

Pau

8 bus articulés déployés en 2019 par le SMTUPPP

La flotte de 8 bus articulés a été complétée par la mise en service de 4 bus standards de 12m fin 2023.

Résumé du projet

105 bus

Taille totale de la flotte (toutes motorisations comprises)

8 bus articulés

Nombre de bus hydrogène en service en septembre 2022

- Date de déploiement du premier bus H₂ : **septembre 2019**
- Constructeur (modèle) : **Van Hool (Exqui.City FC)**
- Fournisseur de la pile à combustible : **Ballard**
- Exploitant : **STAP**
- Autorité organisatrice des transports : **Syndicat mixte des transports urbains Pau-Porte des Pyrénées (SMTUPPP)**

290 km/jour

Kilométrage journalier maximum assuré par les bus

> 1200 km/jour

Kilométrage journalier cumulé des bus

320 000 km/an

Kilométrage annuel cumulé des bus

- Pourcentage du trafic assuré par les bus H₂ : **environ 20 % du trafic passagers**
- Déploiement de bus hydrogène à venir : **4 bus standards en 2023, 4 bus standards en 2024-2025**
- Déploiement de bus électriques à batterie à venir : **7 bus standards à venir entre 2023 et 2025 (en plus des 4 microbus déjà déployés)**
- Exploitant de la station de production et distribution de l'hydrogène : **GNVert (ENGIE)**
- Fournisseur des équipements de production et distribution de l'hydrogène : **ITM Power**

.....

Chacune des deux technologies électriques, électrique à hydrogène et électrique à batterie, est utilisée pour les usages respectifs qui correspondent le mieux à ses caractéristiques.

Compte-rendu de l'entretien réalisé en 2022 avec un interlocuteur du SMTUPPP

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 ? Sinon, sur quels critères avez-vous fait évoluer votre cahier des charges initial ?

Pau a fait le choix de l'hydrogène pour ses bus articulés (18 m) dès 2016, sur la base d'une offre du constructeur Van Hool répondant parfaitement au besoin de l'agglomération, sans nécessité d'adapter le cahier des charges.

Dans le cadre de sa réflexion sur le déploiement d'une solution innovante et respectueuse de l'environnement pour sa ligne de bus à haut niveau de service (BHNS), l'agglomération de Pau était ouverte à plusieurs alternatives bas-carbone, du gaz naturel (GNV) à l'hydrogène en passant par l'électrique à batterie (l'ensemble des alternatives étant en ligne avec le décret sur la Transition Energétique de 2017).

Dans ce cadre, Pau a fait le choix non pas de passer commande à partir d'un catalogue de véhicules, mais de lancer en 2016 un dialogue compétitif afin de sélectionner la solution la plus adaptée à son besoin. Les offres devaient inclure à la fois la fourniture des véhicules et l'approvisionnement en énergie associé, sans vecteur énergétique imposé.

Plus d'une vingtaine de candidatures ont été reçues, allant des solutions classiques GNV (pour Mercedes notamment) jusqu'à des solutions innovantes électriques à batterie ou à recharge par captation en terminus ou le long de la ligne. Deux d'entre elles proposaient la technologie hydrogène : celle de Safran (qui travaillait sur des bus 12 m uniquement à l'époque), et celle de Van Hool, avec des bus 18 m, adaptés au besoin de Pau, solution qui a été retenue. Plus précisément, c'est l'offre formulée en association par ENGIE GNVert (exploitant de la station hydrogène), ITM Power (fournisseur des équipements de production et distribution de l'hydrogène (avec LINDE) et Van Hool (constructeur des bus) qui a été retenue.

La solution hydrogène n'était donc pas la technologie ciblée en particulier, mais s'est avérée parfaitement adaptée aux besoins de ligne, et a été sélectionnée parmi des propositions GNV ou électriques à batterie, sans ajustements notables nécessaires au cahier des charges fixé.

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 ?

Le déploiement des bus hydrogène s'est déroulé comme pour le déploiement de toute nouvelle technologie alternative au diesel, que ce soit le GNV ou l'électrique à batterie, des besoins d'adaptations sont nécessaires.

