibles volumes d'hydrogène, ce qui engendre un coût d'exploitation élevé pour l'opérateur. De plus, le passage à l'échelle des infrastructures de production et distribution dans le cadre de futurs projets permettra de réduire les coûts. Le prix de l'hydrogène à la pompe a été établi à 15 €HT/kgH₂, ce qui semblait être le prix maximum à ne pas dépasser

pour les usagers mais demeure pour le moment inférieur au coût de revient.

Ceci est rendu possible grâce à un effort réalisé par le SYDEV afin de permettre le développement de la filière. Cette valeur de 15 € HT/kgH₂ permettra cependant la rentabilité de la station lorsque celle-ci fonctionnera au maximum de sa capacité.

Ce prix (et plus globalement le coût de l'énergie) représente ainsi l'un des principaux freins pour le développement de la filière : le poste de coût du carburant pour le bus hydrogène est 2,5 fois supérieur à celui du diesel, soit près de 25 000 à 30 000 € de surcoût par an lié au carburant par rapport à un véhicule thermique. Le point d'équilibre (sans prendre en compte une monétisation du CO₂) serait atteint à partir de 9 €/kgH₂, qui était la valeur visée par l'ADEME avant la crise énergétique. L'instauration de la Taxe Incitative Relative à l'Utilisation de l'Energie Renouvelable dans les Transports (TIRUERT)¹⁷ pourrait contribuer à atteindre cette valeur : France Hydrogène évalue à 4,7 €/kgH₂ la valorisation d'un kilogramme d'hydrogène sous forme de certificats de distribution de carburant renouvelable.

17 - N.d.I.R. : L'hydrogène renouvelable a intégré l'assiette TIRUERT au 1^{er} janvier 2023. L'hydrogène bas-carbone produit par électrolyse doit intégrer cette assiette au 1^{er} janvier 2024. Si l'on se réfère à la filière diesel (qui est la plus structurante en France), le maximum théorique pour la valorisation d'un kilogramme d'hydrogène sous forme de crédits TIRUERT, est de 9,4 €/kgH₂ (tenant compte du signal-prix actuel de 140 €/hectolitre de diesel). Ce maximum théorique est inopérant, et France Hydrogène estime que la valorisation réelle possible est de 4,7 €/kgH₂ (50 % du maximum théorique). Cette fourchette est jugée comme fiable car conservatrice. Voir détails au lien suivant : Plan-Mobilité_France-Hydrogene.pdf

5. Bilan général et prochaines étapes

A l'avenir, lorsque le nombre d'utilisateurs sera plus élevé, les nouvelles stations aux capacités de distribution plus importantes permettront de réduire le coût de production et de distribution de l'hydrogène via des effets de volume (les coûts fixes étant mieux répartis et le transport par tube trailer plus optimisé). La station de La Roche-sur-Yon a été prévue dans cette optique de passage à l'échelle, et permettra après modification une capacité d'au moins 1 tH₂/j. Ceci permettrait l'avitaillement d'environ 45 bus (un bus consomme en moyenne 22,5 kgH₂/j¹⁸), mais la station est publique et ouverte à d'autres types de véhicules.

Quels sont les indicateurs économiques pris en compte dans les formules de révision du coût de l'H₂ ? A titre de comparaison, pour les bus à recharge électrique, ou GNV, il est pris comme référence le prix de marché de l'énergie, qui a fortement augmenté ces dernières années et a affecté négativement les OPEX carburant des opérateurs.

Le SYDEV a établi un contrat d'achat de 4 ans avec Lhyfe pour de l'hydrogène d'origine renouvelable.

L'indexation du prix d'achat de l'hydrogène par le SYDEV a notamment pour composantes le coût de la main d'œuvre, celui du transport et celui de la molécule.

Le coût de la molécule vendue au SYDEV dépend principalement du prix de l'électricité pour la produire. Vendée Energie, filiale du SYDEV, est l'acteur fournissant l'électricité renouvelable à Lhyfe, dans le cadre d'un contrat de vente de 5 ans. L'ordre de grandeur en 2020 du prix de l'électricité était de 50 €/MWh. A l'issue de ces 5 ans, le contrat sera renouvelé et un nouvel accord sera trouvé concernant le prix de la fourniture d'électricité.

