
Les bus à moteur électrique alimenté par pile à combustible à hydrogène. Etude de la mise en place d'un réseau sur la ville de Liège et en Wallonie.

Auteur : Rousseau, Isabelle

Promoteur(s) : Pironet, Thierry

Faculté : HEC-Ecole de gestion de l'Université de Liège

Diplôme : Master en sciences de gestion (Horaire décalé)

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/4447>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



**LES BUS À MOTEUR ÉLECTRIQUE
ALIMENTÉ PAR PILE À COMBUSTIBLE À HYDROGÈNE**

**ETUDE DE LA MISE EN PLACE D'UN RÉSEAU
SUR LA VILLE DE LIÈGE ET EN WALLONIE**

Promoteur :

Thierry PIRONET

Lecteurs :

Joseph SMITZ

Jean-Louis COUDRILLIER

Travail de fin d'études présenté par

Isabelle ROUSSEAU

en vue de l'obtention du diplôme de

Master en Sciences de gestion

Option M60 Horaire décalé

Année académique 2017 / 2018



**LES BUS À MOTEUR ÉLECTRIQUE
ALIMENTÉ PAR PILE À COMBUSTIBLE À HYDROGÈNE**

**ETUDE DE LA MISE EN PLACE D'UN RÉSEAU
SUR LA VILLE DE LIÈGE ET EN WALLONIE**

Promoteur :

Thierry PIRONET

Lecteurs :

Joseph SMITZ

Jean-Louis COUDRILLIER

Travail de fin d'études présenté par

Isabelle ROUSSEAU

en vue de l'obtention du diplôme de

Master en Sciences de gestion

Option M60 Horaire décalé

Année académique 2017 / 2018

RESUME

Dans notre société actuelle, la question d'un avenir propre est un enjeu majeur. Développer un avenir responsable est une problématique importante de nos décennies. Un modèle d'avenir sont les moteurs électriques alimentés par pile à combustible à hydrogène.

Le sujet est vaste : les moteurs à piles à combustible peuvent être appliqués à tous les moyens de transport. Plutôt que d'aborder le développement des voitures dont la production et la commercialisation a déjà commencé, ce travail aborde le développement des transports en commun. Changer le réseau de transports en commun en un réseau équipé de moteurs non polluants – sans émission directe – représenterait une opportunité à ne pas manquer en cette période de transition énergétique. De nombreux projets ont été mis sur pied depuis des années aux échelles européenne et mondiale pour promouvoir cette technologie.

Quelle est la situation de la ville de Liège ? La ville a déjà envisagé des modifications de son réseau de transport et la diminution des voitures en centre-ville avec l'implantation du tram.

Comment se déroulerait la mise en place d'un réseau de bus à moteur électrique alimenté par pile à combustible à hydrogène dans notre ville de Liège et en Wallonie ?

La problématique est abordée sur deux plans :

1. une étude comparative des coûts des bus pour chaque mode de propulsion : diesel, hybride et pile à combustible (FC bus) ;
2. une étude de la chaîne logistique ou supply chain, de la production de l'hydrogène à la distribution dans des stations-services.

ABSTRACT

Today, finding the way to a cleaner future is one of the main goals of our society. The key question is the development of a bright future, environmentally friendly. There is a solution with the fuel cell electric vehicles. They would allow us to change driving propulsions with hydrocarbon fuels onto zero-emission motors. This is the future.

Car companies have already started the production of small cars. However, rather than writing about these, it is more interesting to think of the possibilities it would give with public transport. Make a change and try to obtain a zero-emission public transport network is a wonderful challenge. No one wants to miss it. The time is now because the Earth is facing climate change and countries, the energy transition. Lots of European and international projects have already promoted the fuel cell technology.

What are the plans of our city of Liège ? The city has decided to change transport networks with the installation of a tramway. The authorities are willing to decrease the numbers of cars downtown.

How would Liège and Wallonia create a fuel cell electric buses network ? Which steps do they need to follow ? This work studies two major aspects :

1. the costs - in comparison with diesel and hybrid motor propulsions ;
2. the supply chain, from the production of hydrogen to the distribution and gas stations

SOMMAIRE

INTRODUCTION

L'HYDROGENE

1 L'hydrogène et ses modes de production

1.1 L'hydrogène, vecteur énergétique

 1.1.1 Les sources d'hydrogène

 1.1.2 Les sources d'énergie

1.2 Les modes de production

 1.2.1 Le vaporeformage (steam methan reforming ou SMR)

 1.2.2 L'électrolyse de l'eau

 1.2.3 L'oxydation partielle

 1.2.4 Les autres procédés en voie de développement

1.3 Les coûts de production

 1.3.1 Le vaporeformage (steam methan reforming ou SMR)

 1.3.2 L'électrolyse de l'eau

2 Les propriétés du gaz

2.1 L'énergie du futur

 2.1.1 La combustion non émettrice en CO₂

 2.1.2 La densité énergétique

2.2 Les risques d'inflammabilité et de détonation

 2.2.1 Une inflammabilité extrême...

 2.2.2 ... mais un gaz très léger

2.3 Synthèse

 2.3.1 Les qualités de l'hydrogène

 2.3.2 Les défauts de l'hydrogène

LES TRANSPORTS EN COMMUN ET LES NOUVELLES TECHNOLOGIES

1 La situation des transports en commun en Belgique

- 1.1 Une compétence fédérée
- 1.2 Les chiffres du groupe TEC
- 1.3 Les missions du TEC