Pour toutes ces alternatives, les principales contraintes à prendre en compte sont celles de l'adaptation des ateliers ainsi que la formation des personnels de maintenance et des conducteurs des véhicules, qu'il est nécessaire d'anticiper.

Pour les formations comme pour l'adaptation des ateliers, l'agglomération a pu s'appuyer sur l'ensemble des partenaires du projet, qui ont apporté leur soutien (voir questions 2.5 et 3.2).

Le bon déroulement du déploiement de Fébus tient en particulier à l'organisation préalable et à l'anticipation des partenaires quant à la mise en oeuvre de l'ensemble des composants du projet global (bus, station, atelier, formation des personnels de conduite et de maintenance). C'est l'ensemble des parties prenantes qui s'est impliqué et a su travailler en équipe. Ceci est vrai également pour les autres types de technologies considérées comme propres.

Avez-vous été confrontés à des questionnements par rapport à l'homologation, en France, des bus qui vous étaient proposés ? Dans l'affirmative, cela vous a-t-il conduit à écarter certains fournisseurs ?

À l'époque, il n'existait pas de bus articulé électrique à hydrogène homologué dans le monde. Van Hool a donc mené la procédure d'homologation, qui s'est déroulée comme pour tout autre véhicule neuf, indépendamment de la technologie adoptée, et sans difficulté technique posée par l'hydrogène.



Van Hool, le constructeur, est responsable de la demande d'homologation. Van Hool pour Fébus a déposé une demande d'homologation pour une production en petite série. Cette procédure est parfaitement maîtrisée par le constructeur, qui dispose d'un service dédié aux homologations. L'agglomération a également apporté tout le soutien nécessaire. Van Hool a mené les tests techniques sur deux prototypes en parallèle, afin d'être en mesure de conduire des tests différents en simultané sur deux des huit bus, cela permettant un gain de temps.

Comme pour toute procédure d'homologation, il est nécessaire d'anticiper les délais administratifs : la durée totale de l'homologation est d'environ deux ans. La principale difficulté est la rigueur administrative requise, et non la contrainte technique. En effet, une fois les tests techniques réalisés par le constructeur, il est nécessaire de faire valider ces éléments par plusieurs bureaux agréés en Europe.

Comment s'est déroulée la livraison des bus et de l'infrastructure associée ?

Livraison des bus

Aucun problème n'a été rencontré à la livraison, et les huit bus articulés ont pu être mis en opération rapidement, sans complication. Les bus ont été livrés progressivement entre septembre et décembre 2019, au terme de l'homologation et de la production des huit véhicules.

Livraison de l'infrastructure

L'ensemble des infrastructures (électrolyseur, station, parkings, ateliers) était prêt avant l'arrivée des véhicules. La station de distribution d'hydrogène a été pensée de manière analogue à une infrastructure GNV, en prévoyant une distribution à la place. Aucun problème n'a été rencontré durant les travaux.

L'anticipation des délais de construction a été facilitée par le type de contrat adopté, comprenant à la fois la livraison des véhicules et la livraison d'une plateforme aménagée en production et distribution de l'hydrogène.

Comment s'est déroulée la mise en service des bus et de l'infrastructure associée ?

Mise en service des bus

Aucune difficulté de mise en service des bus en lien avec la technologie hydrogène n'a été rencontrée.

Les principales inquiétudes liées à la mise en service des véhicules étaient les suivantes, et toutes ont pu être gérées et ont été compatibles avec l'utilisation des véhicules :

1. Une pente à 8-9 % sur la ligne, comprenant un arrêt dans la pente avec feu de signalisation : une inquiétude quant à la puissance requise pour la montée et le redémarrage en côté avait été notée.

2. Un pont dont la hauteur est limitée à 3,6 m (avec une hauteur des bus de 3,4 m), et d'une manière générale une inquiétude relative à la maniabilité du véhicule car la ligne présente de nombreuses girations : la maniabilité du véhicule avait été testée en Belgique, une inquiétude relative avait été notée.

3. En particulier, un demi-tour serré sur un rond-point lors de la modification du trajet dans le cadre du Grand Prix de Pau a nécessité un rognage des bordures. Mais cette modification aurait été nécessaire à la circulation de tout type de bus articulé.

