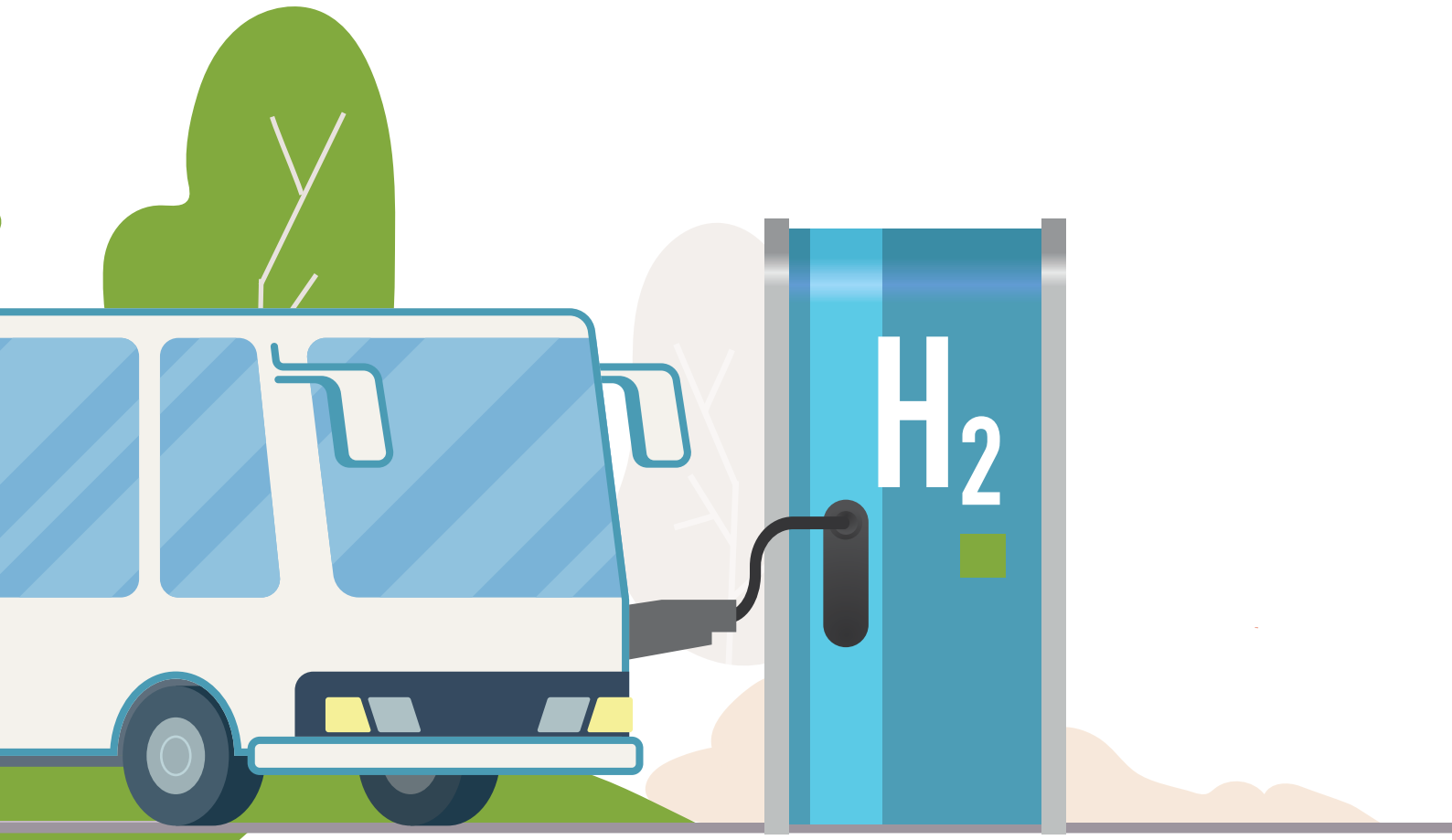
AFHYPAC

Association française
pour l'hydrogène et
les piles à combustible

Mobilité Hydrogène France

COMMENT DÉPLOYER DES BUS ÉLECTRIQUES À HYDROGÈNE EN FRANCE ?

Livre blanc



Document rédigé par Element Energy pour le groupe Mobilité Hydrogène France de l'AFHYPAC

Objet de ce document

Ce document a pour vocation d'informer des collectivités, exploitants de flottes de transport public, et Autorités Organisatrices de la Mobilité (AOM), souhaitant s'engager ou travaillant déjà sur la thématique du bus électrique à hydrogène. Il est structuré sous la forme d'une liste de questions-réponses organisées selon les grandes thématiques du sujet dans l'optique d'apporter des éléments d'informations aux différentes problématiques inhérentes à la réalisation d'un projet de déploiement de bus électrique à hydrogène.

Ce document a été rédigé par Element Energy pour et avec le support du groupe de travail dédié aux bus électriques à hydrogène, au sein du groupe Mobilité Hydrogène France, de l'AFHYPAC (Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible).

Ce document est basé sur des retours d'expérience de projets européens, et a bénéficié du support d'acteurs clés et de précurseurs de la filière hydrogène française, qui ont apporté leurs contributions et ainsi permis d'enrichir le document. Parmi ces acteurs clés :

- Deux des porteurs précurseurs de ce sujet en France, nommément le Syndicat mixte des transports urbains Pau Béarn Pyrénées Mobilités (PBPM) et le Syndicat Mixte des Transports Artois-Gohelle (SMTAG) qui ont été consultés sur les déploiements de bus électriques à hydrogène réalisés sur leurs territoires ;
- Un ensemble d'industriels clés du secteur : des constructeurs de bus électriques à hydrogène (SAFRA, Van Hool), des constructeurs et exploitants de stations de recharge en hydrogène (Engie GNVert, EDF Hynamics, Air Liquide, McPhy et ITM Power), la RATP ;
- Le Groupe de Travail Réglementation de l'AFHYPAC.

Date de rédaction : Septembre 2019
Dates de publication :
Interne AFHYPAC : décembre 2019
Publique : juin 2020

A propos de l'AFHYPAC

Réunissant plus de 170 membres, l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC) fédère les acteurs de la filière française de l'hydrogène structurés sur l'ensemble de la chaîne de valeur : des grands groupes industriels développant des projets d'envergure, des PME-PMI et start-ups innovantes soutenues par des laboratoires et centres de recherche d'excellence, des associations, pôles de compétitivités et des collectivités territoriales mobilisés pour le déploiement de solutions hydrogène.

Interlocuteur privilégié des Pouvoirs Publics, l'AFHYPAC agit pour :

- Partager et promouvoir les enjeux de la filière,
- Faire connaître les bénéfices et les caractéristiques des technologies,
- Faciliter la concertation sociétale autour des objectifs nationaux et des initiatives locales,
- Faire évoluer le cadre règlementaire pour accompagner le déploiement des technologies hydrogène en France.

Son ambition : accélérer le développement de solutions hydrogène pour réussir la transition énergétique, dynamiser l'économie et améliorer la qualité de vie de tous.

Site internet : **http://www.afhypac.org**

A propos du groupe Mobilité Hydrogène France de l'AFHYPAC

Le groupe Mobilité Hydrogène France de l'AFHYPAC rassemble les acteurs industriels de la mobilité hydrogène : des entreprises de l'énergie aux utilisateurs. Depuis 2017, le consortium se positionne sur le sujet des bus électriques à hydrogène afin d'aider au développement de cette solution pour les villes et flottes de véhicules en France.

Les membres de ce groupe de travail incluent des acteurs positionnés sur l'intégralité de la chaine de valeur, et impliqués sur les premiers projets de déploiements de bus électriques à hydrogène en France.



La concrétisation de l'objectif "1000 bus hydrogène" en France ambitionne de faire du pays le premier en Europe sur ces véhicules emblématiques

Fabio Ferrari
1er Vice-Président de l'AFHYPAC

"Ils avaient déjà la bonne idée de transporter plusieurs dizaines de personnes – et de participer ainsi naturellement à la lutte contre le réchauffement climatique et la pollution. En s'équipant d'un système hydrogène ils peuvent en plus, aujourd'hui, être "zéro-émission" sur des trajets à la fois longs et agrémentés de dénivelés… Plus que jamais les bus électriques à hydrogène méritent qu'un guide d'installation leur soit consacré.

Car si la technologie est éprouvée – des dizaines de véhicules circulent aujourd'hui en Europe et des centaines sont annoncées dans les prochaines années –, si leur développement est encouragé par les évolutions législatives et règlementaires, s'ils représentent une solution complémentaire aux bus électriques à batterie, les bus électriques à hydrogène soulèvent de nombreuses interrogations au sein des collectivités et syndicats en charge du sujet. Quelles sont les infrastructures nécessaires ? Les parcours les plus adaptés ? Quel dimensionnement de la flotte ? Quels sites privilégier ? Quels sont les coûts à envisager ? Etc.

Le présent document vise à répondre à toutes ces questions et à participer ainsi à la concrétisation de l'objectif "1000 bus hydrogène" en France. En ligne avec les ambitions environnementales locales et nationales, ce plan ambitionne de faire du pays le premier en Europe sur ces véhicules emblématiques. Surtout, son application pourrait accélérer le déploiement global de la mobilité électrique hydrogène en France. Un bus consomme en effet 30 fois plus qu'une voiture. Une multiplication par 1000 des volumes réduirait alors le coût de l'hydrogène… pour tous les autres véhicules ! Bonne lecture !"



Joseph Beretta
Président de l'Avere-France

"Aujourd'hui la qualité de vie dans nos villes ne cesse de se détériorer, nous assistons à une volonté des Français de voir s'améliorer la qualité de l'air et les nuisances sonores et ce sont les transports de biens et de personnes qui sont montrés du doigt. La France comme beaucoup de pays s'est engagée dans une transition énergétique destinée à promouvoir une "croissance verte", à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à renforcer son indépendance énergétique. Là encore, le transport routier est l'un des principaux contributeurs.

C'est dans ce contexte que les territoires et les municipalités envisagent de remplacer les bus à moteur thermique par des bus électriques. Deux technologies sont aujourd'hui en lice pour accomplir cette mutation, les bus électriques à batterie et les bus électriques à pile à hydrogène. Chaque technologie a ses particularités qu'il y a lieu de prendre en considération car ce n'est pas juste le remplacement du bus mais bien la mise en place d'un système complet qu'il faut envisager : véhicule, mais aussi station d'avitaillement, et utilisation d'une énergie décarbonée.

Ces décisions peuvent sembler risquées pour certains, mais aujourd'hui le risque n'est pas de s'engager mais plutôt de ne pas aller au bout de cette mutation. Pour cela les associations comme l'AFHYPAC et l'Avere-France mettent à disposition toutes les informations pertinentes pour faire un choix technologique et économique durable dans la mobilité électrique qu'elle soit à batterie ou à hydrogène. Je vous recommande la lecture de ce document qui permet d'éclairer décideurs et utilisateurs sur les bus à pile à hydrogène."

Le risque n'est pas de s'engager mais plutôt de ne pas aller au bout de cette mutation

Auteurs :

Elise Ravoire
Principal Consultant, Element Energy

Yannick Chane-Hune
Consultant, Element Energy

Révision :
Alex Stewart
Directeur, Element Energy

elementenergy

Note des auteurs :

Depuis une dizaine d'années, de nombreux projets de déploiements de bus électriques à hydrogène ont vu le jour en Europe et dans le monde, et cette technologie amorce aujourd'hui sa phase de transition depuis les projets de démonstration vers des projets de plus grande échelle et de commercialisation, avec une massification des commandes et la mise en exploitation de flottes de dimensions plus importantes.

Cependant, il est fondamental de noter que cette technologie correspond encore à un secteur qui évolue rapidement et un marché actuellement en pleine expansion. De plus, il est tout aussi important de noter que le marché français voit actuellement les premières mises en exploitation de bus électriques à hydrogène par des collectivités françaises, en 2019, c'est-à-dire à date d'écriture de ce document.

Par conséquent, bien que l'objectif des auteurs de ce document ait été de réaliser une synthèse la plus complète possible sur la base des éléments disponibles à date (en s'appuyant sur les retours d'expériences de projets européens, complétés par des entretiens approfondis avec des villes précurseurs / pionnières de ces déploiements français, et des industriels porteurs du secteur en France), on notera la réserve suivante : la multiplication actuelle des projets de déploiements de bus électriques à hydrogène en France s'accompagnera naturellement des premiers retours d'expérience opérationnels (spécifiques aux déploiements français), potentiellement d'une augmentation des niveaux de standardisation des solutions, d'évolutions réglementaires, etc. et l'ensemble de ces évolutions pourront conduire les analyses et recommandations formulées dans ce document à devoir être révisées à date ultérieure, notamment au niveau de l'exploitation (coût de maintenance, consommation, facilité de remplissage, sécurité) et de la standardisation (uniformisation des concepts et règlementations).

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 :

- Patrick Dilly, Directeur développement H2 Mobilité France, Air Liquide
- Pascal Laude, Directeur de la performance énergétique, EDF / Hynamics groupe EDF
- Timothée Audibert, Chef de Projet, Engie GNVert
- Virginie Hoang, Responsable Grands Comptes, Engie GNVert
- Lucas Bertrand, Business Development Director, ITM Power
- Pierre Lombard, Directeur commercial, McPhy
- Jean-Christophe Hoguet, Business Development Manager, Safra
- Sophie Masure, Chef de projet, SMTAG
- Pierre Souillart, Chargé de mission, SMTAG
- Lucie Kempf, Chef de projet, SMTU PPP
- Mélanie Pedeutour, Manager de Projet, SMTU PPP
- Geert Van Hecke, Head of Sales Public Transport, Van Hool
- Jérôme Salomon, Responsable Transport Public France, Van Hool
- Luc Wouters, Sales Engineer, Van Hool
- Le Groupe de Travail Réglementation de l'AFHYPAC, et en particulier Christelle Werquin, Déléguée Générale de l'AFHYPAC

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

- Stéphanie Paysant, Responsable Administration, Communication, Evènementiel, AFHYPAC
- Christelle Werquin, Déléguée Générale, AFHYPAC
- Patrick Dilly, Directeur Développement Mobilité H2 France, Air Liquide
- Sylvain Gérard, Business Development, Hydrogen for Mobility, Air Liquide
- Guy de Reals, Director for Strategy & Special Projects, Air Liquide
- Bérangère Preault, Responsable développement industrie, Engie Cofély
- Virginie Hoang, Responsable Grands Comptes, GNVert
- Lucas Bertrand, Director Business Development for France-Benelux-Iberia-Italy, ITM Power
- Nicolas Baduel, Ingénierie hydrogène et énergies renouvelables, Justy
- Amaury Vaussanvin, Responsable Pôle Ingénierie, Justy
- Mélanie Pédetour, Manager de projet, SMTU PPP
- Katja Camerier, Management Assistant – Sales Assistant – Pre-sales, Van Hool
- Geert Van Hecke, Head of Sales Public Transport, Van Hool

Enfin, un grand merci pour le suivi de l'ensemble de la réalisation de ce document à Valérie Bouillon-Delporte, Coordinatrice du Groupe Bus de Mobilité Hydrogène France, Vice-Présidente de l'AFHYPAC

Sommaire

1. Quels sont les caractéristiques des bus électriques à hydrogène et les retours d'expérience qui en font une technologie pertinente pour la croissance verte dans mon territoire ? 8
   - 1.1. Qu'est-ce qu'un bus électrique à hydrogène ? 8
   - 1.2. Est-ce une technologie éprouvée en Europe ? Quels sont les déploiements existants ? 9
   - 1.3. Et en France ? 12
   - 1.4. Comment se positionnent les bus électriques à hydrogène par rapport au projet environnemental de mon territoire ? Par rapport à la réglementation LTE pour le déploiement de véhicules basses émissions ? 14

2. Pourquoi déployer des bus électriques à hydrogène en France ? 15
   - 2.1. Quels sont les avantages d'un point de vue opérationnel ? 15
   - 2.2. Quels critères orientent le choix entre bus électriques à batterie ou des bus électriques à hydrogène ? 15
   - 2.3. Quels sont les avantages d'un point de vue environnemental ? 16

3. Comment définir un projet de déploiement de bus électriques à hydrogène ? 20
   - 3.1. Des bus électriques à hydrogène pour quels types d'usages ? 20
   - 3.2. Combien de bus électriques à hydrogène ? 20
   - 3.3. Quelle est l'offre sur le marché des bus électriques à hydrogène ? 22
   - 3.4. Quelles sont les caractéristiques d'usage à définir ? 25
   - 3.5. Quelles sont les réglementations applicables ? 28

4. Quelle infrastructure est nécessaire ? 30
   - 4.1. Quels sont les composants principaux de l'infrastructure de recharge en hydrogène ? 30
   - 4.2. Quelles options pour la production, la compression et le stockage d'hydrogène ? 32
   - 4.3. Quelle infrastructure, éventuellement, pour la livraison d'hydrogène ? 33
   - 4.4. Quelle infrastructure pour la distribution d'hydrogène ? 33
   - 4.5. Quels sont les éléments à considérer pour le choix du site ? 35
   - 4.6. Quelle est l'offre sur le marché des fournisseurs d'hydrogène et des fournisseurs et exploitants de stations ? 37
   - 4.7. Quid des dépôts et ateliers de maintenance ? 40
   - 4.8. Quelles sont les réglementations applicables à l'infrastructure ? 41

5. Quel budget pour un déploiement de bus électriques à hydrogène ? 44
   - 5.1. Quels sont les coûts d'investissement et coûts opérationnels des bus électriques à hydrogène ? Comment évolue l'offre ? 44
   - 5.2. Combien coûte l'infrastructure de distribution d'hydrogène ? Eventuellement l'infrastructure de production d'hydrogène ? Comment évolue l'offre ? 47
   - 5.3. Combien coûte l'infrastructure du dépôt et des ateliers de maintenance ? 48
   - 5.4. Quel est le coût total de possession ? 48
   - 5.5. Quid de la fiscalité ? 51
   - 5.6. Des aides pour financer le projet ? 51

6. Quel portage du projet ? 52
   - 6.1. Quelle(s) entité(s) porteuse(s) du projet ? 52
   - 6.2. Quels modèles de financement pour les différents postes de coûts ? 52

7. Les informations à connaitre pour l'acquisition des véhicules et de l'infrastructure associée 53
   - 7.1. Quels sont les éléments nécessaires au cahier des charges pour les véhicules, et ateliers de maintenance ? 53
   - 7.2. Quels sont les éléments nécessaires au cahier des charges, pour l'infrastructure ? 53
   - 7.3. Des options contractuelles différentes ? 54
   - 7.4. Quels types de procédure pour les appels d'offres ? 55
   - 7.5. Une offre via des centrales d'achat ? 56

Sommaire

8. Quel suivi pour le déroulement du projet ? 58
- 8.1. Pendant la construction / livraison / installation / mise en service ? 58
- 8.2. Focus sur les études détaillées : étude d'implantation, étude sécurité, etc. ? 60
- 8.3. Au long terme, pendant l'exploitation des véhicules et de l'infrastructure associée ? 61

9. Quelles sont les autorisations à obtenir ? 61
- 9.1. Quelles sont les autorisations à obtenir auprès de la DREAL ? 61
- 9.2. Est-il nécessaire de déposer un permis de construire ? 62

10. Qu'en est-il de la sécurité ? 62
- 10.1. Quels sont les risques liés à l'hydrogène ? 62
- 10.2. Comment est garantie la sécurité des véhicules ? 62
- 10.3. Comment est garantie la sécurité des infrastructures de recharge ? 62
- 10.4. Est-ce qu'il y a déjà eu des accidents et comment les éviter ? 63

11. Quels sont les besoins en termes de formation ? 63
- 11.1. Pour les conducteurs de bus ? 64
- 11.2. Pour le personnel en charge de la maintenance des véhicules ? 64
- 11.3. Pour le personnel en charge de la maintenance des infrastructures de recharge associées ? 64
- 11.4. Pour les usagers ? 64
- 11.5. Pour les services d'incendie et de secours (SDIS) ? 64



Liste des acronymes et des abréviations

3EMotion	Environmentally friendly, Efficient Electric Motion
AAP	Appel À Projets
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFHYPAC	Association Française pour l'Hydrogène et les Piles A Combustible
AMPG	Arrêté Ministériel de Prescriptions Générales
AOM	Autorité Organisatrice de la Mobilité
ATEX	Atmosphères Explosives
BHNS	Bus à Haut Niveau de Service
BOM	Benne à Ordures Ménagères
CATP	Centrale d'Achat du Transport Public
CEA	Commissariat à l'Energie atomique et aux énergies Alternatives
CEF	Connecting Europe Facility
CH_4	Méthane
CHIC	Clean Hydrogen in European Cities *(Hydrogène Propre dans les Villes Européennes)*
CNRV	Centre National de Réception des Véhicules
CO	Monoxyde de Carbone
CREM	Conception, Réalisation, Exploitation et Maintenance
CSPE	Contribution au Service Public de l'Electricité
CUTE	Clean Urban Transport for Europe *(Transports Urbains Propres pour l'Europe)*
DGEC	Direction Générale de l'Energie et du Climat
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DSP	Délégation de Service Public
DUER	Document Unique d'Evaluation des Risques
EPI	Equipement de Protection Individuelle
ERP	Etablissements Recevant du Public
FCH JU	Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking
FEDER	Fonds Européen de Développement Régional
FNCCR	Fédération Nationale des Collectivités Concédantes et Régies
GES	Gaz à Effets de Serre
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules
HAZOP	Hazard and Operability Studies *(analyse de risque et de sécurité de fonctionnement)*
HC	Hydrocarbures
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
IED	Industrial Emissions Directive *(Directive sur les Emissions Industrielles)*
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
JIVE	Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe *(Initiative Conjointe pour les Véhicules à hydrogène à travers l'Europe)*
LTECV	Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte
NO_x	Oxydes d'azote
PAC	Pile à Combustible
PEM	Proton-Exchange Membrane
RATP	Régie Autonome des Transports Parisiens
SDIS	Service Départemental d'Incendie et de Secours
SMT	Syndicat Mixte des Transports
SMTAG	Syndicat Mixte des Transports d'Artois-Gohelle
SMTU-PPP	Syndicat Mixte des Transport Urbains - Pau Porte des Pyrénées
SO_x	Oxydes de souffre
SPV	Special Purpose Vehicle
TICPE	Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques
TVA	Taxe sur la Valeur Ajoutée
UGAP	Union des Groupements d'Achats Publics
UTAC	Union Technique de l'Automobile du motocycle et du Cycle



Bus électrique à hydrogène à Bolzano en Italie [1]

1. Quels sont les caractéristiques des bus électriques à hydrogène et les retours d'expérience qui en font une technologie pertinente pour la croissance verte dans mon territoire ?

1.1 Qu'est-ce qu'un bus électrique à hydrogène ?

Un bus électrique à hydrogène est un bus électrique pour lequel l'énergie est produite directement à bord au sein d'une pile à combustible (PAC) qui combine le dihydrogène (ou appelé communément hydrogène, noté H2) stocké dans les réservoirs, avec l'oxygène de l'air, pour produire l'électricité qui alimente le moteur électrique, procédé qui ne rejette qu'un peu de vapeur d'eau. La pile à combustible est alimentée à l'aide d'hydrogène stocké sous forme de gaz comprimé dans des réservoirs semblables à ceux employés pour d'autres types de carburants gazeux. En complément de cela, le véhicule est doté d'une batterie de petite capacité intervenant typiquement sur des appels de puissance et par exemple pour récupérer l'énergie mécanique du freinage.

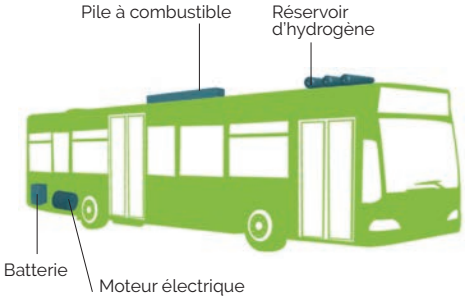
Un bus électrique à hydrogène est donc un bus électrique dont, contrairement à son équivalent à batterie, la majorité de l'énergie est stockée sous forme d'hydrogène plutôt que dans des batteries (ce qui confère au véhicule des avantages particuliers qui seront détaillés dans ce document).

Trois grandes catégories de véhicules hydrogène sont présentes sur le marché :

- Des véhicules à batterie avec un prolongateur d'autonomie hydrogène, qui sont conçus à partir des véhicules électriques à batterie classiques, mais avec un stockage d'hydrogène alimentant une pile à combustible, qui vient fournir un complément d'énergie et ainsi augmenter l'autonomie ;
- Des véhicules "mid power" dans lesquels une pile à combustible de puissance intermédiaire est présente en complément là aussi de batteries, mais avec une capacité plus importante et en général un rôle plus important dans le système ;
- Des véhicules dans lesquels la pile à combustible alimente directement le moteur électrique et où la batterie n'a qu'un rôle de soutien (sur des appels de puissance typiquement).

Par ailleurs, et cette précision a toute son importance, l'objet de ce document porte bien sur les autobus "électriques à hydrogène", avec pile à combustible alimentant un

SCHÉMA DE BUS ÉLECTRIQUE À HYDROGÈNE[2]



[1] *"Solaris wins 12 fuel cell buses in Bolzano. The first order for the Urbino hydrogen", Sustainable Bus*
[2] *"L'opportunité bus électrique à hydrogène", AFHYPAC, Mobilité Hydrogène France, Element Energy, 2018*

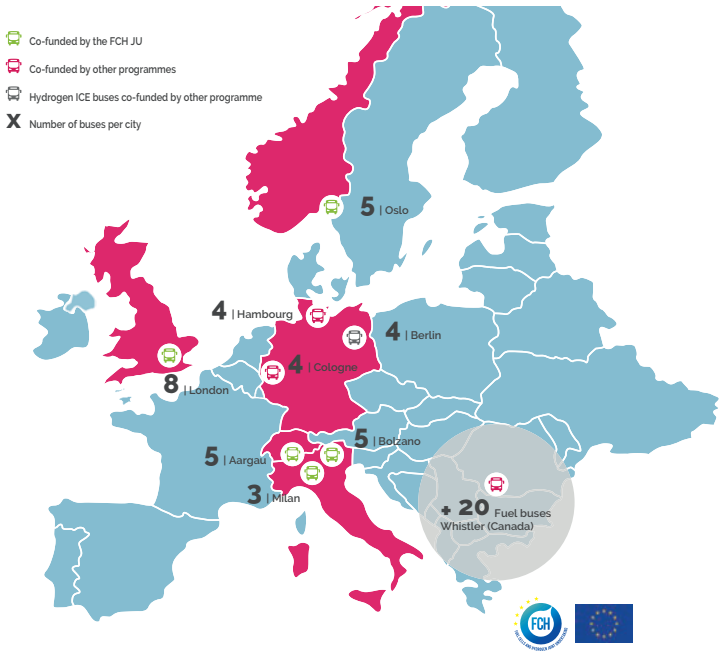
moteur électrique. A contrario, ce document ne traite pas de véhicules avec combustion d'hydrogène (ou d'un mélange d'hydrogène dans du gaz naturel par exemple) dans un moteur thermique. Dans des véhicules électriques avec pile à combustible, il n'y a pas de combustion, l'hydrogène est couplé à l'oxygène de l'air et introduit dans une pile à combustible qui produit de l'électricité alimentant un moteur électrique, d'où le terme de véhicule "électrique à hydrogène".

Les bus électriques à hydrogène présentent de multiples avantages opérationnels, et ils ont en particulier l'avantage d'avoir des temps de recharge courts, typiquement de l'ordre de 10 min (temps variable selon les cas). Cet avantage opérationnel les rend comparables aux solutions de carburants classiques (thermiques) sur les aspects opérationnels de recharge. De plus, les bus électriques à hydrogène présentent une autonomie dépassant 250, 300 ou 400km[3] selon les cas, ce qui permet une exploitation sans contrainte opérationnelle supplémentaire en termes d'autonomie pour l'exploitant des véhicules, avec un mode d'exploitation tout aussi flexible que pour les solutions thermiques (Diesel, GNV, etc.).

Par ailleurs, et c'est souvent là aussi le point de départ pour le choix de l'hydrogène, les véhicules à pile à combustible (c'est-à-dire les véhicules électriques à hydrogène) constituent une voie particulièrement pertinente d'un point de vue environnemental. Les bus électriques à hydrogène sont en effet une solution zéro-émission au point de fonctionnement, que ce soit en termes de gaz à effets de serre ou de polluants locaux (oxydes d'azote, particules, etc.). En ce sens, ils sont la seule solution zéro-émission avec des temps de recharge courts et des autonomies longues. En effet, les options Diesel et GNV par exemple, qui présentent des qualités opérationnelles similaires, sont toutes deux émettrices de CO2, ainsi que de particules polluantes pour le Diesel. On notera par ailleurs que la version bioGNV du GNV (biogaz) apporte d'importantes améliorations au bilan carbone total, mais en local (sur le lieu de son exploitation) a le même bilan en polluants locaux que le GNV. Enfin, les bus électriques à batterie, bien que zéro-émission aussi au point de fonctionnement, offrent des autonomies moins importantes et un bilan global qui dépend de la source d'énergie utilisée (ce deuxième point s'appliquant dans certains cas aussi à l'hydrogène, ce qui sera détaillé plus loin). Les bus électriques à hydrogène correspondent par conséquent à une solution particulièrement pertinente dans le contexte actuel de verdissement des flottes, prévu par la loi pour la transition énergétique et la croissance verte (ce point sera davantage détaillé dans la question 1.4).

1.2 Est-ce une technologie éprouvée en Europe ? Quels sont les déploiements existants ?

La technologie bus électrique à hydrogène se développe dans toute l'Europe depuis déjà plusieurs années et on observe actuellement une augmentation du nombre de déploiements, qui ne sont plus seulement des projets de démonstration (lesquels ont permis et permettent toutefois de tester et d'éprouver la technologie) mais aussi des déploiements de l'ordre de dizaines de bus par site / exploitant[4]. Ces résultats ont notamment été obtenus grâce à des projets européens tels que HyFLEET:CUTE et CHIC, et actuellement High V.LO-City, 3Emotion et JIVE (1 et 2), qui ont accompagné et accompagnent encore actuellement de nombreuses villes européennes dans le financement de leurs déploiements de la mobilité hydrogène et la mise en place de partages de retours d'expérience[5].

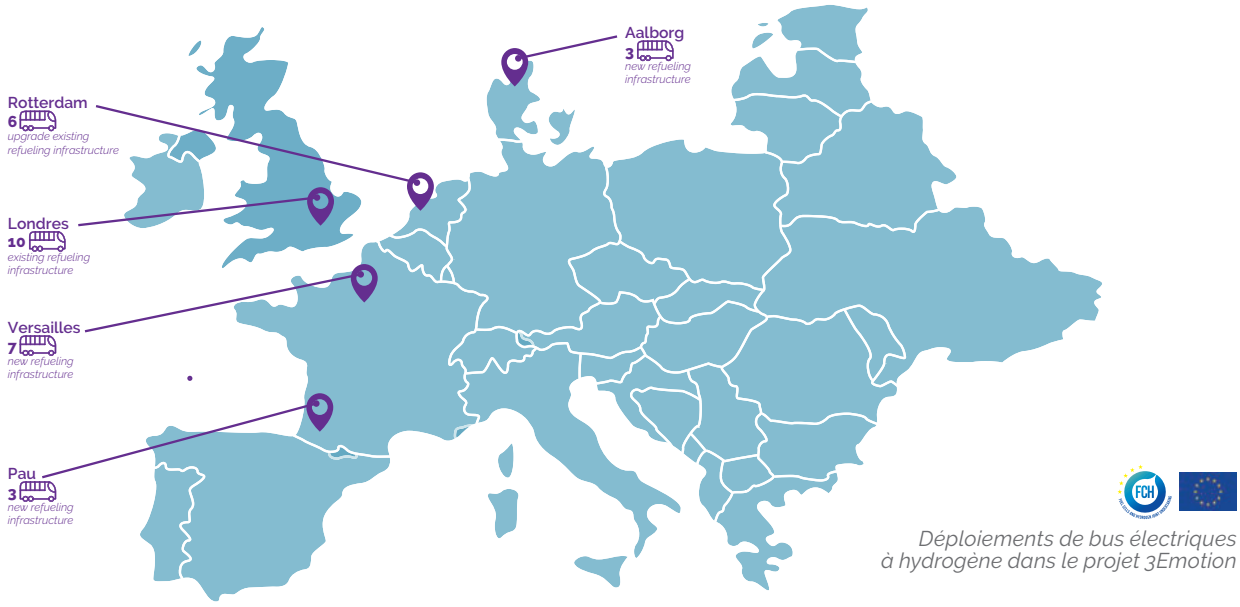


Déploiements de bus électriques à hydrogène dans le cadre du projet européen CHIC

Le projet CHIC (Clean Hydrogen in European Cities), entre 2010 et 2016, a été un des premiers grands projets de déploiement de bus électriques à hydrogène en Europe et a impliqué 8 villes européennes (et une ville canadienne) pour un total de 54 bus électriques à hydrogène[6] en exploitation. Avec l'aide de ses partenaires et financeurs, notamment l'organisme européen FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), ce projet a fait partie de ceux qui ont donc permis de mener à bien des projets de démonstration, qui ont ainsi ouvert la voie aux développements actuels et futurs.

---

[3] *"White Paper, Fuel Cell Electric Buses: Proven Performance and the Way Forward", Ballard, 2018*
[4] *"Strategies for joint procurement of fuel cell buses", FCHJU, 2018*
[5] *These projects have received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking under grant agreement No 256848 (CHIC), 278192 (High V.LO-City), 633174 (3Emotion), 735582 (JIVE), 779563 (JIVE2). This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, the Research Grouping (Hydrogen Europe Research) and the Industry Grouping (Hydrogen Europe).*
[6] *Final report, CHIC, 28 février 2017*



Déploiements de bus électriques à hydrogène dans le projet 3Emotion

Le projet High V.LO-City a été lancé en 2012 et comprend la mise en service de 14 bus de démonstration sur 4 villes européennes : Anvers, Aberdeen, Sanremo et Groningen. Les bus ont été mis à l'exploitation par des opérateurs renommés tels que De Lijn en Belgique, First Group en Ecosse, Riviera Trasporti à Sanremo et QBuzz à Groningen.

Le projet 3Emotion[7] (Environmentally friendly Efficient Electric Motion) a été lancé en 2015 et vise à accompagner d'ici 2022 5 villes européennes dans leurs déploiements de bus électriques à hydrogène. Ces villes sont celles de Londres, Rotterdam et Aalborg, et Pau et Versailles en France. Ce projet bénéficie également du soutien financier de l'Union Européenne à travers le FCH JU.