2 Les bus et le carburant diesel

- 2.1 Vers la fin de la propulsion au diesel
 - 2.1.1 Les zones de basses émissions
 - 2.1.2 Les normes Euro
 - 2.1.3 L'interdiction pure et simple
- 2.2 Les alternatives choisies aux bus diesel
 - 2.2.1 La Région flamande
 - 2.2.2 La Région Bruxelles-Capitale
 - 2.2.3 La Région wallonne

3 Les FC Bus

- 3.1 La pile à combustible
- 3.2 Le fonctionnement des FC bus
- 3.3 Les avantages et les inconvénients
- 3.4 Les projets de développement
 - 3.4.1 L'Union européenne
 - 3.4.2 Les projets internationaux

ETUDE DE LA MISE EN APPLICATION D'UN RESEAU DE FC BUS EN WALLONIE ET A LIEGE – PARTIE I : LE COÛT D'UN FC BUS

1 Le coût total de possession

2 Les composantes de coût d'un bus

- 2.1 Le coût d'acquisition : achat, financement et dépréciation
 - 2.1.1 Le coût d'achat et les frais de financement

- 2.1.2 L'achat de bus hybrides par la Région wallonne
 - 2.1.3 La technologie hybride comparée avec celle de la pile à combustible
 - 2.1.4 L'impasse de la Région wallonne
 - 2.1.5 Les frais de dépréciation
- 2.2 Le coût de propriété : utilisation, carburant, maintenance, personnel et fiscalité
- 2.2.1 Les frais de carburant
 - 2.2.2 Les frais de maintenance
 - 2.2.3 Les frais de personnel
 - 2.2.4 La fiscalité
- 2.3 Le coût de démantèlement ou de retrait de service
- 2.4 L'objectif d'une économie d'échelle

3 *Les composantes de coût des infrastructures*

4 *Le coût des externalités*

- 4.1 Le coût psychologique
- 4.2 Les nuisances sonores

ETUDE DE LA MISE EN APPLICATION D'UN RESEAU DE FC BUS EN WALLONIE ET A LIEGE - PARTIE II : LA SUPPLY CHAIN

1 *La production*

- 1.1 La production sur-site
 - 1.1.1 La théorie
 - 1.1.2 La concrétisation
 - 1.1.3 La faisabilité
- 1.2 La production externe
 - 1.2.1 La théorie
 - 1.2.2 La concrétisation
 - 1.2.3 La faisabilité

1.3 Conclusion

1.3.1 La préférence pour la production externe

1.3.2 La production sur-site par la suite

2 *La distribution*

2.1 Le transport par train

2.2 Le transport par pipeline

2.2.1 La théorie

2.2.2 La concrétisation

2.2.3 La faisabilité

2.3 Le transport par camion

2.3.1 La théorie

2.3.2 La concrétisation

2.3.3 La faisabilité

3 *Le stockage*

3.1 La production sur-site

3.1.1 L'étape préalable au stockage : la compression

3.1.2 Le stockage

3.2 La production externe

3.2.1 La compression et le stockage

3.2.2 L'hydrogène liquide

4 *Les stations-services*

4.1 La situation actuelle

4.2 La concrétisation

4.3 La faisabilité

5 *Le schéma récapitulatif de la supply chain*

5.1 La production sur-site

5.2 La production externe

6 *La ville de Liège*

POTENTIALITES DE LA TECHNOLOGIE

- 1 *Les voitures et les camions***
- 2 *Les trains et tramways***
- 3 *Les vélos et les bateaux***
- 4 *Les chariots élévateurs et les équipements stationnaires***

CONCLUSION

ANNEXES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES ABREVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AFHYPAC	Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible
FC Bus	Fuel Cell Electric Bus Bus à moteur électrique alimenté par pile à combustible à hydrogène
FCH JU	Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking
LEZ	Low Emission Zone Zone de basse émission
SMR	Steam methan reforming Vaporeformage
SRWT	Société Régionale Wallonne du Transport
TCO	Total Cost of Ownership Coût total de possession
TEC	Transports en Commun

INTRODUCTION

Dans la société actuelle, la question d'un avenir propre est un enjeu majeur. Développer un futur responsable est une problématique importante de nos décennies. Il y a obligation de modifier l'utilisation des ressources pour garantir leur préservation. Comme l'écrit Pascal Lamy dans la préface du livre de Pierre-Etienne Franc¹, nous devons promouvoir un modèle de croissance moins destructeur pour l'environnement.

Les ressources les plus marquantes sur lesquelles nous devons changer à moyen terme notre mode d'utilisation sont les hydrocarbures comme le charbon, le gaz naturel et, surtout, le pétrole. Les réserves tendent à s'appauvrir et ce carburant a des effets néfastes sur notre planète. Pourtant, il continue à jouer un rôle important dans nos sociétés car elles en sont dépendantes. Maintenant qu'il a atteint ses limites d'utilisation, il faut de toute urgence trouver son remplaçant. Depuis plusieurs années, les entreprises de transport, de chimie et d'ingénierie orientent leurs recherches vers le développement de nouvelles technologies de motorisation ou de carburants écologiques.

Le secteur des transports est très vaste car il regroupe les différentes catégories de locomotion – routier, aérien, ferroviaire et maritime – que nous utilisons tous quasi quotidiennement. L'Union européenne insiste sur le rôle d'acteur économique clé de ce secteur qui représente 548 milliards d'euros et génère 11 millions d'emplois². Elle se fixe deux grands défis. Le premier est la fin de la dépendance au pétrole car, actuellement, elle en importe à hauteur de 87 % de ses besoins. Le second est la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Elle souhaite réduire, d'ici à 2050, les émissions de 60 % par rapport aux niveaux de 1990 afin de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C. Ainsi, depuis ces vingt dernières années, elle encourage les pays à mener des politiques « efficaces, sûres, fiables et durables » et elle soutient un transport intelligent, respectueux de l'environnement³.