Le véhicule s'est avéré très maniable, et aucune difficulté spécifique à la technologie hydrogène n'a été rencontrée.

Mise en service de l'infrastructure

Sur le plan de l'atelier de maintenance, seule à noter une légère difficulté relative à l'adaptation de l'équipement de levage du pont élévateur.

En conséquence de la hauteur importante du bus, due au placement des réservoirs de stockage de l'hydrogène sur le toit du véhicule, la position des points de levage a nécessité des adaptations. Le même problème aurait été rencontré avec un véhicule GNV. L'usage de l'H₂ a nécessité des études spécifiques complémentaires pour les systèmes de sécurité du bâtiment.

Depuis septembre 2021, la station de production et de distribution de l'hydrogène fonctionne parfaitement, grâce à la grande implication des partenaires durant une phase d'apprentissage de deux ans (voir détails question 3.1).

2.Retour d'expérience sur les véhicules

Comment qualifieriez-vous la fiabilité des bus ?
Rencontrent-ils des pannes?

Comment se déroule le service après-vente ?

Les bus électriques à hydrogène exploités à Pau présentent les mêmes taux de disponibilité (1) (supérieurs à 90 %) et de fiabilité (2) (de l'ordre de 75 %) que leurs équivalents Diesel. (supérieurs à 90 %) et de fiabilité (5) (de l'ordre de 75 %) que leurs équivalents Diesel.

“ Nous sommes vraiment satisfaits, c'est extrêmement fiable. ”

Le niveau de fiabilité des bus hydrogène est très satisfaisant, de l'ordre de 75 %, un taux équivalent à celui des véhicules Diesel en termes de volumes. Les pannes rencontrées ne sont pas directement liées à la technologie hydrogène, et la pile à combustible (PAC) Ballard présente une excellente fiabilité, de l'ordre de 98 %. Ce niveau de fiabilité de la PAC est rendu possible par le suivi du système par Ballard, qui assure des opérations préventives pour éviter toutes pannes.

Le seul incident noté sur un véhicule (en septembre 2021) provient d'une fuite détectée après la recharge du bus. La procédure de détection et de sécurisation du véhicule s'est déroulée normalement.

L'alarme s'est déclenchée, le bus a été vidé, les pompiers sont intervenus. Le véhicule a été placé sur une zone de sécurité dédié, le constructeur du réservoir Luxfer ainsi que Van Hool sont intervenus, les rapports requis ont été produits.

“ C'est le seul incident que nous avons eu, et il a été parfaitement géré. ”

La fuite a été causée par un mauvais montage d'un joint du système haute pression. Le joint a été remplacé. Tous les véhicules ont été contrôlés.

Des éléments complémentaires relatifs au déroulement du service après-vente sont décrits dans la question 2.5.

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

“ Il y a équivalence entre une journée d'exploitation avec un bus articulé à hydrogène et une journée d'exploitation avec un bus Diesel. Un point important, aucun impact climatique sur l'exploitation n'est à noter, malgré des journées particulièrement chaudes dans le sud-ouest de la France. ”

L'autonomie des véhicules assurée par le stockage de 37 kg d'hydrogène répartis dans cinq bouteilles disposées sur le toit du bus est largement suffisante pour assurer les trajets journaliers, de l'ordre de 290 km/jour, et en toute condition climatique. Il est prévu dans le protocole d'exploitation des bus d'anticiper le retour au dépôt pour recharge en cas de besoin, mais ce cas n'a jamais été rencontré.

“ Pour anecdote, la seule fois où un risque de manque d'autonomie a été détecté, il s'agissait d'un oubli lors de la réouverture manuelle des vannes des réservoirs suite à l'entretien annuel du bus : une des cinq vannes n'avait pas été réouverte. Le bus a circulé normalement sans que cela ne soit remarqué pendant un mois, ce qui signifie que l'autonomie était suffisante même avec quatre bouteilles disponibles sur cinq. ”

La recharge est comme mentionné plus haut une recharge à la place, et donc n'a pas spécifiquement vocation à être réalisée le plus rapidement possible. La recharge se fait de manière automatique, sans chauffeur, au dépôt. En quatre heures, les huit bus articulés peuvent être rechargés. L'agglomération n'a pas souhaité déployer de système de recharge rapide. Pour le modèle de Pau avec 8 bus en service, la durée de ravitaillement se fait la nuit et ce modèle à l'avantage de ne pas impacter les coûts d'exploitation de la ligne de bus (temps de conduite).