Compte tenu de cette spécificité du projet permettant un prix d'achat de l'électricité favorable, le coût de production de l'hydrogène est relativement bas, mais pourrait augmenter dans le futur.

Concernant le prix de l'hydrogène distribué, celui-ci n'est pas indexé. En revanche, le contrat précise que le SYDEV et Vendée Energie se gardent la possibilité de modifier ce tarif après un certain délai de prévenance.

Quelles ont été les bonnes et les mauvaises surprises ?

L'hydrogène est une solution technologiquement très fiable : aucune difficulté spécifique n'a été rencontrée, que ce soit au niveau du bus ou de la station. Les quelques complexités liées à la formation, à la direction assistée¹⁹ nécessitant l'adaptation de l'affectation des bus, ont toutes été résolues. Des améliorations ont ainsi été apportées sur les plans où la performance était initialement inférieure à celle d'un véhicule thermique.

Bien que la généralisation de la technologie prenne du temps, et que certains constructeurs rencontrent des difficultés (non liées à la technologie hydrogène) en phase d'émergence du secteur, ces retours sont positifs et prometteurs pour le passage à l'échelle de la filière.

Concernant la station, la mise en place s'est faite progressivement, en apportant les modifications nécessaires à la fluidité des avitaillements, et ce grâce à la grande implication des différentes parties prenantes en amont et tout au long de la mise en opération de la station.

18 - Pour une consommation moyenne de 7,5 kgH₂/100 km et une distance journalière de 300 km/jour.

19 - Cette problématique est rencontrée pour tous les autobus électriques (à batterie et à hydrogène), et des développements sont en cours du côté des constructeurs pour limiter cet inconvénient.

“ Le système fonctionne bien, il fonctionne mieux qu’hier, et il fonctionnera encore mieux demain.

Plusieurs éléments facilitants ont contribué à la réussite du déploiement des véhicules comme de la station :

- ▶ L’accompagnement financier permettant de compenser en partie le surcoût de la transition à une solution hydrogène (appel à projets de l’ADEME EcosysH2 2020, support de la Région et du Département).
- ▶ L’implication d’un coordinateur de projet (le SYDEV), et le partenariat solide entre les différents acteurs (le SYDEV, Vendée Energie, Lhyfe et RATP Dev). La création d’une dynamique d’acteurs a permis de maximiser les synergies entre les parties prenantes. L’implication des élus locaux et le fort soutien politique sur le sujet ont également favorisé le projet.
- ▶ L’accueil positif des véhicules par les conducteurs, pour qui le déploiement de bus hydrogène était autant une fierté qu’une réussite d’un point de vue opérationnel : véhicule silencieux, agréable à conduire, et qui bénéficie d’un excellent couple grâce à son moteur électrique.

Des difficultés ont dû être surmontées dans le cadre de ce déploiement :

- ▶ Les coûts :
 - Prix d’achat : Une baisse significative des prix sera nécessaire pour que le territoire puisse s’engager sur des déploiements massifs. Cependant, les aides financières et les signaux positifs comme la diminution du prix d’achat entre les deux premières commandes sont encourageants.
 - Coûts d’exploitation : le prix du carburant est encore élevé, mais l’instauration du mécanisme de la TIRUERT pourrait permettre de réduire le prix de l’hydrogène.
- ▶ La maintenance & le SAV : les contrats de maintenance sont encore lourds, compte tenu des incertitudes sur les éléments indispensables à intégrer. De plus, il s’agit des premiers véhicules d’une petite série, des problèmes de début de série ont donc été rencontrés - sans être liés spécifiquement à la technologie hydrogène - et la faible disponibilité des pièces à remplacer a parfois entraîné des délais. Cette difficulté devrait entièrement disparaître dans le futur, car le choix du constructeur de véhicule reposera notamment sur la proximité d’un atelier et l’accès à un stock important de pièces détachées.