¹ Franc, P-E. (2015). *Hydrogène : la transition énergétique en marche !* Paris, France : Gallimard.

² Union européenne. (2018). *Politique des transports de l'UE*.

https://europa.eu/european-union/topics/transport_fr – Chiffres mis à jour le 20 mai 2018.

³ Ibidem.

La technologie de propulsion présentée dans ce travail sont les moteurs électriques alimentés par pile à combustible à hydrogène. Modèles d'avenir, ils représentent une réponse à l'objectif de transports propres car ils garantissent une performance opérationnelle zéro-émission. La seule émission en aval est de la vapeur d'eau et cette motorisation peut être appliquée à tous les véhicules. Le marché est incroyablement prometteur. Selon une étude mondiale de quantification⁴, l'énergie hydrogène pourrait générer, d'ici 2050, un chiffre d'affaires de 2,5 trillions de dollars par an, créer plus de 30 millions d'emplois et contribuer à économiser annuellement 6 giga tonnes de CO₂.

Plutôt que d'aborder le développement des voitures dont plusieurs constructeurs ont démarré la production et la commercialisation, ce travail analyse le développement des transports en commun. Changer le réseau des bus en un réseau équipé de moteurs non polluants, sans émission directe, représenterait une opportunité à ne pas manquer. La densification des villes et les rythmes urbains mettent les bus au centre du débat sur les problématiques environnementales. Des transports publics propres vont permettre d'obtenir des villes plus saines et plus agréables à vivre. Délaisser sa voiture au profit des transports groupés constitue déjà un geste en faveur du désengorgement et de la lutte contre le dérèglement climatique. Néanmoins, maintenant, il est temps d'aller beaucoup plus loin. Il faut tendre de toute urgence vers un monde décarboné.

Dans la suite de ce travail, je désignerai les bus à moteur électrique alimenté par pile à combustible à hydrogène par l'abréviation FC bus, pour fuel cell electric buses.

L'analyse s'articule selon un plan en trois chapitres. Les deux premiers chapitres sont consacrés à la présentation de l'hydrogène et des transports en commun, avec l'explication de la technologie de la pile à combustible. Le troisième chapitre est séparé en deux parties : la première détaille le coût d'un FC bus, en comparaison avec les autres modes de propulsion, et la seconde étudie la concrétisation d'un réseau en Wallonie et à Liège, de la production d'hydrogène à la distribution.

⁴ Hydrogen Council. (2017). Hydrogen scaling up : A sustainable pathway for the global energy transition.

L'HYDROGÈNE

Remarque liminaire

Dans ce chapitre, les informations sur les caractéristiques et comportements du gaz sont issues des différentes sources ci-dessous. Ce travail est consacré à l'étude de la mise en place d'un réseau de FC bus en Wallonie. A portée économique, il analyse la supply chain qu'il faudrait suivre pour pouvoir installer un réseau de bus. Il n'est absolument pas un travail à portée scientifique. En outre, ne possédant pas les compétences nécessaires en chimie, ni dans les techniques et mécaniques ad hoc, j'ai fait le choix de conserver les explications sur les propriétés et caractéristiques de l'hydrogène sans modifier la formulation des phrases afin d'éviter de commettre une erreur. Certains passages peuvent donc être repris explicitement des sources consultées.

Pour les coûts de production de l'hydrogène selon les différents procédés, les chiffres sont maintenus secrets par les industriels. Au vu de la difficulté d'obtenir des estimations, la source utilisée est l'étude de France Stratégie, rédigée par Etienne Beeker en août 2014.

Sources :

- Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (AFHYPAC)
- Connaissance des énergies, Service de presse en ligne
- Futura-sciences, Portail web d'informations liées à la connaissance
- IFP Energies nouvelles, Organisme public de recherche, d'innovation et de formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement
- Planète-énergies, Portail web sur les énergies à l'initiative de l'entreprise Total
- France Stratégie, Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ?
- Ministère français de l'écologie, Accidentologie de l'hydrogène
- Encyclopedie-energie.org, Encyclopédie de l'énergie

1 L'HYDROGÈNE ET SES MODES DE PRODUCTION

1.1 L'hydrogène, vecteur énergétique

Appelée communément « hydrogène », la molécule de dihydrogène, H₂, est composée de deux atomes d'hydrogène. Sa caractéristique principale est de ne pas être une source d'énergie mais un vecteur énergétique : elle peut stocker de l'énergie et la redistribuer en énergie utilisable. L'hydrogène peut être ainsi converti en électricité, en chaleur ou en force motrice.

Pour produire de l'hydrogène, il faut deux éléments : une source d'hydrogène et une source d'énergie.

1.1.1 Les sources d'hydrogène

L'hydrogène est l'atome le plus abondant : il représente 75 % de la composition de l'univers. Cependant, il est rare à l'état naturel en tant qu'élément isolé. Dans la majorité des cas, il est couplé à d'autres atomes, notamment le carbone pour former du méthane (CH₄) et l'oxygène pour former de l'eau (H₂O). En conséquence, il ne peut être produit à l'état pur que via la séparation des éléments chimiques dont il est un composant.

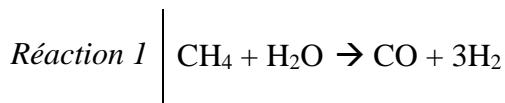
1.1.2 Les sources d'énergie

Il existe trois grandes techniques de production pour trois sources d'énergie. Elles sont expliquées ci-après avec les modes de production.