Aberdeen, UK
Akershus, NO
Auxerre, FR
Birmingham, UK
Bolzano, IT
Cologne, DE
Dundee, UK
Gatwick Airport, UK
Grosingen, NL
Herning, DK
London, UK
Pau, FR
Reykjavik, ISL
Rhein-Main, DE
Rotterdam, NL
South Holland, NL
Sweden, SE
Toulouse, FR
Wuppertal, DE

JIVE buses
JIVE 2 buses
MEHRLIN HRS*

** Hydrogen Refuelling Station*



Villes incluses dans les deux programmes JIVE[8]

Plus récemment, le projet JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe), financé à hauteur de 32 M€ par le FCH JU, vise le déploiement de près de 300 bus électriques à hydrogène dans une vingtaine de villes européennes d'ici fin 2023 en deux grandes phases. Les projets, JIVE 1 et JIVE 2, ont été lancés respectivement en 2017 et 2018.

Des échelles importantes de déploiements sont visées, afin (i)- de démontrer le niveau de maturité de la technologie, (ii)- d'opérer la transition vers une phase de commercialisation, (iii)- d'identifier des informations techniques et partager les retours d'expérience pour faciliter les déploiements futurs de flottes de bus électriques à hydrogène de dimensions conséquentes.

[7] *Projet 3Emotion*
[8] *Localisations des déploiements JIVE, JIVE 2, 11 juin 2019*

A titre d'exemples, une sélection de quelques projets phares de déploiements de bus électriques à hydrogène est présentée succinctement ci-dessous.

Exemple 1 : Déploiement de bus électriques à hydrogène à Bolzano (Italie)



- *Bus électriques à hydrogène déployés ou en cours de déploiement :*
  - *5 bus électriques à hydrogène dans un premier temps, déployés en 2014 (avec le soutien du programme européen CHIC financé par le FCH JU) ;*
  - *12 bus électriques à hydrogène dans un deuxième temps, commandés en 2019[9] (avec le soutien du programme européen JIVE financé par le FCH JU) ;*
- *Constructeurs des véhicules : 5 bus 12 m EvoBus (Daimler) et 12 bus 12 m Solaris ;*
- *Dates de mise en service des véhicules : 2014 et 2020 ;*
- *Sont notamment impliqués dans le projet : SASA ; EvoBus, Solaris à travers les programmes CHIC et JIVE soutenus par le FCH JU / Commission Européenne.*

Exemple 2 : Déploiement de bus électriques à hydrogène à Cologne (Allemagne)[10]



- *Bus électriques à hydrogène déployés ou en cours de déploiement :*
  - *4 bus électriques à hydrogène dans un premier temps, déployés en 2011 et 2014 (avec le soutien du programme européen CHIC financé par le FCH JU) ;*
  - *35 bus électriques à hydrogène dans un deuxième temps commandés en 2018 (avec le soutien du programme européen JIVE financé par le FCH JU) ;*
  - *15 bus électriques à hydrogène dans un troisième temps seront commandés (avec le soutien du programme européen JIVE2 financé par le FCH JU) ;*
- *Constructeurs des véhicules : 2 bus 18,5 m APTS Phileas, 2 bus 13,2 m Van Hool, puis 30 bus 12 m Van Hool ;*
- *Dates de mise en service des véhicules : 2011, 2014, 2019 (JIVE), 2020 (JIVE2) ;*
- *Sont notamment impliqués dans le projet : RVK ; HyCologne ; Van Hool ; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur à travers les programmes CHIC et JIVE soutenus par le FCH JU / Commission Européenne.*

Exemple 3 : Déploiement de bus électriques à hydrogène à Londres (Royaume-Uni)[11]



- *Bus électriques à hydrogène déployés ou en cours de déploiement :*
  - *8 bus électriques à hydrogène, en 2011 et 2013 (avec le soutien du programme européen CHIC financé par le FCH JU) ;*
  - *2 bus électriques à hydrogène déployés en 2015 (avec le soutien du programme européen 3Emotion financé par le FCH JU) ;*
  - *20 bus électriques à hydrogène ont été commandés dans un troisième temps en 2019[12] (avec le soutien du programme européen JIVE financé par le FCH JU) et seront mis en service en 2020 ;*
- *Constructeurs des véhicules : 8 bus 11,9 m Wrightbus, 2 bus 12 m Van Hool, 20 bus 12 m à deux étages Wrightbus ;*
- *Dates de mise en service des véhicules : 2011, 2013, 2020 ;*
- *Sont notamment impliqués dans le projet : Transport for London, WrightBus, Van Hool à travers les programmes CHIC et JIVE soutenus par le FCH JU / Commission Européenne.*

---

[9] *Sustainable bus*
[10] *Site du constructeur Van Hool*
[11] *"London to have world-first hydrogen-powered double-decker buses", article du Guardian*
[12] *Wrightbus hydrogen double decker buses to help tackle London's toxic air*

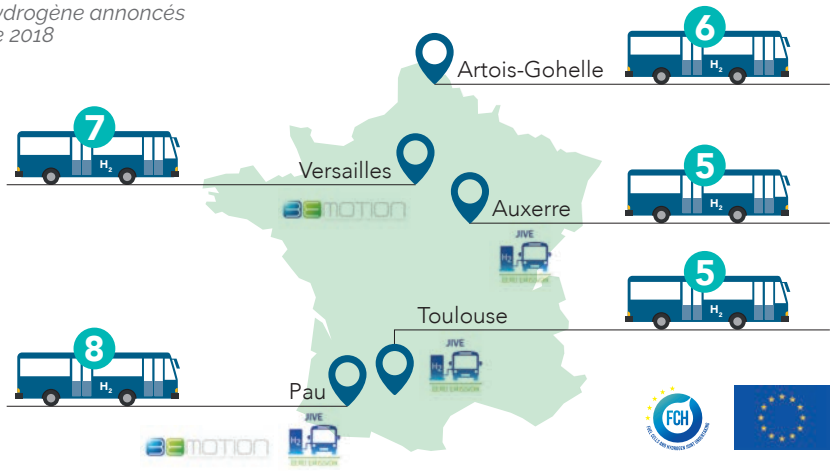
1.3. Et en France ?

Alors que des bus électriques à hydrogène sont déployés dans des villes européennes depuis plusieurs années, l'intérêt pour cette technologie a émergé en France plus récemment. Cependant, on observe aujourd'hui une augmentation rapide du nombre de villes / collectivités en France qui se positionnent sur cette technologie.

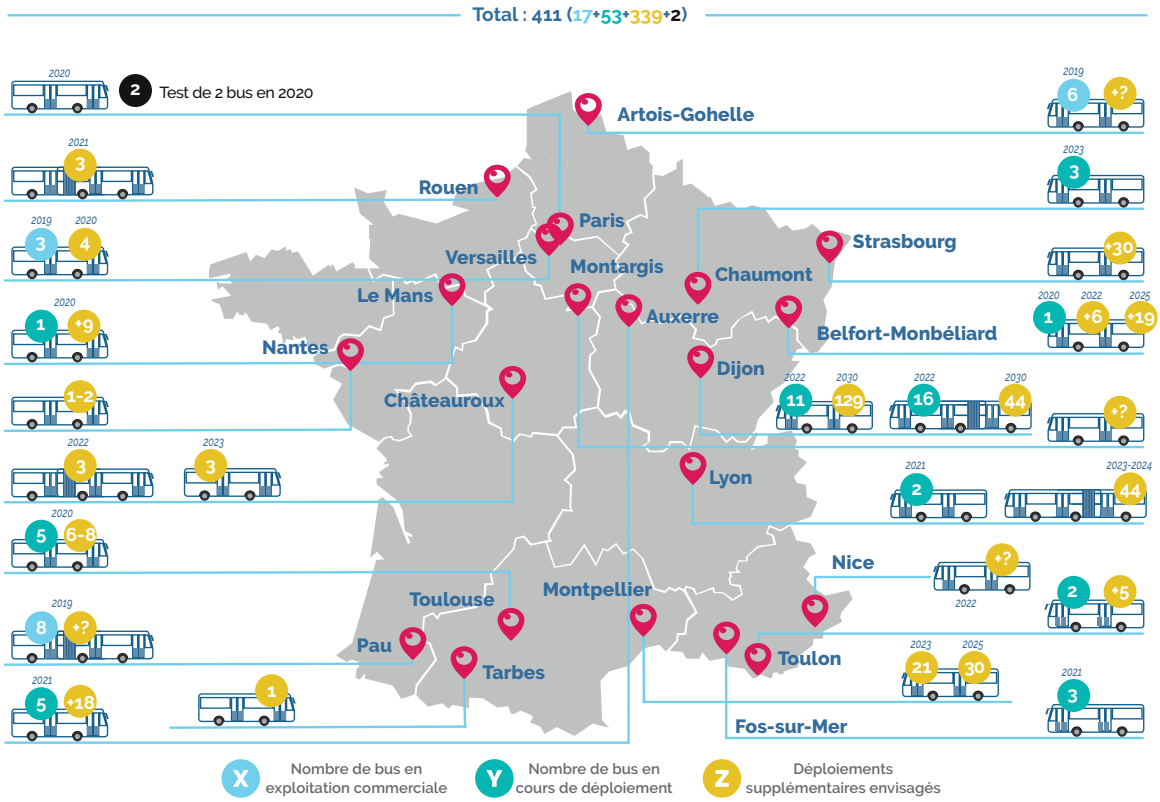
En 2015-2016, plusieurs villes françaises menaient déjà des réflexions dans cette direction ; en 2017 les premières annonces sont faites ; et fin 2018, on comptait 5 villes ayant annoncé publiquement des déploiements de bus électriques à hydrogène (pour un total de 31 bus). Mi-2019, on identifie une augmentation rapide du nombre d'annonces de la part de collectivités françaises faisant ce choix, pour atteindre plus de 15 villes et plus d'une centaine de bus électriques à hydrogène annoncés en septembre 2019.

Cette évolution rapide de la demande / l'intérêt pour des bus électriques à hydrogène en France est illustrée dans les cartes ci-dessous. Celles-ci montrent les projets ayant été annoncés publiquement, à fin 2018 et à la date de publication respectivement. On notera que ces cartes n'impliquent pas les projets de déploiements qui sont en cours de définition / discussions mais n'ont pas encore été annoncés. La demande réelle en cours de formation, en incluant ces autres projets, est donc en réalité supérieure à ce qui est présenté ci-dessous.

Projets de bus électriques à hydrogène annoncés en France à date de novembre 2018



Etat des lieux des projets de déploiement de bus hydrogène annoncés en France à date de publication



Parmi les villes qui se sont déjà positionnées publiquement, on compte Pau qui a été la première ville française à annoncer des déploiements de bus électriques à hydrogène, et qui a ensuite été rejointe entre autres par Rouen, Le Mans, Versailles, Paris, Toulouse, Auxerre, Lyon, Belfort, Chaumont, Toulon, Marseille, Lens-Béthune (Syndicat Mixte des Transports Artois-Gohelle), etc. Ces différentes annonces témoignent ainsi d'une demande grandissante et de volumes de déploiements importants attendus dans les années à venir. Les premiers bus électriques à hydrogène de France ont été inaugurés cette année, avec les premiers véhicules livrés en juin 2019 à Lens (Artois-Gohelle), puis en septembre 2019 à Pau et Versailles, et une première mise en service commercial à Versailles, le 9 septembre 2019.

La rédaction de ce document s'est donc naturellement appuyée sur les retours d'expérience de différents acteurs clés de ces projets de déploiement de bus électriques à hydrogène en France, et en particulier sur de nombreux échanges avec les porteurs de deux projets notamment, celui de Pau et celui de Lens-Béthune, au travers d'entretiens dédiés avec leurs porteurs de projet.

Exemple 1 : Déploiement de bus électriques à hydrogène à Lens-Béthune[13]



- *Bus électriques à hydrogène déployés ou en cours de déploiement :*
  - *6 bus électriques à hydrogène dans un premier temps, le premier a été inauguré le 21 juin 2019, avec une mise en service fin novembre 2019 ;*
  - *3 à 4 bus électriques à hydrogène supplémentaires sont envisagés dans le cadre de l'extension de la ligne Bulle 6 dédiée à l'hydrogène ;*
- *Les véhicules : 6 bus 12m Safra (constructeur français) ;*
- *Station de production et de recharge en hydrogène bas carbone : McPhy ;*
- *Date d'inauguration du 1er véhicule : 21 juin 2019 ;*
- *Sont notamment impliqués dans le projet : Engie ; McPhy, Safra, TADAO, le Syndicat Mixte des Transports Artois-Gohelle soutenu par la Région Hauts de France, le Fonds européen de développement régional (Feder) et le Ministère de la Transition écologique et solidaire.*

Exemple 2 : Déploiement de bus électriques à hydrogène à Pau[14]



- *Bus électriques à hydrogène déployés ou en cours de déploiement : 8 bus électriques à hydrogène qui seront déployés fin 2019, avec le soutien des programmes européens 3Emotion et JIVE financés par le FCH JU ;*
- *Les véhicules : 8 bus 18 m Van Hool*
- *Station de production et de recharge en hydrogène bas carbone : ENGIE, ITM Power ;*
- *Date de mise en service des véhicules : décembre 2019 ;*
- *Sont notamment impliqués dans le projet : la Communauté d'agglomération PAU Béarn Pyrénées, PAU Béarn Pyrénées Mobilités, IDELIS, ITM Power, Engie, Van Hool, dans le cadre des programmes 3Emotion et JIVE avec le soutien du FCH JU / Commission Européenne, la Région Nouvelle Aquitaine et l'ADEME.*

[13] *"Une ligne de bus à hydrogène 100% française lancée dans le Pas-de-Calais", article de Automobile Propre*
[14] *"Hydrogène : Fébus présenté à Pau", article du site Bus&Car*

1.4. Comment se positionnent les bus électriques à hydrogène par rapport au projet environnemental de mon territoire ? Par rapport à la réglementation LTE pour le déploiement de véhicules basses émissions ?

La loi pour la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) votée en 2015 a fixé des objectifs de réduction des émissions de GES de 40 % en 2030 par rapport à 1990, et de réduction de la consommation d'énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à 2012. Du fait de l'impact important du transport dans ces différents domaines, une des mesures phares portées par la LTECV concerne le développement de la mobilité propre dans les territoires. Elle fixe ainsi comme objectifs[15] que 50 % des renouvellements des autobus et autocars devront s'effectuer vers des modes de mobilité propre dès 2020, et 100 % à partir de 2025, selon les catégories de territoires décrites dans le schéma ci-dessous[16] :

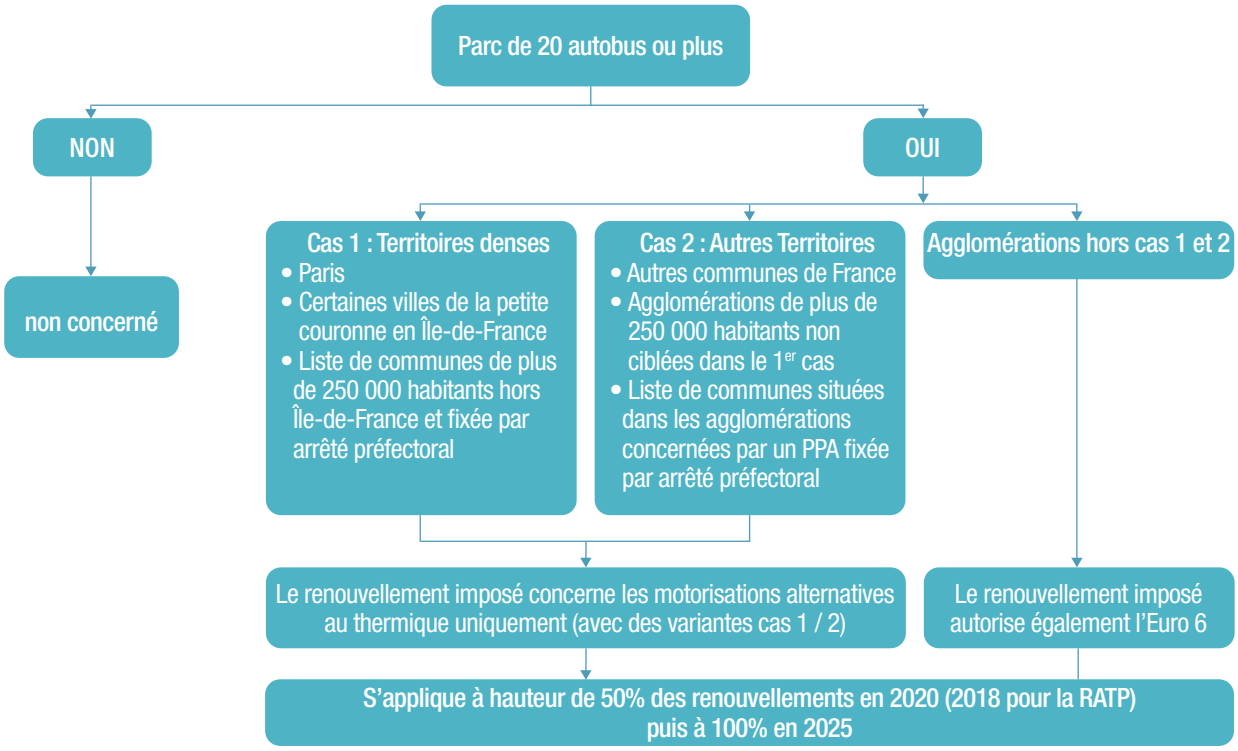


Diagramme de décision indiquant les territoires auxquels s'appliquent les taux de renouvellements fixés par la LTECV

Dans ce contexte, l'hydrogène répond à l'ensemble des attentes de la LTECV (quel que soit le type de territoire[17]). Par conséquent, la mobilité hydrogène est une solution de motorisation verte pour les collectivités et AOM souhaitant organiser la transition énergétique de leur territoire.

[15] *Projet de loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte*
[16] *"Financement du verdissement des flottes de matériel roulant", Caisse des dépôts, janvier 2019*
[17] *Définition du véhicule à faibles et très faibles émissions, Association nationale pour le développement de la mobilité électrique*

2. Pourquoi déployer des bus électriques à hydrogène en France ?

Les bus électriques à hydrogène sont avec les bus électriques à batterie une des deux options pour les collectivités et AOM qui souhaitent mettre en place une solution de mobilité zéro-émission.

2.1. Quels sont les avantages d'un point de vue opérationnel ?

La technologie des bus électriques à hydrogène présente de nombreux avantages en comparaison avec les autres carburants alternatifs au Diesel, mais aussi de façon complémentaire par rapport aux bus électriques à batterie (qui sont aussi zéro émission au point de fonctionnement). Cette section se concentre sur ses avantages opérationnels, et les avantages d'un point de vue environnemental seront traités dans la suite de ce document.

Les performances opérationnelles des bus électriques à hydrogène sont en tout point comparables aux bus ayant des motorisations basées sur des solutions fossiles (Diesel, gaz naturel, etc.) auxquels sont habitués les exploitants de flottes de bus, et ne génèrent donc pas de contraintes opérationnelles supplémentaires, tout en apportant les bénéfices d'une solution zéro émission. En effet :

- En termes d'autonomie, les bus électriques à hydrogène peuvent parcourir 200, 300, 400 km selon les cas et peuvent donc parcourir des itinéraires aussi longs que ceux desservis par des véhicules thermiques sans nécessiter d'infrastructure de recharge sur leurs parcours (borne de recharge ponctuelle ou recharge en ligne) ;

- De plus, bien que les bus électriques à hydrogène nécessitent des installations de stockage et de distribution de carburant (hydrogène) spécifiques (comme tout carburant), leur gestion opérationnelle ne sera pas impactée par rapport à celle d'une solution Diesel, avec des temps de recharge courts (de l'ordre de 10 minutes selon les cas pour recharger un bus) et des modes de distribution qui s'adaptent aux contraintes de l'opérateur (borne de recharge rapide en général, mais aussi alternative de recharge "à la place" développée pour le projet de Pau) ;

- Les bus électriques à hydrogène, comme tous véhicules électriques, apportent un confort et une qualité d'utilisation toute particulière pour les usagers et les conducteurs, et réduisent l'impact des bus sur leur environnement direct. En effet les véhicules électriques sont particulièrement silencieux (réduction de la pollution sonore), et les vibrations des véhicules sont extrêmement réduites par rapport à un véhicule thermique (amélioration significative du confort des utilisateurs).

En comparaison, les bus électriques à batterie nécessitent des temps de recharge importants, entre 6 et 8 heures en utilisation normale, et présentent une autonomie moins importante d'environ 150 km, jusqu'à 200km, mais avec des diminutions d'autonomie au cours de la vie des véhicules, ou en cas de dénivelé sur le parcours (et avec comme pour toute motorisation une surconsommation de l'ordre de 20-30 % pour les besoins en climatisation ou chauffage). Par conséquent, l'exploitation de bus électriques à batterie sur des itinéraires longs nécessite de réaliser des recharges intermédiaires en journée et/ou d'avoir davantage de véhicules à disposition (surdimensionnement de la flotte pour réaliser un service équivalent).

Dans un monde s'orientant de plus en plus fermement vers les solutions zéro émission (zéro émission de gaz à effets de serre, tout comme de gaz polluants et néfastes pour la qualité de l'air), les solutions électriques à batterie et électriques à hydrogène pourront donc être utilisées de façon complémentaire dans des réseaux de bus variés, car répondant à des cas d'usage différents, notamment : longue autonomie pour les bus électriques à hydrogène, autonomies plus courtes pour les bus électriques à batterie, et dans tous les cas des solutions zéro émission (ce point est traité plus en détail dans la question suivante).

2.2. Quels critères orientent le choix entre bus électriques à batterie ou des bus électriques à hydrogène ?

Les technologies électriques, à batterie ou à hydrogène, sont toutes deux des technologies zéro-émission en exploitation, et sont donc à considérer comme complémentaires plutôt qu'en concurrence, car selon les cas d'usage, il s'avère que l'une ou l'autre des options est la plus adaptée. Il est donc important pour les exploitants d'identifier la technologie répondant le mieux à leurs besoins opérationnels.

Dans les cas par exemple de courtes distances parcourues quotidiennement, de longues durées disponibles pour effectuer les recharges ou encore de possibilité de recharge par pantographe, alors l'utilisation de bus électriques à batterie est souvent un choix pertinent. Cela rend cette option zéro-émission tout à fait adaptée

à de multiples territoires, avec recharge sur le réseau électrique. Cela étant, selon les capacités disponibles au point du réseau électrique sur lequel le dépôt de bus sera connecté, un renforcement de la capacité de réseau pourra être nécessaire, impliquant un surcoût à prendre en compte. Par ailleurs, les infrastructures de recharges en ligne (type pantographe) induisent un investissement et des travaux significatifs.

Du fait notamment de ses performances sur de longues distances (pas de perte d'autonomie par rapport au Diesel), et de la facilité opérationnelle d'une recharge rapide, l'hydrogène est quant à lui préférable dans plusieurs cas :

Cas particulièrement pertinents pour le choix d'une solution électrique à hydrogène :

- Si les parcours impliquent de longues distances parcourues quotidiennement (typiquement plus de 200 voire 300 km) et donc un besoin en autonomie des véhicules élevé ;

- Si le climat local impose des besoins en climatisation qui augmentent les consommations énergétiques des véhicules jusqu'au point où les véhicules électriques à batterie ne pourraient plus répondre à la demande en autonomie ;

- Si le territoire présente des contraintes opérationnelles telles que des forts dénivelés ou encore des lignes très fréquentées (grande charge utile) qui peuvent là aussi causer une augmentation des consommations énergétiques et rendre les autonomies des véhicules électriques à batterie non adaptées ;

- Si l'exploitant a des contraintes sur les temps de recharge qui doivent être réduits à quelques minutes (moins de 15 min typiquement) ;

- Si un besoin en autonomie élevée des véhicules est combiné avec une impossibilité d'installer des points de recharge par pantographe le long du parcours (par exemple pour éviter de surcharger le paysage urbain) ;

- Si un besoin en autonomie élevée des véhicules est combiné avec une demande de flexibilité de l'allocation des véhicules sur une ligne de réseau de transport ou une autre : en effet dans le cas de l'électrique à batterie, en cas de besoin de recharge le long du parcours, les véhicules ne pourront pas être réalloués sur d'autres lignes du réseau facilement, ou peuvent rencontrer des difficultés d'accès aux stations de recharge en cas de déviations, etc. ;

- S'il y a des capacités de production d'énergies renouvelables (ENR) sur le territoire, qui peuvent donc être une opportunité pour produire de l'hydrogène renouvelable (dit "vert") en local par électrolyse de l'eau – ce point est développé plus avant dans la question suivante.

2.3. Quels sont les avantages d'un point de vue environnemental ?

Une solution zéro-émission au point de fonctionnement ?

Les bus électriques à hydrogène ne génèrent aucune émission pendant les phases d'exploitation. Ils ne sont à l'origine que d'un rejet léger d'eau sous forme de vapeur, d'où la qualification de bus zéro émission. Pour résumer :

- Ils ne rejettent pas de gaz à effet de serre, CO_2 en particulier, c'est-à-dire pas de gaz contribuant au réchauffement climatique ;

- Ils n'émettent pas de particules polluantes (SOx, Ozone, NOx, CO etc.), c'est-à-dire pas de pollution locale et nocive pour la santé ;

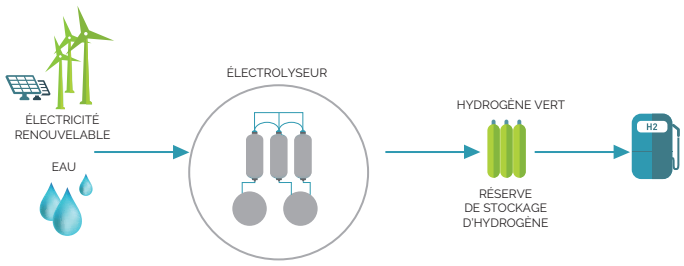
- Ils présentent bien entendu tous les avantages de confort d'un véhicule électrique : pas de vibration et pas de nuisance sonore.

Une stratégie d'écosystèmes incluant énergies renouvelables et solutions de stockage ?

Comme détaillé dans le Plan de Déploiement de l'hydrogène pour la Transition Energétique[18], publié par le Ministère de la transition écologique et solidaire en 2018 : "L'hydrogène peut […] être produit de façon décarbonée et économique grâce aux progrès de la technologie de l'électrolyse, à condition que l'électricité ayant servi à le produire soit elle-même décarbonée, et servir les objectifs que la France s'est fixée en matière de développement des énergies renouvelables, de réduction des émissions de gaz à effet de serre et des polluants."

En effet, le procédé dit d'électrolyse permet de produire de l'hydrogène à partir d'électricité : au sein d'un module appelé électrolyseur, des molécules d'eau (H_2O) sont séparées en deux composants par apport d'électricité, ces deux composants étant du dihydrogène (H_2) appelé couramment hydrogène, et de l'oxygène. Lorsque de l'hydrogène est produit par électrolyse, il n'y a donc aucune émission de pollution ou gaz à effet de serre au cours de l'opération. Si de plus l'apport en électricité est fait avec une source renouvelable (éolienne, solaire, hydraulique, etc.), alors l'hydrogène est dit "hydrogène renouvelable" (ou "hydrogène vert"). De même, si l'apport en électricité est fait avec de l'électricité bas carbone (c'est-à-dire produite sans émission de dioxyde de carbone CO_2), alors l'hydrogène est dit "hydrogène bas carbone".

[18] *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, CEA et DGEC, 2018*



Chaine de production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir de sources de production d'électricité renouvelables (solaire, éolien, etc.)

L'illustration ci-dessus présente donc schématiquement la mise en place d'un cycle extrêmement vertueux : production d'électricité renouvelable, alimentation d'électrolyseur pour la production d'hydrogène (procédé d'électrolyse), hydrogène qui est ensuite utilisé comme énergie pour des véhicules électriques à hydrogène, qui sont des véhicules zéro émission.

Ainsi, de nombreux territoires envisagent des projets de mobilité hydrogène en lien avec le développement des énergies renouvelables sur le territoire. D'autres alimentent leur production d'hydrogène par électrolyse en utilisant l'électricité du réseau électrique français avec contrat incluant des garanties d'origine renouvelable. La ville de Pau qui a déjà fait le choix de produire l'hydrogène par électrolyse, vise à terme de couvrir les besoins en électricité de sa station grâce à l'installation de panneaux photovoltaïques sur son dépôt. Ces projets sont emblématiques d'écosystèmes complets et vertueux centrés sur les énergies renouvelables et la mobilité durable.

Enfin, convertir les énergies renouvelables en hydrogène est aussi une solution permettant d'optimiser et favoriser leur développement. En effet, les sources d'énergies comme le vent ou le soleil sont par nature des énergies intermittentes, c'est-à-dire qu'elles ne produisent pas en continu et sont dépendantes respectivement des conditions de vent et d'ensoleillement à un instant donné (typiquement pas de production solaire pendant la nuit). Par conséquent, les énergies renouvelables intermittentes peuvent poser des problématiques d'intégration sur les réseaux électriques et d'équilibre entre la production et la demande d'énergie : la demande en électricité (pour les secteurs industriels, commerciaux, résidentiels, etc.) n'est pas alignée dans le temps avec la production en électricité des éoliennes et panneaux solaires. Se pose par conséquent la question fondamentale du stockage de l'électricité produite par ces sources intermittentes : comment stocker l'énergie lorsqu'elle est produite et l'utiliser selon les profils journaliers et saisonniers de demande de la part des consommateurs ? Dans ce cadre, l'hydrogène apporte une solution, là aussi en complément des solutions batterie par exemple. En effet, l'hydrogène est un vecteur énergétique facilement stockable, sous forme gazeuse ou liquide, et ce pendant des jours, semaines ou mois. L'électricité peut donc être transformée en hydrogène par électrolyse, et être stockée sous cette forme, aussi longtemps que nécessaire. En conclusion, comme présenté dans le Plan de Déploiement de l'hydrogène pour la Transition Energétique[19], publié par le gouvernement en 2018 : "l'hydrogène produit par électrolyse est à long terme une solution structurante pour l'intégration des énergies renouvelables au système électrique : il est actuellement le moyen de stockage massif inter saisonnier des énergies renouvelables électriques intermittentes le plus prometteur".

Des options différentes pour la production de l'hydrogène et par conséquent des impacts environnementaux variables ?

De tous les éléments chimiques, l'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant dans l'univers. L'hydrogène n'est pas une source d'énergie mais un "vecteur énergétique" : il doit être produit puis stocké avant d'être utilisé. Sur Terre, il est rarement présent à l'état pur dans la nature, mais il entre notamment dans la composition de l'eau et des hydrocarbures. Pour produire de l'hydrogène, de nombreux procédés différents existent et par conséquent, en fonction des modes de production de l'hydrogène, l'impact environnemental (émissions équivalentes de dioxyde de carbone ou CO_2) va varier et certains procédés vont s'avérer plus émetteurs de CO_2 que d'autres.

Historiquement et encore actuellement (et bien avant que l'hydrogène pour la mobilité ne commence à se développer), l'hydrogène a été et est utilisé en majorité pour l'industrie : 900 000 tonnes d'hydrogène utilisées par an pour l'industrie française par exemple, pour les procédés de l'industrie pétrolière, la synthèse d'ammoniac (pour les engrais), et dans l'industrie chimique. Le mode de production majoritaire de cet hydrogène, là encore historiquement mais aujourd'hui encore, est le vaporeformage du gaz naturel, qui consiste à transformer les charges légères d'hydrocarbures en gaz de synthèse (mélange H_2, CO, CO_2, CH_4 et H_2O) par réaction avec la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel[20]. La réaction généralement en jeu est $CH_4 + 2\ H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$. Elle donne lieu à des émissions de GES dans l'atmosphère de l'ordre de 11 à 12 kg de CO_2 par kilogramme d'hydrogène en prenant en compte l'ensemble de la chaine de production et les performances des installations[21]. Cependant, afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (CO_2), des procédés se développent, comme la captation du dioxyde de carbone rejeté (ou CCS, pour Carbon Capture and Storage), ou le vaporeformage de biogaz, mais ne sont pas encore généralisés.

Par ailleurs, d'autres procédés de production de l'hydrogène de façon décarbonée ou renouvelable sont

[19] *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, CEA et DGEC, 2018*
[20] *"Production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles", AFHYPAC, 2014*
[21] *Émissions de la production d'hydrogène, "Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies", MDPI, 2018*

de plus en plus utilisés. En particulier, la production par électrolyse de l'eau, évoquée plus haut dans ce document, connait aujourd'hui un développement conséquent en France et dans le monde, car permettant de produire de l'hydrogène à partir d'électricité, qui peut être renouvelable ou bas carbone, d'où une production d'hydrogène renouvelable ou bas carbone.

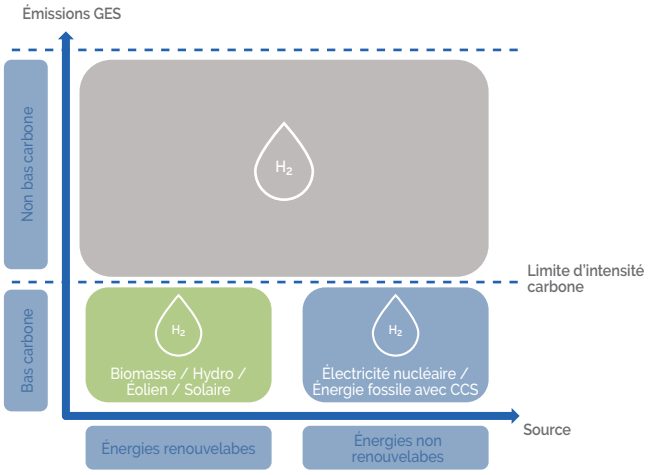
Par ailleurs on notera aussi un fort intérêt pour :
- Le vaporeformage de biogaz ;
- La pyrogazéification de biomasse ;
- La valorisation d'hydrogène coproduit, associée à un procédé industriel (comme par exemple les électrolyses chlore/soude ou les procédés de déshydrogénation) ;
- Un cas particulier de production par électrolyse : des projets de production d'hydrogène en lien avec les usines de valorisation des déchets. En effet, celles-ci peuvent permettre d'avoir accès à un coût d'électricité compétitif, et permettent la mise en place d'une boucle riche de sens à l'échelle locale : collecte des déchets par des bennes à ordures ménagères, qui sont acheminés jusqu'à une usine d'incinération, dont l'électricité en sortie est utilisée pour alimenter un électrolyseur pour la production d'hydrogène, qui en tant que carburant permet d'alimenter des véhicules électriques à hydrogène, par exemple des bennes à ordures ménagères ou des bus. On remarquera par ailleurs et de façon générale la pertinence d'associer dans les plans énergétiques d'un territoire les développements conjoints des bennes à ordures ménagères et des bus.