▶ Le système de direction assistée, exigeant un effort plus important pour le conducteur lors des manœuvres par rapport à un véhicule thermique²⁰. Ceci a peu d’impact pour un BHNS (Bus à Haut Niveau de Service), mais cela représente une difficulté réelle compte tenu des nombreux ronds-points de La Roche-sur-Yon (en moyenne 80 franchis par jour pour un conducteur).

▶ La réglementation : les différentes autorisations et réglementations à respecter complexifient les mises en service et pourraient être un frein pour le déploiement de stations aux capacités plus importantes. Cependant, un assouplissement des contraintes ICPE (Installation classée pour la protection de l’environnement) relatives au stockage de l’hydrogène est en discussion au niveau national.

Quels sont les points à améliorer pour cette filière du bus hydrogène d’après vous ?

La clarification des obligations réglementaires sur les dépôts et ateliers, la formation des entreprises et la montée en compétences des personnels faciliteront le passage au bus électrique à hydrogène.

20 - Cette problématique est rencontrée pour tous les autobus électriques (à batterie et à hydrogène), et des développements sont en cours du côté des constructeurs pour limiter cet inconvénient.



Comme précisé dans la section relative à la maintenance, une clarification des obligations réglementaires vis-à-vis de la maintenance et du service après-vente permettrait de lever des zones d'ombre pour les opérateurs.

Le maillage du réseau de SAV hydrogène doit également continuer à se développer, afin d'assurer la montée en compétences au niveau local. Ainsi, la formation des acteurs à La Roche-sur-Yon a permis de réels progrès, et l'amélioration de la réactivité des équipes et de la disponibilité de la station et des véhicules.

Le coût élevé de l'énergie nécessite une vraie volonté politique pour soutenir le surcoût qu'il représente pour la mobilité hydrogène.

Pour favoriser l'amorçage de la filière, des incitations fiscales et financières (via des mécanismes d'exonération ou de subvention) permettraient de plus facilement viabiliser les modèles économiques des développeurs de projets. L'instauration du mécanisme de la TIRUERT pourrait également permettre de diminuer le prix de l'hydrogène et ainsi soutenir la filière. Plus globalement, dans l'optique de multiplier les déploiements, les acteurs requièrent une meilleure visibilité sur la trajectoire d'évolution du prix de l'hydrogène.

Compte tenu de ces complexités, il est important de renforcer autant que possible les dynamiques entre les différentes parties prenantes des écosystèmes hydrogène, afin de mutualiser les efforts nécessaires pour supporter le surcoût de l'hydrogène durant les premières années. Ceci doit permettre le démarrage de la filière et à terme la viabilité des modèles d'affaires des différents acteurs, lorsqu'un effet volume aura été atteint.

Suite à cette première expérience, planifiez-vous des déploiements supplémentaires ?

Suite aux retours positifs obtenus pour ces deux premiers déploiements de bus hydrogène, la ville a prévu de déployer 9 bus supplémentaires d'ici 2033 : 2 bus sont prévus pour 2025, puis 1 chaque année entre 2027 et 2033.

Ces déploiements s'intègrent dans la stratégie du territoire pour sa flotte de véhicules. L'objectif est d'atteindre un mix comprenant 70 % de bioGNV, 20 % hydrogène et 10 % d'autres alternatives à horizon 2032.



Conclusion



Le marché émergent du bus hydrogène français est désormais l'un des plus dynamiques d'Europe avec ses voisins allemand, italien, et espagnol, et entame sa transition vers la massification. Après les premiers déploiements prudents de quelques unités entre 2019 et 2023, les commandes passent à l'échelle, avec des territoires comme Rouen, Dijon, Belfort, Clermont-Ferrand ou l'Île-de-France par exemple, visant des déploiements de plusieurs dizaines d'unités. Les annonces de projets de déploiement se multiplient, et totalisent à l'été 2024 plusieurs centaines de bus hydrogène qui devraient circuler en France dans les prochaines années.