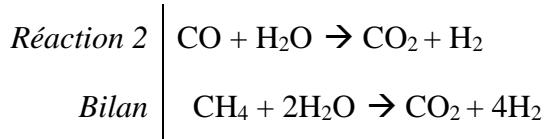
1.2 Les modes de production

1.2.1 Le vaporeformage (steam methan reforming ou SMR)

Ce procédé utilise le gaz naturel (essentiellement composé de méthane) à la fois comme source d'hydrogène et comme source d'énergie. Il consiste en le reformage du gaz naturel par de la vapeur d'eau surchauffée. La molécule de méthane (CH₄) est cassée avec de la vapeur d'eau. Les atomes de carbone se dissocient pour se reformer ensuite séparément au terme de deux réactions successives :



Le CO issu de cette réaction est nocif. Il doit être éliminé par une seconde réaction qui permet de récupérer encore de l'hydrogène.

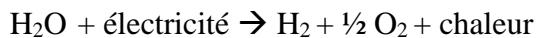


Le résultat est l'obtention de dihydrogène (H_2) et de dioxyde de carbone (CO_2) qui peuvent être stockés.

Le SMR est le procédé le plus économique et le plus utilisé à l'heure actuelle. Pourtant, il présente l'inconvénient majeur d'être fort émetteur en CO_2 . (10 kg de CO_2 par kg de H_2 produit). Ainsi, si l'on veut une production propre à la sortie, il faut faire une séquestration du CO_2 . Ensuite, des unités recrackent le CO_2 pour en faire du CO utile dans l'industrie chimique.

1.2.2 L'électrolyse de l'eau

La source d'hydrogène est l'eau et la source d'énergie est l'électricité. L'eau est la source la plus importante d'hydrogène sur Terre car elle en recouvre plus de 70 % de sa surface.



L'avantage majeur de l'électrolyse sur le SMR est la production d'un hydrogène plus pur. En aval, seule de la vapeur d'eau est émise ce qui est excellent pour l'environnement.

1.2.3 L'oxydation partielle

La source d'hydrogène sont les hydrocarbures et la source d'énergie est l'oxygène. Le procédé consiste en la conversion des hydrocarbures, résidus des usines de raffinage, en hydrogène et en oxydes de carbone, en présence d'oxygène. Les hydrocarbures sont brûlés à haute température (entre 1200 et 1500 °C) et libèrent des gaz qui vont se séparer pour obtenir du dihydrogène (H_2) et du dioxyde de carbone (CO_2).

Comme ce procédé est surtout utilisé dans les raffineries, il ne sera pas analysé plus longuement dans ce travail.

1.2.4 Les autres procédés en voie de développement

La production d'hydrogène à base de biogaz prend de l'essor : elle permet une production plus locale à partir de déchets verts ou de déjections animales. Le processus de méthanisation est réalisé de manière naturelle via la dégradation de la matière organique par des bactéries, en l'absence d'oxygène. L'avantage principal est que l'hydrogène est produit sans émission de CO_2 (hydrogène vert) à des coûts abordables.

La photosynthèse est, quant à elle, un processus au stade expérimental. Basé sur des micro-organismes (algues vertes) qui produisent de l'hydrogène via la lumière lors de la photosynthèse, l'objectif est d'obtenir une production uniquement à partir de lumière et d'eau. Dans ce processus, il n'y aurait aucun dégagement direct de gaz à effet de serre.

En annexe, le schéma de la chaîne hydrogène reprend toutes les sources de production de l'hydrogène et ses utilisations.

1.3 Les coûts de production

1.3.1 Le vaporeformage (steam methan reforming ou SMR)

Le coût de production de l'hydrogène par SMR est estimé entre 1,5 € et 2,5 € / kg, sachant que l'élément le plus important est le prix du gaz naturel source. Si le procédé s'accompagne d'une décarbonation, le prix augmente de 0,5 € à 1 € / kg. Le SMR est utilisé en cas de production de gros volumes d'hydrogène car il est plus économique et que la technologie est très bien maîtrisée.

1.3.2 L'électrolyse de l'eau

Avec ce procédé, le coût principal qui déterminera celui de l'hydrogène en bout de course est celui de l'électricité, nécessaire au fonctionnement des électrolyseurs. Ce coût dépendra lui-même de son mode de production (électricité classique / verte) ainsi que de la taille de l'unité de production. Les chiffres sont donc très variables. L'étude France Stratégie considère un coût de l'électricité moyen de 70 € / MWh. Au final, le coût de production d'hydrogène par électrolyse est de 3,7 € / kg au minimum, soit un prix beaucoup plus cher qu'une production via SMR. Suivant le coût de l'électricité, ce prix peut être beaucoup plus élevé. Ce processus est généralement utilisé pour produire de faibles volumes d'hydrogène.

2 LES PROPRIÉTÉS DU GAZ

2.1 L'énergie du futur

L'hydrogène est souvent présenté comme l'énergie du futur en raison de ses deux caractéristiques principales qui sont sa non-émission de gaz à effet de serre et son potentiel énergétique.

2.1.1 La combustion non émettrice en CO₂

Le nom « hydrogène » signifie « qui engendre de l'eau ». Il a été choisi afin de traduire la caractéristique principale qui est sa combustion non émettrice de gaz à effet de serre.