De façon générale, il est aujourd'hui de plus en plus reconnu (y compris au niveau des plus hautes instances nationales, européennes et internationales) que l'hydrogène présente un potentiel extrêmement fort pour la transition énergétique en général. Par conséquent il est à présent partagé par l'ensemble des acteurs clés de ce secteur qu'il sera nécessaire d'opérer une transition rapide vers un hydrogène de plus en plus décarboné et/ou renouvelable. En ce sens, et afin d'accélérer la mise en place d'une filière hydrogène performante et durable, le "Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique[22]", propose une vision claire du lien entre mobilité hydrogène et production d'hydrogène par électrolyse : "Si le développement de la production d'hydrogène par électrolyse répond parfaitement aux nouvelles attentes des territoires, il favorise aussi l'émergence d'écosystèmes hydrogène locaux – c'est-à-dire la combinaison d'un plan de déploiement de la mobilité conçu avec une optique d'aménagement du territoire, d'un recours aux énergies renouvelables produites localement et d'un système financier pour couvrir les risques de commercialisation."

Par ailleurs, pour l'industrie, ce plan stratégique au niveau national vise à atteindre une production de 10 % d'hydrogène décarboné dès 2023 (contre moins de 1 % en 2015[23]) et entre 20 % et 40 % dès 2028. De façon similaire, et pour revenir au cas précis de déploiements de bus électriques à hydrogène, les fournisseurs et exploitants de stations hydrogène peuvent décrire de façon précise la provenance de l'hydrogène fourni à une station, et s'engager sur la nature des formes de production de cet hydrogène.

Enfin, afin de caractériser de façon standardisée les attributs de l'hydrogène produit, un certain nombre d'initiatives et discussions sont actuellement en cours. La Loi Energie-Climat prévoit ainsi dans son article 52 un cadre juridique pour l'hydrogène. Par ordonnance, le gouvernement est amené à définir la terminologie des différents types d'hydrogène en fonction de la source d'énergie utilisée pour sa production. Un décret du Conseil d'Etat définira également un dispositif de garanties d'origine, notamment pour l'hydrogène renouvelable.

Au niveau européen, le projet CertifHy[24] réunit des acteurs clés du secteur (dont des acteurs industriels français) dans le but de développer une définition commune et à l'échelle européenne du concept d'hydrogène vert, et de développer une plateforme de garanties d'origine s'appliquant à toute forme de production d'hydrogène et pouvant être déployé dans toute l'Europe, ainsi qu'une feuille de route pour sa mise en œuvre.

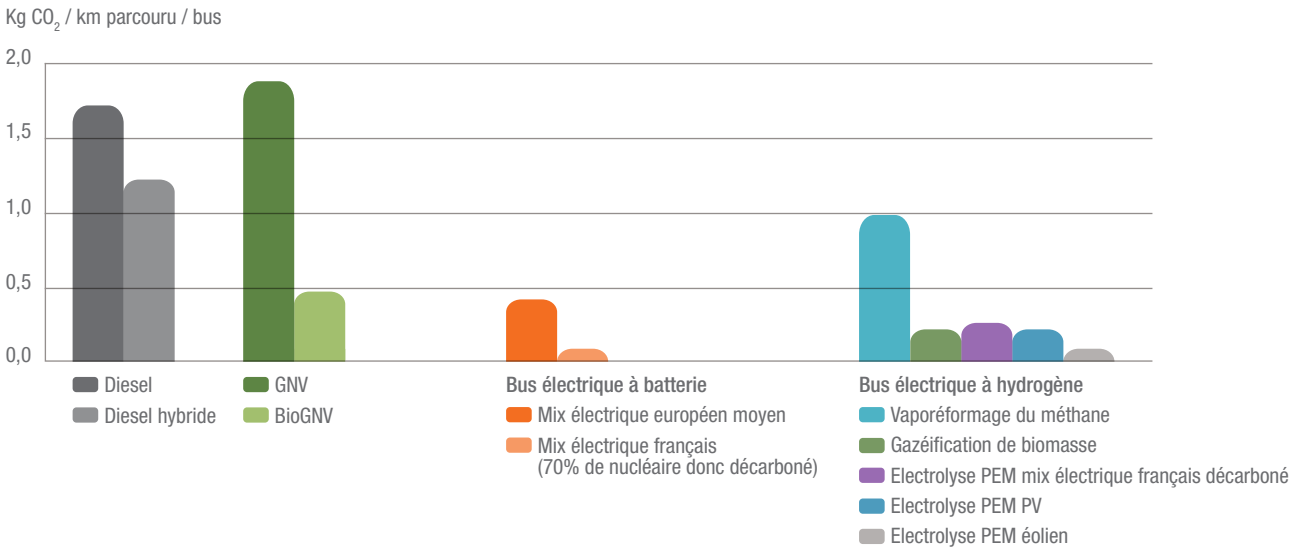


Classification de l'hydrogène par modes de production développée dans le cadre du projet CertifHy[25]

[22] *"Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique", Ministère de la transition écologique et solidaire, 2018*
[23] *Rapport sur la filière Hydrogène-énergie, remis au Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie et au ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique, septembre 2015*
[24] *Site internet du projet CertifHy*
[25] *Webinar Certifhy, 12 juin 2018*

Quel impact du mode de production de l'hydrogène sur le bilan environnemental des bus électriques à hydrogène ?

Comme évoqué dans la partie précédente, la quantité d'émissions de dioxyde de carbone lors de la production d'hydrogène dépend directement du procédé utilisé. Par conséquent, bien que les bus électriques à hydrogène soient zéro émission au point de fonctionnement (c'est-à-dire en exploitation), une analyse plus globale des émissions de dioxyde de carbone doit prendre en compte les émissions de CO2 pour la production du carburant hydrogène. Dans le cadre de la rédaction de ce document, une analyse comparative a été réalisée, et les valeurs moyennées des émissions de dioxyde de carbone rapportées au kilomètre parcouru par bus sont présentées dans le graphique ci-dessous, pour différentes motorisations, et quelques cas représentatifs de procédés de production de l'hydrogène.



Comparaison des émissions de différentes technologies de bus en fonction des modes de production de l'énergie (kgCO2 / km)[26]

Comme illustré dans ce graphique, l'impact carbone des bus électriques à hydrogène est très nettement inférieur aux solutions Diesel et gaz, et même dans le cas où l'hydrogène est produit par vaporeformage de gaz naturel (45 % d'émissions en moins par rapport au cas Diesel classique). On notera de plus que la comparaison est faite par rapport aux derniers modèles les plus performants de bus Diesel, c'est-à-dire ceux qui sont en vente actuellement et qui sont plus performants en termes d'émissions que des modèles plus anciens. En effet, il est logique de comparer les technologies sur la base des modèles actuellement sur le marché, même si des modèles de bus Diesel plus anciens sont encore très présents dans les flottes d'autobus puisque la durée de vie moyenne d'un bus est de 15 ans. Par conséquent, si la comparaison était faite avec ces véhicules plus anciens, il est évident que les estimations de réductions des émissions seraient encore plus favorables aux bus électriques (à batterie comme à hydrogène) que celles présentées ici. Lorsqu'un bus Diesel ancien est remplacé par un bus électrique, l'amélioration de l'impact environnemental est donc encore plus importante que celle présentée dans cette analyse.

Dans le cas d'une production d'hydrogène par électrolyse, des émissions particulièrement basses pour la production de l'hydrogène peuvent être atteintes y compris en connexion au réseau électrique français. Ceci est dû au fait que l'électricité est très "décarbonée" en France, puisque le mix électrique français est porté par une majorité de production nucléaire (environ 70 % du mix électrique actuel en France). On a donc en France une empreinte carbone faible d'environ 70 gCO2 / kWh produit (RTE, 2018[27]), en comparaison avec une moyenne de 296 gCO2 / kWh produit à l'échelle européenne (European Environment Agency, 2016[28]). Cela explique aussi le faible bilan carbone des bus électriques à batterie alimentés par le mix électrique français : ceux-ci sont en majeure partie rechargés par une électricité nucléaire, qui n'est donc pas une électricité renouvelable mais qui limite drastiquement les émissions de CO2.

Enfin, lorsque la production de l'hydrogène par électrolyse est associée à une production d'électricité renouvelable, alors le bilan environnemental est encore amélioré, à hauteur de 88 % de réduction des émissions de CO2 par rapport au Diesel en supposant une électrolyse alimentée par une énergie photovoltaïque, et 95 % pour une énergie éolienne. On notera ici qu'il est possible d'alimenter un électrolyseur par de l'électricité renouvelable même en l'absence de champs solaire ou éolien (par exemple) à

[26] *Les émissions de CO2 (en kgCO2/km) sont les émissions amont et combustion. Pour le Diesel, le Diesel hybride, le GNV et le bioGNV, les valeurs sont basées sur la base de données ADEME (reprise dans la rapport ADEME "Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbain", 2018*
[27] *Émissions de la production d'électricité en France, RTE France, valeurs moyennes de l'année 2018*
[28] *"Overview of electricity production and use in Europe", 2018*

proximité, en souscrivant à un contrat d'électricité avec certificats d'origine renouvelable.

Ainsi du point de vue des gaz à effet de serre, l'hydrogène est une alternative vertueuse par rapport aux modes de motorisation classiques, qui si alliée à une production d'énergies renouvelables peut présenter un bilan environnemental encore plus intéressant pour les territoires.

Enfin, comme déjà évoqué plus haut dans ce document, au-delà des gaz à effet de serre, les bus électriques à hydrogène présentent aussi l'avantage primordial de ne générer aucune émission de polluants locaux (oxydes d'azote, PM…). Ce point prend tout son sens dans les stratégies environnementales d'amélioration de la qualité de l'air, en connaissance des impacts néfastes de la pollution locale en termes de santé publique. En effet, pour rappel, le coût total de la pollution de l'air est estimé entre 68 et 97 milliards d'euros par an pour la France[29], soit entre 3,0 % et 4,2 % du PIB national, et les composants majeurs de ce coût sont les coûts sanitaires, principalement ceux liés aux décès prématurés dus à la pollution particulaire. Plus de 70 000 décès/an seraient en fait attribuables à une mauvaise qualité de l'air en France[30] (qui serait la troisième cause de décès évitables en France, après le tabac et l'alcool). Le secteur des transports a un rôle important à jouer dans ce contexte, car en 2015, il représentait[31] 14 % des émissions nationales de particules fines PM_{10}, 18 % des émissions de particules $PM_{2.5}$ et 62 % des émissions d'oxydes d'azote NOx.

3. Comment définir un projet de déploiement de bus électriques à hydrogène ?

3.1. Des bus électriques à hydrogène pour quels types d'usages ?

Cette question est en partie traitée dans les parties 2.1 et 2.2, qui soulignent le fait que les bus électriques à hydrogène ont des performances opérationnelles leur permettant d'être exploités pour de nombreux types d'usage ou de territoires.

Par ailleurs, pour certains projets, le choix de l'hydrogène est fait dans le cadre de la planification d'une ligne de Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) :

- C'est le cas notamment à Pau, où le projet de déploiement de bus électrique à hydrogène s'inscrit dans un cadre plus large de redéfinition de l'espace et de l'aménagement urbain ainsi que de l'offre de transport public de l'agglomération.

  La ligne qui sera desservie par ces bus est d'une longueur commerciale de 6,1 km dont 80 % de longueur en site propre. Elle relie l'Hôpital au Nord et la Gare au Sud en 17 min de trajet avec une fréquence de 7 à 10 min en heure de pointe. Les véhicules parcourront 54 000 km/an/bus avec des services journaliers allant jusqu'à 240 km/bus.

- C'est aussi le cas à Lens-Béthune où le SMTAG (Syndicat Mixte des Transports Artois-Gohelle) a souhaité offrir une grande visibilité à l'hydrogène en dédiant à cette technologie une ligne entière du nouveau réseau BHNS de lignes intitulées "Bulles".

  Les bus hydrogène parcourent 70 000 km par an et par bus, soit en tout 420 000 km par an pour la ligne, et environ 300 km par jour et par bus pendant 10 mois de l'année. La ligne complète (la ligne "Bulle 6") mesure 13km et sera desservie par 6 bus électriques à hydrogène, avec une fréquence en heures pleines de 15min.

En effet, la flexibilité de la technologie la rend particulièrement pertinente pour des lignes exigeantes (en termes de kilométrages, poids total embarqué, dénivelé, demande en régulation thermique, etc.).

Enfin, il est important de noter que les formes de mobilité hydrogène en général bénéficient grandement d'un point de vue économique des effets d'échelle, et que des offres de plus en plus compétitives sont par conséquent attendues avec l'augmentation du nombre et des volumes de déploiements. Ce point sera traité plus avant dans la section 5 de ce document.

3.2. Combien de bus électriques à hydrogène ?

Combien de bus électriques à hydrogène sont nécessaires là où un nombre donné de bus Diesel auraient été déployés pour un usage équivalent ?

De façon simple, la réponse est d'un ratio "1 pour 1".

En effet, les bus électriques à hydrogène n'entrainant ni perte d'autonomie, ni temps supplémentaire pour la recharge par rapport à des véhicules thermiques, le dimensionnement de la flotte peut être fait exactement de

[29] *Commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air, 2015*
[30] *"Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio function", European Heart Journal, 2019*
[31] *Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, 2018*

la même manière : un bus électrique à hydrogène là où en version thermique un bus Diesel aurait été utilisé. C'est là d'ailleurs un des avantages de la motorisation électrique à hydrogène par rapport à l'électrique à batterie qui dans le cas de lignes très contraignantes (hautes fréquences, grandes plages horaires d'opération, etc.) peut nécessiter davantage de bus pour assurer un service équivalent et cela en raison notamment des longs temps de recharge (entre +20 et +30 % de véhicules nécessaires dans de nombreux cas, et même +100 % dans certains cas, par exemple de service 24h/24).

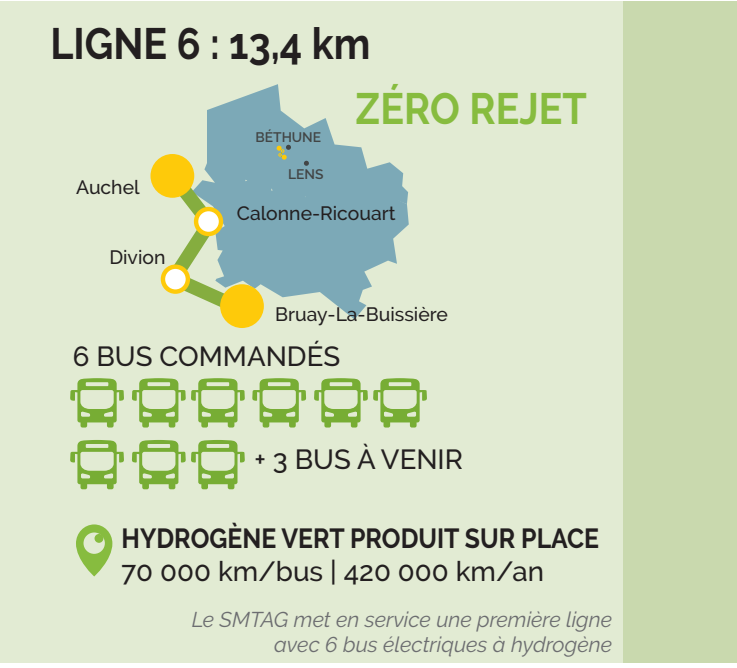
Combien de véhicules de réserve (qui sont toujours prévus, quelle que soit la technologie) sont à prévoir dans le cas de l'hydrogène ?

Concernant ce point, pour prévenir les potentielles indisponibilités dues au caractère récent de la technologie hydrogène, la collectivité de Pau (précurseur des déploiements de bus électriques à hydrogène en France) a fait le choix d'un pourcentage de bus de réserve supérieur à ce qui est observé pour les autres modes de motorisation. En effet, dans le cadre du projet de Pau, 2 bus de réserve sont prévus pour 6 bus en exploitation pour la ville de Pau (soit 25 %), alors qu'en moyenne le ratio utilisé de façon classique pour des flottes de bus est plutôt situé entre 10 % et 15 %. Cependant, ces dispositions particulières ne sont pas forcément mises en place dans les autres projets européens, et de façon générale ne seront pas nécessaires à long terme avec la montée en maturité de la filière. En effet, dès lors que cette technologie sera plus généralisée, il est attendu que le nombre de bus de réserve soit dimensionné exactement comme pour les autres motorisations. Par ailleurs, de façon pragmatique, il est aussi possible (et c'est le choix qui est fait dans certains projets) de prendre comme bus de réserve des anciens bus thermiques. L'avantage de cette approche est d'utiliser le plus possible les bus électriques à hydrogène qui sont acquis, et garder pour le court/moyen terme des bus thermiques pour les bus de réserve. Cette approche, qui optimise l'utilisation des bus électriques à hydrogène, peut aussi être une solution de secours dans le cas par exemple où sur un premier déploiement en phase de démonstration tous les bus électriques à hydrogène doivent être mobilisés pour une opération de maintenance.

Pour résumer, en théorie, le dimensionnement d'une flotte de bus électriques à hydrogène est de "1 pour 1" par rapport au Diesel, mais parce que le marché est pour le moment au stade des premiers déploiements en France et pour être pragmatique, il peut être pertinent de prévoir plus de véhicules de réserve que pour une flotte Diesel (tout en pouvant à moyen terme conserver des véhicules Diesel pour la réserve). A terme, lorsque des bus électriques à hydrogène seront déployés de façon plus répandue sur le marché et dans des flottes de véhicules importantes, et que le niveau de fiabilité des bus électriques à hydrogène sera entièrement équivalent (il pourrait en réalité même être supérieur), il est attendu que ce ratio de "1 pour 1" soit appliqué comme base de dimensionnement.

Quelles sont les dimensions des flottes de bus électriques à hydrogène actuellement ?

En termes de tailles des déploiements existants ou en cours, comme évoqué dans la première partie de ce document, de nombreux projets européens donnent lieu à des déploiements de grande envergure, avec plusieurs dizaines de bus électriques à hydrogène déployés de façon simultanée dans des villes allemandes et britanniques notamment. Ces villes ont généralement commencé par déployer quelques unités il y a plusieurs années. Aujourd'hui, des villes comme Cologne et Londres acquièrent plusieurs dizaines de bus électriques à hydrogène simultanément. Au total, les projets JIVE et JIVE 2 contribuent actuellement au déploiement de 300 bus électriques à hydrogène en Europe. Le projet H2Bus Europe permettra quant à lui le déploiement d'un millier de bus électriques à hydrogène additionnels, répartis dans plusieurs marchés du nord de l'Europe.



Le SMTAG met en service une première ligne avec 6 bus électriques à hydrogène

En France, les premiers projets sont sur des volumes plus réduits (typiquement de 5 à 10 bus), mais certains affichent déjà la volonté de phases suivantes, avec les déploiements de flottes plus importantes (par exemple un passage de 6 à 10 bus pour le SMT Artois-Gohelle, une volonté de passer de 5 à 23 bus pour la ville d'Auxerre, plus de 20 bus électriques à hydrogène annoncés par Belfort-Montbéliard, et d'autres projets de plusieurs dizaines de véhicules qui devraient être annoncés prochainement).

Ainsi, lorsque c'est le choix d'une collectivité, il est d'ores et déjà possible et dès la première phase de déploiement de programmer des conversions de lignes entières à l'hydrogène. Par ailleurs, ces déploiements de flottes importantes sont aussi nettement plus favorables d'un point de vue économique du fait des économies d'échelle, notamment par rapport à des projets d'expérimentation de faible nombre de bus (voir la section 5 sur ces aspects financiers).

3.3. Quelle est l'offre sur le marché des bus électriques à hydrogène ?

Le secteur de la mobilité hydrogène en général et des bus électriques à hydrogène en particulier est actuellement en pleine croissance. Des constructeurs se sont déjà positionnés, d'autres ont déjà annoncé leur intention de proposer une gamme dans un futur proche. Cela étant, il sera nécessaire à l'avenir qu'un nombre croissant de "grands" constructeurs se positionnent sur ce marché pour répondre à la demande.

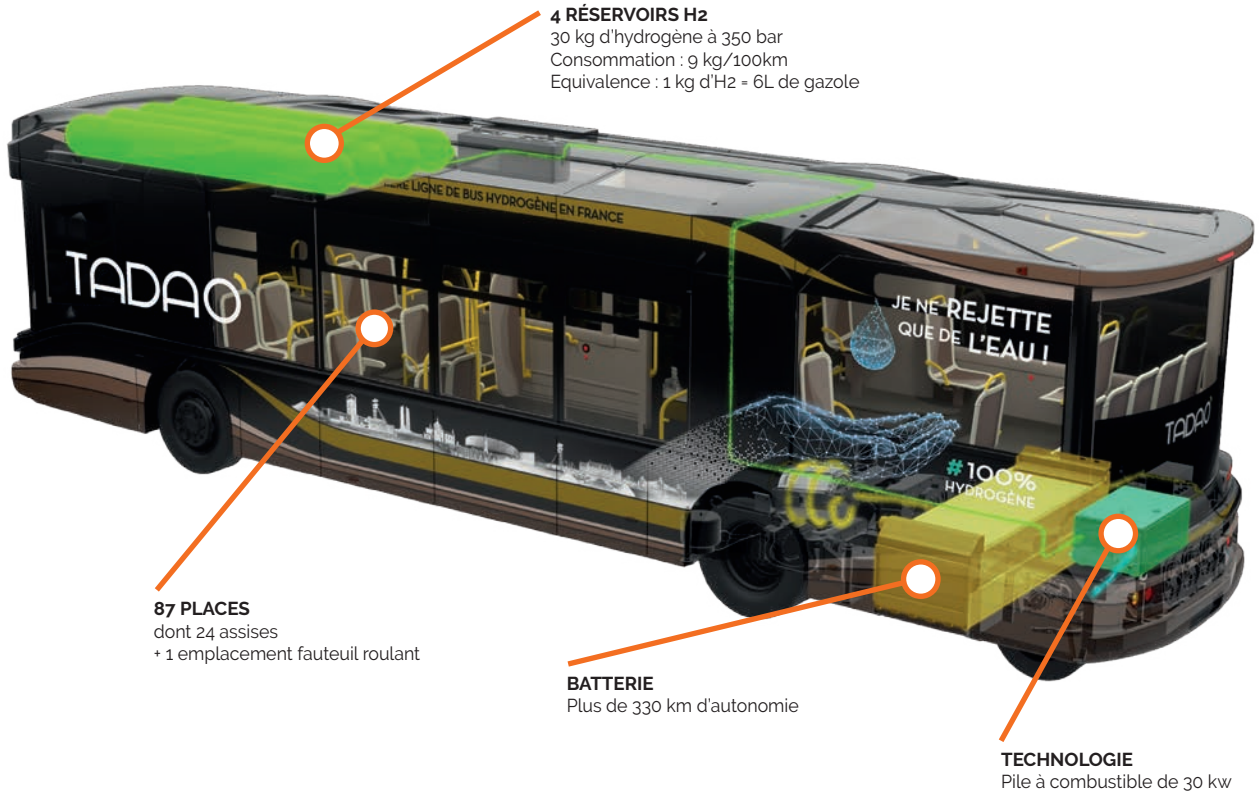
Parmi les constructeurs européens positionnés sur ce marché au cours des dernières années (selon les cas, de façon permanente, pour des démonstrations seulement à ce stade, ou avec des annonces pour des offres futures), on citera en particulier les constructeurs présentés dans le tableau ci-après (liste non exhaustive).

LISTE DES CONSTRUCTEURS DE BUS ÉLECTRIQUES À HYDROGÈNE POSITIONNÉS SUR LE MARCHÉ EUROPÉEN

Fabricant	*Description des projets et annonces récentes*
VAN HOOL	*Van Hool est le constructeur historique et leader sur le marché des bus électriques à hydrogène en Europe – voir paragraphe plus détaillé ci-après.*
DAIMLER	*Daimler via sa filiale Evobus avait été un des premiers constructeurs de bus à déployer une série de bus électriques à hydrogène et avait participé au projet de déploiement européen "CUTE" qui avait débuté en 2003. Après la fin du projet en 2010, Evobus avait fourni plus de 20 bus électriques à hydrogène à des projets européens (au moins 15 pour le projet CHIC et 6 dans d'autres projets). Après avoir ralenti pendant une période ses démonstrations dans le secteur des bus électriques à hydrogène pour se focaliser sur des bus électriques à batterie, Daimler via sa filiale Mercedes Buses a annoncé souhaiter se positionner à nouveau sur ce marché avec l'intention de produire à partir de 2021-22 (commandes dès 2020-21) une version avec prolongateur d'autonomie hydrogène de son modèle de bus électrique à batterie Citaro (le eCitaro), la version avec prolongateur d'autonomie hydrogène permettant d'atteindre une autonomie de 400km[32].*
VDL	*APTS (alors filiale de VDL) avait historiquement créé les bus articulés de 18m appelés Phileas, véhicules hydrogène alimentés par une PAC de 150 kW Ballard. Deux de ces véhicules avaient été déployés à Cologne, et deux à Amsterdam. Depuis 2017, un nouveau modèle de bus électrique à hydrogène VDL est testé à Eindhoven : un Citea Electrique de 12m.*
SOLARIS	*Solaris est un constructeur historique (et un des leaders) sur le marché des bus électriques à hydrogène en Europe – voir paragraphe plus détaillé ci-après.*
WRIGHTBUS	*Wrightbus est un constructeur de bus d'Irlande du Nord qui, historiquement, a par exemple déployé 8 bus électriques à hydrogène (équipés de PAC Ballard) à Londres dans le cadre du projet européen CHIC. En 2016, Wrightbus a présenté un nouveau modèle de bus électrique à hydrogène, à deux étages, permettant de répondre à cette demande spécifique du marché britannique, et la ville de Londres a commencé par commander 20 unités de ce modèle en 2019. Aujourd'hui, Wrightbus se positionne sur des commandes de volumes importants sur le marché britannique, et consolide son offre avec des bus électriques à hydrogène pour les marchés européens, en étant notamment le constructeur positionné sur le groupement d'industriels du projet H2BusEurope (déploiement massif de 600 puis jusqu'à 1000 bus électriques à hydrogène dans plusieurs marchés européens).*
ADL	*ADL (Alexander Dennis Limited), en partenariat avec BYD, construit actuellement des bus électriques à hydrogène, à un et deux étages, principalement pour le marché britannique.*
CAETANOBUS, EN PARTENARIAT AVEC TOYOTA	*En 2018, Toyota a annoncé la fourniture de sa technologie de pile à combustible hydrogène au constructeur de bus portugais Caetanobus. Ces véhicules bénéficieront de toute l'expérience pile à combustible acquise par Toyota sur les véhicules légers électriques à hydrogène et la Toyota Mirai en particulier (véhicule notamment opérationnel dans la plus grande flotte de taxis électriques à hydrogène au monde, les taxis Hype à Paris). Les premiers modèles sont prévus pour être produits en 2019.*
SAFRA	*Safra est le premier constructeur français à s'être positionné sur ce marché et a déjà remporté plusieurs contrats en France – voir paragraphe plus détaillé ci-après.*

[32] *"Mercedes eCitaro : le bus électrique promet une autonomie de 400 km", 14 juillet 2018*

Schéma des composants du modèle Businova hydrogène de Safra pour le SMTAG



Les paragraphes suivants proposent des focus sur les trois constructeurs qui à date d'écriture de ce document sont déjà positionnés sur des déploiements de bus électriques à hydrogène en France : Van Hool, Safra, et Solaris.

Van Hool, fabricant belge de bus, cars de tourisme et véhicules industriels, a déjà vendu de nombreux véhicules roulant à l'hydrogène (plus de 130 en tout dont plus de 100 en Europe), avec par exemple au départ 2 véhicules pour Cologne puis 35 dans une nouvelle phase de déploiement de plus grande ampleur, et de la même façon 2 au départ pour Groningen puis 20 plus récemment.

Pour la France, Van Hool produit les 8 BHNS à pile à hydrogène du projet Fébus à Pau et les 2 bus électriques à hydrogène qui sont exploités par la SAVAC à Versailles. Van Hool propose différents modèles de bus électriques à hydrogène, et notamment le modèle A330[33] (en 12 et 13 mètres) qui est déjà en opération notamment à Cologne et Oslo. Ce véhicule d'autonomie moyenne de 350 km a un moteur électrique de 210 kW, une pile à combustible de 85 kW, 5 réservoirs d'hydrogène à 350 bar pour une capacité totale utile de 35.8 kgH2 et des batteries de 36 kWh. Le modèle qui circule à Pau sera l'Exqui. City 18, un bus articulé de 18 mètres avec un moteur électrique de 210 kW, une pile à combustible de 100 kW, des réservoirs d'hydrogène de 36 kg utile. Ce modèle est prévu pour pouvoir parcourir entre deux recharges les 240 km correspondants au service le plus long de la ligne (son autonomie réelle sur le parcours de la ligne de déploiement sera mesurée en conditions réelles).

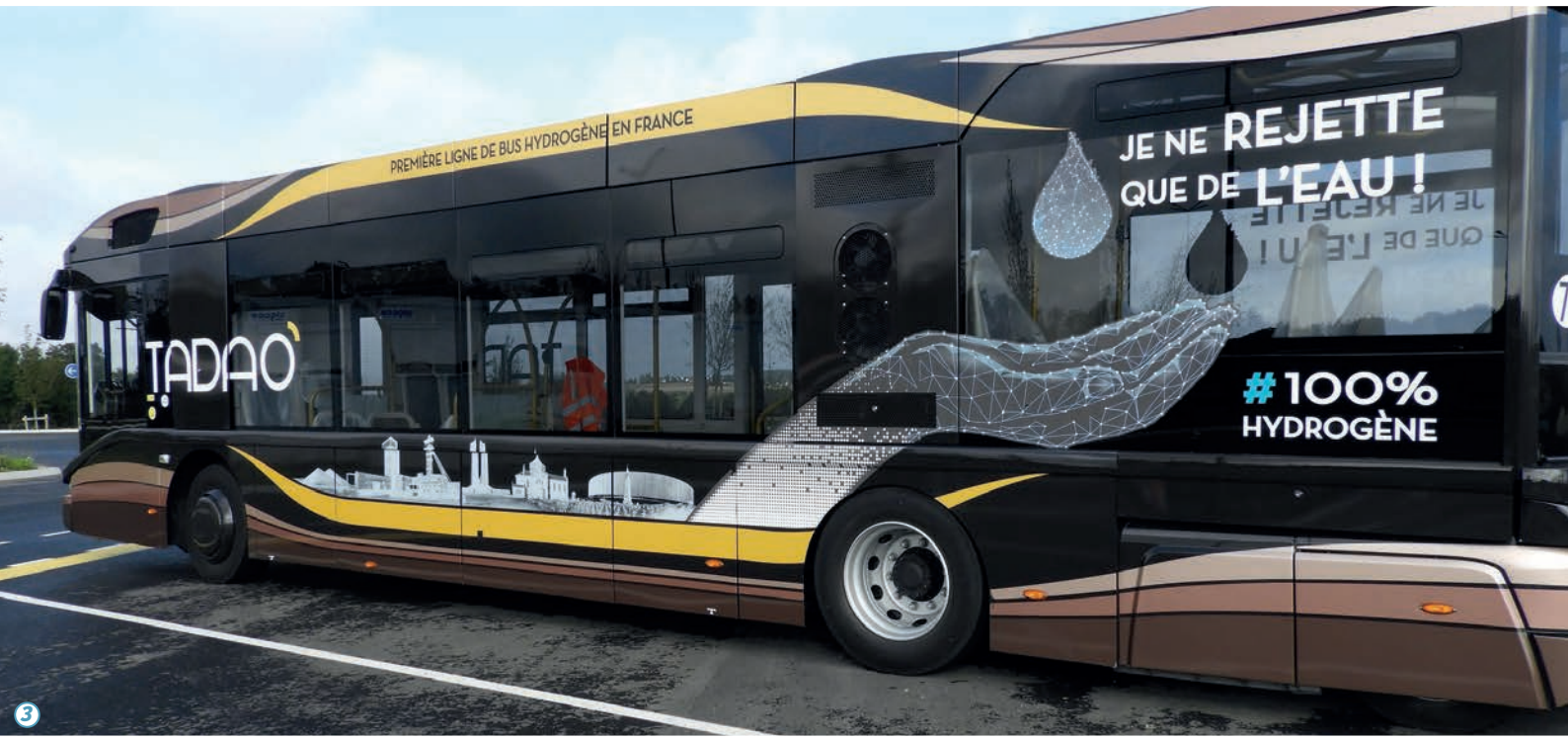
Safra est le premier constructeur de bus français à se positionner sur le marché des bus électriques à hydrogène avec son modèle évolutif Businova, adaptable à l'ensemble des modes de propulsion électrique : électrique à batterie, électrique hybride, électrique à hydrogène.

En mai 2018, Safra a remporté son premier appel d'offre pour des bus électriques à hydrogène avec 6 bus qui ont été livrés au Syndicat Mixte des Transports Artois-Gohelle entre juin et décembre 2019. En outre, Safra fournira 5 bus à Versailles fin 2019 / début 2020 et 1 bus au Mans en 2020. Le Businova[34] est disponible en 10,5 m et 12 m, a un moteur électrique de 250 kW, une

[33] *Van Hool construit 40 autobus à hydrogène pour Cologne et Wuppertal (Allemagne), site de Van Hool*
[34] *Offre Businova hydrogène, site de Safra*











1• A330 FC 13 de Van Hool à Versailles (premiers bus électriques à hydrogène à être entrés en service commercial en France)

2• Modèle Businova hydrogène de Safra (version standard)

3• Modèle Businova hydrogène de Safra (version commandée et livrée à Lens)

4• Nouveau modèle Urbino 12 Hydrogen

5• Le SMTU PPP (Syndicat Mixte des Transport Urbains - Pau Porte des Pyrénées) met en service une première ligne avec 8 bus électriques à hydrogène[35]

---

[35] *Febus alimenté par de' l'hydrogène 100 % palais*

pile à combustible de 30 kW, des réservoirs d'hydrogène de 30 kgH2 à 350 bar, et des batteries de 132 kWh. Safra est un constructeur qui a une capacité de production actuelle d'environ 40 bus par an avec comme objectif de passer à 60-70 bus par an dès 2021. Safra se positionne sur une offre complète en proposant un accompagnement allant jusqu'à la réalisation des études liées aux dépôts. Ces études spécifiques sont réalisées en partenariat avec l'assistance technique de la société d'économie mixte EVEER'HY'PÔLE.