(1) Le niveau de disponibilité désigne le pourcentage du temps durant lequel les véhicules hydrogène sont disponibles par rapport à la durée totale d'exploitation requise sur le parc.

(2) Le niveau de fiabilité se mesure au nombre de pannes, y compris les arrêts de courte durée des véhicules, dus par exemple au déclenchement d'une alarme du système électronique (portes, rampe PMR, etc.).



La consommation des véhicules, initialement estimée par Van Hool entre 10 et 12 kgH₂/100 km, est en réalité en moyenne de 8,9 kgH₂/100 km.

Cette consommation est légèrement plus élevée en été en conséquence de l'utilisation du système de climatisation, mais ne dépasse jamais les 10 kgH₂/100 km. En comparaison, un véhicule Diesel équivalent consomme en moyenne 47 L/100 km. Cette consommation faible en hydrogène est favorisée par les performances du véhicule en lui-même ainsi que les caractéristiques de la ligne : les véhicules circulent avec une vitesse commerciale élevée, en moyenne 21 km/h, sur une ligne BHNS en site propre à plus de 85 % peu sujette aux embouteillages.

Ce système de recharge sera revu dans le cadre du déploiement de quatre bus supplémentaires. La vitesse de distribution pourra être de 2 kgH₂/min, ce qui est un maximum dans le cadre d'installations ne disposant pas d'un système de refroidissement sur la rampe de distribution.

En général, un véhicule n'arrivant pas complètement à vide, la recharge d'un véhicule nécessite au maximum la distribution de 20 kg d'hydrogène, ce qui prendrait donc 10 minutes.

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 bus ne rencontrent aucun problème de performance. Les conditions climatiques n'ont pas d'influence sur l'exploitation d'un bus hydrogène.



Même lors de journées très chaudes, la température n'a pas d'impact sur l'utilisation des bus.

Les quelques inquiétudes relevaient des infrastructures de la ligne qui ont été réalisées avant le choix définitif du véhicule. Les points critiques du parcours (arrêts en dénivelé (jusqu'à 9 % de pente), pont (hauteur limitée à 3m60), rond-point angle de giration n'ont pas été problématiques. Le bus fonctionne parfaitement dans toutes les conditions, et il n'a pas été nécessaire d'adapter les infrastructures routières. Ce qui démontre l'adaptabilité des bus hydrogène aux conditions d'exploitation habituelles des lignes de bus.

Quelle est la fiabilité des composants (durabilité des PAC, des réservoirs, etc.) ?

La fiabilité de la pile à combustible Ballard est excellente, de l'ordre de 98 %.

En dehors du problème de fuite mentionné à la question 2.1, aucun problème notable n'a été rencontré sur les réservoirs (réservoirs de type III). Un contrôle complet des systèmes haute pression et de stockage aura lieu à la fin de l'année 2022. Une normalisation est à venir (gérée par l'exploitant la SPL STAP). Comme pour les bus GNV, l'étude du vieillissement des réservoirs pour prévoir la normalisation (démarche CID) de leur gestion est nécessaire. Ces éléments sont pilotés par le groupe de travail réglementation de France Hydrogène.

Comment s'est déroulée la formation des personnels ?

La formation du personnel de maintenance est du même type (ATEX) que pour les bus électriques à batterie, et nécessite simplement un complément spécifique à l'utilisation de l'hydrogène. Un plan de formation à plusieurs niveaux a été validé avec l'exploitant des véhicules.

Une formation des conducteurs est également nécessaire, elle est identique à celle requise pour la conduite des véhicules électriques à batterie.