2.1.2 La densité énergétique

L'hydrogène est un vecteur énergétique de premier ordre. Il est bien plus important que le pétrole ou le gaz naturel car 1 kilogramme d'hydrogène libère environ 3 fois plus d'énergie qu'un kilogramme d'essence. Plus précisément, voici une table d'équivalence des densités énergétiques :

The energy content of ²⁾	is equivalent to
1Nm ³ of gaseous hydrogen	0,30 litres of diesel
1litre of liquid hydrogen	0,24 litres of diesel
1kg of hydrogen	2,79 kg / 3,33 litres of diesel

Figure 1 : table d'équivalences des densités énergétiques⁵

2.2 Les risques d'inflammabilité et de détonation

2.2.1 Une inflammabilité extrême...

L'hydrogène, comme tout gaz, possède son domaine d'inflammabilité et de détonabilité, soit des pourcentages limites haut et bas de concentration dans l'air entre lesquels il s'enflamme ou génère une explosion. Ils se situent respectivement entre 4 % – 75 % et 13 % – 65 %, ce qui sont des échelles très larges. A cela, il faut ajouter que l'hydrogène n'a besoin que d'une très faible énergie d'activation pour générer son auto-inflammation. En cas de fuite, l'énergie liée (présence d'oxygène dans l'air) suffit. Pour toutes ces raisons, l'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable.

Il y aura toujours des risques que l'hydrogène contenu dans un habitacle de véhicule s'enflamme. Mais, c'est la même chose pour l'essence et celle-ci a l'inconvénient d'être toxique. L'hydrogène, lui, est tellement léger qu'une fois réparti dans l'air, il est impossible de le respirer.

⁵ Figure issue de la brochure finale du projet HyFleet :Cute.

HyFleet :Cute. (2009). Hydrogen transports : Bus technology & Fuel for TODAY and for a sustainable future.

2.2.2 ... mais un gaz très léger

Gaz le plus léger, il présente une grande vitesse de diffusion dans l'air. Il se libère verticalement en cas de fuite et sa concentration diminue rapidement pour passer en-dessous de la limite inférieure d'inflammabilité. Cela constitue un avantage en matière de sécurité car le risque d'explosion en devient réduit. Dans un volume ouvert, les conditions de concentration pour une détonation sont très difficiles à atteindre.

2.3 Synthèse

2.3.1 Les qualités de l'hydrogène

- Enorme abondance sous forme atomique
- Combustion non carbonée, pas d'émission directe de CO₂ : gaz non polluant
- Gaz non toxique
- Très forte densité énergétique
- Le plus léger des gaz, avec une grande vitesse de diffusion dans l'air

2.3.2 Les défauts de l'hydrogène

- Faible densité volumique : difficulté de stockage
- Le plus léger des gaz, avec une grande vitesse de diffusion dans l'air : difficulté de stockage car propension à fuir par le moindre interstice
- Inodore et incolore : difficulté de détection
- Flamme invisible : danger
- Mise en place d'un réseau de distribution nécessaire pour permettre l'accessibilité au public

LES TRANSPORTS EN COMMUN ET LES NOUVELLES TECHNOLOGIES

1 LA SITUATION DES TRANSPORTS EN COMMUN EN BELGIQUE

1.1 Une compétence fédérée

La compétence des transports en commun urbains est attribuée aux entités fédérées des Régions. Pour gérer ce domaine en Wallonie, les autorités régionales ont décidé de fonder le groupe TEC, acronyme de Transports En Commun. Il se compose de six entités :

- la Société régionale wallonne du transport (SRWT)

Elle supervise et coordonne les actions des cinq sociétés d'exploitation. Elle est précisément chargée de l'étude, de la conception, de la promotion et de la coordination des services de transports publics des personnes⁶.

- les cinq sociétés d'exploitation

Elles s'occupent du réseau de bus au quotidien. Chacune gère une zone géographique précise :

- TEC Liège-Verviers : province de Liège ;
- TEC Namur-Luxembourg : provinces de Namur et de Luxembourg ;
- TEC Brabant wallon : province du Brabant wallon ;
- TEC Charleroi : communes de Momignies, Chimay, Sivry-Rance, Froidchapelle, Beaumont, Thuin, Lobbes, Ham-sur-Heure, Nalinnes, Gerpinnes, Aiseau-Presles, Châtelet, Farcennes, Charleroi, Montigny-le-Tilleul, Fontaine-l'Evêque, Anderlues, Fleurus, les Bons-Villers, Pont-à-Celles et Courcelles ;
- TEC Hainaut : toutes les autres communes du Hainaut.

Pour la Région flamande et la Région Bruxelles-Capitale, ce sont respectivement les entités De Lijn et STIB qui sont responsables du réseau.

⁶ Région wallonne. (2018). *Portail de la Wallonie, Transport et Mobilité*.
<http://www.wallonie.be/fr/competences/transport-et-mobilite>

1.2 Les chiffres du groupe TEC

L'ensemble du groupe emploie plus de 5.100 personnes, toutes professions confondues : conducteurs, stewards, agents de réseau, agents de vente, mécaniciens, membres administratifs, formateurs, ingénieurs... Le TEC est une entreprise diversifiée reprenant 120 métiers différents.

2500 véhicules sont mis en service quotidiennement sur 781 lignes à travers toute la Wallonie. Ils transportent près de 180 millions de voyageurs par an, pour un total parcouru de 118 millions de kilomètres.

Ces voyageurs peuvent prendre le bus à l'un des 16.000 arrêts disponibles⁷.

Les chiffres du TEC Liège-Verviers

Le TEC Liège-Verviers emploie 1.800 travailleurs.

En 2016, la société a engrangé 43,64 millions d'euros de recettes pour 75 millions de voyageurs transportés. Environ 600 bus roulent dans la province. La superficie totale desservie est de 3.862 km² et 4.722 arrêts sont disponibles. En moyenne, les bus parcourent 35 à 40 millions de kilomètres par an⁸.

1.3 Les missions du TEC

La mission prioritaire du groupe TEC est celle de "Manager de la Mobilité". Il doit offrir un transport correspondant aux besoins de déplacement des citoyens wallons. De plus, les chiffres énoncés ci-dessus suffisent à prouver son rôle de contributeur au développement économique et social de la Wallonie.