Solaris est un constructeur de bus polonais qui est actif dans 32 pays[36] et qui, en 2014, a développé une version hydrogène de son bus articulé de 18 m (le Urbino) en y intégrant une PAC Ballard de 85 kW. Ce bus électrique avec prolongateur d'autonomie hydrogène a été déployé à Hambourg, sur un parcours de 450 km par jour entre chaque ravitaillement. Dix "trolleybus" hydrogène seront aussi livrés à Riga.

De plus, Solaris a récemment annoncé un nouveau modèle de bus électrique à hydrogène 12 mètres, le Urbino 12 Hydrogen, qui a été présenté pour la première fois en juin 2019 au Sommet Mondial des Transports Publics à Stockholm. Ce bus a déjà été commandé par Bolzano (en Italie) pour sa nouvelle vague de déploiement de 12 bus électriques à hydrogène, et en France il sera notamment expérimenté par la RATP en 2020. Le modèle Urbino 12 Hydrogen[37] est propulsé par 2 moteurs électriques de 110 kW, alimentés par une pile à combustible de 60 kW et des réservoirs d'hydrogène de 36,8 kgH2 et des batteries de 29,2 kWh.

Par ailleurs, d'autres constructeurs, français et européens, étudient actuellement voire planifient leur positionnement sur le marché des bus électriques à hydrogène en France et en Europe.

Enfin, il est également probable que dans les années à venir d'autres constructeurs non européens proposent des modèles hydrogène pour les marchés français et européens. A titre d'exemple, en septembre 2018, Yutong a livré les deux premiers bus électriques à hydrogène à Zengzhou en Chine (sur une commande de 22 bus au total) et 25 bus seront livrés à Zhangjiakou pour les Jeux Olympiques d'Hiver. En France, Yutong s'est associé avec Dietrich Carebus pour commercialiser des modèles électriques à batterie, et on peut supposer qu'ils pourraient donc aussi potentiellement se positionner sur le marché européen des bus électriques à hydrogène. De façon tout aussi notable, Hyundai a un contrat avec le gouvernement de Corée du Sud pour remplacer 26 000 bus roulant aujourd'hui au gaz naturel par des bus électriques à hydrogène.

3.4 Quelles sont les caractéristiques d'usage à définir ?

Comme pour tout déploiement de flotte de véhicules, notamment avec un carburant dit "alternatif" (non Diesel), lorsqu'une collectivité ou AOM définit son projet de transition d'une flotte de bus vers l'hydrogène, il est primordial de définir de manière précise l'ensemble des caractéristiques d'usage visées afin d'informer précisément les fournisseurs de technologies (véhicules et stations de recharge) et qu'ils puissent ainsi dimensionner leur offre au plus près du besoin exprimé. Il est aussi à noter que certains constructeurs peuvent également proposer des accompagnements dans la définition et l'étude de ces caractéristiques. Les tableaux présentés plus bas synthétisent les caractéristiques d'usages à définir ainsi qu'une description générale des enjeux inhérents à chacune d'entre elles.

Quelle est la consommation énergétique des bus électriques à hydrogène ?

La consommation des bus électriques à hydrogène est exprimée en quantité d'hydrogène (exprimée en kilogrammes) nécessaire pour parcourir 100km, d'où l'unité de kgH2/100km.

Le projet européen de déploiement de bus électriques à hydrogène CHIC[38] a rapporté les consommations effectives (entre 2011 et 2016) des bus déployés dans les 10 villes du projet. Les valeurs de la deuxième phase (la plus récente et qui concerne 5 villes) présentent une échelle de valeurs allant de 7,9 kgH2/100km à 10,4 kgH2/100km pour des bus de 12 m, avec une moyenne à 9,2 kgH2/100km.

Ces dernières années ayant été particulièrement dynamiques pour la filière hydrogène, les technologies évoluent et les performances continuent à être améliorées. Les constructeurs visent actuellement plutôt 8 à 9 kgH2/100km pour des bus standards de 12 m, voire moins de 8 kgH2/100km.

Dans la version 2018 du Multi-Annual Word Plan du FCH JU[39], les valeurs rapportées sont en moyenne de 9 kgH2/100km en 2012 et 8.5 kgH2/100km en 2017, avec des objectifs affichés de 8 kgH2/100km en 2020, 7.5 kgH2/100km en 2024 et 7.1 kgH2/100km en 2030.

Pour des bus articulés de 18 m, la consommation est bien entendue supérieure. Dans le cadre du projet CHIC, seule une ville avait déployé des bus de cette dimension et ceux-ci avaient présenté une consommation moyenne de 16,5 kgH2/100km. Cependant, ce déploiement date de 2011 et les constructeurs ont depuis gran-

[36] *Présentation de Solaris, Hydrogen Valley*
[37] *Offre Urbino 12 Hydrogen, site de Solaris*
[38] *Final Report, CHIC, 28 février 2017*
[39] *Multi-Annual Work Plan, FCHJU, 2018*

dement amélioré les performances de leurs technologies. Ainsi, dans le cas du projet de déploiement de bus électriques à hydrogène de 18 m pour la ville de Pau, le constructeur des véhicules Van Hool prévoit d'atteindre des consommations de 10-12 kgH2/100km[40].

Les équipements tels que le chauffage et la climatisation sont également susceptibles d'impacter la consommation énergétique des véhicules et donc l'autonomie, comme pour tout type de motorisation. Les constructeurs de bus interrogés estiment que la climatisation peut augmenter la consommation et donc réduire l'autonomie d'environ 10 à 20 % en conditions normales et jusqu'à 25-30 % dans les situations les plus exceptionnelles. Concernant le chauffage en revanche, cela s'avère en général moins contraignant, et certains constructeurs réutilisent notamment la chaleur de la pile à combustible ce qui permet de limiter les besoins énergétiques.

CARACTÉRISTIQUES D'USAGE À DÉFINIR	
Service Commercial	*C'est-à-dire l'ensemble des déplacements des véhicules sur un trajet donné pour un jour type (par exemple par jour, mois, période scolaire, etc.) : heure de départ du dépôt des véhicules, heure de retour, kilométrages quotidiens, plage de temps dédiée à la recharge, nombre de jours de service annuel, fréquence à chaque moment de la journée, le nombre de bus total et la quantité de bus de réserve utilisés en cas de panne ou d'accident etc. Les caractéristiques du tableau de marche sont fondamentales pour dimensionner les besoins énergétiques des véhicules.*
Tracés des lignes	*En lien avec le service commercial, les tracés permettent d'identifier les différentes contraintes du parcours (reliefs, nombre d'arrêts, etc.) qui pourront impacter la consommation des véhicules. De plus, la position des dépôts et des stations de ravitaillement par rapport aux tracés pourra aussi influencer les kilométrages quotidiens et donc les besoins en autonomie et la consommation totale des véhicules.*
Nombre de bus, et caractéristiques des véhicules requis	*Donnée évidemment fondamentale pour l'ensemble du projet, en notant que des volumes plus importants induisent des effets d'échelle favorisant le modèle d'affaire global. Les caractéristiques des véhicules incluent notamment :* *- Les types de bus (dimensions, nombre de portes, etc.) ;* *- Les estimations en termes de nombre de passagers ;* *- Les équipements annexes (tels que le chauffage et la climatisation) qui peuvent notamment influencer grandement la consommation énergétique des véhicules.*
Calendrier de déploiement	*- Calendrier de déploiement des bus électriques à hydrogène, potentiellement avec un phasage ;* *- Calendrier de déploiement de l'infrastructure de recharge associée, et qui doit bien évidemment être pensé en ligne avec le calendrier de livraison sur site, tests et mise en service des véhicules ;* *- Calendrier d'adaptation des dépôts / ateliers de maintenance pour qu'ils puissent recevoir les bus électriques à hydrogène, ou construction de nouveaux espaces dédiés, calendrier qui doit là aussi être aligné avec celui de réception et début d'exploitation des véhicules.* *Les délais de livraison pour les solutions hydrogènes étant plus longs que pour le thermique (le marché étant moins développé à ce stade), ceux-ci pourront être une contrainte qu'il faudra évaluer dans le cadre de discussions avec les constructeurs, et anticiper dans le calendrier d'ensemble.*

[40] *Dossier de presse : "la station hydrogène Fébus", janvier 2019*

CARACTÉRISTIQUES D'USAGE À DÉFINIR	
Approvisionnement en hydrogène	*La logistique de recharge prévue est aussi à prendre en compte dès le début du projet dans la mesure où cela pourra influencer l'organisation et le dimensionnement de la station de ravitaillement :* *- Les besoins de recharge (quantité d'hydrogène nécessaire pour les véhicules, exprimée en kgH2/jour), en s'appuyant sur les kilométrages et les consommations qui sont généralement de l'ordre de 8 à 10 kgH2/100km pour des bus 12m et de 10 à 12 kgH2/100km pour des bus 18m hors climatisation (voir le paragraphe avec un focus sur ce point, à la fin de la réponse à cette question) ;* *- Les pressions de recharge (pour le moment les bus électriques à hydrogène utilisent majoritairement de l'hydrogène comprimé à 350 bar, mais des bus utilisant de l'hydrogène à 700 bar pourraient être développés[41]) ;* *- Les plages horaires (en effet, si les bus sont par exemples ravitaillés à différents moments de la journée, il n'y a pas les mêmes contraintes sur le stockage en hydrogène que s'ils sont tous ravitaillés sur le même créneau horaire en soirée) ;* *- La durée du plein acceptable ;* *- Les modes de ravitaillement (le plus souvent à la borne en quelques minutes, mais dans le cas du projet de Pau le choix a été fait d'un ravitaillement "à la place" avec recharge pendant la nuit) ;* *- Le nombre de bornes de recharge ;* *- Etc.*
Station dédiée ou multi-usages, et localisation	*Dans de nombreux cas, la station de recharge en hydrogène pour les bus électriques à hydrogène est une station dédiée uniquement pour ces véhicules, typiquement localisée sur le site du dépôt.* *Dans certains cas cependant, la station est située sur un site autre que celui du dépôt, et dans ce cas il faudra notamment des temps de recharge courts inférieurs à une dizaine de minutes afin que les conducteurs puissent aller à la station et recharger les véhicules avant d'aller les stationner au dépôt.* *Enfin, que ce soit dans un cas ou l'autre, sur certains projets la station est mutualisée pour l'usage des bus électriques à hydrogène et d'autres véhicules. C'est par exemple le cas de la station d'Aberdeen en Ecosse qui est utilisée par des bus électriques à hydrogène et des véhicules utilitaires légers à hydrogène, mais aussi de la station de Versailles (aux Loges-en-Josas plus précisément) qui est utilisée par les bus électriques à hydrogène mais également par les taxis électriques à hydrogène de la flotte de taxis Hype.* *Dans ce cas, des questions supplémentaires se posent, et notamment :* *- Autorisation des recharges simultanées de véhicules de types différents ? Si oui, aucun véhicule ne se trouvera a priori bloqué, dans un cas similaire à celui de Versailles par exemple les taxis ne devront pas attendre la fin de la recharge d'un bus pour se recharger. En revanche, les contraintes pour la station dans ce cas et donc l'impact sur son design et son fonctionnement peuvent être notables. Si au contraire les recharges simultanées de véhicules de types différents ne sont pas autorisées, alors les logiques de fonctionnement et des équipements sont plus simples.* *- Organisation des différents acteurs qui utilisent la même station (et donc impact sur les contraintes d'exploitation) ? En effet si par exemple la station est mutualisée entre des acteurs différents exploitant des véhicules similaires : c'est là aussi l'exemple de Versailles avec des bus électriques à hydrogène différents pour des acteurs différents que sont la SAVAC et BEgreen. Ces acteurs peuvent avoir les mêmes habitudes opérationnelles par exemple de recharge en fin de parcours. Dans ce cas une organisation sera à mettre en place pour que les différents acteurs puissent accéder à la station sans interférer sur leurs recharges respectives.* *- Compatibilité technique entre les usagers par exemple en termes de pression de remplissage (350 bar pour les bus versus 700 bar pour certains VL), de protocole de remplissage, d'accessibilité du site (sécurisation du dépôt de bus versus station publique), etc.*

[41] *"Toyota lance Sora, premier bus à hydrogène", Mobilités Magazine*

AUTRES CARACTÉRISTIQUES QUI SERONT DÉFINIES	
Degré de disponibilité	*Dans le cadre des discussions avec les constructeurs des stations de distribution d'hydrogène (voire stations de production et distribution d'hydrogène), les porteurs de projet sont amenés à définir un certain degré de disponibilité attendu pour cette infrastructure. La définition de ce degré de disponibilité, et des pénalités correspondantes en cas de dépassement des niveaux définis, est aujourd'hui identifiée comme un point sensible auquel il faudra prêter une attention particulière. En effet, si le degré de disponibilité et les pénalités associées sont estimés trop élevés, alors les constructeurs seront amenés à surdimensionner les équipements, à prévoir des provisionnements de pièces de rechange à l'avance et à mettre en place des niveaux de redondance permettant d'atteindre ces niveaux de disponibilité, avec pour conséquence une augmentation significative du coût d'investissement.* *Deux recommandations se détachent de plusieurs entretiens menés dans le cadre de la rédaction de ce document :* *- Définir la disponibilité en termes de service (est-ce que les bus sont bien rechargés et peuvent assurer le service d'exploitation normal ?) et non en termes de fonctionnement de composants de la station. De cette façon, la demande est formulée de sorte à laisser au fournisseur le soin de mettre en place des solutions pour assurer la disponibilité pour la recharge y compris en cas de défaillance d'un composant ;* *- Engager des discussions voire négociations avec les fournisseurs (notamment dans le cadre d'appels d'offres permettant la négociation si l'infrastructure est procurée par appel d'offre) – ce point est repris en plus de détails dans la partie 7.*
Mode de communication entre le bus et la station	*A l'heure actuelle les modes de communication entre les bus électriques à hydrogène et la station de ravitaillement varient selon les projets de déploiement (pas de standard unique à ce jour). Parmi les options les plus répandues sont les options filaire et infrarouge, et dans certains cas, pas de communication.* *Dans certains projets, par exemple si les véhicules sont fournis par des constructeurs différents, il peut être utile de mettre en place les deux modes. Par exemple, dans le cadre du projet de Versailles, 2 bus du constructeur Van Hool et 5 bus du constructeur Safra seront rechargés à la même station Air Liquide. Le mode de communication pour les bus Van Hool est filaire, c'est-à-dire que le pistolet pour la recharge ne communique pas avec le bus, et un câble est installé à côté du pistolet pour que les deux soient branchés pendant la recharge. Pour des véhicules avec un mode de communication infrarouge pour la recharge, le pistolet communique directement avec le véhicule.* *La communication entre les véhicules et la station permet notamment d'optimiser le plein / la distribution.*

3.5. Quelles sont les réglementations applicables ?

Les deux réglementations qui s'appliquent aux projets de bus électriques à hydrogène sont la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE/Code de l'environnement) et des Atmosphères Explosives (ATEX/Code du Travail).

En ce qui concerne les ICPE, les rubriques qui s'appliquent sont les suivantes :
- 4715 : stockage de l'hydrogène ;
- 1416 : station de distribution d'hydrogène gazeux ;
- 2930 : ateliers de réparation et d'entretien de véhicules et engins à moteur ;
- 3420 : production d'hydrogène.

Chaque rubrique va imposer différentes obligations fonction des caractéristiques intrinsèques des projets (masse d'hydrogène, surfaces des ateliers, débit de la station).

L'application de la réglementation ATEX impliquera la réalisation d'une étude spécifique des risques d'explosion sur les différents postes de travail (station de remplissage, atelier de maintenance, remisage, etc.). L'étude conduira :
- A la mise en place de mesures techniques et organisationnelles qui seront implémentées sur les sites et consignées dans le Document Unique d'Evaluation des Risques (DUER) ;
- A la définition de "zone ATEX" où peuvent apparaitre des atmosphères explosives. Celles-ci peuvent être temporaires en fonction des opérations réalisées. Ces zones seront repérées et balisées sur le site.

Est-il nécessaire de déclarer à l'administration l'accueil des véhicules hydrogène ?
Aucune réglementation ne l'impose. Cependant, il parait important d'informer le SDIS de la présence régulière de véhicules spécifiques (électrique / GNV / hydrogène) sur un dépôt.

Est-il possible de maintenir des véhicules hydrogène et des véhicules à motorisations autres (Diesel, gaz, etc.) au même endroit ?
Oui il est possible de maintenir différents types de véhicules sur le même site. Dans ce cas, il convient :
- D'intégrer les réglementations spécifiques s'appliquant aux autres motorisations ;
- D'intégrer dans l'étude ATEX les risques liés aux autres motorisations.

Le nombre de véhicules et la capacité d'hydrogène embarquée des véhicules est-elle réglementée ?
Non. Il n'y a pas de limite au nombre de véhicules sur les sites. Par ailleurs, chaque véhicule est homologué par l'administration avec une capacité de stockage qui lui est propre et déterminée par le constructeur. Comme tout autre véhicule il est interdit de modifier cette caractéristique.

Quid du remisage dans des parkings souterrains ?
Hormis des exceptions comme certains dépôts de la RATP, les autobus (quelle que soit la motorisation) ne sont généralement pas remisés en parkings souterrains. Cela étant, si la question se pose, on notera qu'à l'heure actuelle, le remisage de véhicules hydrogène en parking public couvert est déconseillé (recommandation du guide PS de janvier 2018). Le remisage en parking privé souterrain n'est pas impossible mais il doit être envisagé avec la même approche que la maintenance des véhicules hydrogène, c'est à dire avec une étude du risque ATEX et une éventuelle adaptation du parking.

Les véhicules peuvent-ils circuler dans des tunnels ?
A l'heure actuelle et à notre connaissance, rien n'interdit la circulation des véhicules hydrogène en tunnel. En effet, l'accès aux tunnels des véhicules transportant des matières dangereuses, dont l'hydrogène, dépend de la classification du tunnel. Cette classification est établie par l'administration compétente (Ministère des Transports) pour chaque tunnel en fonction de ses caractéristiques. Le cas de l'hydrogène comme carburant pour véhicules (véhicules particuliers, bus, véhicules utilitaires, véhicules lourds) n'est pas spécifiquement traité dans la réglementation actuelle.

D'autres réglementations ?
Suivant la configuration des sites, la réglementation des Etablissements Recevant du Public (ERP) peut s'appliquer sur des bâtiments contigus ou une partie des installations.

Les bus électriques à hydrogène sont rechargés grâce à une station de recharge hydrogène avec un pistolet similaire à celui pour une recharge Diesel par exemple,

La station de recharge hydrogène peut être une station de distribution seulement avec livraison de l'hydrogène sur le site (comme pour le Diesel par exemple), et elle est dans ce cas composée de modules de stockage, compression et distribution de l'hydrogène aux véhicules. La station peut aussi couvrir la production d'hydrogène sur site, en plus des autres modules de stockage, compression, distribution.

Chaque station hydrogène a des caractéristiques propres qui la rendent adaptée à l'usage pour lequel elle a été conçue. Ainsi, cette partie n'a pas vocation à promouvoir certains choix technologiques par rapport à d'autres, mais d'informer les réflexions en présentant les différentes typologies et modules d'infrastructures qui se retrouvent dans les stations hydrogène.

Pour un projet de déploiement de bus électriques à hydrogène, les fournisseurs et exploitants de stations de recharge hydrogène formuleront des propositions aux porteurs du projet pour répondre à un schéma de consommation d'hydrogène donné.



Bus électrique à hydrogène "Fébus" de 18m à Pau

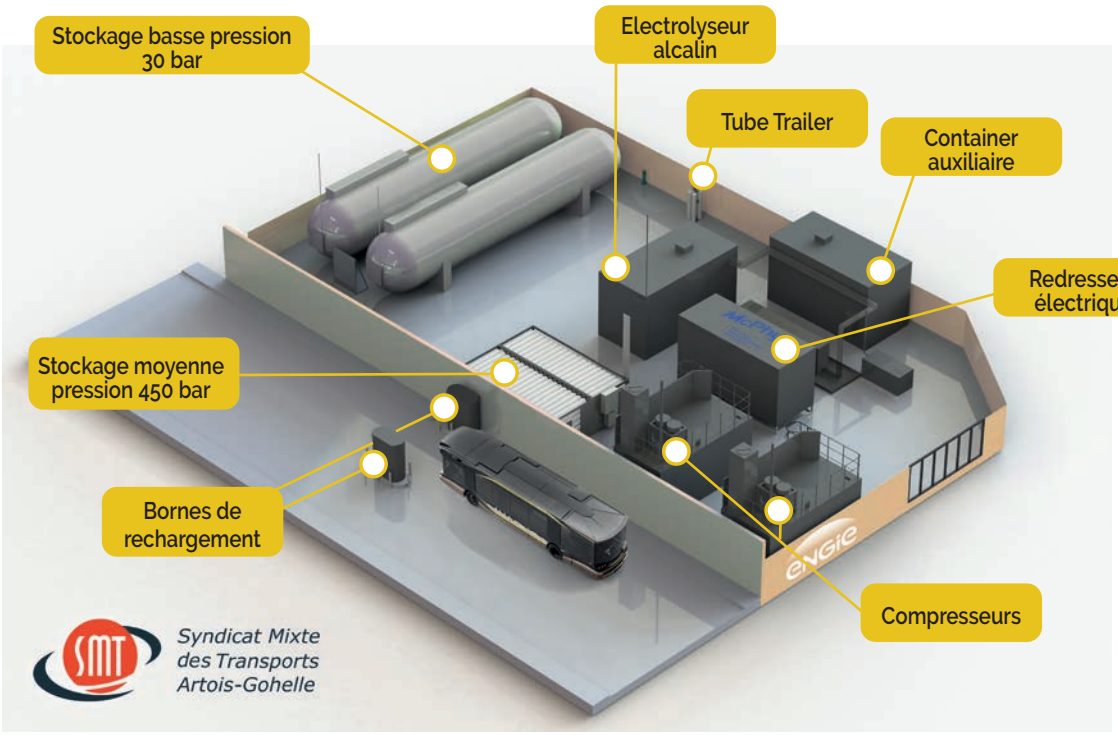
4. Quelle infrastructure est nécessaire ?

4.1. Quels sont les composants principaux de l'infrastructure de recharge en hydrogène ?

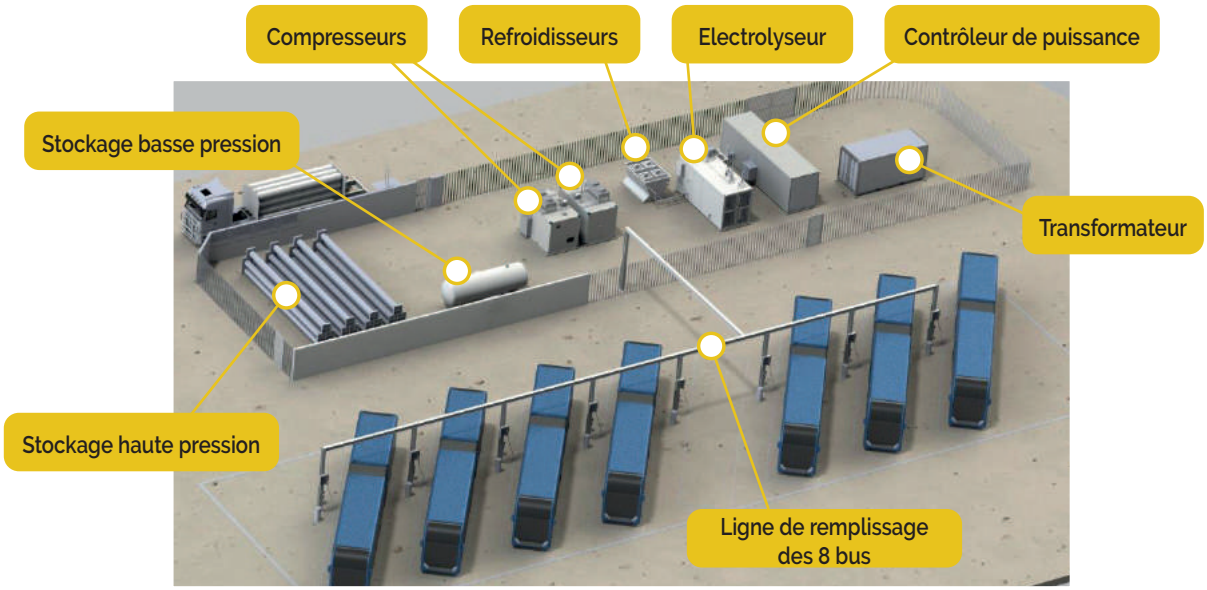
L'infrastructure de recharge en hydrogène est généralement composée des principaux éléments suivants, qui seront repris en plus de détails dans les paragraphes de cette section :

- Pour l'alimentation en hydrogène : soit un module de production d'hydrogène sur site (électrolyseur pour hydrogène produit par électrolyse de l'eau), soit un point d'accès pour la livraison de l'hydrogène par camion ou une connexion à un pipeline hydrogène, les différentes approches pouvant être combinées ;
- Des modules de stockage de l'hydrogène à différents niveaux de pression, ainsi que des modules de compression permettant de comprimer l'hydrogène pour passer d'un niveau de pression de stockage à un autre niveau plus élevé ;
- Des bornes de distribution de l'hydrogène auxquelles sont connectés les bus pour la recharge.

Les schémas présentés ci-contre, produits dans le cadre des projets de déploiements de bus électriques à hydrogène du SMTAG (Syndicat Mixte des Transports d'Artois-Gohelle) et du SMTU PPP (Syndicat Mixte des Transports Urbains - Pau Porte des Pyrénées), permettent de visualiser les différents éléments qui composent une station de distribution d'hydrogène pour des bus, dans les deux cas avec production d'hydrogène directement sur site par électrolyse de l'eau, et dans les deux cas avec aussi un accès pour approvisionnement en hydrogène par camion, en solution de secours par rapport à la production sur site.

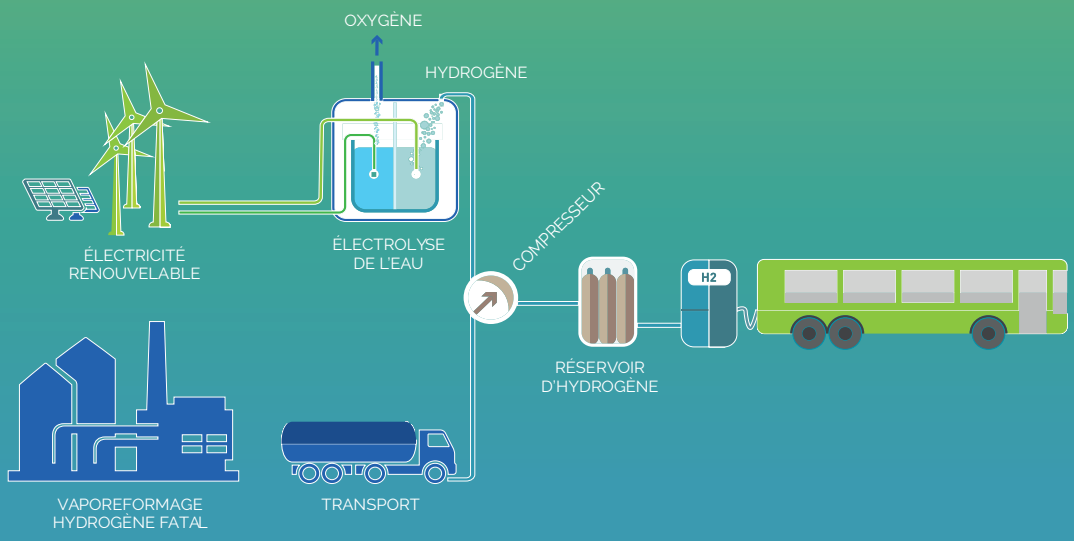


Plan de la station hydrogène à Lens pour les bus électriques à hydrogène du SMTAG



Plan de la station hydrogène à Pau pour les bus électriques à hydrogène du SMTU PPP[42]

[42] *Dossier de presse : "la station hydrogène Fébus", janvier 2019*



Les modes d'approvisionnement en hydrogène pour les projets de déploiement de bus électriques à hydrogène qui ont fait partie du programme CHIC (Clean Hydrogen in European Cities)[43] : production par électrolyse dans le cas du haut, production hors site et livraison par camion dans le 2e cas

4.2. Quelles options pour la production, la compression et le stockage d'hydrogène ?

Un des premiers choix que les porteurs de projet devront réaliser sera d'implanter ou non une production d'hydrogène locale, et il y a donc plusieurs options qui sont détaillées ci-dessous. Au préalable, il faudra cependant noter que les détails et dimensionnements plus précis des solutions seront ensuite fournis par les constructeurs, et ceux-ci seront également en mesure de conseiller les porteurs de projet sur les possibilités d'implantation liées aux contextes locaux et caractéristiques des sites disponibles.

Globalement, on identifiera trois cas pour la localisation de la production d'hydrogène :

- La production d'hydrogène sur site – C'est par exemple le choix des villes de Pau et de Lens qui ont implanté des stations de production et distribution d'hydrogène sur leurs sites. Dans le cas de la production d'hydrogène sur site, la production par électrolyse est très largement la méthode la plus employée – même s'il est aussi envisageable, plus rarement, et ce qui n'a pas encore été observé en France, de mettre en place une unité de production par vaporeformage sur site (en exploitant du gaz naturel ou de la biomasse). La production sur site permet de simplifier la logistique de distribution de l'hydrogène en l'implantant directement au lieu de demande.
- La production d'hydrogène semi-centralisée – Dans ce cas, toutes les méthodes de production d'hydrogène peuvent s'appliquer, mais la production est faite en un lieu central dans le but de servir plusieurs usages dans un périmètre restreint. Ce n'est plus de la production précisément sur le site d'un usage, mais néanmoins toujours sur une production en local pour un territoire donné et ses différents usages. En fonction des volumes considérés et de la proximité entre les sites de production et de distribution, l'acheminement de l'hydrogène pourra prendre différentes formes, par pipeline (plutôt dans le cas de faibles distances ; inférieures à 500m par exemple ; ou en cas de présence d'un pipeline existant et utilisable), par tube-trailer ou semi-remorque (plus de détails sur ce point en partie 4.3).
- La production d'hydrogène hors site, et livrée sur site – dans ce cas-là, l'hydrogène sera directement acheté à un fournisseur qui prendra généralement en charge l'ensemble de la logistique de transport. L'hydrogène sera livré sur la station de distribution (avec là aussi plusieurs options, comme pour le point précédent) où il sera stocké pour être ensuite utilisé pour la recharge des véhicules.

Dans le cas d'une production d'hydrogène sur site ou semi-centralisée par électrolyse, les porteurs de projet pourront également envisager de coupler la production avec une production d'énergies renouvelables. Cela peut être réalisé, comme détaillé en partie 2.3, en lien avec l'implantation d'une centrale de production d'énergies renouvelables dédiée (en totalité ou en partie) à la production d'hydrogène (idéalement sur le site ou à proximité pour réduire les investissements nécessaires

[43] *Final report, CHIC, 28 février 2017*

aux raccordements), et / ou en mettant en place un contrat de fourniture d'électricité avec certificat d'origine renouvelable.

Concernant les infrastructures de compression et de stockage, leurs caractéristiques découleront des choix de fourniture d'hydrogène, des caractéristiques d'usages définies (taux de disponibilité attendus, besoins en hydrogène, etc.), et des propositions technologiques des fournisseurs. L'hydrogène livré ou produit sur site est typiquement un hydrogène gazeux à basse pression, qui doit être comprimé (différentes techniques et niveaux de compression selon les stratégies adoptées) afin d'atteindre un hydrogène stocké à haute pression pour pouvoir alimenter les véhicules. Le remplissage des véhicules étant réalisé par équilibrage de pression, la pression de stockage finale dans la station doit être de plus de 350 bar ou 700 bar selon si les véhicules rechargés ont des réservoirs 350 ou 700 bar respectivement.

Le design des modules de compression et stockage découle d'une stratégie d'optimisation des équipements par les fournisseurs, et dépend des technologies utilisées et des projets au cas par cas.

4.3. Quelle infrastructure, éventuellement, pour la livraison d'hydrogène ?

La livraison d'hydrogène sur site est à envisager dans deux cas :
- Le premier étant pour un hydrogène livré sur la station comme solution d'approvisionnement (pas de production de l'hydrogène sur site) ;
- Le second étant pour mettre en place une solution de secours en cas de défaillance sur un équipement, ou par exemple d'opération de maintenance prolongée de la partie production de la station hydrogène (cette option de secours sera dans la plupart des cas proposée par les fournisseurs pour améliorer le taux de disponibilité de la station).

Lorsque l'hydrogène est livré sur site, il y a un certain nombre de règles d'implantation et de réglementations à respecter et dont la prise en compte sera en général à la charge des fournisseurs des équipements ou de l'exploitant. Ces règles d'implantation dépendent du mode de livraison choisi parmi les deux principaux, la livraison par semi-remorque et la livraison par cadres. L'option d'alimentation par pipeline (beaucoup plus rare à ce jour sur ce type de projet) peut aussi être envisagée, notamment dans deux cas : 1. S'il existe un réseau d'alimentation par pipeline existant en local (assez peu répandu à ce jour) ; ou 2. Si la distance entre la station de distribution et une canalisation existante (ou le lieu de production de l'hydrogène) est très courte, de l'ordre de quelques dizaines / centaines de mètres, ce qui permet d'envisager l'extension (ou la construction) d'un pipeline qui ait du sens économiquement.

Le choix entre ces options n'a pas besoin d'être étudié par une collectivité souhaitant déployer des bus électriques à hydrogène puisqu'il sera proposé par les énergéticiens, spécialistes de l'hydrogène, qui proposent la solution la plus adaptée en fonction des quantités d'hydrogène nécessaires, de la fréquence des ravitaillements et des contraintes d'emplacement.

Description (rapide) d'une livraison par cadres (assemblage de bouteilles)

Plusieurs types de cadres existent et dépendent du type et du nombre de bouteilles assemblées, par exemple, un cadre V18 permet de stocker 13,5 kgH2 à 200 bar et représente une empreinte au sol de 1,2*1,2m.