Face à cette demande, l'offre constructeur est au rendez-vous, puisque le nombre de modèles commercialisés en France a triplé depuis les premiers déploiements en 2019. En 2024, une dizaine de modèles d'autobus standards ou articulés sont proposés sur le marché français, y compris par les deux premiers constructeurs européens Iveco et Mercedes, disposant d'un réseau de maintenance et de SAV développé sur le territoire. L'offre se démocratise également auprès des Centrales d'Achats, qui proposent en mai 2024 six modèles H₂ : Mercedes (12 & 18 m), Iveco et Solaris pour l'UGAP²¹, CaetanoBus, Van Hool et Solaris pour la CATP²².

Pour les premiers déploiements français qui sont documentés dans ce livret, les retours des opérateurs sont favorables, et soulignent des performances opérationnelles atteignant ou dépassant les attentes des exploitants. L'objectif d'une solution zéro émission à l'échappement présentant tous les avantages opérationnels d'une solution thermique est rempli. Cette solution est donc parfaitement adaptée à tous les cas d'usages pour lesquels les bus électriques à batterie ne pourraient répondre aux exigences opérationnelles (d'autonomie, de temps de recharge courts, de fiabilité des performances indépendamment des températures ou de la topographie, etc.). De façon non surprenante pour une technologie innovante, ces retours d'expérience reflètent également les challenges pour faire de ces démonstrateurs une réalité. Cela étant, ces difficultés sont rarement corrélées à la technologie hydrogène, et résultent plutôt de l'amorçage d'une filière en phase d'industrialisation, qui met en place un réseau de maintenance, de formation et une réglementation qui lui est propre.

21 - Autobus à motorisation hydrogène - ugap.fr

22 - Produits Bus et Cars - CATP - Centrale d'Achat du Transport Public

En particulier, les retours de La Roche-sur-Yon sur les véhicules fournis par le constructeur portugais CaetanoBus sont très positifs.

Le déploiement des bus s'est déroulé de manière similaire à celui d'un bus diesel. La fiabilité des bus et la disponibilité de la station sont au rendez-vous, et appartenir à un écosystème hydrogène est une réelle fierté pour les conducteurs et acteurs locaux. Aucune difficulté spécifique à l'utilisation de l'hydrogène n'est apparue depuis la mise en service, et La Roche-sur-Yon compte poursuivre les déploiements de bus hydrogène.

Ainsi, sur ce territoire comme partout en France, les principaux challenges et freins liés à l'opération des véhicules et stations sont résolus ou en passe d'être levés. La technologie se démocratise, permettant l'atteinte d'un taux de fiabilité équivalent à celui du diesel, notamment grâce à une nette amélioration de la vitesse du service après-vente, et à la formation des équipes d'entretien et de maintenance.

Cependant, il est nécessaire de noter que c'est la problématique du coût total de possession qui est aujourd'hui la première barrière à la massification des déploiements. Face à cela, la filière se structure pour enclencher l'ensemble des leviers nécessaires à la compétitivité économique du bus hydrogène. Au niveau national, les industriels français se tiennent prêts pour le passage à l'échelle, et développent des *gigafactories* pour la production d'électrolyseurs, de stations de distribution, de véhicules, de réservoirs hydrogène et de piles à combustible. Plusieurs projets d'implantation en France d'usines de grande capacité ont été notifiés Projet Important d'Intérêt Européen Commun (PIIEC), et bénéficieront d'un soutien financier important pour le développement de leurs capacités de production. En guise d'exemples (liste non exhaustive, voir détails sur les [sites du gouvernement français](#) et de la [Commission européenne](#)) :

- Pour la **fabrication d'électrolyseurs** en série, avec le développement des usines de McPhy à Belfort, d'Elogen à Vendôme (Loir-et-Cher), et de Genvia à Béziers.
- Pour l'industrialisation de la production de **piles à combustible**, avec notamment la construction de la *gigafactory* de Symbio, à Saint-Fons (près de Lyon), et

la ligne d'assemblage d'HYVIA (assemblage de pile à combustible, mais également de véhicules utilitaires).

- Pour l'industrialisation de la **production de réservoirs hydrogène**, par Faurecia dans son usine d'Allenjoie près de Montbéliard, et OPmobility (anciennement Plastic Omnium) sur son site de Compiègne.