Face aux nouveaux défis, le TEC insiste sur son rôle d'acteur du développement durable. Il souhaite accomplir son objectif de transport des personnes tout en minimisant l'impact sur l'environnement. Pour cela, il favorise des trajets associant des connexions avec des modes de transport alternatifs (covoiturage, train, tram, vélo, marche à pied). En parallèle, il tend à réduire au maximum la production de déchets et la consommation des ressources. Il généralise notamment la consommation d'électricité verte et a déjà expérimenté des propulsions alternatives au diesel. Ainsi, le TEC a précisé son rôle qui est désormais celui de "Manager de la Mobilité durable".

⁷ Sociétés d'exploitation TEC. (2018).

<https://www.infotec.be/>

⁸ TEC Liège-Verviers. (2018). Rapport annuel 2016 du TEC Liège-Verviers.

2 LES BUS ET LE CARBURANT DIESEL

2.1 Vers la fin de la propulsion au diesel

Les bus sont généralement équipés d'un moteur à combustion interne alimenté au diesel. Carburant polluant, l'avenir de ces véhicules est largement compromis. De nombreuses politiques incitent en leur défaveur.

2.1.1 Les zones de basses émissions

Pour réduire les émissions de CO₂, les autorités ont créé les zones de basses émissions (low emission zones, LEZ) dans lesquelles le taux d'émission est contrôlé et limité. L'accès y est interdit aux véhicules les plus polluants sous différentes conditions. Des LEZ existent dans de nombreuses villes européennes comme Londres, Stockholm, Amsterdam et Barcelone ainsi que dans la quasi-totalité des villes et agglomérations allemandes.

En Belgique, la région Bruxelles-Capitale a décidé d'instaurer une LEZ depuis le 1^{er} janvier 2018. Elle couvre le territoire des 19 communes, hormis le ring. Les voitures diesel les plus anciennes (immatriculées avant telle date) ne pourront plus pénétrer dans la zone, avant d'être suivies par d'autres catégories de véhicules polluants au fil des ans. La ville d'Anvers a précédé Bruxelles depuis le 1^{er} février 2017. Ces deux villes seront rejoints par Malines en 2018 et par Gand en 2020. En ce qui concerne la Wallonie, le gouvernement a rédigé le cadre réglementaire de l'établissement des LEZ qui ne pourront être instaurées qu'à partir de 2020.

2.1.2 Les normes Euro

Les véhicules diesel doivent respecter la norme antipollution Euro VI. Elle vise la réduction des émissions polluantes des véhicules routiers. Elle oblige les constructeurs à produire des voitures et des camions plus propres par l'imposition de taux d'émissions de particules de plus en plus bas.

2.1.3 L'interdiction pure et simple

La ville de Paris a annoncé vouloir devenir une ville neutre en carbone à moyen et à long terme avec la suppression des véhicules diesel dans la capitale pour 2024 et celle des véhicules à essence pour 2040. Cela suit l'objectif du gouvernement français d'interdire les véhicules

diesel pour 2040. Pour Paris, il ne s'agirait pas d'interdire ou de sanctionner les propriétaires de ces véhicules mais bien d'investir dans les alternatives.

2.2 Les alternatives choisies aux bus diesel

2.2.1 La Région flamande

En Région flamande, De Lijn teste des FC bus dans la ville d'Anvers. Cette présence est liée à la localisation du siège de l'entreprise Van Hool, constructeur de bus, à Koningshooikt, dans l'entité anversoise (voir infra). Hormis ceci, la Région flamande favorise la technologie hybride, diesel – électricité. De Lijn a ainsi investi dans de nombreux bus hybrides et attend maintenant la livraison de tram-bus dans la périphérie bruxelloise.

2.2.2 La Région Bruxelles-Capitale

Pour la Région Bruxelles-Capitale, la STIB a annoncé fin février la commande de 90 bus hybrides, diesel – électricité, dont les 50 premiers devraient être mis en circulation d'ici la fin de l'année. La Région Bruxelles-Capitale envisage l'électrification de son réseau d'ici 2030.

2.2.3 La Région wallonne

La Région wallonne promeut les bus hybrides, diesel – électricité. Sa volonté est l'arrêt définitif de l'achat de bus diesel au profit des bus hybrides uniquement. Ainsi, les premiers bus hybrides mis en circulation par le TEC sont testés à Namur depuis le 16 janvier 2017. Depuis l'année dernière, Liège en expérimente elle aussi grâce, notamment, à un partenariat conclu avec la start-up locale Green Propulsion.

L'expérience wallonne des bus hybrides continuera à être abordée dans la suite de ce travail.

3 LES FC BUS

Pour faire bouger un véhicule au moyen de l'hydrogène, il existe deux possibilités :

- les moteurs à combustion interne : l'hydrogène, carburant, alimente directement un moteur thermique spécifique ;
- les moteurs électriques alimentés par pile à combustible : de l'électricité est produite dans une pile à combustible adaptée aux véhicules électriques.

Les moteurs à combustion interne ne sont absolument pas le sujet de ce travail qui se concentre uniquement sur les moteurs électriques alimentés par pile à combustible.

3.1 La pile à combustible

Le fonctionnement d'une pile à combustible peut être décrit comme le contraire d'un électrolyseur : alimentée en oxygène et en hydrogène, la pile transforme ces deux gaz en énergie électrique. L'énorme avantage de cette technologie est de n'émettre que de la vapeur d'eau en aval. Le schéma d'une pile à combustible est mis en annexe.