Un point important d'une livraison par cadre est de prévoir l'espace nécessaire à la fois pour leur stockage sur le site (il y a généralement des cadres en permanence sur le site et les livraisons se font par des échanges de nouveaux cadres pleins contre les cadres vides précédents) et pour leur livraison. En ce qui concerne la livraison, un accès du camion de livraison est nécessaire, mais aussi les espaces nécessaires aux opérations de manutention (isolées de la voie publique). A titre indicatif l'empreinte au sol nécessaire pour 4 cadres (par exemple pour alimenter 2 bus) et les opérations de manutention correspondantes sera de l'ordre de 20 à 30 m2.

Description (rapide) d'une livraison par semi-remorques

Une semi-remorque permet généralement de stocker 350 kgH2 à 200 bar et il faudra prévoir des espaces dédiés pour organiser les livraisons et stockage des semi-remorques. En effet, la livraison se fait elle aussi par un échange d'une semi-remorque vide contre une semi-remorque pleine, ou en laissant la semi-remorque le temps de dépoter sa cargaison, afin de limiter les frais d'immobilisation. Il faudra donc prévoir deux emplacements pour une semi-remorque à poste, et environ 120 m² pour les deux emplacements prévus sur les deux emplacements par poste.

Dans tous les cas, la solution la plus adaptée sera mise en place par le fournisseur qui prendra en charge la logistique d'approvisionnement en hydrogène.

4.4. Quelle infrastructure pour la distribution d'hydrogène ?

La station de distribution hydrogène sera conçue et dimensionnée pour ravitailler les bus électriques à hydrogène selon les habitudes opérationnelles de l'exploitant des véhicules.

De façon générale, les bornes de distribution incluent un pistolet de recharge qui connecte les réservoirs du bus et de la station pour assurer le ravitaillement, et dans certains cas le suivi de la recharge via une interface utilisateur

(qui permet également de procéder à des arrêts d'urgence). Plusieurs modes de communication sont envisageables entre les bus et la station (filaire, infrarouge, etc.).

Concernant la sécurité de la station, les bornes de recharge sont les seuls éléments avec lequel l'utilisateur final va interagir (le reste de la station étant généralement à l'intérieur d'une zone sécurisée). Comme pour le reste de la station, les fournisseurs garantissent la sécurité des équipements en s'assurant que l'ensemble des procédures et équipements employés soient certifiés et homologués (notamment la norme ISO 17268:2012 pour le pistolet de recharge[44] et le standard SAE J2601 pour le procédé de recharge[45]) et que les contraintes de distance de sécurité soient bien prises en compte.



Description du mode de recharge à la borne

La recharge à la borne est une recharge rapide (de typiquement 10 à 15 min selon les cas) qui peut être faite soit par le conducteur du bus soit par un pompiste recruté pour cette tâche. C'est le mode de recharge choisi par exemple dans le cadre du projet du SMTAG (Syndicat Mixte des Transports Artois-Gohelle), mais aussi dans la majorité des flottes de bus électriques à hydrogène en Europe. Pour atteindre des temps de recharge très courts, l'ajout de modules de refroidissement par le constructeur de la station peut être nécessaire.

Avec ce mode de recharge, les bus sont ravitaillés les uns après les autres sur les bornes de recharge, typiquement à la fin du service, et plusieurs bus à la fois si plusieurs bornes de distribution sont installées (ce qui est forcément le cas pour une flotte de véhicules importante). Dans ce cas, les recharges se font sur des plages horaires courtes. C'est l'un des avantages des bus électriques à hydrogène par rapport aux bus électriques à batterie de pouvoir bénéficier d'une recharge rapide. Le temps souhaité pour une recharge ainsi que le nombre de bus à recharger sont deux facteurs clés pour le dimensionnement de la station en termes de stockage haute pression et de puissance et vitesse des compresseurs. Il sera important de spécifier le besoin en "back-to-back" c'est-à-dire le nombre de bus qui devront être rechargés d'affilés pendant une plage horaire donnée.

Ainsi si un exploitant de flotte de bus fait ce choix de mode de distribution, la capacité "back-to-back" devra être prévue dès la conception de la station, et l'exploitant prendra en compte le temps que les conducteurs ou pompistes consacreront à la recharge. Les avantages qui seront retirés de ce mode de distribution seront les temps de recharge courts mais aussi une flexibilité d'usage : temps de recharge courts et pouvant être programmés à différents moments de la journée.

Concernant ce dernier point, les exploitants pourront également tirer parti de cette flexibilité pour éventuellement mettre en place une optimisation des horaires de recharge (par exemple une partie des bus est rechargée le matin et l'autre le soir ou encore avec des recharges sur les heures creuses) pour ainsi diminuer les contraintes sur les équipements de compression et de stockage, et donc les coûts d'investissements dans l'infrastructure.

Un autre aspect à considérer est que la recharge à la borne peut permettre à la station d'accueillir d'autres usages, par exemple dans le cadre de la mise en place d'un écosystème de mobilité hydrogène avec plusieurs types de véhicules. Cette option devra aussi être prise en compte dans la conception de la station (protocoles de remplissage différents pour différents types de véhicules, etc.). Dans le cas d'une station multi-usages (utilisée par plusieurs types de véhicules comme c'est le cas à la station Air Liquide des Loges-en-Josas), il faudra évaluer la demande additionnelle en hydrogène des autres véhicules ainsi que leurs caractéristiques de recharge. Par exemple, une pression de 700 bar est requise pour certains véhicules légers, alors que celle pour les bus est généralement de 350 bar, ce qui supposera d'installer les équipements adaptés.

Description du mode de recharge dit "à la place"

La recharge dite "à la place" est un mode de recharge qui se fait sur la période où les bus sont garés au dépôt. Il va donc se réaliser aux emplacements de stationnement des véhicules lorsqu'ils ne sont pas en service. Ce mode de recharge, peu commun à ce jour pour les bus électriques à hydrogène, a été développé dans le cadre du projet de la ville de Pau, sur le même modèle que le mode de remplissage communément utilisé pour les flottes de bus GNV.

Dans ce cas, les bus sont connectés par les conducteurs à la fin du service : les conducteurs n'ont qu'à effectuer

[44] *Norme ISO 17268:2012, Organisation internationale de normalisation*
[45] *Standard SAE J2601, SAE International*

le branchement et s'assurer que les voyants confirment le bon démarrage de la recharge. Ensuite, la station de distribution recharge les véhicules consécutivement de manière autonome, ce qui diminue les besoins opérationnels (notamment en termes de main-d'œuvre). De plus, en raison de plus grandes plages de temps disponibles pour la recharge, les contraintes sur le stockage et la compression seront plus faibles. Cela supposera en revanche des investissements plus importants sur les bornes de recharge (une borne de recharge nécessaire par bus).

Ce mode de ravitaillement ne rend pas la station moins flexible dans le cas du projet de Pau, puisque des recharges rapides sont aussi possibles. Pour reprendre le parallèle avec le GNV, pour la recharge d'une flotte de bus GNV, une borne de charge rapide est installée en complément de la recharge à la place, notamment pour gérer les aléas d'exploitation et les sorties de maintenance.

BILAN COMPARATIF DES DEUX MODES DE RECHARGE	
RECHARGE À LA BORNE *(mode de recharge le plus répandu pour l'hydrogène)*	***Les raisons pour ce choix :*** • *Recharge rapide* • *Flexibilité d'usage* • *Mode de recharge le plus répandu* • *Mutualisation des équipements de distribution* • *Empreinte au sol réduite*
	Les implications à prendre en compte : • *Pic de consommation plus important (dimensionnement majoré des équipements)* • *Besoin de personnel pendant la recharge* • *Risque de création de file d'attente (limité par un dimensionnement adéquat)* • *Attente du chauffeur pendant la recharge (limitée et comparable à un temps de recharge de véhicule thermique)*
RECHARGE À LA PLACE *(développé dans le cadre du projet de Pau)*	***Les raisons pour ce choix :*** • *Lissage de la consommation sur un temps plus long (dimensionnement optimisé des équipements)* • *Mutualisation de la zone de distribution et de stationnement* • *Gestion opérationnelle simplifiée et pas de file d'attente*
	Les implications à prendre en compte : • *Nombre plus important de postes de recharge à installer* • *Augmentation de la taille de la zone nécessaire pour la recharge*

4.5. Quels sont les éléments à considérer pour le choix du site ?

De façon générale, les infrastructures de stockage et distribution de l'hydrogène vont être positionnées au lieu de dépôt des bus, de façon à mettre en place un mode d'exploitation "naturel" / "habituel" pour les exploitants, similaire aux habitudes avec des bus Diesel. Les véhicules sont rechargés au dépôt, typiquement en fin de service, à proximité du lieu de stationnement, et la distance "non-commerciale" à parcourir pour recharger les véhicules est limitée, réduisant ainsi les coûts et permettant d'utiliser au maximum l'autonomie des véhicules pour l'exploitation.

Dans ce cas, les stations hydrogène ne peuvent pas forcément être publiques et accessibles à un ensemble d'autres usages, mais il pourra être envisagé par exemple de les mutualiser pour la recharge de bennes à ordures ménagères électriques à hydrogène (de la même façon que pour des flottes de bus et BOM au gaz naturel).

Pour des projets de déploiement de flottes réduites de bus électriques à hydrogène, par exemple de l'ordre de 5 véhicules pour un projet de type démonstration, il peut aussi être envisagé de faire la recharge hors dépôt. C'est par exemple le cas pour les 7 bus de Versailles, qui seront rechargés à la station hydrogène existante des Loges-en-Josas. Cependant, en supposant le déploiement de flottes de plusieurs dizaines voire centaines de bus électriques à hydrogène dans les années à venir, le mode "naturel" de recharge au dépôt sera probablement le plus répandu pour ces flottes de bus plus importantes.

Parmi les points à prendre en compte dans le choix du site pour les infrastructures de recharge des bus électriques à hydrogène :



- Premièrement, l'infrastructure de recharge hydrogène sera localisée sur un site proche des routes desservies par les bus électriques à hydrogène, pratique d'accès, rajoutant peu de distance à parcourir pour les bus, et comme mentionné plus haut, a priori sur un site de dépôt des véhicules ;

- En cas de production d'hydrogène in-situ par électrolyse, le site devra être relié aux réseaux d'électricité et eau avec des capacités suffisantes aux besoins des infrastructures ;

- Le site en question devra avoir des dimensions telles qu'il permette le stationnement des véhicules et opérations habituelles d'un dépôt de bus, si localisé au dépôt, mais aussi en prévoyant l'espace nécessaire pour les infrastructures de stockage / compression et distribution d'hydrogène (voire production, si production sur site) – ce point sur l'empreinte au sol des infrastructures sera détaillé plus loin dans ce paragraphe ;

- Il sera important de prévoir les espaces nécessaires pour faciliter l'accès à la station en cas d'intervention des secours (comme tout site, hydrogène ou autre carburant). Sur ce point, il est recommandé de se rapprocher du SDIS local en amont dans le projet, pour identifier les mesures à mettre en place, par exemple l'installation de réservoirs d'eau sur le site, les voies d'accès, etc. (ce point est détaillé davantage dans la partie 11.5 sur les dialogues avec le SDIS) ;

- Dans le cas de plusieurs types de véhicules électriques à hydrogène utilisant la station (en plus des bus), il sera nécessaire de prendre en compte pour le choix du site les habitudes opérationnelles de l'ensemble des usages – et dans le cas où de nouveaux déploiements d'autres véhicules seraient prévus par la suite, il faudra se poser la question d'une extension de la station existante ou du déploiement d'une nouvelle station ;

- Il n'y a à priori pas de contre-indications sur le fait de bâtir la station en centre-ville (ce qui sera le cas à Auxerre par exemple), mais il faudra prendre en compte que les études de sécurité et les procédures d'autorisation notamment seront plus exigeantes sur ces types de sites. Dans le cas de zone ultra dense, les contraintes pourront potentiellement s'avérer très importantes pour des implantations en centre-ville. A titre d'illustration, à date, la RATP a choisi de positionner ses dépôts GNV et hydrogène (pour les premiers véhicules qui seront testés en 2020) en périphérie.

Concernant l'empreinte au sol de l'infrastructure de recharge en hydrogène, celle-ci est bien entendu très variable, en fonction notamment :

- De la taille de la flotte de bus : les équipements de recharge en hydrogène sont proportionnés pour pouvoir répondre à la consommation en hydrogène d'une flotte de véhicules donnée ;

- Des caractéristiques du projet telles que les niveaux de disponibilités attendus : si un haut niveau de redondance des équipements de la station est mis en place pour assurer un très haut niveau de disponibilité, alors l'espace nécessaire aux infrastructures sera plus important ;

- Du choix pour le mode de recharge (à la borne ou "à la place"), etc.

Par conséquent, les valeurs décrites ci-dessous ne sont données qu'à titre indicatif, pour renseigner les premières analyses sur cette partie.

Les acteurs interrogés dans le cadre de la rédaction de ce document indiquent que pour une flotte de bus de l'ordre d'une dizaine de véhicules, une surface de l'ordre de 500-1000 m² est pertinente pour l'installation de l'ensemble du site de la station (hors voirie et zones de distribution), mais cela est bien évidemment à adapter au cas par cas.

A titre d'exemple, dans le cas du SMTAG à Lens, la station installée est positionnée sur un espace de 30 m x 30 m soit 900 m² qui inclut les espaces de distribution et de parking de 2 bus lors de la recharge et est dimensionné pour 6 à 10 bus.

Enfin, dans le cadre de l'étude NewBusFuel[46], un ensemble d'analyses sur plusieurs sites en Europe a permis de réaliser des dimensionnements théoriques de futures stations pour des flottes de l'ordre de plusieurs dizaines de bus électriques à hydrogène. Pour celles-ci, les empreintes au sol estimées (station uniquement) sont d'environ 900 m² pour une station de capacité de 1000 kgH2/j (soit pour environ une cinquantaine de bus de 12m) et 1200 m² pour une capacité de 2000 kgH2/j (soit pour environ une centaine de bus de 12 m). Ces dimensionnements (détaillés plus avant dans le rapport dont le lien est disponible en note de bas de page) illustrent des effets d'échelle : pour une station de capacité doublée, l'empreinte au sol estimée est multipliée par un facteur inférieur à deux.

Les porteurs de projets de déploiements de bus électriques à hydrogène pourront s'appuyer sur ces ordres de grandeurs et sur les premières discussions qu'ils pourront avoir avec des experts du secteur pour finaliser la sélection du terrain où se positionnera la station. Il sera utile pour les fournisseurs d'avoir ensuite un maximum d'informations (détaillées davantage en partie 7 sur les éléments à faire figurer au cahier des charges pour la station) sur la demande précise en hydrogène et le terrain choisi, afin de pouvoir adapter la conception et les dimensionnements en conséquence.

Lors des discussions avec les constructeurs de stations, ceux-ci pourront présenter des valeurs plus précises d'empreinte au sol, et pourront éventuellement proposer des solutions permettant de moduler cette empreinte. A titre d'exemple, les équipements de stockage pourront être positionnés en horizontal, par exemple pour limiter l'impact visuel, ou en vertical, permettant de limiter l'empreinte au sol. Aussi, l'utilisation de murs coupe-feux peut permettre de limiter les contraintes en termes de distances de sécurité. Ces points sont à envisager au cas par cas en fonction des spécificités de chaque projet.

4.6. Quelle est l'offre sur le marché des fournisseurs d'hydrogène et des fournisseurs et exploitants de stations ?

La filière hydrogène en général est actuellement en plein essor, poussée par un ensemble de dynamiques des territoires, des industriels, et de politiques environnementales allant dans le sens de la transition énergétique et de la mobilité zéro émission en particulier. Dans ce contexte, de nombreux acteurs se sont positionnés (ou pourraient se positionner dans un futur proche) sur le marché des stations hydrogène. On citera en particulier les constructeurs et exploitants de stations pour bus électriques à hydrogène ci-dessous (liste non exhaustive).

Concepteur, fabricant et intégrateur d'équipements de production et distribution hydrogène depuis 2008, **McPhy** contribue au déploiement mondial de l'hydrogène zéro-carbone comme solution pour la transition énergétique. Fort de sa gamme complète dédiée aux secteurs de l'industrie, la mobilité et l'énergie, McPhy offre à ses clients des solutions clés en main adaptées à leurs applications d'approvisionnement en matière première industrielle, de recharge de véhicules électriques à pile à combustible ou encore de stockage et valorisation des surplus d'électricité d'origine renouvelable. McPhy dispose d'une solide expérience dans le secteur de la mobilité hydrogène, avec plus de vingt stations en référence, notamment la station hydrogène pour bus de Lens-Béthune (SMT AG) : un système complet de production d'hydrogène bas carbone (électrolyse 0,5 MW) connecté à une station hydrogène d'une capacité de 200 kg par jour.

ITM POWER est un des leaders mondiaux de la technologie d'électrolyse PEM. Fondée en 2001, la société

[46] *"New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots", NewBusFuel, mars 2017*

conçoit, fabrique et intègre des systèmes de production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau (procédé de dissociation des molécules d'eau en utilisant de l'électricité renouvelable ou bas carbone). ITM POWER adresse trois marchés principaux : le stockage d'énergie, l'hydrogène industriel et la mobilité hydrogène. ITM Power a une expérience très poussée de ce dernier secteur, en particulier sur le marché britannique, où elle installe et exploite une dizaine de stations, toutes avec production sur site. ITM Power intervient également en tant que fournisseur sur plusieurs projets en France, notamment la station de production et de distribution d'hydrogène vert qui alimentera la ligne BHNS du projet Fébus de Pau avec un électrolyseur PEM de 700 kW.



Electrolyseur PEM intégré à une station hydrogène

McPhy comme ITM Power sont des constructeurs ou intégrateurs de stations, donc collaborent avec des entités autres qui vont plutôt se positionner sur le rôle d'exploitant des stations (même si ITM Power est aussi exploitant de certaines stations au Royaume-Uni). Parmi les constructeurs de stations, on pourra aussi noter d'autres acteurs clés du secteur comme Hydrogenics qui fournit par exemple des stations pour Air Liquide ou des acteurs qui n'ont pas encore fourni de station bus pour la France, comme Areva H2Gen, Atawey, Haskel, Proviridis ou NEL (NEL étant l'un des acteurs majeurs du projet H2Bus Europe pour le déploiement de 1000 bus dans plusieurs clusters européens).

NEL est une entreprise norvégienne présente à l'international, spécialisée dans l'hydrogène, et qui fournit des solutions pour produire, stocker et distribuer de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables. Les solutions hydrogène de NEL couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis les technologies de production d'hydrogène jusqu'à la fabrication de stations de ravitaillement en hydrogène, fournissant à tous les véhicules électriques à pile à combustible la même vitesse et la même autonomie que les véhicules classiques actuels. NEL est présent en France via sa filiale Sertronic.

Parmi les acteurs d'ores et déjà positionnés sur le marché français en tant qu'exploitant des stations hydrogène pour bus on citera notamment : Air Liquide, Engie GNVert, Hynamics groupe EDF ou encore Total et Shell.

Air Liquide est un des leaders mondiaux du gaz, technologies et services pour l'industrie et la santé, qui s'est positionné dès le début des années 2000 sur le secteur de l'hydrogène énergie, en particulier pour la mobilité. L'entreprise conçoit, installe et exploite des stations pour véhicules lourds et légers, parmi elles notamment celles alimentant depuis 2015 la flotte de taxis Hype à Paris (100 taxis aujourd'hui, 600 en 2020). Air Liquide se positionne également sur le segment des bus électriques à hydrogène, et a déjà fourni des stations de recharge à Whistler (Canada), Oslo (Norvège) et dans l'Aargau pour ces projets de déploiements. En France, l'entreprise a conçu et installé la station qui alimente les bus hydrogène à Versailles dont la ligne 264 est en service depuis le 9 septembre 2019.

Engie est un groupe mondial de l'énergie et des services, qui repose sur trois métiers clés : la production d'électricité bas carbone, notamment à partir de gaz naturel et d'énergies renouvelables, les infrastructures énergétiques et les solutions clients. ENGIE envisage l'hydrogène sous sa forme renouvelable, et est déjà présent sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène : de sa production à partir d'énergies renouvelables et jusqu'à ses utilisations finales (mobilité, industrie, Power to Gas…). Depuis 1998, GNVERT, filiale du Groupe ENGIE, met toute son expertise au service des entreprises et des collectivités locales afin de proposer des solutions sur mesure de mobilité verte. GNVERT est le leader en France des solutions d'avitaillement en carburants alternatifs (GNC, BioGNC, GNL, hydrogène…) et exploite plus de 150 stations. ENGIE assure notamment la conception, la réalisation, l'exploitation et la maintenance des stations de deux des premiers projets de





Pendant l'installation de la station hydrogène installée par McPhy à Lens

déploiement de bus électriques à hydrogène en France, à Pau (avec ITM Power comme fournisseur de la station) et Lens-Béthune (avec McPhy comme fournisseur de la station). De plus, ENGIE est associée à la région Occitanie dans le développement du projet HYPORT qui avitaillera les bus de l'aéroport de Toulouse-Blagnac.

Hynamics est la filiale du groupe EDF en charge de proposer une offre de production et de distribution d'hydrogène bas carbone performante pour l'industrie et la mobilité. Par cet engagement, l'ambition d'Hynamics est de devenir un acteur incontournable de la filière hydrogène bas carbone en France et à l'international et de renforcer sa contribution à la lutte contre le réchauffement climatique et l'amélioration de la qualité de l'air. Hynamics propose des solutions d'hydrogène bas carbone :

- Pour les clients industriels, pour lesquels l'hydrogène est une matière nécessaire (raffinerie, verrerie, agro-alimentaire, chimie...), Hynamics installe, exploite et assure la maintenance de centrales de production d'hydrogène sur les sites, en investissant dans les infrastructures nécessaires ;

- Pour les acteurs de la mobilité publique et professionnelle, Hynamics contribue à mailler les territoires d'unités décentralisées de production et de distribution d'hydrogène afin d'alimenter les flottes de véhicules lourds tels que les trains, les bus, les camions, les véhicules de collecte de déchets, les véhicules utilitaires, les engins de manutention ou encore les moyens de transport fluviaux ou maritimes.

Total est producteur et fournisseur de pétrole, de gaz, d'électricité, d'énergies renouvelables et d'hydrogène. Total a toujours le même objectif : fournir à ses clients les énergies dont ils ont besoin. Devenir la major de l'énergie responsable, c'est fournir à la fois une énergie au meilleur coût, disponible et propre. Pour ses besoins industriels, Total produit depuis de nombreuses années de l'hydrogène pour désulfurer les carburants. Concernant la mobilité, Total s'est positionné comme pionnier dans la distribution d'H2 : dès 2002 en Allemagne, Total construit sa première station H2 et a développé son propre réseau de stations hydrogène. Depuis 2015, dans le cadre de la JV H2 Mobility avec 5 autres partenaires, Total a investi dans la construction d'un réseau public national de stations-service dédiées aux véhicules légers. Il y a actuellement 26 stations H2 sur le réseau Total en Allemagne. Total conçoit, construit, finance, opère et maintient des infrastructures d'avitaillement hydrogène. Au BENELUX, Total opère 4 stations hydrogène dédiées à des flottes de bus. En France, Total a installé début 2020 une station Hydrogène dédiée à ravitailler un bus de la ville du Mans. Total investit massivement dans des projets de production d'hydrogène issu des énergies renouvelables, et de captage de CO2.

Enfin, concernant les fournisseurs d'hydrogène (pour de l'hydrogène livré aux stations donc, plutôt que produit sur site), le secteur compte un certain nombre de grands acteurs historiques, spécialistes de la production et distribution d'hydrogène en grandes quantités pour des applications industrielles notamment. Parmi ceux-ci, on notera par exemple l'allemand Linde, l'américain Air Products, et le français Air Liquide (avec parfois des collaborations avec des pétroliers comme Shell ou Total par exemple pour ses stations pour véhicules hydrogène en Allemagne).

Le groupe **Shell** est présent en France depuis 1919. La Société des Pétroles Shell ("Shell France"), filiale de Royal Dutch Shell commercialise des produits et services pétroliers : carburants et biocarburants automobiles et pour l'aviation, lubrifiants, bitumes et carte mobilité. Elle dispose de 85 stations-service sur autoroutes et voies express ainsi que d'une usine de lubrifiants à Nanterre. Shell France dispose également depuis 2017 d'une branche "Nouvelles Energies" dédiée au développement de projets dans les énergies renouvelables. L'hydrogène fait partie des nouveaux carburants proposé par Shell avec les biocarburants, l'électrique à batteries ou encore le GNL. Shell a déjà mis en service plusieurs stations de recharge hydrogène en Allemagne et au Pays-Bas notamment.

Par ailleurs, l'émergence d'une appétence forte pour la production d'hydrogène renouvelable conduit aujourd'hui à l'émergence de nouveaux modèles d'affaire et d'opportunités pour de nouveaux entrants de se positionner sur ce marché, par exemple sur de l'hydrogène produit exclusivement par électrolyse. Des évolutions et mise en place de propositions de nouveaux acteurs sont donc attendues sur ce marché dans les prochaines années.

On citera l'exemple de LHYFE qui propose une solution clé en main de production d'hydrogène 100 % vert, modulaire et déployable rapidement pour la mobilité et l'industrie. Spécificité de cet acteur : une connexion directe aux sources d'énergies renouvelables disponibles sur les territoires (éolien, photovoltaïque, déchets urbains, etc.) par électrolyse de l'eau pour un hydrogène propre, 100 % vert (sans recours à l'achat de certificats de garantie) et à prix compétitif. La société d'ingénierie complètement dédiée à l'intégration de solutions d'hydrogène vert est composée d'experts dans l'installation et le pilotage d'électrolyseurs, dans la compression, dans la logistique hydrogène, dans le financement et la règlementation de sites hydrogène.

4.7. Quid des dépôts et ateliers de maintenance ?

Les déploiements de bus électriques à hydrogène nécessitent la mise en place de dépôts et ateliers de maintenance adaptés.

Il peut être envisagé d'adapter / aménager un dépôt existant pour qu'il puisse accueillir des bus électriques à hydrogène, ou de construire un nouveau dépôt, qui sera alors conçu de sorte à répondre aux contraintes spécifiques des bus électriques à hydrogène. Dans tous les cas, une étude dédiée sera réalisée, afin de s'assurer que le dépôt / atelier de maintenance ait toutes les caractéristiques nécessaires pour l'exploitation d'une flotte de bus électriques à hydrogène, à savoir (liste non exhaustive) : des installations permettant d'accéder aux toits des véhicules (où se situent généralement des équipements hydrogène dont les réservoirs), des détecteurs d'hydrogène, des équipements de ventilation du bâtiment, un sol antistatique, des éclairages certifiés ATEX, éventuellement des fenêtres ou portes coupe-feux, etc. A priori, le nombre de travées de maintenance n'est pas à modifier par rapport à des bus classiques.

Ce point sur les dépôts sera abordé en plus de détails dans deux parties de ce document :
- Dans la partie 5 pour les aspects budgétaires en lien avec des dépôts / ateliers ;
- Dans la partie 4.8 concernant les aspects réglementaires.

Quelles sont les dispositions constructives à prévoir pour un atelier neuf ?

Il convient d'anticiper les futures contraintes de gestions des ATEX :
- Eviter la formation d'une atmosphère explosive ;
- Eviter l'inflammation d'une atmosphère explosive ;
- Limiter les effets d'une inflammation d'une atmosphère explosive.

Les dispositions constructives à anticiper sont :
- Prévoir une zone, en extérieur, pour réaliser la purge partielle ou complète des circuits hydrogène à l'aide d'un connecteur et d'un évent ;
- Eviter les architectures favorisant l'accumulation de l'hydrogène en cas de fuite (gaz volatil plus léger que l'air) ;
- Prévoir une ventilation naturelle ou mécanique (ATEX) des ateliers ;
- Prévoir une détection hydrogène et incendie ;
- Prévoir des dispositifs de chauffage dont la source de chaleur est située à l'extérieur de l'atelier ou des locaux où de l'hydrogène sera présent ;
- Prévoir des dispositifs de mise à la terre des véhicules.

Il est important d'échanger au plus tôt avec le fournisseur de véhicules afin d'obtenir ses préconisations de zonage ATEX pour les différentes opérations de maintenance.

Quelles sont les mesures techniques et organisationnelles à mettre en place pour mettre aux normes hydrogène un atelier de maintenance existant ?

Pour un atelier de maintenance déjà construit, une analyse de site est nécessaire pour définir les zones qui devront satisfaire les normes ATEX. Cette analyse doit être très fine car basculer l'ensemble d'un dépôt en normes ATEX pour un seul bus ou quelques bus serait un non-sens économique. Il est donc indispensable d'obtenir le plus d'informations sur les opérations à réaliser et les préconisations des constructeurs.

Les ajustements majeurs à faire dans la zone ATEX seront :
- Formation du personnel ;
- Outils de travail adaptés aux opérations ;
- Remplacement de l'éclairage ;
- Ventilation intérieure et évents sur le toit ;
- Capteurs d'hydrogène ;
- Identification visuelle des zones ATEX.

Tout personnel travaillant dans une zone ATEX doit être formé au niveau requis en fonction du type d'opération réalisée. L'habilitation ATEX délivrée par l'employeur est donc en lien étroit avec la formation de maintenance délivrée par le fournisseur des véhicules. Il existe trois niveaux de formation :
- Niveau 0 : Personnel évoluant dans l'environnement sans intervention technique directe (techniciens de surface, personnes non accompagnées, conducteurs, etc.) ;
- Niveau 1 : Personnel technique d'intervention de maintenance de premier niveau sur les bus (techniciens non spécialisés, cadres, etc.) ;
- Niveau 2 : Personnel technique d'intervention de maintenance des établissements et des bus capable de démonter et remonter un appareil hydrogène en toute sécurité (techniciens spécialisés, cadres, etc.).

Selon le type d'opération et le type de zone ATEX, il peut être nécessaire d'avoir des équipements spéciaux de type ATEX (ces équipements ne doivent pas émettre d'étincelles ni posséder de sources chaudes susceptibles de déclencher une explosion) :
- EPI (chaussures antistatiques, vêtements antistatiques, détecteurs hydrogène portatifs) ;
- Eclairages ATEX ;
- Outillages ATEX.

Ces équipements sont onéreux. Il convient donc d'être précis lors de l'étude ATEX sur les opérations qui seront réalisées sur place et celles externalisées.

Est-il nécessaire d'équiper l'ensemble de l'atelier avec du matériel ATEX ?

Non, cela dépendra de l'analyse du site réalisée par un bureau d'étude spécialisé. Plus les informations collectées auprès du fournisseur des véhicules sont précises plus le bureau d'étude pourra réaliser un zonage adapté aux opérations réellement exécutées.

4.8. Quelles sont les réglementations applicables à l'infrastructure ?

Les fournisseurs d'infrastructure de production, stockage, distribution etc. d'hydrogène s'assurent que leurs équipements répondent aux diverses normes et réglementations, par exemple les normes comme la norme ISO 9001 de management de la qualité, les directives européennes comme la Pressure Equipment Directive, Machine Directive, Low Voltage Directive, Electromagnetic Compatibility Directive, mais aussi les normes et standards pour la recharge des véhicules (SAE J 2799 si communication infrarouge entre le véhicule pendant la recharge et la station), ISO 17268 ou SAE J2600 pour le design du pistolet, SAE J2719 et ISO 14687-2 sur la pureté de l'hydrogène fourni par la station, ISO 22734-1 en cas de production d'hydrogène par électrolyse, etc.

Par ailleurs, le déploiement d'infrastructures de recharge hydrogène fera appel à plusieurs rubriques ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement), certaines en lien avec l'hydrogène et d'autres plus génériques. L'analyse des caractéristiques du projet, les études de risques et de dangers, et des échanges avec la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) permettront d'identifier les différentes rubriques ICPE qui s'appliquent, et celles pour lesquelles le projet sera soumis à régime d'autorisation ou de déclaration seulement.

En effet, en fonction du type et de la taille des installations projetées ou existantes, le projet pourra être soumis à déclaration ou autorisation dans les rubriques ICPE concernées.

>> Dans le cas de **procédure de déclaration**, les rubriques ICPE sont régies par des arrêtés ministériels "type" qui préconisent généralement des distances de sécurité vis à vis des tiers ou d'autres installations classées. Il convient donc de réaliser une étude d'implantation pour respecter l'ensemble des distances de sécurité.

>> Pour les **procédures d'autorisation**, une étude d'impact et de dangers sur l'environnement sera exigée. Dans le cas particulier de la production d'hydrogène par électrolyse, soumis à autorisation dans le cadre de la rubrique 3420 sur les émissions polluantes, une note de cadrage élaborée par la DGPR (Direction gé-

nérale de la prévention des risques, MTES), permet de déroger à la procédure d'autorisation en se référant à la notion de "pression sur l'environnement" à travers une simple une étude d'impact sur la ressource en eau et le réseau électrique. En effet, le procédé d'électrolyse ne génère pas d'émissions polluantes.

>> Il est à noter cependant que la directive IED va prochainement faire l'objet d'une révision au niveau européen.

La liste des rubriques ICPE applicables variera donc selon les projets. Parmi celles-ci :

- La rubrique 1416 (AMPG du 22 octobre 2018[47]), qui est spécifique aux stations de distribution d'hydrogène gazeux (et qui s'applique aux stations-service étant des installations, ouvertes ou non au public, où l'hydrogène gazeux est transféré dans les réservoirs de véhicules, la quantité journalière d'H2 distribuée étant supérieure ou égale à 2 kg/ jour) ; sont réglementés en particulier la pression nominale en sortie de la borne de distribution d'hydrogène, le débit maximal de l'hydrogène pendant la recharge, les distances de sécurité entre les équipements susceptibles de contenir de l'hydrogène et les limites du site, dispositifs d'aération et modules de stockage de matières inflammables autres que l'hydrogène, etc. ;
- La rubrique 4715, sur le stockage de l'hydrogène, qui définit notamment le seuil d'une tonne d'hydrogène stocké sur site en-dessous duquel le régime de déclaration s'applique et au-dessus duquel une demande d'autorisation est nécessaire (au-dessus de 5 t, procédure Seveso) ;
- La rubrique 3420 (fabrication de produits chimiques inorganiques) qui s'applique en cas de production d'hydrogène par électrolyse sur site notamment. Actuellement, une installation de production d'hydrogène par électrolyse est en théorie forcément soumise à une autorisation environnementale au titre de la rubrique 3420 de la Directive IED qui couvre la production en quantité industrielle d'hydrogène, sans donner de seuil sur la quantité d'hydrogène produit. Ceci étant, il est au cas par cas possible de déroger à la procédure d'autorisation, sur la base d'une étude d'impact sur les ressources en eau et le réseau électrique (cf. ci-dessus) ;
- La rubrique 2930 sur les ateliers de réparation et d'entretien de véhicules et engins à moteur (voir focus sur ce point plus bas) ;
- Potentiellement la rubrique 1435 qui est relative aux volumes de carburant liquide (donc pas applicable pour des bus rechargés avec de l'hydrogène gazeux) dans le cas où le site accueille aussi des véhicules motorisés par carburants liquide (site multi-carburants) ;
- Et comme pour tout dépôt de véhicules avec infrastructure associée, d'autres rubriques non nécessairement liées à l'hydrogène, comme la rubrique 2915 pour la gestion de l'atelier, etc.