Comme les bus électriques à hydrogène et à batterie sont silencieux, il est nécessaire de former les conducteurs à la réaction de l'usager. Le chauffeur doit également adapter sa conduite à la motorisation électrique. Un bus électrique ne se conduit pas comme un bus thermique, en particulier à l'accélération et lors des freinages. Il est important de prévoir une formation en amont afin de donner au personnel un temps d'adaptation suffisant. Communiquer et préparer l'arrivée des futurs véhicules est un gage de réussite et d'acceptabilité. Par ailleurs, une mauvaise prise en main du véhicule peut avoir un impact financier important (surconsommation, accidentologie). Ceci doit s'accompagner de formations complémentaires gérées par l'exploitant lors de la première année d'exploitation (transmission d'expérience des conducteurs formés).

Les bus sont en contrat de « full maintenance » avec le constructeur Van Hool, qui opère par ailleurs un transfert de compétences vers les équipes locales au fur et à mesure des années d'exploitation. Les formations se déroulent en trois étapes :

- Formations initiales ;
- Rappels ;
- Perfectionnements.

Dans les deux premières années d'exploitation réelle au minimum (jusqu'à l'été 2022), un technicien spécialisé de Van Hool est présent sur site 24h/24 pour diriger les opérations de maintenance et faire le lien avec le SAV de Van Hool. Au-delà de ces deux années, le contrat impose la présence sur site du technicien de Van Hool tant que le niveau de disponibilité des véhicules n'a pas atteint 92 % et que l'ensemble des formations du personnel n'a pas été achevé.

En mars 2022, la disponibilité des véhicules était d'ores et déjà de 95 %. Le départ du technicien est prévu au mois d'octobre 2022 après la fin des formations. Après le départ du technicien, un niveau de disponibilité des véhicules trop faible entraînerait le cas échéant des pénalités. De plus, durant une période de 5 ans, les techniciens de Van Hool pourront être amenés à revenir sur site pour assurer des formations complémentaires.

A l'issue de ces 5 ans, les bus devront présenter une disponibilité de 95 %, et le personnel de la STAP se chargera de l'ensemble de la maintenance à l'exception de la chaîne cinématique (en dehors de la maintenance de la pile à combustible, assurée par Ballard, des systèmes de stockage/distribution H2 à haute pression, assurée par Luxfer, et du moteur, assurée par Siemens).

Comment a été accueilli le bus électrique à hydrogène du point de vue du personnel exploitant le véhicule (chauffeur, etc.) et des usagers ?

Les conducteurs comme les usagers palois sont particulièrement fiers et satisfaits du bus à hydrogène sur la ligne Fébus.

Les enquêtes usagers montrent un niveau de satisfaction de 88 % sur la ligne Fébus. A la question « Est-il plus efficient de prendre le Fébus (6) ou votre voiture ? », les usagers répondent même en majorité que prendre le bus et la voiture sont équivalents pour eux.

Aucun acte de vandalisme n'a été à déplorer sur cette ligne depuis deux ans. Le soin apporté au design du véhicule (intérieur cuir, etc.) y participe.



Les Palois sont fiers de leur bus.

Les conducteurs apprécient particulièrement cette technologie, et ont soutenu de leurs vœux la commande de bus supplémentaires, et quatre devraient être livrés en 2022.



Les chauffeurs sont ravis, ce sont eux qui ont demandé de racheter d'autres bus hydrogène.

3.Retour 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 ?

Avez-vous été confrontés à des détections de fuites d'hydrogène : à bord des bus, au dépôt, au centre de maintenance ?

Les bus de Pau sont alimentés par une station hydrogène exploitée par ENGIE GNVert, et fournie par ITM Power.



Depuis sa mise en service, et ce, grâce à son architecture globale de conception permettant une redondance des compresseurs, un point de recharge par bus, un stockage de gaz conséquent (3 jours) et un système de secours de l'électrolyseur (hydrogène via camion trailer), la disponibilité de la station s'élève aujourd'hui à 98 % en moyenne.

Cette station a connu, durant une période d'apprentissage de deux ans, plusieurs soucis techniques, au niveau de la production comme de la distribution, mais

depuis septembre 2021, la station de production et de distribution de l'hydrogène fonctionne parfaitement, grâce à la grande implication des partenaires.

La station permet d'avitailler les bus en continu (quasiment sans interruption de service), 7 jours sur 7, soit en moyenne 150 kgH₂/jour. Elle a produit, à la date de l'entretien, 46 tonnes d'hydrogène renouvelable.