3.2 Le fonctionnement des FC bus

Les véhicules roulent grâce à un moteur électrique dont l'électricité nécessaire à son fonctionnement est produite à bord grâce à une pile à combustible. Celle-ci est alimentée en hydrogène par des réservoirs, généralement installés sur le pavillon. L'hydrogène arrive sous pression donc le gaz doit être bien comprimé. Le bus comprend aussi une batterie qui est rechargée par l'électricité de la pile. Cette batterie permet de générer de l'énergie supplémentaire quand c'est nécessaire.

Le véhicule avance soit au moyen de la batterie, soit au moyen de la pile à combustible, soit au moyen des deux pour obtenir plus de puissance.

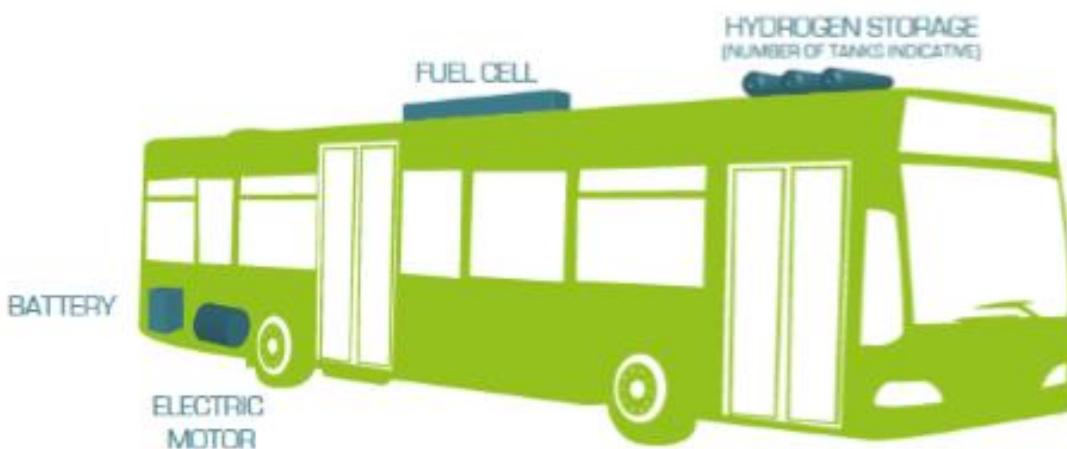


Figure 2 : représentation schématique d'un FC bus

3.3 Les avantages et les inconvénients



Flexibilité opérationnelle

Même réseau routier
Pas d'infrastructures routières spécifiques
Même capacité de passagers
Même rayon d'action : entre 300 et 450 km
Temps de recharge : inférieur à 10 minutes
Possibilité de plusieurs pleins par jour
Solution zéro-émission
Performances semblables aux carburants classiques

Confort

Pollution sonore réduite

Autres

Projets européens : partages des connaissances
Solution pour décarboner les transports

Les coûts

- Production d'hydrogène
- Achat du bus
- Infrastructures (stations-services)
- Maintenance
- Développement

Solution zéro-émission avec la plus grande flexibilité opérationnelle

Lors de l'évocation des caractéristiques des FC bus, la SRWT a émis une remarque importante, liée à sa mission première de transport des personnes. Elle rappelle qu'un bus doit avoir la capacité d'accueillir 100 personnes. Cette capacité est la condition sine qua non pour que son utilisation soit rentable. Si les aménagements nécessaires au bon fonctionnement d'un FC bus (pile à combustible, réservoirs d'hydrogène) prennent trop d'espace et supprime de la place pour des passagers, la SRWT devra s'y opposer. Plusieurs raisons entrent en jeu :

- la technologie ne doit pas être privilégiée au détriment du transport de personnes ;
- la rentabilité diminue car plus de trajets seront nécessaires pour transporter le même nombre de personnes ;
- le coût salarial est plus élevé, suivant l'augmentation du nombre de trajets.

Les FC bus respectent cette condition car ils sont aménagés pour qu'un maximum des équipements soient installés sur le pavillon.

3.4 Les projets de développement

3.4.1 L'Union européenne

De nombreux projets ont été mis sur pied depuis des années à l'échelle européenne. L'objectif est de promouvoir cette technologie ainsi que de montrer que des FC bus sont opérationnels et peuvent circuler en centre-ville sur des lignes classiques. Avant ces projets de grande ampleur, des premiers bus avaient été testés, notamment en Allemagne sous l'impulsion de l'entreprise Daimler.

Créé en 2008, le consortium Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) est un partenariat mixte (public et privé) qui réunit la Commission européenne, des membres de l'industrie (groupés sous le nom de "Hydrogen Europe") et des organismes de recherche (groupés sous le nom de "N.ERGHY") pour promouvoir les technologies de la pile à combustible et de l'hydrogène en Europe. Leur vision est d'obtenir des FC bus commercialement viables partout en Europe à l'horizon 2020.

PROJET CUTE (Clean Urban Transport for Europe) – 2003 à 2006 : de grandes villes européennes (Londres, Amsterdam, Porto, Madrid, Barcelone, Luxembourg, Stuttgart, Hambourg et Stockholm) ont testé l'exploitation d'une flotte de 27 FC bus. Ils présentaient une autonomie de 250 km, avec un stockage de 40 kg d'hydrogène comprimé en bouteilles

pour alimenter la pile. Le projet fut couronné de succès : il n'y a eu aucun accident. Selon l'AFHYPAC⁹, le coût unitaire d'un bus était de 1,25 million d'euros, maintenance inclue.

Dans la même période, l'Union européenne a aidé au financement du projet ECTOS (Ecological City Transport System) qui testait une même ligne de FC bus à Reykjavik. L'Islande est un pionnier dans les énergies propres.