Le site peut également accueillir une station-service de distribution de gazole, qui implique les rubriques suivantes :

- Un stockage de produits pétroliers (rubrique n° 4734) ;
- Une installation de remplissage des réservoirs à carburant des véhicules à moteur (rubrique n° 1435) ;

Un nouvel atelier de maintenance pour accueillir Fébus

"En parallèle des travaux de réaménagement et de modernisation du dépôt de bus IDELIS, l'arrivée de Fébus nécessite la création, sur ce même site, d'un nouvel atelier de maintenance, en extension de l'atelier existant. Un bâtiment de 540 m² qui complètera la plateforme destinée à accueillir la future station hydrogène.

Le format hors norme de Fébus requiert la construction d'un atelier sur mesure. Les travaux relatifs à l'atelier de maintenance et sa nouvelle extension débuteront en février 2019. Au programme : démolition d'une partie de l'atelier existant, déplacement du local de stockage intégré au bâtiment à démolir et construction de l'annexe comprenant deux travées supplémentaires pour Fébus, un bureau, ainsi qu'un dépôt de matériel et d'outillage dédiés aux bus à hydrogène.

La nouvelle configuration de l'atelier doit permettre la création de deux travées supplémentaires, adaptées à la maintenance des nouveaux véhicules Fébus : l'une de huit mètres, avec poste de travail en toiture ainsi qu'un pont roulant, et l'autre de six mètres avec moyen de levage. Côté sécurité des postes de travail et du matériel, le nouveau bâtiment répondra, conformément aux directives ATEX, aux contraintes liées à un environnement de travail en contact direct avec l'hydrogène. Pour cela, une étude complémentaire a été réalisée en collaboration avec l'INERIS."



Extrait du dossier de presse (daté de janvier 2019) sur les aménagements réalisés par le SMTU PPP qui a fait le choix d'un atelier neuf pour accueillir ses bus électriques à hydrogène[48]

[47] www.legifrance.gouv.fr
[48] Dossier de presse : "la station hydrogène Fébus", janvier 2019

- Accessoirement, une installation de chargement de véhicules citernes ou de remplissage de récipients mobiles (rubrique n° 1434), etc.

Comme évoqué plus haut, les rubriques vont dépendre de la nature et des caractéristiques techniques des projets. Les DREAL ont maintenant un interlocuteur régional "hydrogène". Il est donc préconisé de prendre contact avec cet interlocuteur pour définir avec lui la démarche administrative.

Pour ces diverses démarches auprès de la DREAL, relatives aux ICPE, l'exploitant du site (ou autre acteur qui porte ces démarches) pourra être accompagné dans la préparation et le dépôt des dossiers de déclarations ou demandes d'autorisation par les fournisseurs et exploitants de l'infrastructure.

FOCUS SUR LA RÉGLEMENTATION DES ATELIERS DE MAINTENANCE :

La réglementation ICPE spécifique des ateliers de maintenance est la rubrique 2930 :

Ateliers de réparation et d'entretien de véhicules et engins à moteur, y compris les activités de carrosserie et de tôlerie :	
1. Réparation et entretien de véhicules et engins à moteur :	
a) La surface de l'atelier étant supérieure à 5 000 m2	*(A - 1)*
b) La surface de l'atelier étant supérieure à 2 000 m2, mais inférieure ou égale à 5 000 m2	*(D C)*
2. Vernis, peinture, apprêt (application, cuisson, séchage de) sur véhicules et engins à moteur :	
a) Si la quantité maximale de produits susceptible d'être utilisée est supérieure à 100 kg/j	***(A - 1)***
b) Si la quantité maximale de produits susceptible d'être utilisée est supérieure à 10 kg/j ou si la quantité annuelle de solvants contenus dans les produits susceptible d'être utilisée est supérieure à 0,5 t, sans que la quantité maximale de produits susceptible d'être utilisée dépasse 100 kg/j	***(D C)***

Régime de la déclaration : Arrêté du 04/06/04 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées soumises à déclaration sous la rubrique 2930 relative aux ateliers de réparation et d'entretien de véhicules et engins à moteur, y compris les activités de carrosserie et de tôlerie.

A noter : la rubrique 2930 est en cours de révision.
Par ailleurs d'autres rubriques peuvent s'appliquer en fonction des activités de l'atelier :
- Travail mécanique des métaux et alliages (rubrique n° 2560) pour ses machines-outils ;
- Nettoyage – dégraissage de surface quelconque (rubrique n° 2563 ou rubrique n° 2564) pour les machines à laver de pièces, d'essieux ou de roulements ;
- Combustion (rubrique n° 2910) pour les chaudières ;
- Peinture (rubrique n° 2940) pour le tunnel de peinture ;
- Charge d'accumulateur (rubrique n° 2925) pour les zones de chargement des batteries ;
- Compression (rubrique n° 2920) pour les compresseurs d'air (supprimée en octobre 2018) ;
- Emploi de matière abrasive (rubrique n° 2575) pour les grenailleuses ;
- Atelier de travail du bois (rubrique n° 2410) pour la menuiserie ;
- Oxygène (rubrique n° 4725) pour les stockages d'oxygène ;
- Acétylène (rubrique n° 4719) pour les stockages d'acétylène.



5. Quel budget pour un déploiement de bus électriques à hydrogène ?

L'ensemble des coûts présentés dans cette partie sont basés sur des discussions avec des fournisseurs de véhicules et d'infrastructures associées, mais aussi sur des retours d'expérience de projets de déploiements de bus et station hydrogène en Europe ainsi que pour les premiers projets français. Il est cependant à noter que les données présentées seront généralement des plages de valeurs en raison des caractéristiques propres à chaque projet et des contextes locaux qui rendent les coûts particulièrement variables d'un déploiement à un autre. Enfin, ce secteur évoluant et progressant extrêmement rapidement, les analyses présentées ici seront potentiellement à actualiser dans les prochaines années, notamment suite aux retours d'expérience des premiers déploiements sur le territoire national et avec l'augmentation du nombre de projets en France. Les porteurs de projet pourront par conséquent s'appuyer sur les valeurs présentées dans cette partie pour se faire une première idée des budgets nécessaires, mais une analyse fine devra être réalisée en complément, dans le cadre de discussions avec les fournisseurs, et en tenant compte des spécificités de chaque flotte de véhicules.

Un point fondamental concernant les analyses économiques, et qui est commun à l'ensemble des différents volets (véhicules, stations, prix de l'hydrogène, etc.) : des modèles d'affaires compétitifs seront permis par des volumes de déploiements permettant des économies d'échelle, et de façon générale par le développement du marché de l'hydrogène pour la mobilité hydrogène (bus en particulier).

En effet, les constructeurs de bus auront besoin de volumes de commandes conséquents et réguliers pour débloquer des économies d'échelle, dédier des lignes entières de production à l'hydrogène et ainsi proposer des coûts des véhicules compétitifs. La même logique d'effet d'échelle s'applique pour les stations et l'hydrogène. A contrario un déploiement d'un ou deux véhicules n'aura pas de sens au niveau économique (même s'il pourra avoir du sens dans une démarche de test ou démonstration).

5.1. Quels sont les coûts d'investissement et coûts opérationnels des bus électriques à hydrogène ? Comment évolue l'offre ?

Cette section présente des ordres de grandeur disponibles sur le marché actuel et en construction, pour les coûts d'investissement et coûts opérationnels des bus électriques à hydrogène. En plus des réserves mentionnées en introduction de cette section, il sera important de

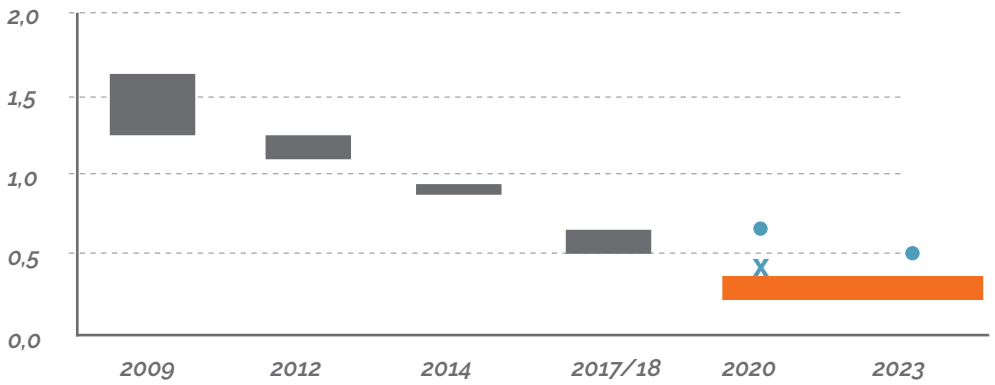
noter que bien évidemment le marché des bus en général a la particularité de présenter des fourchettes de coûts assez larges du fait du niveau moins élevé de standardisation des véhicules. En effet, le marché des bus offre un niveau de personnalisation des véhicules bien plus élevé que pour d'autres véhicules, avec notamment un ensemble d'options différenciantes, bien plus varié que pour le marché des voitures particulières. Par ailleurs, et comme détaillé plus loin dans cette section, ce marché étant aujourd'hui dans sa phase de transition depuis le succès des projets de démonstration vers une phase de commercialisation, les coûts évoluent de façon significative et rapidement.

Coûts d'acquisition des bus électriques à hydrogène et évolution de l'offre

Les coûts d'acquisition des bus électriques à hydrogène sont variables selon les projets, les types de véhicules (bus de longueur 10m, 12m ou bus articulés de 18m par exemple), et les options demandées, etc. mais de façon générale, une tendance claire est actuellement identifiée de réduction des coûts depuis les premiers projets jusqu'à aujourd'hui. En effet, dans le cadre des premiers projets dans les années 2010, avec des véhicules qui étaient des prototypes, les coûts de fabrication étaient très importants d'où des coûts d'acquisition de plus de 1.5 M€ par bus dans certains projets. Depuis, la multiplication du nombre de bus électriques à hydrogène en circulation en Europe, et du nombre de projets de déploiement de nouvelles flottes, ont permis une diminution rapide de ces coûts d'acquisition. L'organisation européenne FCH JU rapportait en juin 2018 (dans le FCH JU Multi Annual Work Plan[49]) une diminution de 72% en moyenne des coûts d'acquisition des bus électriques à hydrogène par rapport au coût moyen en 2012. Cette tendance a notamment été encouragée par les objectifs définis dans le cadre du programme européen JIVE (Joint Initiative for Hydrogen Vehicles across Europe) qui subventionne le déploiement d'environ 300 bus électriques à hydrogène en Europe (dont 5 pour Auxerre, 5 pour Toulouse Hyport et 5 pour Pau en France) et affiche parmi ses objectifs les cibles suivantes[50] :

- Faire progresser la commercialisation des autobus à pile à combustible par le déploiement à grande échelle de véhicules et d'infrastructures afin qu'à la fin du projet, ces véhicules soient commercialement viables et que les exploitants de flottes puissent les déployer sans subvention ;
- Atteindre un prix maximum de 625 000 à 650 000 € pour un autobus à pile à combustible standard grâce à des économies d'échelle (ou prix inférieurs) ;
- Favoriser les processus de commandes groupées, encourager les constructeurs à développer leurs offres d'autobus à pile à combustible ;
- Eprouver les flottes de véhicules en service à grande échelle et encourager leur adoption, en démontrant que les autobus à pile à combustible représentent une alternative viable pour les autorités de transport public, offrant la même flexibilité opérationnelle que les autobus Diesel, mais sans les émissions nocives des tuyaux d'échappement ;
- Déployer les plus grandes stations de recharge en hydrogène d'Europe et les exploiter avec une fiabilité se rapprochant de 100% ;
- Démontrer les voies permettant d'obtenir de l'hydrogène renouvelable à faible coût ;
- Partager les données et les meilleures pratiques à l'appui de l'adoption de la technologie et fournir la preuve que les autobus à pile à combustible conviennent à un déploiement plus large.

Évolution du coût d'acquisition en M€, historique et prospectif, pour un bus électrique à hydrogène standard (12m) en Europe (coût hors subvention)



● *Objectifs du FCH JU Multi Annual Work Plan : 650 k€ en 2020, 500 k€ en 2023*
X *Proposition pour des commandes >100bus en Scandinavie*
▬ *Coûts annoncés par le consortium H2Bus Europe de 375 k€*

[49] *Multi-Annual Work Plan, FCHJU, 2018*
[50] *www.fuelcellbuses.eu/projects/jive*

Toujours dans la révision datée de juin 2018 du "FCH JU Multi Annual Work Plan" publié par le FCH JU, les objectifs affichés de coût d'acquisition pour un bus standard étaient de 625 000 € en 2020 (en supposant que les constructeurs puissent voir une demande de l'ordre de 150 unités), 600 000 € en 2024 (250 unités) et 500 000 € en 2030 (300 unités).

Cependant, comme illustré sur le graphique ci-dessus, et le secteur évoluant très rapidement, les annonces faites par les partenaires du projet H2Bus en 2019 suggèrent des réductions de coûts d'acquisition finalement plus rapides que les objectifs annoncés par le FCH JU en 2018. Le projet H2Bus est porté par des acteurs clés du secteur que sont Everfuel, Wrightbus, Ballard Power Systems, Hexagon Composites, Nel Hydrogen et Ryse Hydrogen, et vise le déploiement de 1000 bus électriques à hydrogène. Parmi ces 1000 véhicules visés, 600 sont répartis sur trois clusters au Danemark, en Lettonie et au Royaume-Uni (200 par pays) et bénéficieront de subventions de la part du CEF (Connecting Europe Facility). Du fait de volumes de l'ordre de centaines d'unités, ce groupement annonce des réductions significatives pour l'ensemble des coûts pour un déploiement de bus électrique à hydrogène, avec des véhicules à 375 000 € (après subvention), un prix de l'hydrogène compris entre 5 et 7 €/kg et un coût de service de 0,30 €/km. Pour plus d'informations : H2Bus

Cela étant, à date de rédaction de ce document, les coûts du groupement H2Bus sont des annonces, les premiers déploiements concrets sont encore à venir, et ces coûts seront permis par des volumes de centaines de véhicules. Par ailleurs, ils sont annoncés pour des pays ayant un historique plus fort que la France dans le secteur des bus électriques à hydrogène. Cependant, Wrightbus est un constructeur historique sur le marché des bus électriques à hydrogène, de même que Ballard, Hexagon, et NEL pour les stations de recharge, etc. Par conséquent, le fait que des acteurs clés du secteur se positionnent sur ces niveaux d'ambition donne une idée des tendances vers lesquelles pourraient tendre l'offre en France si la demande pour des bus électriques à hydrogène se confirme.

Les volumes nécessaires à des baisses de coûts significatives pourraient être atteints en France dans les années à venir, notamment grâce aux travaux de centralisation de la demande réalisés par les centrales d'achat et par l'objectif 1000 bus H2 en France à l'horizon 2024 porté par l'AFHYPAC et son groupe Mobilité Hydrogène France[51] .

Coûts d'exploitation des bus électriques à hydrogène

Comme pour tout type de motorisation, les coûts d'exploitation des bus électriques à hydrogène se décomposent principalement en coûts du carburant (coûts d'exploitation variables) et coûts de maintenance, des garanties, etc. (coûts d'exploitation fixes).

Les coûts énergétiques dépendront des consommations énergétiques des véhicules (décrites en partie 3.4) et du coût de l'hydrogène. Le coût de l'hydrogène sera impacté par un certain nombre de facteurs, dont la demande totale, les modes de fourniture, les contrats passés avec les fournisseurs et/ou exploitants de station, les distances parcourues dans le cas de livraison de l'hydrogène, le coût de l'électricité en cas de production d'hydrogène par électrolyse, etc. En raison de ces différentes caractéristiques, les coûts observés sont variables d'une station à un autre, et sont actuellement pour les premiers déploiements en France de l'ordre de 8 à 14 €/kgH2 à la pompe, et légèrement moins dans certains projets européens d'envergure plus importante notamment. Bien entendu ces coûts peuvent être beaucoup plus élevés pour une expérimentation avec un ou deux bus par exemple, sans aucun effet d'échelle (mais il est aujourd'hui reconnu qu'un projet de dimension si réduite ne permet de toute façon pas de modèle économique optimal). Dans le cadre du projet JIVE dont font partie trois villes françaises et qui prévoit des déploiements de bus entre 2019 et 2022, le FCH JU prévoit que les véhicules devront être alimentés par de l'hydrogène à un prix maximum[52] de 9 €/kgH2.

Par ailleurs, et comme mentionné plus haut, le projet H2Bus Europe a pour objectif d'atteindre un prix de l'hydrogène inférieur[53] à 7 €/kgH2 et tendant vers 5 €/kgH2 (prix qui sera établi plus précisément en fonction des contextes locaux). Bien que ce dernier projet ne s'adresse pas directement au marché français à date, cela montre de façon générale que ces coûts pourront continuer à baisser dans les années à venir, avec notamment l'augmentation des volumes de déploiements et la montée en maturité de la filière, et que ce type d'économies d'échelle est atteignable avec la massification de la demande.

Concernant les coûts fixes dont la maintenance, ceux-ci seront différents en fonction des types de contrat, des fournisseurs, des dimensions des flottes, etc. Ces coûts sont exprimés ici en € par km parcouru par les véhicules. Dans les données de coûts de maintenance rapportées dans le cadre du projet CHIC[54], donc antérieures à 2016, ces coûts variaient entre 0,40 €/km (cas le plus bas avec notamment formation des équipes de l'exploitant à la maintenance) à 1,73 €/km (cas le plus élevé avec entre autres une prise en charge complète par le constructeur), avec une moyenne à 0,96 €/km.

Comme pour le coût d'acquisition, les coûts de maintenance connaissent une baisse conséquente du fait de la dynamique de la filière. Ainsi, l'étude "Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe" de Roland Berger[55] en 2015 prévoyait des coûts

[51] *"Le plan 1000 bus hydrogène rejoint par l'UGAP", AutoActu*
[52] *Annual Work Plan and budget, FCH 2 JU, 2017*
[53] *Site du projet H2Bus*
[54] *Final report, CHIC, 28 février 2017*
[55] *"Fuel Cell Electric Buses – Potential for Sustainable Public Transport in Europe", Roland Berger pour le FCH JU, 2015*

de 0,38 à 0,45 €/km dès 2020. Par ailleurs, le livre blanc[56] "Fuell Cell buses – An attractive value proposition for zero-emission buses in Scandinavia", publié par Ballard, Nel, Hydrogen Valley en 2018 annonce la possibilité d'atteindre 0,35 €/km pour des déploiements supérieurs à 100 bus. Enfin, le constructeur Wrightbus a annoncé des coûts à 0,30 €/km dans le cadre du projet H2Bus Europe[57]. Comme pour les autres postes de coûts, ces divers éléments laissent présager qu'avec des volumes semblables, des baisses de coûts d'opération des bus électriques à hydrogène seront également à attendre en France dans les années à venir. Cela étant, dans les premiers déploiements et selon les cas, des prix supérieurs à 0.40 €/km sont encore observés.
En complément de cela, il est à noter que les véhicules électriques à hydrogène nécessiteront des remplacements de pièces à mi-vie, et les coûts associés dépendront des types de véhicule considérés dans le projet ainsi que des différences contractuelles (service plus ou moins complet, garanties, etc.) ainsi que des différences en matière de garanties des composants.

5.2. Combien coûte l'infrastructure de distribution d'hydrogène ? Eventuellement l'infrastructure de production d'hydrogène ? Comment évolue l'offre ?

Tout d'abord, il est important de signaler (et les constructeurs interrogés dans le cadre de la rédaction de ce document insistent sur ce point) que les coûts seront très variables en fonction de la taille des déploiements, des contextes locaux, des caractéristiques propres à un projet de déploiement, et de la demande en disponibilité des équipements. Ainsi, les postes de coûts présentés dans cette partie ne visent qu'à donner des ordres de grandeur pour guider la réflexion des collectivités qui souhaiteraient se positionner sur le secteur, et qui pourront se rapprocher ensuite des fournisseurs pour obtenir des dimensionnements adaptés aux spécificités du projet.

Par ailleurs, même s'il est intéressant de pouvoir estimer les coûts de l'infrastructure pour la recharge en hydrogène, la donnée la plus pertinente est probablement le coût de revient total, et donc le prix de revient de l'hydrogène "à la pompe" incluant tous les investissements de départ pour l'infrastructure et l'approvisionnement (ou la production) de l'hydrogène. Cette donnée est celle qui est détaillée dans la question précédente. C'est aussi celle qui est utilisée pour l'analyse du coût total de possession en question 5.4.

Toutefois, afin de documenter cette section, des ordres de grandeur de coûts d'investissement (hors génie civil, études, raccordements, etc.) pour des stations hydrogène de différentes échelles ont été demandés aux constructeurs interrogés et qui permettent d'ores et déjà de visualiser des effets d'échelle :
- Pour une station pour 1 ou 2 bus ("starter kit" avec production par électrolyse) : 200 à 400 k€ ;
- Pour une station pour 10 bus : de l'ordre de 3 à 4 M€ avec électrolyseur, et 1,5 à 2,5 M€ sans électrolyseur, mais potentiellement plus si haut niveau de redondance des équipements (stratégie parfois adoptée pour atteindre un niveau de disponibilité très élevé) ;
- Pour une station pour 20 bus : de l'ordre de 4,5 à 5,5 M€ avec électrolyseur, et 3,5 à 4 M€ sans électrolyseur, mais potentiellement plus si haut niveau de redondance des équipements (même point de stratégie pour le niveau de disponibilité) ;
- Pour une station avec électrolyseur pour environ 40-80 bus, l'ordre de grandeur serait de 6 M€, et pour environ 80-100 bus, l'ordre de grandeur serait de 10 M€, etc. avec là aussi la même réserve sur le niveau de redondance des équipements mais dans une moindre mesure, puisque sur des stations de ces ordres de capacité les dimensionnements des équipements offrent un certain niveau de redondance naturelle.

A cela s'ajoute les coûts de génie civil, les études, les raccordements, la mise en service, etc. qui représentent généralement un surcoût de 20% à 30% (ce qui pourra être plus élevé pour les très petites stations, avec des surcoûts pouvant atteindre jusqu'à 100%). Cependant, de même que sur les stations, des économies d'échelle pourront être atteintes (par exemple sur les études qui restent similaires d'une taille de station à une autre), et ainsi ces coûts tendront plutôt vers 20% pour les stations de 20 bus et plus.

En complément de cela, les capacités de stockage et de compression qui seront installées influent grandement sur les coûts finaux. Le dimensionnement de ces capacités dépend des caractéristiques de la station tels que les contraintes de temps de rechargement, le taux de disponibilité souhaité, etc. auxquels il conviendra de prêter attention lors de la définition d'un projet. En effet, plus les contraintes seront élevées, plus les redondances d'équipements seront nécessaires. Il conviendra donc d'identifier le meilleur équilibre, adapté au projet. Pour cela il est conseillé d'engager rapidement dans la définition du projet les discussions avec les fournisseurs et experts du secteur.

En ce qui concerne les coûts opérationnels de la station, ils incluent notamment :
- La consommation énergétique, qui va dépendre des prix des contrats d'électricité souscrits, et pour le cas de production d'hydrogène par électrolyse du rendement des électrolyseurs (de l'ordre de 55 à 60 kWh/kgH2) ;
- La consommation en eau, et pour le cas de production d'hydrogène par électrolyse la consommation des

[56] *"Fuell Cell buses – An attractive value proposition for zero-emission buses in Scandinavia", Ballard, Nel, Hydrogen Valley, 2018*
[57] *Site du projet H2Bus*

électrolyseurs, est généralement entre 15 à 20 l/kgH2 produit ;
- La maintenance des installations, avec un coût annuel généralement de l'ordre de 3 à 5% du coût d'investissement des infrastructures.

Cependant, la filière est en plein développement et de nombreux acteurs se positionnent actuellement (voir partie 4.6), il est donc attendu que cette dynamique bénéficie à la filière et permette d'atteindre des réductions de coûts dans le futur.

Enfin des coûts d'assurance s'ajouteront à cela (y compris pour les bus) et sont généralement un poste de coût non négligeable compte tenu du caractère récent de la filière.

5.3. Combien coûte l'infrastructure du dépôt et des ateliers de maintenance ?

La technologie hydrogène présentant des caractéristiques différentes de celles des autres technologies, les infrastructures des dépôts et des ateliers de maintenance seront à adapter (ou de nouveaux seront à construire) pour qu'ils soient agréés à recevoir des bus électriques à hydrogène. Un certain nombre de mesures réglementaires à respecter sont détaillées dans les parties 4.7 et 4.8.

Les coûts d'adaptation d'ateliers et de construction de nouveaux ateliers dans le cadre du projet CHIC[58] avaient été relevés et avaient montré qu'en fonction des caractéristiques des bus et des ateliers existants (notamment des équipements déjà présents) ces valeurs pouvaient être amenées à varier significativement. Ainsi les coûts associés à l'adaptation d'une travée de l'atelier à l'hydrogène (ou surcoût en cas de construction d'un nouvel atelier/dépôt) variaient pour le projet CHIC entre 30 000 et 230 000 € par travée. A cela s'ajoutait des changements à la structure du dépôt (fenêtres et portes coupe-feux) et l'installation d'équipements permettant l'accès aux toits des bus (où se situent généralement des équipements hydrogène dont les réservoirs) pour les activités de maintenance.

Ces chiffres seront bien entendu à prendre avec précaution et devront être complétés et précisés par des dialogues avec les constructeurs, notamment dans la mesure où ils ne concernaient pas de projets français. Par ailleurs, il a été remarqué qu'en raison du manque de réglementations précises en la matière en France, les acteurs (par exemple ceux délivrant les autorisations, ou encore les assureurs) pouvaient avoir tendance à s'orienter vers les scénarios majorants en termes de sécurité qui impliqueront donc des coûts plus élevés.

D'après les travaux du Groupe de Travail Réglementation de l'AFHYPAC, chaque atelier étant différent, il est difficile d'annoncer un prix exact concernant sa modification. En effet, un point important dans l'adaptation d'un atelier de maintenance hydrogène est de mettre en place les mesures nécessaires pour éviter la formation de poches de gaz explosives au sein de l'atelier si un problème survient. Or de nombreux ateliers assez anciens possèdent des toits à redans partiels (en dent de scie), ce qui peut poser des problèmes d'évacuation de poches de gaz et impliquer des coûts supplémentaires. De plus, ce coût d'adaptation va varier suivant la taille de celui-ci et le nombre de bus qu'il devra accueillir. Malgré tout, pour un atelier accueillant 1 à 5 bus hydrogène et ne nécessitant pas de gros travaux (changement de toiture…), un ordre d'idée de prix cohérent est de 50 000 à 100 000 € pour l'ensemble de la modification de l'atelier.

5.4. Quel est le coût total de possession ?

Une analyse de coût total de possession a été réalisée pour les bus électriques à hydrogène, et a été couplée avec l'analyse de coûts totaux de possession pour d'autres types de motorisation, de façon à pouvoir comparer les coûts des options thermiques (Diesel, Diesel hybride, gaz naturel), et électriques (électriques à batterie et électriques à hydrogène).

Les coûts présentés pour l'hydrogène sont des coûts sans subvention (avant subvention). Cela étant, tous les projets de déploiements de bus électriques à hydrogène actuels font appel à des guichets de subvention, permettant d'améliorer le modèle économique dans cette phase d'amorçage du marché.

Cette analyse prend en compte les coûts d'acquisition des véhicules (dans lesquels sont inclus les coûts éventuels de remplacement de composants à mi-vie des véhicules), les coûts pour le dépôt, le coût d'installation de l'infrastructure de recharge pour les électriques à batterie, en notant qu'à contrario, pour les électriques à hydrogène, les coûts pour l'infrastructure sont inclus dans les coûts de carburant (on considère le coût de l'hydrogène "à la pompe"), et les coûts opérationnels décomposés en coûts de maintenance et coûts de carburant (respectivement Diesel, gaz naturel, électricité ou hydrogène).

Les hypothèses sont basées sur un ensemble de sources dont l'"Étude comparative sur les différentes motorisations de bus" publiée par la CATP (Centrale d'Achat du Transport Public) en 2017, des caractéristiques des coûts observés en France, des retours d'expérience de la part des membres du groupe de travail dédié aux bus électriques à hydrogène de Mobilité Hydrogène France, et des discussions avec plusieurs porteurs de projets.

[58] *Final report, CHIC, 28 février 2017*

L'analyse est faite pour un cas moyenné pour des bus standards (de dimensions 12m), et en se plaçant volontairement dans une hypothèse de longues distances parcourues par les véhicules (60 000 km par an et par bus, avec des services journaliers allant jusqu'à 250 km/jour), c'est-à-dire dans un cas où des longues autonomies sont requises pour les véhicules, cas particulièrement pertinent pour l'hydrogène en comparaison avec les électriques à batterie. En effet, pour effectuer le même service avec des bus électriques à batterie, il faudrait soit mettre en place des recharges en ligne (cas qui n'est pas inclus ici car ne correspond pas au même service rendu en termes de flexibilité de l'usage des véhicules), soit surdimensionner la flotte de véhicules, cas qui est étudié ici.

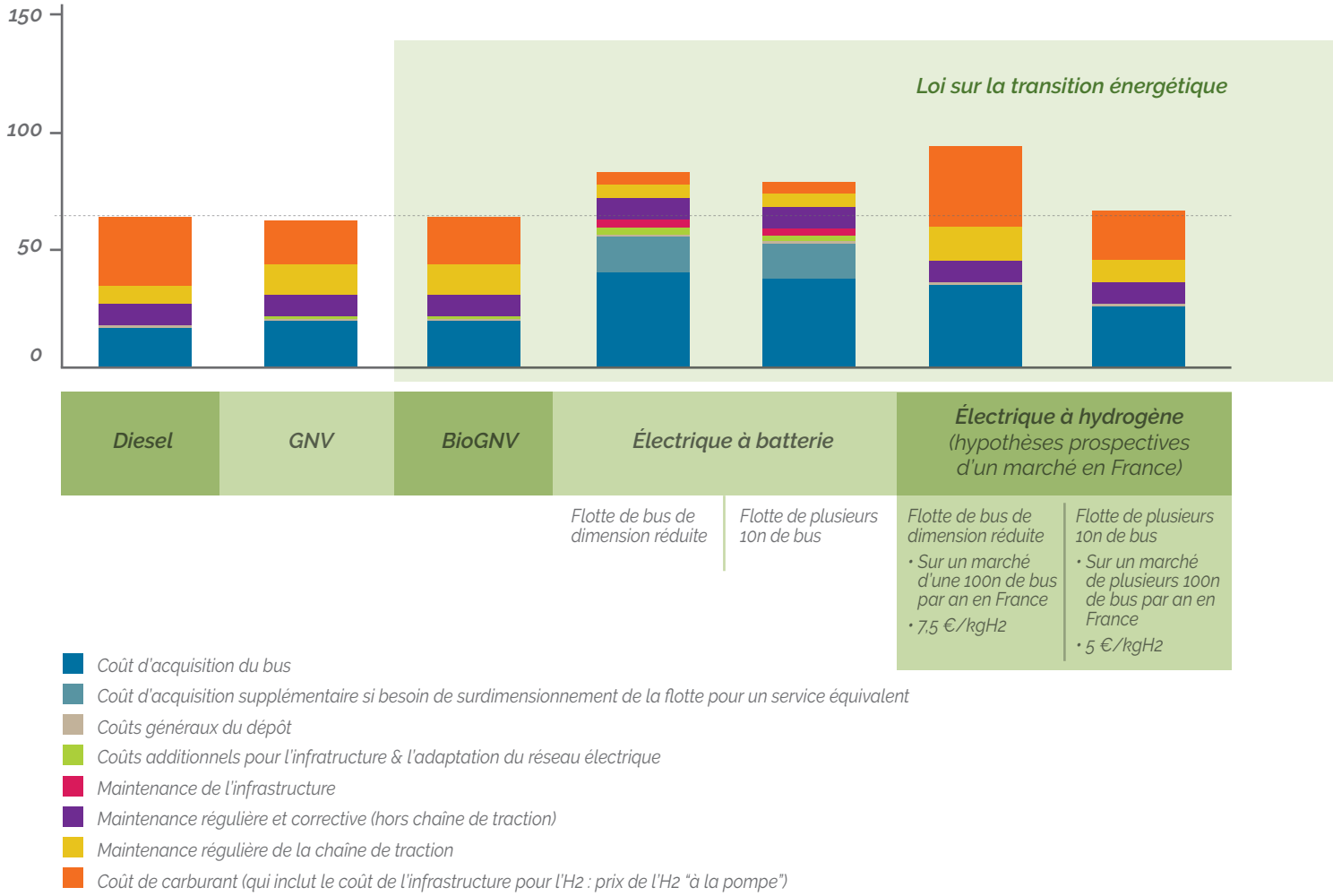
Une analyse de coût total de possession telle que celle présentée ici est faite sur un cas moyenné comme mentionné plus haut. Elle n'est en conséquence pas transposable directement pour un projet donné. Pour un déploiement en particulier, une analyse dédiée sera nécessaire, pour prendre en compte le type précis de véhicules, le tableau de marche, la consommation des véhicules, la taille de la flotte, etc.

Le premier graphe ci-après présente le coût total de possession normalisé sur 15 ans (en k€/bus/an) pour les différentes motorisations, en faisant l'hypothèse prospective d'un marché des bus électriques à hydrogène qui aura continué à se développer et aura bénéficié d'économies d'échelles.