Initialement, trois personnes employées à temps plein étaient en charge des interventions sur la station. Aujourd'hui, elles ne sont plus que deux, et seul un technicien ENGIE Solutions devrait rester sur place à partir de fin 2022 dans le cadre du contrat d'exploitation/ maintenance du site.

Spécifiquement pour l'atelier de maintenance, des études avec l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) en début de projet ont eu lieu afin d'établir une liste de recommandations permettant à l'exploitant des bus (la SPL STAP) de les décliner en procédures adaptées pour le personnel de maintenance.

L'équivalent Diesel tout inclus coûte 280.000 €HT. Hors options, un bus hydrogène standard coûte environ 600.000 €, contre 550.000 € pour un électrique à batterie.

Cet achat des bus ainsi que l'infrastructure de production et distribution de l'hydrogène ont été subventionnés par des financements locaux, nationaux et européens :

- La Région via le fond FEDER ;
- L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ;
- L'Europe et le Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) dans le cadre des projets européens JIVE et 3Emotion.

Des baisses significatives du prix d'achat des bus standards ne sont pas attendues pour les prochaines commandes.

Un objectif pour Pau sera d'assurer la durée de vie des bus la plus longue possible, de l'ordre de 16 ans si possible.

4.Aspect financier

Comment s'est déroulée la formation des personnels ?

Une formation du personnel pour la procédure de remplissage et un travail avec les pompiers (formés en interne) ont été nécessaires.

Les pompiers ne manifestent pas d'inquiétude particulière en ce qui concerne les dangers de la technologie hydrogène. En comparaison, la technologie électrique à batterie génère plus d'inquiétudes car elle comporte plus d'inconnues, les détails de la fabrication de la batterie n'étant pas toujours connus et pouvant impliquer des interventions variables.

Quel a été le prix d'achat des bus ?

Les prix d'achat des bus électriques à hydrogène sont les suivants :

- Bus articulés 18 m Van Hool déployés en 2019 : 1.177.000 €HT/bus ;
- Bus standards 12 m Van Hool commandés pour livraison prévue en 2022 : 658.000 €HT/bus.

Ces prix comprennent les équipements embarqués, les dispositions souhaitées par Pau (barres en inox, sièges en cuir, sol particulier, trois portes, etc.), la garantie, et la formation.

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

Une adaptation des ateliers de maintenance est nécessaire, au même titre que pour la technologie électrique à batterie, et GNV dans une moindre mesure.

Les surcoûts suivants sont observés par rapport au Diesel : Aménagement du dépôt et particulièrement de l'atelier de maintenance :

- Coûts des systèmes et des dispositifs de sécurité et d'extraction des fumées deux fois plus élevés ;
- Mise en oeuvre d'un sol antistatique ;
- Outillages et équipement agréés ATEX (coûts 2 fois plus élevés) ;
- Coûts supplémentaires pour la gestion des conformités ICPE ;
- Surcoût de 40 % en moyenne par rapport à un atelier classique.

En prenant en compte l'ensemble des travaux et démarche requis, le bâtiment revient environ deux fois plus cher que pour du Diesel, en l'occurrence 1,2 M€ en comptant les équipements ATEX. Certains surcoûts (dus à des adaptations demandées par les assureurs notamment) pourraient être réduits si la réglementation fixait des règles plus claires (travail en cours au sein de France Hydrogène).

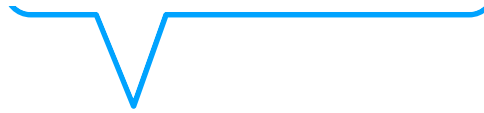
Quel est le coût de maintenance des bus ?
Autres coûts opérationnels fixes ?

Le contrat de « full maintenance » pour les bus articulés auprès de Van Hool revient à 0,72 €/km. Il comprend également la garantie, le déplacement des techniciens Van Hool, le service de Ballard pour la pile à combustible, le contrat de sous-traitance avec Siemens pour le moteur électrique. Les coûts réels de maintenance tout compris (main d'oeuvre et pièces détachées) s'élèvent en réalité à 0,60€/km⁽³⁾. En comparaison, la maintenance d'un bus Diesel revient à 0,26€/km.