La multiplication des déploiements à l'échelle européenne permet d'ores et déjà une nette réduction du prix d'achat des bus hydrogène, qui se rapproche de celui du bus électrique à batterie, alors même que les premiers déploiements des deux technologies sont séparés de plus d'une décennie. Au niveau de l'exploitation, le prix de l'hydrogène à la pompe reste aujourd'hui la principale difficulté à surmonter afin de réduire le coût d'opération de ces véhicules. Ce frein pourra être progressivement et partiellement levé par les effets de volumes et les progrès techniques attendus dans la décennie, qui rendront plus robustes les modèles économiques de la production et distribution d'hydrogène renouvelable. En complément, le support associé à la taxe incitative relative à l'utilisation d'énergie renouvelable dans le transport (TIRUERT) devrait être un des leviers clés pour assurer la compétitivité économique du bus électrique à hydrogène. En effet, elle pourrait permettre de réduire de 4,7 €/kgH₂ le prix de l'hydrogène à la pompe²³. Enfin, des évolutions sont attendues sur la fiscalité du bus diesel – et notamment la diminution du remboursement partiel de la TICPE pour les carburants fossiles – contribuant à ce que le prix de l'hydrogène à la pompe se rapproche progressivement de la parité avec le gazole.

Ainsi, la multiplication des retours d'expérience et le partage d'informations entre les porteurs de projets devraient participer à une accélération des déploiements, tout en consolidant les dernières briques techniques faisant de la technologie pile à combustible une solution zéro émission aux conditions opérationnelles analogues au thermique, et présentant le même niveau de fiabilité. Les métropoles devraient bénéficier dans les années à venir de conditions de déploiements de bus hydrogène facilitées, et d'un marché non plus de niche, mais définitivement mature et qui pourra prendre pleinement sa place dans le futur mix zéro émission pour le transport public.

23 - Voir détails relatifs à l'évaluation de cette valorisation dans l'encadré dédié à la TIRUERT du document suivant : [Plan-Mobilite_France-Hydrogene.pdf](#).

Contacts

Ce document est rédigé par ERM France, pour et avec le support du groupe de travail dédié au bus électrique à hydrogène, au sein du groupe France Hydrogène Mobilité. Pour plus d'informations, n'hésitez pas à contacter :

Elise Ravoire

elise.ravoire@erm.com
+33 (0)1 86 47 78 07

Aurélie Deshons

aurelie.deshons@erm.com
+33 (0)1 86 47 77 83

Thomas Botsarron

thomas.botsarron@erm.com
+33 (0)1 89 20 69 93



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 :

- **François CHALLET**, Chargé de mission Hydrogène au SYDEV ;
- **Alexandre GALVEZ**, Directeur CTY – filiale de RATP Dev.

Nous tenons également à remercier pour la relecture détaillée, les compléments et améliorations apportés à la rédaction de ce document :

- **Jean-Marc BOUCHERET**, Sustainable Mobility Manager, IVECO ;
- **Samir BOUKHALFA**, Responsable Développement Hydrogène, ENGIE Solutions ;
- **Cécilia FRY**, Responsable marketing & communication, Ataway ;
- **Thierry GUINARD**, Directeur technique, Keolis ;
- **Nenad NIKOLIĆ**, Responsable Développement Commercial, McPhy ;
- **Bertrand RICHARD**, Responsable Développement Commercial, Safra.

Enfin, un grand merci pour le suivi de l'ensemble de la réalisation de ce document aux membres du groupe de travail dédié au bus électrique à hydrogène, au sein du groupe France Hydrogène Mobilité, et notamment ses coordinateurs Valérie BOUILLON-DELPORTE, Directrice Ecosystème Hydrogène chez Michelin et Co-présidente de France Hydrogène et Nenad NIKOLIĆ, Responsable du Développement Commercial chez McPhy.

France Hydrogène Mobilité est le groupe dédié à la mobilité des acteurs de la filière au sein de France Hydrogène. Il réunit près de 50 acteurs : des énergéticiens, des fabricants d'électrolyseurs, de stations de distribution, des constructeurs automobiles, des fabricants de composants comme piles à combustibles et réservoirs, des fonds d'investissement, des porteurs de projet, des cabinets de conseil ainsi que des institutionnels et 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.