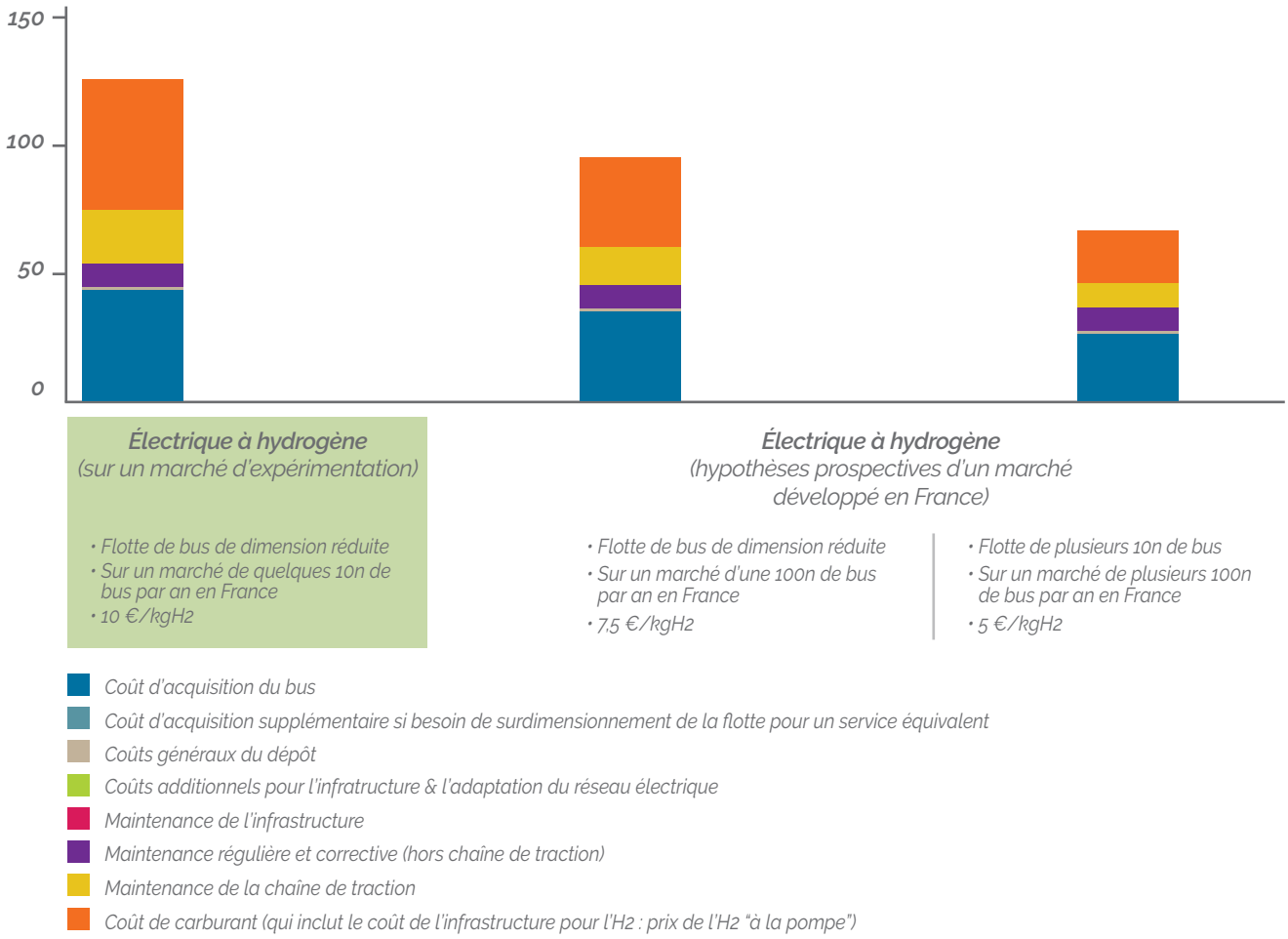
Le deuxième graphe propose un focus sur la courbe de décroissance des prix qui sera nécessaire pour atteindre une situation compétitive avec comme point de départ des coûts équivalents aux projets de démonstration actuels.

Analyse des coûts totaux de possesssion sur 15 ans pour plusieurs types de motorisations

Coût total de possession annualisé (k€/bus/an) en faisant l'hypothèse prospective d'un marché des bus électriques à hydrogène qui aura continué à se développer et aura bénéficié d'économies d'échelles



Coût total de possession annualisé (k€/bus/an) : focus sur la courbe de décroissance des prix qui sera nécessaire pour atteindre une situation compétitive pour l'hydrogène telle que présentée ci-dessus



Concernant l'hydrogène, le premier cas est centré sur des déploiements de dimensions réduites et un marché de niche, donc des coûts d'acquisition (actuels) comme définis par le projet JIVE (650 000 € par bus), un coût de maintenance de la chaine de traction élevé de 0.35 €/km (en plus de la maintenance hors chaine de traction), un coût de l'hydrogène de 10 €/kgH2, et une consommation des véhicules correspondant à l'état de l'art 2017 rapporté par le FCH JU en 2018, de 8.5 kgH2/100km. Pour les deux cas de coûts totaux de possession dégressifs :

- Le premier suppose un premier effet levier et des premières économies d'échelle du fait du développement du marché, avec des coûts d'acquisition de 525 000 € par bus, une consommation des bus de 7.5 kgH2/100km correspondant aux objectifs du FCH JU à 2024, et un coût de l'hydrogène à 7.5 €/kgH2.

- Le deuxième, dans l'esprit des valeurs annoncées dans le cadre du projet H2Bus Europe, suppose des bus à 400 000 € par bus, des coûts de maintenance réduits à 0.15 €/km pour la chaine de traction, une consommation des bus de 7.1 kgH2/100km correspondant aux objectifs du FCH JU à 2030 (et qui pourraient être atteints avant cette date), et un coût de l'hydrogène à 5 €/kgH2. On notera ici le poids important du carburant dans l'analyse de coût total de possession, et donc l'intérêt de développer des sources d'hydrogène de capacités suffisantes pour atteindre des coûts de l'hydrogène compétitifs et améliorant le modèle d'affaire.

Cette analyse montre qu'avec un développement fort de la filière bus électriques à hydrogène, les coûts des bus électriques à hydrogène seraient compétitifs avec ceux des bus électriques à batterie (et proches des coûts des options thermiques). Dans le cadre d'un positionnement pour des options zéro émission au point de roulement, les deux options seraient donc compétitives d'un point de vue économique, facilitant ainsi un choix centré uniquement sur leurs caractéristiques opérationnelles, et permettant de déployer un type de véhicules ou l'autre au cas par cas et selon les cas d'usage les plus appropriés pour chacun.

Cela étant, une limite de la comparaison des coûts totaux de possession est liée aux limites d'une simple

réflexion iso-prix. En effet, les bus électriques à hydrogène apportant des avantages opérationnels non atteignables par les électriques à batterie, dans certains cas ils seront le choix privilégié, même s'ils entraînent un surcoût.

L'option GNV ou bioGNV est quant à elle légèrement moins coûteuse que le Diesel en termes de coûts totaux de possession. Enfin, les électriques à batterie sont là aussi selon les cas plus ou moins coûteux en comparaison avec le Diesel, malgré le surcoût en termes de coûts d'acquisition (incluant le coût des batteries, et le coût de remplacement des batteries à mi-vie des véhicules), surcoût qui est (quasiment ou totalement selon les hypothèses) compensé par le prix bas de l'électricité comme carburant.

5.5. Quid de la fiscalité ?

La filière hydrogène pour la mobilité étant relativement récente, le sujet de la fiscalité est encore peu développé. Cette partie reprend ci-dessous les éléments du guide "Déployer les stations hydrogène dans votre territoire" publiée par l'AFHYPAC et son groupe Mobilité Hydrogène France avec la FNCCR en 2018[59].

Pour l'instant l'hydrogène n'est pas considéré fiscalement comme un carburant et est donc seulement soumis à la TVA ainsi, la Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques (TICPE) ne s'applique pas par exemple.

De plus, la production d'hydrogène par électrolyse est exonérée de Contribution au Service Public de l'Électricité (CSPE), qui représenterait autrement un coût de 22,5 €/MWh[60].

5.6. Des aides pour financer le projet ?

Au niveau européen, de nombreux projets de déploiement de bus électriques à hydrogène ont historiquement été financés par plusieurs organisations européennes. En particulier, le FCH JU a subventionné des projets de démonstration comme le programme CHIC ou 3Emotion (plusieurs dizaines de véhicules chacun), et subventionne actuellement les programmes JIVE et JIVE 2 (plus de 300 véhicules en tout). Du fait des programmes de subventions passés pour des déploiements de démonstration, la tendance pour le financement de déploiements de bus électriques à hydrogène est aujourd'hui plutôt orientée pour favoriser la transition vers la commercialisation à grande échelle. C'est tout l'objectif des projets JIVE (deux phases d'environ 150 véhicules chacune), mais aussi et dans une échelle d'autant plus conséquente du projet H2Bus Europe (600 véhicules) financé par le CEF (Connecting Europe Facility). Il est fort probable que cette tendance au niveau européen se confirme, et que les organisations européennes, si elles attribuent des financements aux déploiements de bus électriques à hydrogène à l'avenir, favorisent les projets de l'ampleur de centaines de véhicules. Ces véhicules pourront être répartis sur plusieurs villes déployant quelques dizaines de véhicules chacune, mais l'enjeu sera la mise en place de démarches coordonnées de sorte à permettre des économies d'échelle tant au niveau des véhicules, que de l'infrastructure de recharge et des prix de l'hydrogène.

Au niveau français, il n'existe actuellement pas de support systématique des déploiements de bus zéro émission, malgré la demande formulée pour des bus à basses émissions dans la Loi de Transition Energétique et effective dès janvier 2020. Une aide au financement au niveau national permettrait de soutenir et accélérer le développement de cette solution pour le transport public zéro émission en France, par exemple comme prévu en Allemagne via le financement de 80% du surcoût entre les bus Diesel et électriques à hydrogène.

En France, le budget de 100 millions d'euros pour le secteur de l'hydrogène en France a été annoncé par le gouvernement en 2018 dans le cadre du Plan National Hydrogène, et ces financements sont attribués via des appels à projet de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Les AAP Mobilité Hydrogène de l'ADEME en 2019 ont permis aux dossiers sélectionnés de bénéficier de subventions allant jusqu'à 30% des coûts d'investissement sur la partie production d'hydrogène (35% dans certains cas), 30% des coûts d'investissement sur la partie distribution de l'hydrogène, et jusqu'à 55% sur la partie véhicules (entre 35% et 55% selon la taille de entreprises). Si pérennisés dans le temps, des budgets tels que celui-ci permettraient de soutenir le développement de cette filière en France.

Enfin, au niveau des régions françaises, on constate actuellement une mobilisation croissante sur le sujet de l'hydrogène, avec notamment les annonces de la Région Occitanie pour 150 M€ de financement pour la filière, ou encore celles de la Région Auvergne-Rhône-Alpes au travers du projet Zero Emission Valley.

En considérant comme exemple le projet de la ville de Pau (étant l'un des premiers projets de déploiements de bus électriques à hydrogène en France), le coût total du projet s'élève à 13 M€ pour les véhicules et la station[61], et plusieurs sources de financement ont été sollicitées. En effet, au niveau européen, le projet est soutenu par le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional) ainsi que le FCH JU via les programmes JIVE et 3Emotion, au niveau français par l'ADEME pour la station et l'atelier de maintenance, mais aussi au niveau de la Région Nouvelle-Aquitaine pour la station, etc. en complément des investissements de la ville de Pau et de la Communauté d'agglomération Pau Béarn Pyrénées.

[59] *Disponible ici*
[60] *"La contribution au service public de l'électricité (CSPE)", portail economie.gouv.fr*
[61] *"Febus – Inauguration de la station hydrogène", septembre 2019*

6. Quel portage du projet ?

6.1. Quelle(s) entité(s) porteuse(s) du projet ?

Plusieurs possibilités de montage juridique s'offrent aux collectivités souhaitant déployer un projet de bus électriques à hydrogène et le choix va dépendre notamment du degré d'implication souhaité, et des volets à porter financièrement et opérationnellement.

En fonction de cela, plusieurs entités pourront se positionner en co-porteurs du projet, collectivités, exploitants de bus, énergéticiens, etc. Il est envisageable que des acteurs créent des sociétés de projet pour faciliter la gestion du projet et contribuer ensemble au portage des investissements.

6.2. Quels modèles de financement pour les différents postes de coûts ?

Investissement et exploitation des bus

En ce qui concerne l'achat des bus les collectivités pourront opérer selon leur mode de fonctionnement classique pour le portage des coûts, c'est-à-dire portés par la collectivité, l'AOM ou encore l'exploitant des véhicules qui serait donc propriétaire des bus et les exploiterait ou concèderait l'exploitation (régie, marché de service, DSP – Délégation de Service Public) à un exploitant tiers.

Dans le cas de Pau et de Lens par exemple, ce sont les syndicats mixtes des transports qui investissent dans les bus et en sont propriétaires, ils confient ensuite l'exploitation à leur exploitants respectifs (STAP et Tadao) par le biais de contrats de DSP.

En parallèle de cela, il pourrait aussi être envisagé d'opter pour des options de leasing (crédit-bail) ou de location (simple, avec seulement les bus, ou de service, avec dans ce cas des éléments de garantie, de maintenance, etc. inclus), et peuvent notamment permettre aux collectivités de procéder à des expérimentations (comme la RATP qui va tester un premier bus électrique à hydrogène Solaris ainsi qu'un bus Caetano en 2020[62]).

Que ce soit pour les véhicules ou pour les stations, plusieurs projets de développement de la mobilité hydrogène en France s'organisent via le montage de sociétés de projet dédiées, comme par exemple Hyport, société regroupant ENGIE et la Région Occitanie pour le déploiement de 5 bus électriques à hydrogène (entre autres).

Investissement et exploitation de la station hydrogène

Pour la partie station hydrogène, plusieurs cas de figure peuvent être envisagés (liste non exhaustive) :

1. L'exploitant des bus / la collectivité / l'AOM / une SPV (Special Purpose Vehicle) est propriétaire de la station et l'exploite directement, donc porte l'ensemble des coûts d'investissement (équipements, études, etc.) et d'exploitation (électricité, eau, etc.). Le fournisseur de la station sera en charge de la conception, réalisation et maintenance des installations via un contrat CREM (conception, réalisation, exploitation et maintenance) ;

2. L'exploitant des bus / la collectivité / l'AOM / une SPV est propriétaire de la station mais ne l'exploite pas, donc porte l'ensemble des coûts d'investissement (conception et réalisation) et a un contrat de vente de carburant avec le fournisseur de la station, qui portera les coûts opérationnels de production et facturera donc l'hydrogène à l'exploitant des bus ;

3. L'exploitant des bus / la collectivité / l'AOM / une SPV n'est pas propriétaire de l'infrastructure et n'est pas en charge de son exploitation, une entité autre porte l'ensemble des coûts d'acquisition et facture l'hydrogène ou un service mensuel à l'exploitant des bus (offre clé en main).

[62] *La RATP va tester un bus à hydrogène du constructeur Solaris, site de la RATP*

7. Les informations à connaitre pour l'acquisition des véhicules et de l'infrastructure associée

Cette partie vise à décrire les informations nécessaires aux dialogues avec les fournisseurs de station et de bus et notamment pour les procédures d'achat. De façon générale, en amont de la publication d'un appel d'offres, il est conseillé de se rapprocher des fournisseurs afin d'obtenir des renseignements complémentaires (en donnant notamment des données sur l'usage visé, voir partie 3.4) et pour préciser les différentes composantes du projet.

En complément des éléments décrits par la suite, il est recommandé d'anticiper autant que possible l'évolutivité souhaitée pour la station, et apporter des réponses aux questions suivantes : est-ce que l'infrastructure doit prévoir de préserver de la place pour de futurs agrandissements ? Combien de véhicules seraient visés dans des phases suivantes du projet ? Etc.

7.1. Quels sont les éléments nécessaires au cahier des charges pour les véhicules, et ateliers de maintenance ?

En ce qui concerne les véhicules, les AOM pourront s'appuyer en grande partie sur des cahiers des charges classiques[63] (par exemple sur les parties pneumatiques, châssis, carrosserie, compartiments passagers et conducteurs, etc. sans lien avec la motorisation), et devront prendre en compte les spécificités pour l'hydrogène. Parmi celles-ci, les caractéristiques qui impactent les parties suivantes des véhicules (liste non exhaustive) seront précisées :

- Moteur électrique ;
- Pile à combustible ;
- Circuit de refroidissement ;
- Batteries auxiliaires de récupération d'énergie / Batteries alimentant le moteur dans le cas de bus à prolongateur d'autonomie d'hydrogène ;
- Armoire électrique et câblage ;
- Réservoirs d'hydrogène ;
- Embout de remplissage ;
- Etc.

Concernant les ateliers de maintenance, que ce soit dans le cas d'une construction d'un nouvel atelier ou d'un réaménagement, une étude dédiée sera réalisée permettant de définir quels seront les équipements nécessaires : détecteurs d'hydrogène, équipements de ventilation, éclairages ATEX (Atmosphère Explosive), fenêtres et portes coupe-feu, équipements en toiture de l'atelier pour l'accès au toit des véhicules lors des opérations de maintenance (notamment accéder aux réservoirs d'hydrogène), etc.

7.2. Quels sont les éléments nécessaires au cahier des charges, pour l'infrastructure ?

Dans le cadre de cette question, on désigne par "infrastructure" l'ensemble des éléments pour la recharge des véhicules, c'est-à-dire :

- La station de distribution (qui comprend plusieurs capacités de stockage de l'hydrogène, des compresseurs, des équipements auxiliaires, etc. et jusqu'aux bornes de distribution) ;

- Eventuellement, les équipements pour la production d'hydrogène sur site (typiquement des électrolyseurs pour produire de l'hydrogène à partir d'électricité par électrolyse de l'eau, mais il existe aussi des projets avec vaporeformage de biomasse sur site par exemple, etc.) ;

- Dans la majorité des cas, les espaces et équipements pour la livraison d'hydrogène (produit hors site donc), soit comme source principale d'approvisionnement, soit en secours en cas de défaillance de la production sur site.

Dans tous les cas, le cahier des charges pour l'infrastructure devra spécifier l'ensemble des caractéristiques d'usage listées dans la partie 3.4 et en particulier :

- Les données sur les véhicules et le tableau de marche :

Celles-ci sont absolument nécessaires pour que le fournisseur de la station puisse dimensionner sa proposition en comprenant comment les bus vont consommer l'hydrogène et donc comment ils vont avoir besoin de se recharger. Il faudra pour cela détailler : le type de bus (taille de bus, consommation, etc. et surtout la quantité d'hydrogène consommée par jour en moyenne et au maximum), le type de ligne (dénivelé, les conditions climatiques, le nombre d'arrêts et de redémarrage, le nombre de passagers etc.), et le mode d'exploitation (horaires, nombre d'arrêts, plages de recharge, etc.) – ces éléments sont repris dans la question 3.4.

En résumé, les fondamentaux de cette description devront répondre aux questions suivantes : Comment re-

[63] *Remarque : de nombreuses collectivités prennent comme référence le "Bus Tender Structure" de l'UITP*

charge-t-on ? Combien de bus recharge-t-on ? En combien de temps ? A la place ou pas ? Quelle est la pression de recharge de bus qui seront déployés ? Si possible, où se situe le point de recharge sur les véhicules ?

- Les données sur le site pour l'infrastructure de recharge :

Informations précises sur les sites d'implantation (station/dépôt de bus) pour que le constructeur puisse prendre en compte les caractéristiques du terrain dans ses dimensionnements : quel est le site prévu pour cette infrastructure ? Où est-il situé précisément ? Quelle localisation par rapport aux lignes de bus ? Quelle organisation des différents éléments sur le site ? Espace disponible pour l'infrastructure de recharge ? Quelles conditions d'accès au site ? De circulation sur le site ? Des éléments sur le site qui sont prévus mais avec une certaine flexibilité si identification d'opportunité d'optimisation de l'espace ou des équipements par le fournisseur ? Quelles caractéristiques des connexions existantes aux réseaux d'eau et d'électricité, notamment leurs plans et capacités respectives ? etc.

- Le niveau de disponibilité attendu des infrastructures de recharge :

C'est un point important (et déjà évoqué dans la question 3.4). En effet, en fonction des demandes en termes de taux de disponibilité des infrastructures de recharge, les constructeurs vont être amenés à prévoir plus ou moins de redondance des équipements ou de pièces de rechange sur le site pour prévenir toute interruption de service. Ainsi plus le taux de disponibilité souhaité est élevé (>98% par exemple) plus les constructeurs vont mettre en place les mesures précédentes ce qui va se traduire par un coût plus élevé des infrastructures. Il convient donc d'essayer de trouver le bon équilibre entre demande en termes de disponibilité des équipements et contraintes budgétaires.

Plus le cahier des charges est complet sur les descriptions pour les véhicules et le site, plus les constructeurs / fournisseurs de stations de production et distribution d'hydrogène seront en mesure de répondre au plus près du besoin exprimé. Toutefois, il sera généralement bien évidemment possible de faire évoluer / d'affiner les dimensionnements et choix au cours de la phase d'études et de construction des infrastructures, et cette remarque s'applique pour la fourniture des véhicules comme des infrastructures (et y compris sur les modes de communication entre véhicules et station) mais aussi des ateliers de maintenance.

Dans le cadre de nombreux entretiens menés pour la rédaction de ce document, une recommandation pour des cahiers de charges "ouverts" a été notée, typiquement laissant la place à des discussions, des ajustements en conséquence, des propositions de variantes, etc., afin que l'offre initiale puisse évoluer et que l'offre finale réponde au mieux au besoin de l'exploitant de la flotte.

Concernant les optimisations entre niveaux de disponibilité et coût des équipements en particulier, il sera utile d'ouvrir ce point à des discussions / ajustements / négociations, qui permettront d'éviter des surdimensionnements d'équipements qui ne seraient pas toujours nécessaires et qui généreraient des surcoûts importants. Par exemple, il sera pertinent de consacrer une réflexion particulière au nombre de jours de stockage utile sur site (exemple : demande d'avoir en permanence l'équivalent de 2 ou 3 jours de consommation d'hydrogène, stocké sur site), car même si l'augmentation de ce nombre de jours de stockage permet d'augmenter la disponibilité d'une station, les équipements de stockage supplémentaires impliquent automatiquement des coûts et un encombrement supplémentaires.

Par ailleurs, il est très souvent utile même dans le cas de production d'hydrogène par électrolyse sur site de prévoir une possibilité de secours par hydrogène livré (tube-trailers) qui permettrait de limiter les besoins de redondance des équipements. Dans ce cas, l'exploitant de la station souscrirait à un contrat avec un fournisseur d'hydrogène qui pourra ravitailler la station en moins de 48h par exemple (ce qui, avec les 2 à 3 jours de stockage utile sur site, suffira généralement à assurer le service continu des véhicules).

Enfin, comme noté plus haut, il est recommandé de fixer le taux de disponibilité sur le service (remplissage des bus effectif ou non) et non sur le fonctionnement de chaque composant individuel de la station (dont la gestion et la mise en place de solutions en cas de défaillance relève du fournisseur / exploitant de la station). Selon cette définition du taux de disponibilité, les constructeurs sont généralement en mesure de proposer des taux allant de 92 à 98% et typiquement supérieurs à 95%.

7.3. Des options contractuelles différentes ?

Cette partie complète ce qui aura été évoqué à la partie 6 sur les différents modèles de financement et de portage du projet en apportant des éléments sur les possibilités contractuelles de gestion des différents volets du projet. Les différentes options impliquent des contraintes différentes en termes de gestion opérationnelle et financière.

Avec le constructeur de bus

Pour l'exploitation des véhicules, il n'y a priori pas de différences notables avec des bus classiques, et d'impact

sur les habitudes des autorités organisatrices de la mobilité et des exploitants de transport.

En dehors de la maintenance du bloc "pile à combustible" (voire des équipements associés, réservoirs, flexibles, etc.) dont la maintenance est assurée par son fabricant, toutes les opérations de maintenance peuvent être réalisées par le personnel d'un atelier de maintenance de bus. Cela nécessitera, bien entendu, des formations auprès du constructeur de bus.

Pour la maintenance, plusieurs options contractuelles peuvent être envisagées selon le degré d'implication que les exploitants souhaitent de la part du constructeur :

>> Un contrat "full maintenance" soit sur une durée longue (5-6 ans) soit sur toute la durée de vie des véhicules (15 ans en moyenne), dans le cadre duquel le constructeur est en charge de toutes les opérations d'entretien courant et de maintenance préventive et curative, incluant notamment les pièces détachées. Un technicien du constructeur vient chez l'exploitant une à deux fois par mois par exemple. C'est l'option la plus coûteuse mais qui permet aussi une gestion opérationnelle simplifiée ;

>> Un contrat "full maintenance temporaire", c'est-à-dire "full maintenance" sur les premières années du projet avec une passation au fur et à mesure des compétences vers l'exploitant des véhicules, puis maintenance corrective par le constructeur seulement sur le matériel hydrogène (pile à combustible, stockage…). Cette formation peut être échelonnée sur plusieurs années avec par exemple une implication complète du constructeur la première année ou les deux premières années, réduite ensuite progressivement sur quelques années impliquant des formations par le constructeur du personnel de l'exploitant ;

>> Un contrat de formation rapide des techniciens de maintenance de l'exploitant, et un accompagnement sur les toutes premières opérations, avec passage de relais rapide à l'exploitant, en gardant une implication du constructeur seulement pour la maintenance corrective sur le matériel hydrogène (pile à combustible, stockage…).

Avec le fournisseur et/ou l'exploitant de la station

Comme évoqué en détail dans la partie 6.2, plusieurs possibilités de portage du volet station sont possibles, il conviendra donc de réfléchir à celle convenant le plus à l'usage souhaité, et pour cela il sera possible de s'appuyer sur les échanges avec les fournisseurs.

7.4. Quels types de procédure pour les appels d'offres ?

Le type de procédure variera bien évidemment en fonction du type d'acheteur, avec par exemple si celui-ci est une entité privée une mise en concurrence, alors que dans le cas d'investissements portés par une collectivité par exemple, l'acquisition du matériel roulant comme des infrastructures associées se fera via une procédure classique d'achat de marchés publics.

Sur les premiers déploiements en France, on constate d'ores et déjà des approches différentes :

>> D'acquisition du matériel par des sociétés privées ;

>> De formations de SPV (sociétés de projets) pour porter les investissements (exemple du projet HyPort à Toulouse qui porte les infrastructures de recharge dédiées) ;

>> D'acquisition du matériel par le secteur public :
- Dans le cas de la ville de Pau, par le SMTU-PPP, celui-ci avait opté pour une procédure de dialogue compétitif[64], incluant la fourniture / maintenance des véhicules et la fourniture / exploitation / maintenance des infrastructures de recharge. Cette procédure relativement peu commune pour des achats de matériel roulant avait permis des échanges approfondis avec les fournisseurs. Son choix avait été orienté par le fait que la collectivité n'avait initialement pas arrêté son choix vers l'électrique à hydrogène mais cherchait plutôt à identifier l'offre basse émission la plus adaptée à sa demande pour son projet de BHNS. Le SMTU-PPP avait échangé avec de multiples acteurs (y compris pour des bus GNV et électriques à batterie) avant de s'orienter vers l'hydrogène.
- Dans le cas du projet de Lens, par le SMTAG, celui-ci a réalisé deux appels d'offres plus classiques, un pour l'achat des bus et un autre pour la station hydrogène.

Concernant la question d'appels d'offres séparés ou combinés pour les parties bus et stations (question qui ne se pose pas toujours, par exemple si les investissements sur la station sont portés par un énergéticien qui revend ensuite l'hydrogène "à la pompe"), les deux approches sont possibles, et peuvent être envisagées :

>> **Dans le cas d'un appel d'offre combiné station et bus** (comme ce qui a été fait par Pau), l'avantage est que les fournisseurs des véhicules et de l'infrastructure communiquent entre eux et définissent leur offre ensemble, anticipant ainsi des problématiques d'interface. En revanche, cette option limite potentiellement le nombre de combinaisons possibles entre fournisseurs d'infrastructure et des véhicules.

[64] *Article L2124-4, Code de la commande publique, Legifrance*

>> **Dans le cas de deux appels d'offres séparés, l'un pour la station et l'autre pour les véhicules,** les négociations peuvent être engagées séparément avec les deux types de fournisseurs, le nombre d'offres reçues sera potentiellement plus important, et le porteur de projet pourra choisir de façon indépendante ses prestataires pour ces deux volets du projet (sans combinaison prédéfinie comme dans le premier cas). En revanche, cette option peut poser des problématiques d'interface, au moment des négociations, et pendant les déploiements. Elle requiert donc la mobilisation d'un ou plusieurs acteurs capables de coordonner l'ensemble. Cette option d'appels d'offres séparés pour la station et les bus est le cas le plus répandu pour l'ensemble des projets européens. Elle est souvent perçue comme une solution naturelle dans la mesure où de façon générale des constructeurs de stations de carburant et des constructeurs de véhicules sont des entités qui peuvent collaborer mais qui par nature correspondent à des marchés différents. Avec deux appels d'offres séparés, il sera nécessaire de s'assurer que les deux calendriers (déploiement de station et véhicules) soient en ligne.

Enfin, comme déjà mentionné plus haut, il est recommandé de privilégier des procédures et cahiers des charges "ouverts", permettant des discussions / évolutions / négociations, afin de pouvoir dialoguer avec les différentes parties prenantes pour pouvoir préciser au mieux le besoin et faciliter ainsi la construction de l'offre la plus adaptée au projet.

7.5. Une offre via des centrales d'achat ?

En France, de nombreuses collectivités font le choix de passer par des centrales d'achat pour leurs acquisitions d'autobus urbains, et on compte deux principales organisations positionnées sur ce segment, la CATP et l'UGAP (Union des Groupements d'Achats Publics), présentées succinctement ci-dessous.

CENTRALE D'ACHAT	DESCRIPTION
CATP	"Association loi 1901, la Centrale d'Achat du Transport Public (CATP) a été créée en 2011 par des élus locaux et des techniciens de collectivités territoriales pour optimiser les achats en matière de transport public. Grâce à cet outil, les collectivités qui le souhaitent peuvent désormais maîtriser les coûts d'achat tout en bénéficiant de la mutualisation de l'expertise juridique et technique. Rapidement, la CATP s'est imposée auprès des collectivités locales et des opérateurs publics comme la solution d'achat en matière de véhicules. Si les bus et cars représentent un volume important de son activité, la CATP propose un catalogue complet : logiciels, applications mobiles, solutions billettiques, appareils de lavage, etc." Pour plus d'informations, cliquez ici
UGAP	"L'Union des groupements d'achats publics (UGAP) est un établissement public industriel et commercial (EPIC) placé sous la tutelle du ministre chargé du de l'Action et des Comptes publics et du ministre chargé de l'Education nationale. Elle est la seule centrale d'achat public "généraliste" en France, qui se distingue par sa politique partenariale, son engagement en faveur des politiques publiques (innovation, PME, Développement Durable) et son fonctionnement "achat pour revente". En effet, celui-ci permet au client d'accéder immédiatement, et sans avoir à conclure un quelconque marché, à plus d'1 million de références actives issues de 2620 marchés actifs. La désignation d'un interlocuteur commercial unique, la possibilité de recourir à un site de commande en ligne, et le règlement, pour son compte, des éventuels litiges permettent aux acheteurs publics de dégager un temps précieux pour satisfaire aux obligations croissantes" Pour plus d'informations, cliquez ici

L'une comme l'autre, ces deux centrales d'achat, positionnées entre autres sur le secteur des autobus urbains, sont aujourd'hui conscientes de la demande grandissante pour des bus électriques à hydrogène en France, étant de plus en plus contactées par des collectivités sur ce sujet.

Par conséquent, entre 2018 et 2019, elles ont toutes deux décidé de se positionner sur ce nouveau marché et de proposer des bus électriques à hydrogène à leur catalogue.

En 2018, la CATP a publié un avis d'appel à la concurrence pour accord-cadre relatif notamment à l'acquisition de véhicules de différentes catégories pour le transport urbain, dont des bus électriques à hydrogène. Cette procédure est aujourd'hui toujours en cours et pourrait être complétée par une offre en option locative.

En 2019, lors de l'édition marseillaise des Journées Hydrogène dans les territoire, de l'AFHYPAC, l'UGAP a annoncé son positionnement sur ce secteur (voir encadré ci-contre)

D'après Jean-Marc Borne, l'initiative aboutira à la publication d'un appel d'offre en 2020. *"La publication [du DCE] est prévue à fin février 2020 pour une mise à disposition des offres en septembre ou octobre 2020. Avec ce calendrier, l'idée est d'assurer une convergence entre la mise en œuvre des infrastructures et l'arrivée des matériels roulants"*.[65]

Ce positionnement des centrales d'achat, extrêmement positif pour le secteur en pleine évolution des bus électriques à hydrogène en France, pourrait permettre des procédures d'achat simplifiées ; mais aussi l'amélioration de la visibilité des constructeurs d'autobus sur la demande pour des bus électriques à hydrogène en France, et donc, par la création de volumes de commandes, le déblocage d'économies d'échelle.

Extrait du communiqué de presse AFHYPAC - Mobilité Hydrogène France - UGAP du 10 juillet 2019[66] :

L'UGAP a annoncé que la centrale d'achat proposerait désormais aux collectivités partenaires de fonctionner en co-prescription sur les bus hydrogène, c'est-à-dire de bâtir ensemble des offres sur ces véhicules. "Notre objectif est de monter des marchés innovants avec des partenaires publics avec qui nous coconstruisons des objectifs communs" explique Jean-Marc Borne, directeur des achats techniques de l'UGAP. Ce mode de fonctionnement a déjà fait ses preuves sur d'autres segments de véhicules, en particulier en 2011-2012 sur les véhicules utilitaires légers électriques (groupement de commande "50 000 véhicules électriques" entre plusieurs grands donneurs publics et privés). Il sera désormais aussi utilisé sur les bus.

[65] *"UGAP, une commande groupée pour 1000 bus à hydrogène d'ici 2024", 11 juillet 2019*
[66] *"Le plan 1000 bus hydrogène franchit un jalon clef grâce à l'UGAP", communiqué de presse AFHYPAC, Mobilité Hydrogène France, UGAP, 10 juillet 2019*



Illustration extraite de la timelapse réalisée par Engie GNVert présentant le déroulement des travaux de la station hydrogène alimentant les bus du SMTAG.

8. Quel suivi pour le déroulement du projet ?

L'objet de cette partie est de donner une vision d'ensemble des étapes clés du déploiement de bus électriques à hydrogène et de l'infrastructure de recharge associée, et de souligner des recommandations issues de retours d'expérience de projets existants (en Europe principalement).