Le facteur 3 entre l'hydrogène et le Diesel est grandement lié au préventif, et à la réglementation qui oblige des arrêts et pourrait être simplifiée.

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



Le CAPEX total de la station de production et distribution s'élève à 4,2 M€, auxquels s'ajoute un contrat de maintenance souscrit auprès d'ENGIE d'un montant de 300 000 €/an.

Le SMTUPPP a fait le choix de porter la totalité des investissements (y compris les études) afin d'accéder à davantage de subventions (qui sont généralement pour le propriétaire de la station).

En 2019, du fait du prix particulièrement attractif de l'électricité, de l'ordre de 45 €/MWh, le prix à la pompe de l'hydrogène était de l'ordre de 9 €/kgH₂, respectant ainsi la cible fixée par l'ADEME. Compte tenu de la crise énergétique engendrée par la guerre en Ukraine, le prix de l'électricité a considérablement augmenté, impactant le prix de l'hydrogène produit par électrolyse. Le prix de l'hydrogène à la pompe est aujourd'hui variable, de l'ordre de 13,6 à 14 €/kgH₂, en fonction du prix de l'électricité renouvelable.

Ces prix à la pompe élevés sont principalement reliés au prix d'achat de l'électricité, qui représente 70 % du coût total de production et distribution de l'hydrogène, et des dépenses de près de 1,5 M€/an en électricité pour l'agglomération. Si le prix de l'électricité était de l'ordre de 45 €/MWh au début du projet en 2019, il a triplé, et s'élève en juillet 2022 à environ 135 €/MWh.



Aujourd'hui le marché de l'énergie est complètement fou, avec les nouveaux tarifs proposés par ENGIE, nous avons également été surpris de constater cet été que le prix d'achat de l'électricité en heure creuse était devenu supérieur au prix d'achat en heure pleine.

L'électricité est aujourd'hui achetée directement par l'agglomération auprès des producteurs d'électricité hydraulique des barrages pyrénéens. Des négociations avec ENGIE sont en cours pour tendre vers une stabilisation du prix d'achat de l'électricité. Le contrat d'approvisionnement en électricité actuel est négocié sur une courte durée (1 an) car des options sont réfléchies en interne visant à des solutions en autoconsommation pour alimenter l'électrolyseur afin de mieux maîtriser le coût de l'énergie et de gagner en indépendance face à la fluctuation des marchés.

(3) Ce coût, calculé en moyenne sur une année de fonctionnement, est réparti également entre coût du personnel et coût des pièces détachées. La maintenance de la pile à combustible représente 20 % du coût de maintenance.



Quels sont les indicateurs économiques pris en compte dans les formules de révision du prix de l'H₂ distribué ? 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 10 derniers mois et a affecté négativement les OPEX carburant des opérateurs.

Avez-vous constaté des différences entre les coûts totaux de possession prévus et observés des bus ?

5. Bilan général

En dehors de l'augmentation considérable du prix d'achat de l'électricité du fait de la situation énergétique et géopolitique actuelle, en partie compensée par la consommation en hydrogène des véhicules 10 à 20 % inférieure aux estimations, les coûts observés sont alignés avec les prévisions.

Quelles ont été les bonnes et les mauvaises surprises ?

Le prix d'achat de l'électricité est le principal facteur susceptible de faire varier considérablement le prix de l'hydrogène à la pompe, puisque les frais de consommation en électricité représentent en ordre de grandeur 70 % du coût de production et distribution de l'hydrogène.

Les CAPEX ont été fixés au moment de la contractualisation, et les coûts réels observés de maintenance sont légèrement plus favorables que les prévisions (voir détails question 4.3).

Les coûts de possessions correspondent à nos estimations initiales hors impact de la crise énergétique récente.

Par ailleurs, les montages financiers ont été réfléchis en fonction des niveaux de subvention à récupérer.