8.1. Pendant la construction / livraison / installation / mise en service ?

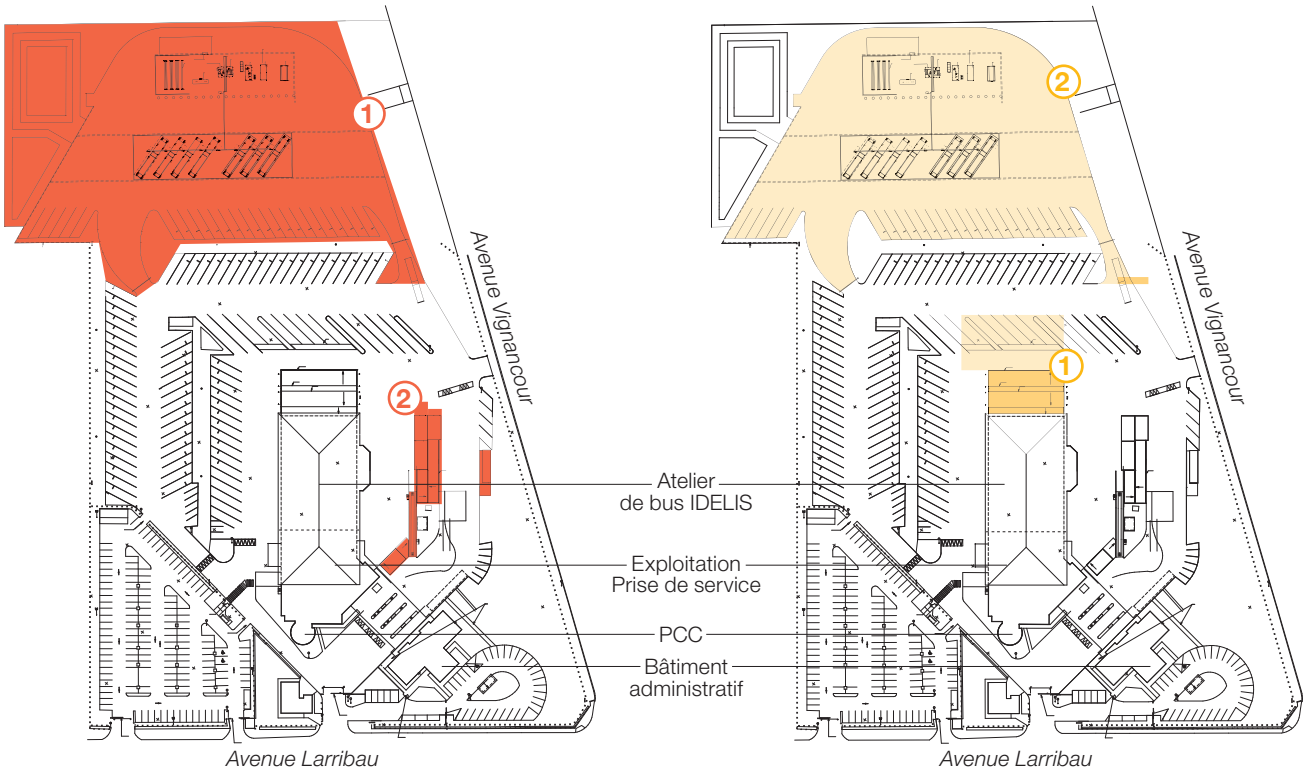
Bien que chaque projet de déploiement de bus électrique à hydrogène ait ses spécificités, les phases de construction / livraison / installation / mise en service incluent typiquement :

1. Une phase de lancement pendant laquelle les spécificités de la station et des bus sont validées ;
2. Des études détaillées (étape décrite plus en détail dans la partie suivante) ;
3. La mise en place des approvisionnements en équipements par les fournisseurs ;
4. La construction des équipements (véhicules et infrastructures recharge associées) ;
5. Les tests de validation en usine (ou FAT pour Factory Acceptance Test) ;
6. L'ensemble des opérations de génie civil (terrassement, etc.) ;
7. La livraison des différents équipements sur site ;
8. L'installation pour la partie station et les raccordements ;
9. Les premiers tests des installations et des véhicules ;
10. Les tests de validation sur site (ou SAT pour Site Acceptance Test) ;
11. Une phase d'améliorations et d'adaptations avant mise en service ;
12. La mise en service.

La phase de lancement (ou "kick-off") et d'échanges est très importante et permet, à l'issue de la procédure d'achat et de la validation des fournisseurs, de procéder aux derniers ajustements relatifs aux spécificités du projet et de prévoir l'organisation précise des différents volets et de leurs interactions (avec notamment un planning prévisionnel fixant la fréquence des points d'avancement / de suivi du projet). A la suite de cela, les travaux pourront débuter avec notamment une phase d'étude d'implantation et de sécurité (détaillée à la partie suivante, 8.2).

Pour la suite, il est recommandé de maintenir une communication fréquente entre les différents acteurs (notamment les constructeurs de bus et station, les entreprises de travaux civils et l'exploitant des bus), et ce sera souvent la collectivité / l'exploitant de bus qui sera en charge de la coordination entre les différentes parties (avec potentiellement un support d'AMO). Les porteurs de projets interrogés pour la rédaction du présent document à ce sujet, le SMT Artois-Gohelle et le SMTU de Pau, conseillent notamment d'inclure au maximum les industriels dans les discussions, d'être réactif, dynamique et de suivre de près l'ensemble des avancées.

Les porteurs de projet consultés recommandent notamment d'anticiper les temps liés aux formations de personnel, ainsi que les temps nécessaires aux tests préalables à la mise en service de la station et des bus, nécessaires pour atteindre le niveau de service visé par la suite. Tous les projets ne réalisent cependant pas les mêmes tests avant mise en service, variables par exemple selon les choix faits pour la recharge des véhicules, les besoins caractéristiques comme la climatisation, etc. Il est à noter que les services et le degré d'accompagnement (et donc également les coûts de



Décembre 2018 > Février 2019

TRAVAUX PRÉPARATOIRES

- ① • Défrichement
- ① • Terrassement
- ① • Création de la plateforme
- ② • Déconstruction de l'atelier de maintenance actuel

Avril > Août 2019

TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL

- ① • Construction du nouvel atelier
- ② • Mise en place des équipements de la station

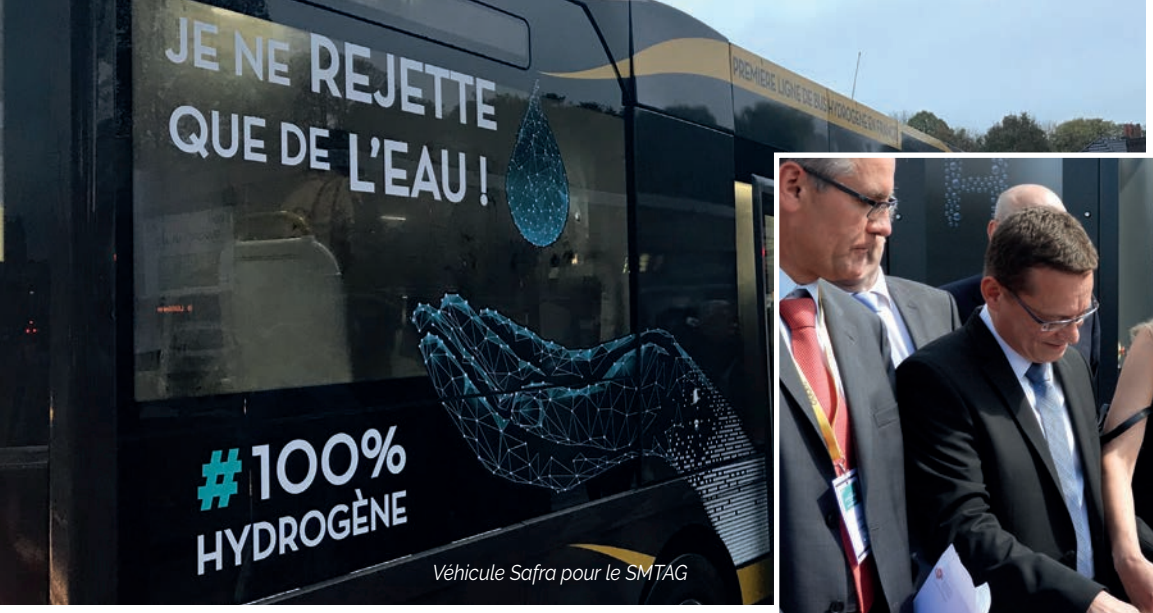
Schéma illustratif des deux grandes phases de travaux pour la station hydrogène qui accueille les bus de la ville de Pau[67]

l'installation et de la mise en service) proposés sont amenés à varier en fonction des offres des prestataires et des choix opérés (ensemble des caractéristiques de la station).

Une recommandation aussi notée lors de la phase de consultation pour la rédaction de ce document est pour un dialogue le plus en amont possible avec les exploitants de bus, afin de comprendre précisément leurs besoins, afin de les rassurer si besoin sur le fonctionnement et les risques associés à l'hydrogène, et pour les accompagner dans une campagne de sensibilisation. En effet, il sera nécessaire au départ de sensibiliser les conducteurs de bus et les syndicats qui, en raison de la nouveauté de la technologie, devront potentiellement être rassurés sur la technologie. La très large majorité des porteurs de projets remarquent cependant que ces acteurs, une fois sensibilisés, sont généralement rapidement convaincus par les performances et la souplesse d'utilisation des véhicules, et font généralement part de leur satisfaction une fois la transition opérée.

A l'approche de la mise en service, l'équipe de gestion du projet sera généralement amenée à avoir des échanges plus rapprochés avec l'ensemble des acteurs, et devra notamment s'assurer que les temps dédiés aux tests des véhicules et de la station de ravitaillement sont suffisants, pour assurer la pleine fonctionnalité dès les premiers jours d'exploitation. Au besoin, le calendrier de mise en service pourra être revu, ou redéfini selon une mise en service par étapes, afin de privilégier l'expérience utilisateur et de réduire au minimum les perturbations du service dans les premiers jours de transport de passagers.

[67] *Dossier de presse du projet Febus, "La station hydrogène", janvier 2019*



Véhicule Safra pour le SMTAG


Coupure symbolique du ruban devant la station hydrogène à Houdain

Enfin, de façon générale, le temps total à consacrer au montage, à la coordination et au suivi du projet peut s'avérer assez conséquent, et il sera donc à anticiper pour une bonne gestion du projet. A titre d'ordres de grandeur, les responsables du déploiement de bus électriques à hydrogène du SMTAG indiquent avoir consacré entre un et deux jours par semaine à leur projet pendant plus d'un an avant l'inauguration, et ceux du SMTU PPP plusieurs temps pleins (en notant que dans le cas de la ville de Pau le projet s'inscrit dans une dynamique plus globale de réaménagement urbain).

8.2. Focus sur les études détaillées : étude d'implantation, étude sécurité, etc. ?

L'implantation de stations hydrogène et le déploiement de bus électriques à hydrogène vont nécessiter un certain nombre d'études préalables à la construction des différents volets du projet. Par le biais de ces études, les porteurs du projet devront notamment vérifier les possibilités d'implantation sur le/les terrains choisis et s'assurer de mettre en place toutes les mesures de sécurité nécessaires au projet.

Les études d'implantation sont dans la plupart des cas comprises dans les prix des constructeurs, mais cela est davantage variable pour les études de sécurité, et dépendra notamment des types d'offre vers lesquelles les collectivités/exploitants de bus vont choisir de s'orienter.

Etudes d'implantation

Ces études sont généralement réalisées par les fournisseurs ou exploitants de la station et visent à analyser les possibilités d'implantation pour des infrastructures à installer.
Les études prendront en compte / permettront de définir :
• Une description technique des équipements ;
• Un schéma tuyauterie et instrumentation ;
• Un dessin de disposition générale ;
• Une évaluation du risque opérationnel ;
• Un plan des zones de danger ;
• Un manuel des équipements ;
• Une déclaration de conformité ;
• Un rapport des tests de validation en usine ;
• Un rapport des tests de validation sur site.

Etudes de sécurité / de danger

Ces études seront généralement réalisées par un organisme spécialisé missionné soit par la collectivité / exploitant de bus / AOM (cas de Pau) soit par les fournisseurs / exploitants de station (potentiellement en sous-traitance). Il est conseillé de se rapprocher au préalable de la DREAL locale (qui sera à solliciter pour la démarche ICPE, voir partie 9.1) pour les études complémentaires à réaliser en fonction des spécificités du projet.

Les études devront permettre d'étudier l'ensemble des aspects sécurité de la station (besoins de ventilation, seuils de limite inférieure d'explosivité, risques d'électricité statique, etc.) et pourront notamment inclure une étude HAZOP (*hazard and operability studies*, ou analyse de risques et de sécurité de fonctionnement), une analyse des différents dispositifs de sécurité mis en place pour prévenir les accidents et réduire leur impact (analyse LOPA, pour *layer of protection analysis*) et une analyse des risques sur l'ensemble du cycle de vie.

Les premiers déploiements de bus électriques à hydrogène en France ayant déjà eu lieu à date d'écriture de ce document, plusieurs approches ont pu être utilisées, et par conséquent des incohérences ont pu être remarquées entre les prescriptions et l'usage. Dans ce cas, ces différences seront résolues par des dialogues avec les bureaux d'études et les organismes publics pour s'assurer que les dispositifs mis en place permettent de couvrir l'ensemble des besoins de sécurité. Comme pour les autres aspects traités dans ce document, une augmentation future de l'utilisation de bus électriques à hydrogène s'accompagnera de l'établissement de consensus sur les approches les plus adaptées, d'une

progressive standardisation des pratiques, et donc d'une simplification de chacune des phases des projets.

8.3. Au long terme, pendant l'exploitation des véhicules et de l'infrastructure associée ?

Il est commun de devoir opérer quelques ajustements lors des premiers mois d'exploitation des bus et de la station. Cependant, dès les projets de démonstration du programme CHIC par exemple, les stations installées ont expérimenté des taux de disponibilité de 97% en moyenne sur l'ensemble de la durée du projet, avec plusieurs stations à 98% et plusieurs stations à 99%[68].

En complément de cela, différents éléments seront à anticiper dans l'exploitation des véhicules et des infrastructures :

- **La passation de compétences** – cela concerne les cas où les fournisseurs ne vont pas assurer les maintenances pendant toute la durée de vie des équipements, et il faudra alors prévoir des temps de formation et d'accompagnement des équipes (détaillé davantage en partie 7.3 pour les options contractuelles, et en partie 11 pour les formations).
- **Les renouvellements de pièces** – en effet, les technologies étant assez récentes, certaines pièces peuvent nécessiter plus de temps à se procurer que dans le cas de motorisations thermiques par exemple. Il peut être envisagé de provisionner certaines pièces à l'avance ; les constructeurs pourront apporter des conseils sur la gestion de ce point.
- **Les contrôles techniques** – les bus électriques à hydrogène sont soumis à des contrôles techniques tous les 6 mois[69] (contre 12 mois pour les bus Diesel) qu'il faut donc anticiper en identifiant notamment au préalable un centre de contrôle habilité (tous ne sont pas forcément déjà familiers avec l'hydrogène).
- **L'évolutivité de la station** – comme évoqué précédemment (début de la partie 7), il est recommandé de réfléchir dès le lancement du projet aux potentielles évolutions de la station, notamment car cela pourra impliquer une gestion opérationnelle différente lors des travaux d'agrandissement. Les discussions seront à engager à ce sujet avec les fournisseurs pour obtenir davantage d'informations et réfléchir à ce qui est réalisable, mais il peut être possible d'organiser les plages horaires des travaux de sorte à perturber le moins possible l'opération des bus (sauf dans la dernière phase de bascule qui est susceptible d'avoir un impact).

9. Quelles sont les autorisations à obtenir ?

L'obtention de permis et d'autorisations est un élément à anticiper afin d'éviter des délais potentiels, en particulier parce que les autorités sont moins familières avec cette technologie qu'avec des technologies plus éprouvées comme le Diesel. Il est donc important de collaborer dès le début du projet avec les différentes autorités pertinentes et au besoin les accompagner dans la compréhension de la technologie, bien que ce dernier point devienne de moins en moins nécessaire du fait des développements actuels.

9.1. Quelles sont les autorisations à obtenir auprès de la DREAL ?

Les infrastructures produisant, stockant ou distribuant de l'hydrogène entrent dans le cadre des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et sont à ce titre soumises à déclaration ou autorisation sous diverses rubriques ICPE, certaines spécifiques à l'hydrogène et d'autres plus génériques et pas forcément en lien avec le choix de carburant. Les porteurs du projet devront se rapprocher de la DREAL de leur région pour réaliser les démarches nécessaires au dépôt des déclarations ou à l'obtention des autorisations liées à différentes rubriques ICPE. L'identification des rubriques ICPE concernées se fera dans le cadre d'échanges avec la DREAL. Une description (non exhaustive) des rubriques concernées est présentée dans la question 4.8.

Le dossier est généralement porté par l'exploitant du site avec un support des prestataires pour la station (qui apportent notamment leur expertise basée sur des dossiers similaires) pour la partie station hydrogène, et devra être validé avant de pouvoir amorcer les différentes phases de construction.

De manière générale, il est conseillé d'entamer le dialogue avec les autorités concernées dès le lancement des projets pour les informer et ainsi faciliter et accélérer les différentes procédures administratives, notamment car certaines réglementations et rubriques peuvent ne pas être directement adaptées aux spécificités du projet ou aussi car la DREAL est susceptible de demander des analyses et études complémentaires avant de valider un dossier. Les démarches en lien avec les déclarations et/ou autorisations doivent être prises en compte dans le planning du projet : quelques mois pour une déclaration, et plutôt de l'ordre d'un an pour une autorisation.

[68] *Final report, CHIC, 28 février 2017*
[69] *Décision n° 18.00.905.001.1 du 28 juin 2018 autorisant la délivrance de certificats d'examen de type d'ensembles de mesurage de masse d'hydrogène pour véhicules, DGE*

9.2. Est-il nécessaire de déposer un permis de construire ?

Un permis de construire est nécessaire pour tous les travaux civils de la partie station et doit donc être demandé par le propriétaire du terrain, en prenant en compte les délais inhérents (généralement de l'ordre de 3 à 6 mois mais pouvant aller jusqu'à 12 mois dans certains cas) pour ne pas retarder le projet.

Le dossier administratif se composera principalement :
- De renseignements administratifs sur la société appliquant ;
- D'un ensemble de plans ;
- D'un ensemble d'éléments graphiques permettant de juger de l'impact du projet sur l'environnement extérieur ;
- D'une description succincte du projet.

Il est à noter que pour faire une demande de permis de construire il sera nécessaire de fournir un reçu montrant qu'une déclaration ou autorisation ICPE (voir ci-dessus) a été demandée. Le reste de la démarche pourra se réaliser en parallèle des autres, mais la validation finale ne pourra être obtenue avant la validation de la DREAL.

10. Qu'en est-il de la sécurité ?

10.1. Quels sont les risques liés à l'hydrogène ?

L'hydrogène comme tout gaz ou liquide combustible présente des risques liés à ses propriétés physico-chimiques[70] et est caractérisé par plusieurs aspects facilitant ou complexifiant la maîtrise des risques, notamment la faible taille de la molécule augmentant la propension aux fuites, une probabilité d'inflammation élevée, une flamme très peu radiative limitant la propagation du feu, etc.

Cependant, comme pour toutes les technologies, ce risque est encadré, et les nombreuses exigences en termes d'homologation et de certification des équipements et des véhicules (détaillées dans les parties suivantes) ont été mises en place pour assurer leur sécurité. Par conséquent, déployer des véhicules électriques à hydrogène doit se faire avec un encadrement des risques tout comme pour des véhicules d'autres types de motorisation, gaz notamment.

En tant que document de référence sur les risques liés à l'hydrogène, l'ADEME a publié en 2015 une étude détaillée sur le sujet dans son "Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène", disponible ici

10.2. Comment est garantie la sécurité des véhicules ?

La sécurité des véhicules est garantie par le constructeur des véhicules qui fait homologuer et certifier (normes CE) ses véhicules auprès des services publics concernés.

La procédure d'homologation suivie pour un bus électrique à hydrogène est la même que pour les autres types de bus et fait notamment intervenir trois parties prenantes, à savoir la DREAL de la région dans laquelle les bus sont construits, l'UTAC (Union Technique de l'Automobile du motocycle et du Cycle) et le CNRV (Centre National de Réception des Véhicules).

En France, lors de son homologation un bus doit suivre un ensemble d'une trentaine de réglementations (portant sur un ensemble de sujets allant du règlement des freinages à la compatibilité électromagnétique) et celles-ci incluent un règlement supplémentaire pour l'hydrogène selon la directive européenne 79/2009[71], qui porte spécifiquement sur la sécurité de l'hydrogène. Pour cette dernière partie, c'est notamment l'UTAC qui intervient et vérifie la stratégie de gestion des risques (capteurs, détection d'incendies, vannes, etc.), le circuit d'hydrogène (haute et basse pression), le fonctionnement de la pile à combustible, et du bus en général.

En complément de cela, les constructeurs sont généralement en charge de la maintenance des véhicules ou forment les mainteneurs de sorte que toutes les procédures de sécurité soient respectées et les garanties maintenues. De plus, les véhicules électriques à hydrogène sont soumis à des contrôles techniques semestriels (tout comme pour des véhicules thermiques classiques) qui sont réalisés par des centres agréés et contribuent donc à la garantie de sécurité des véhicules.

Le personnel devra-t-il porter des vêtements spécifiques ? Le port d'EPI spécifiques va dépendre de la nature des opérations réalisées et du risque ATEX identifié. Le port de vêtements spécifiques et d'outillage spécifique sera donc plutôt l'exception dans le cycle de maintenance habituel du véhicule.

10.3. Comment est garantie la sécurité des infrastructures de recharge ?

La sécurité des infrastructures hydrogène est elle aussi garantie par le constructeur qui fait homologuer et certifier (normes CE) la station auprès des services publics concernés (de même que pour les bus, ce sont des procédures classiques avec quelques spécificités liées à l'hydrogène qui font que la sécurité de l'ensemble de la station est garantie), et s'approvisionne auprès d'équipementiers certifiés.

Cela est complété par :

>> Les dialogues avec la DREAL, qui délivre les autorisations nécessaires à l'exploitation de la station après une étude approfondie de l'ensemble des caractéristiques du projet (détaillé davantage dans la partie 9.1) ;

[70] *"Guide d'information sur les risques et les mesures de sécurité liés à la production décentralisée d'hydrogène", ADEME, juin 2015,*
[71] *"REGULATION (EC) NO 79/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL", Journal official de l'Union européenne*

>> Les échanges avec le SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours) pour déterminer l'ensemble des mesures à prendre pour garantir la sécurité du site (détaillé d'avantage dans la partie 11.5).

10.4. Est-ce qu'il y a déjà eu des accidents et comment les éviter ?

Comme pour tout secteur, celui de la mobilité hydrogène n'est pas à l'abri d'accidents qui peuvent toucher aussi bien les véhicules (exemple : accidents de la route) que les stations de recharge en hydrogène, malgré l'ensemble des certifications et homologations, et les précautions prises. Ces événements sont bien entendu rares et les constructeurs mettent de nombreuses mesures en place pour parer au plus grand nombre d'éventualités.

On notera par ailleurs que sur des stations de ravitaillement en Diesel et essence, des accidents existent et surviennent malheureusement aussi de façon régulière, tout comme sur des stations GNV par exemple. De façon générale, le risque zéro n'existe pas, d'où l'importance de mettre en place toutes les mesures de sécurité nécessaires, et toutes les mesures adéquates en cas d'accident, pour l'intervention des services d'incendie et de secours en particulier.

A date, sur les stations hydrogène en exploitation, un accident est survenu en Norvège (qui n'a fait aucun blessé et n'a pas causé de dommages sur le long terme). Lors de cet accident, il s'est avéré qu'une erreur de montage sur un composant avait causé une fuite d'hydrogène et un incendie, qui a été très rapidement maîtrisé. Cet accident a illustré le fait que comme toute technologie l'hydrogène n'est pas infaillible, mais il a aussi démontré la réactivité des acteurs de l'hydrogène dans ce type de situation, et leur capacité à mettre en place rapidement des mesures de sécurité et de gestion de l'évènement. En effet, dès le signalement de l'accident, l'exploitant de la station a directement procédé à la suspension des activités de l'ensemble des stations du territoire pour prévenir d'autres problématiques similaires et a lancé une commission d'enquête pour identifier la cause de l'accident, enquête dont les résultats pouvaient être suivis en direct grâce à une plateforme Q&A dédiée[72].

Les acteurs de l'hydrogène pourront s'appuyer sur cet antécédent comme sur d'autres expériences, et sur la démarche transparente menée par le constructeur dans le cadre de cet accident, pour renforcer encore la sécurité de leurs processus et de leurs installations.

11. Quels sont les besoins en termes de formation ?

Comme pour n'importe quelle nouvelle technologie, l'introduction de bus électriques à hydrogène sur un territoire va nécessiter un certain degré de formation et de familiarisation à la technologie.

Les retours d'expérience de projets opérationnels en Europe conduisent en particulier aux recommandations suivantes[73] :

- Les programmes de formation doivent avoir lieu avant le début de livraison des autobus et doivent être ajustés au contexte local, en prenant en compte les exigences régionales en matière de sécurité, de conception et de fonctionnalité du matériel (bus et station).
- La formation doit être à la fois pratique et théorique - de nombreuses villes / exploitants ayant de l'expérience dans ce domaine ont signalé que la formation à bord de l'autobus lui-même permet de mieux impliquer les employés et d'accroître l'efficacité.
- Les manuels de formation et les instructions écrites doivent être fournis en même temps que toute instruction pratique ou orale. Il s'agit notamment de fiches de données de sécurité et d'informations sur les procédures d'urgence.
- Des formations de remise à niveau devraient avoir lieu régulièrement (par exemple tous les un ou deux ans).
- Lors de l'introduction d'une nouvelle technologie, il est intéressant pour l'exploitant de réaliser des activités de sensibilisation au sein de son organisation pour maintenir un bon niveau de communication et de connaissance et ainsi un environnement positif pour l'introduction de la nouvelle technologie. Il convient d'accorder une attention particulière à la possibilité d'attitudes "alarmistes" concernant les dangers potentiels de l'hydrogène et des bus électrique à hydrogène. Les responsables du programme doivent être conscients des préoccupations potentielles (par exemple en ce qui concerne les composants haute tension et l'hydrogène sous pression) et fournir des informations claires et factuelles.
- La gestion des attentes est également un élément important de la formation et du partage de l'information. Les autobus à pile à combustible n'ont pas le même niveau de maturité technique que les autobus Diesel et les difficultés potentielles sont à expliquer en anticipation, surtout aux premiers stades du déploiement.

Les modules de formation proposés par les constructeurs des véhicules et fournisseurs des infrastructures de recharge associées doivent être conçus de façon adaptée aux besoins exprimés par les exploitants. Si par exemple la maintenance des véhicules est entièrement à la charge du constructeur, alors le personnel de l'exploitant n'aura que des formations allégées, alors que dans le cadre d'une prise en charge d'une partie de la maintenance directement par l'exploitant, la formation devra être plus complète et spécialisée.

[72] *"Status and Q&A regarding the Kjørbo incident", site de Nel*
[73] *"Operators' guide to fuel cell bus deployment", FCHJU, 2018*

11.1. Pour les conducteurs de bus ?

Les bus électriques à hydrogène sont équipés de signaux et d'alarmes qui donnent des indications au conducteur sur l'état du bus (ex. éteindre ou redémarrer le bus). Les conducteurs doivent être formés pour reconnaitre ces signaux et y répondre en conséquence, mais aussi pour se familiariser avec les caractéristiques de conduite des bus électriques à hydrogène, et les différences avec un bus Diesel notamment. Enfin, les conducteurs sont formés pour pouvoir donner des explications sur la technologie aux passagers intéressés. De plus, le cas échéant, les conducteurs peuvent également être formés pour assurer la recharge des véhicules, si cette opération est dans leur mission.

Ces formations sont principalement offertes par les fabricants de bus ou par un spécialiste (pour la partie ravitaillement c'est en revanche plutôt l'énergéticien fournissant la station qui peut proposer des formations). Dans certains projets, un ou deux conducteurs formés formeront à leur tour les autres conducteurs. Les formations pourront être reprogrammées à intervalles réguliers (tous les ans ou tous les deux ans par exemple) afin de maintenir le niveau de formation et un niveau adapté de connaissance de la technologie.

Ces formations sont particulièrement importantes pour former aux différences technologiques mais aussi pour informer et rassurer sur les risques liés à cette "nouvelle" technologie. Il a d'ailleurs été observé dans différents projets de déploiement européens qu'au départ certains conducteurs pouvaient exprimer des réticences envers la transition vers l'hydrogène, et que par la suite, dans la très grande majorité des cas ils étaient rapidement convaincus et séduits par le confort opérationnel des véhicules.

A titre d'exemple, le retour d'expérience d'un conducteur milanais avait été rapporté dans le cadre du projet CHIC[74] : *"Les autobus à pile à combustible sont d'excellents véhicules qui offrent un confort de conduite sans bruit ni vibrations. [...] Les conducteurs apprécient ces bus pour leur visibilité et leur maniabilité. Il a été très facile d'apprendre à conduire des autobus à pile à combustible et d'apprendre aux conducteurs comment les utiliser. Les conducteurs sont impressionnés par l'enthousiasme des passagers, accordent toujours une attention particulière au service, et sont heureux de répondre aux questions des utilisateurs".*

11.2. Pour le personnel en charge de la maintenance des véhicules ?

Pour des raisons de sécurité et du fait de la nature encore récente de la technologie hydrogène, les techniciens qui travaillent sur des équipements hydrogène ou des composants haute tension ou hybride nécessitent une formation particulière. L'objectif des formations est donc d'acquérir des connaissances précises sur les systèmes hydrogène et notamment sur les :

- Technologies bus électrique à hydrogène et pile à combustible ;
- Caractéristiques de sécurité ;
- Notions de maintenance liées aux composants haute-tension ;
- Systèmes à gaz haute-pression.

11.3. Pour le personnel en charge de la maintenance des infrastructures de recharge associées ?

Les énergéticiens proposent généralement plusieurs modules de formation couvrant l'ensemble des aspects fonctionnement, sécurité, maintenance et dépannage.

Cela consiste notamment en une présentation de la technologie hydrogène, des différents équipements de la station et aux risques associés, du fonctionnement général d'une station hydrogène et des caractéristiques particulières de celle installée, de l'exploitation de la station (mise en service, surveillance, alarmes, interface usager, etc.) et de la maintenance. L'ensemble de ces modules théoriques est généralement complété par des exercices pratiques sur site.

11.4. Pour les usagers ?

Il n'y a évidemment pas de formations nécessaires pour les usagers. Cependant il est recommandé de communiquer auprès des usagers pour vulgariser les sujets de l'hydrogène en les sensibilisant à cette nouvelle technologie. Cela peut se réaliser notamment au travers de campagnes d'informations, de réunions de présentation ou encore de démonstrations de véhicules électriques à hydrogène.

Dans le cadre des premiers projets de déploiements de bus électriques à hydrogène en France, une attention particulière est accordée à la communication auprès des usagers, via la presse ou les réseaux sociaux par exemple. Les porteurs du projet de la ville de Pau par exemple, et parce que leur projet s'inscrit dans un projet global de revisite du paysage urbain et du service de transports publics, ont mis en place des pages dédiées sur leur site internet sur lequel les habitants peuvent trouver l'ensemble des publications sur le sujet, des informations sur le projet, et un suivi de l'avancement des travaux.

11.5. Pour les services d'incendie et de secours (SDIS) ?

Réglementairement, il n'y a pas de validation à obtenir auprès du SDIS. Néanmoins, pour les procédures d'autorisation, la DREAL va vérifier auprès du SDIS la présence, à proximité du site ou sur le site, de bouches à incendie en nombre suffisant.

De façon générale, il est recommandé de communiquer auprès du SDIS sur le projet le plus tôt possible et de vérifier qu'ils pourront intervenir dans de bonnes conditions. Cette approche permettra au SDIS de se familiariser rapidement avec le projet et avec les protocoles spécifiques à l'hydrogène.

Le SDIS pourra par exemple étudier les caractéristiques de la station et éventuellement formuler des recommandations supplémentaires à prendre en compte (largeurs des voies d'accès à la station, voie permettant aux services de secours de faire le tour complet du site, volumes d'eau nécessaires sur le site, détecteurs, zones ATEX, etc.). Concernant la partie véhicules, les constructeurs pourront informer le SDIS sur leur fonctionnement de sorte à faciliter leur intervention en cas d'accident.

[74] *Final Brochure, CHIC, novembre 2017*

L'amélioration de la qualité de l'air dans les agglomérations est un enjeu majeur auquel doivent faire face les collectivités. Les législations européennes, nationales et locales fixent des objectifs de renouvellement des flottes de bus et d'autocars avec des véhicules faibles émissions. Les bus électriques à hydrogène répondent à ces objectifs en offrant une solution zéro émission avec les facilités d'usage d'un véhicule thermique en termes d'autonomie et de temps de recharge.

Les déploiements sont en cours en Europe et en France avec une nette accélération du nombre de ces véhicules. Les projets pionniers décrits dans ce guide livrent leurs premiers retours d'expérience et sont rejoints par d'autres déploiements ambitieux. L'offre se construit notamment avec les centrales d'achat ce qui va permettre de donner aux constructeurs la visibilité nécessaire pour augmenter les volumes de productions et déclencher des économies d'échelle.

Enfin, déployer une flotte de bus hydrogène au sein d'un territoire permet d'initier une réflexion sur la mise en place d'écosystèmes complets intégrant une production locale d'hydrogène permettant ainsi de valoriser les énergies du territoire au service de plusieurs usages.

A la lecture de ce guide que nous avons voulu pratique, nous espérons que vous aurez trouvé les informations utiles sur les différentes étapes de la réalisation d'un projet de déploiement de bus électriques à hydrogène illustrées par des expériences concrètes.

Les bus électriques à hydrogène sont une formidable opportunité d'améliorer la qualité de l'air dans nos villes et métropoles. Il est aujourd'hui possible pour les collectivités de s'engager de façon éclairée dans des projets de déploiement pour faire face aux enjeux de décarbonation des transports et ainsi participer ainsi à la concrétisation de l'objectif "1000 bus à hydrogène en France à l'horizon 2024" !

Valérie Bouillon-Delporte,
Coordinatrice du groupe Bus de Mobilité Hydrogène France,
Vice-Présidente de l'AFHYPAC

AFHYPAC

Association française
pour l'hydrogène et
les piles à combustible

www.afhypac.org

Contact
info@afhypac.org
28, rue Saint-Dominique
75007 Paris
T. +33 (0)1 44 11 10 04

© Afhypac - Création : Alphy Création -Crédits Photos DR - Istock

STATION BUS ÉLECTRIQUES À HYDROGÈNE