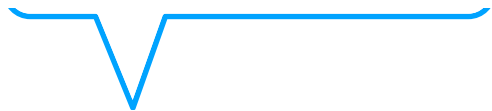
À titre de comparaison, les véhicules électriques à batterie restent aujourd'hui plus favorables en termes de prix du carburant. En revanche, pour un bus articulé 18 m consommant en moyenne 47 L/100 km de gazole en version Diesel et 8,9 kgH₂/100 km en hydrogène, la version hydrogène pourrait être compétitive rapidement. Pour un prix d'achat du gazole de 2 €/HT/L par exemple, il y aurait équivalence pour un prix de l'hydrogène à la pompe de 10,5 €/kgH₂, soit 1,5 € de plus que le prix de 9 €/kgH₂ visé par l'ADEME.

Si les principales inquiétudes portaient initialement sur les véhicules, les bus articulés du constructeur Van Hool fonctionnent parfaitement, et présentent des niveaux de disponibilité et de fiabilité comparables à ceux des équivalents Diesel Citaro (Mercedes) de la flotte.

Le bus de Van Hool est parfaitement adapté au besoin de l'agglomération, et a été le premier bus articulé de ce type à être homologué dans le monde. Il a remporté en 2019 deux prix internationaux à Busworld : le « Grand award bus 2019 » et le « Ecology label », pour ses performances techniques et environnementales. D'autres métropoles s'intéressent de près à ce véhicule, en France mais aussi par exemple en Australie, en Allemagne ou encore au Portugal.

Des difficultés ont été rencontrées sur le plan financier en lien avec l'augmentation du prix de l'électricité. Des difficultés ont également été rencontrées au démarrage de la station, et ont été traitées dans une période Covid qui ne simplifiait pas les choses, mais la grande réactivité des partenaires et leur implication forte malgré les dysfonctionnements initiaux permettent cependant aujourd'hui d'avoir une station parfaitement fonctionnelle, sur le plan de la production comme de la distribution.

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



Le développement en cours d'une réglementation adaptée et le déploiement généralisé d'infrastructures de distribution de l'hydrogène devraient considérablement faciliter le passage au bus électrique à hydrogène.

Le développement en cours d'une réglementation claire pour la mise à niveau des dépôts et des ateliers de maintenance devrait grandement faciliter les déploiements de bus hydrogène. Aujourd'hui, les zones d'incertitudes réglementaires sont contraignantes. D'une part, la SPL - STAP a dû procéder au recrutement d'un spécialiste hygiène sécurité et environnement (HSE), chargé du suivi particulièrement chronophage de la réglementation applicable au dépôt, des arrêtés de prescriptions légales et des demandes administratives. D'autre part, les assureurs peuvent effectuer des demandes supplémentaires non obligatoires sur le plan légal (alarmes additionnelles, distances de sécurité élevées, etc.), ce qui engendre des coûts imprévisibles et qui pourraient être évités s'il était possible de s'appuyer sur une réglementation précise.

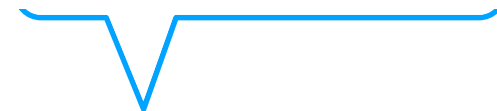
Par ailleurs, le développement des infrastructures de distribution de l'hydrogène à plus grande échelle devrait permettre aux collectivités et à leurs exploitants de réseaux de bus de se délester de la gestion des stations d'approvisionnement.

L'autonomie des bus hydrogène étant suffisante pour adapter les réapprovisionnements des véhicules selon les conditions d'exploitation des lignes. La solution de recharge à la place pour des flottes importantes est également une solution à réfléchir.

Par conséquent, la logique d'installation de l'infrastructure de recharge sur le dépôt doit être réfléchie et évaluée. Dans certains cas, elle peut ne pas être nécessairement pertinente, en particulier dans les grandes villes, il serait possible de prévoir un approvisionnement en dehors du dépôt si un maillage adapté de solution de recharge était développé.

6. Prochaines étapes

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



L'excellent fonctionnement des bus articulés hydrogène Van Hool, associé à une demande des conducteurs des véhicules, et à une subvention européenne (les 4 bus supplémentaires sont associés au projet JIVE2, et bénéficient d'une subvention d'environ 150 k€/bus) conduisent la ville à commander quatre bus hydrogène supplémentaires, toujours du constructeur Van Hool, en format 12 m cette fois-ci.

Les 4 bus standards ont été mis en service fin 2023.