PROJET HyFLEET:CUTE – 2006 à 2009 : l'exploitation de FC bus a grandi en nombre de bus testés et en nombre de villes partenaires. 47 bus répartis dans 10 villes de trois continents différents (Reykjavik, Londres, Amsterdam, Luxembourg, Hambourg, Berlin, Madrid, Barcelone, Pékin – pour les Jeux Olympiques de 2008 – et Perth, en Australie). Ces 47 bus étaient séparés en 33 FC bus et 14 bus à moteur à combustion interne alimenté en hydrogène – appelés ICE = internal combustion engines – (à Berlin) afin de comparer les deux sortes de motorisation. A nouveau, le projet fut un succès.

PROJET CHIC (Clean Hydrogen in European Cities) – 2010 à 2016 : les projets continuent avec d'autres villes : 26 bus dans 5 villes (Aargau, Bolzano, Londres, Milan, Oslo) pour un montant total du projet de 81,8 millions d'euros¹⁰. De nouveaux constructeurs se sont aussi joints, dont l'entreprise belge Van Hool. A nouveau, le projet fut réussi avec plus de 6000 tonnes de gaz à effet de serre (soit la consommation annuelle de 91 bus diesel) et plus de 4 millions de litres de diesel économisés¹¹.

PROJET HIGH V.LO-City – 2012 à 2017 : l'expérience de la potentialité d'un réseau de FC bus se concrétise. Les projets précédents, qui avaient intégrés petit à petit de nombreux partenaires du secteur, se voient renforcés. Des entreprises de tous les domaines sont associées pour développer un réseau. Un bus est essayé pour la première fois dans une ville belge, Anvers.

PROJET HYTRANSIT – 2013 à 2018 : implantation de 6 FC bus dans la ville d'Aberdeen, en Ecosse.

⁹ AFHYPAC. (2015). Daimler - Les bus à pile à combustible. *Mémento de l'Hydrogène, fiche 9.2.1.* Repéré à : http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_9.2.1_daimler_les_bus_pac_rev.mars_2015_th.pdf

¹⁰ Ibidem.

¹¹ Clean Hydrogen in European Cities – CHIC. (2015). Présentation du projet CHIC : déploiement de bus électriques à pile à combustible.

PROJET 3EMOTION (Environmentally Friendly Efficient Electric Motion) – 2015

à 2019 : coordonné par Van Hool, le but de ce projet est d'étendre toujours plus l'expérimentation des bus afin de lancer une mise en place à plus grande échelle. Il s'agit d'un consortium de 20 partenaires de domaines différents (construction des bus, production d'hydrogène, fabrication des piles à combustible, recherche et développement, etc.) qui s'allient pour développer la technologie hydrogène.

L'entreprise Van Hool prend une place prépondérante dans les projets sur les FC bus. En tant que constructeur de bus et d'autocars depuis 1947, Van Hool a rapidement compris que le futur des bus résidait dans la technologie des piles à combustible. L'entreprise est un partenaire privilégié des projets européens depuis leur lancement.

PROJET JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe) – 2017 à 2022 :

le projet JIVE veut cibler précisément les coûts élevés des FC bus et de leurs infrastructures pour les réduire le plus possible et pousser au maximum la commercialisation des FC bus. Ses objectifs sont, entre autres, la réduction de 30 % des coûts par rapport à la technique, le déploiement de la plus grande capacité de stations-services en Europe, la démonstration de la fiabilité des bus et des infrastructures et l'encouragement à l'adoption.

Le projet JIVE réalise un pas encore plus grand que les autres projets vers le but final de commercialisation à grande échelle des FC bus au sein de l'Union européenne. Les acteurs sont en train de gérer la transition entre la démonstration et l'application dans la vie réelle du transport public zéro émission.

Il est important de noter que la Wallonie ne figure pas dans la liste des villes concernées par les différents projets de FC bus. La Flandre, elle, est présente avec la ville d'Anvers. Ce choix n'est pas dû au hasard : c'est le lieu du siège de l'entreprise Van Hool, constructeur. L'objectif de ces bus à Anvers n'était pas principalement le transport de personnes mais bien le développement des véhicules. Etre à proximité de l'usine du constructeur permettait de procéder aux réparations rapidement et d'essayer facilement des améliorations techniques sur le terrain.

3.4.2 Les projets internationaux

A côté de ces initiatives de l'Union européenne, beaucoup d'autres projets et consortiums se sont créés pour promouvoir la technologie de l'hydrogène. Leur nombre ne permet malheureusement pas d'en donner une liste exhaustive.

Depuis 2013, l'Allemagne, seule, a lancé un projet de réseau de 400 stations-services d'hydrogène d'ici 2023 par l'intermédiaire du consortium H2Mobility. Celui-ci regroupe les entreprises Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell et Total.

Aux Etats-Unis, le Département de l'Energie a mis sur pied depuis des années un projet d'études sur l'hydrogène : the Hydrogen Analysis (H2A) Project. Il rassemble chercheurs, industriels et membres des organisations gouvernementales pour élaborer une énergie propre, à un coût le plus bas, pour le futur. En parallèle, la mission H2USA regroupe des partenaires des différents horizons pour promouvoir le développement des véhicules FC aux Etats-Unis.

Lors du forum économique de Davos 2017, des entreprises mondiales de l'industrie et de l'automobile ont créé le Conseil de l'Hydrogène (Hydrogen Council). Ces entreprises sont Air Liquide S.A., Alstom, Anglo American plc, Audi AG, BMW Group, Daimler AG, Engie S.A., GM, Honda Motor Co. Ltd, Hyundai Motor Company, Iwatani Corporation, Kawasaki Heavy Industries Ltd., Plastic Omnium, Royal Dutch Shell, Statoil ASA, The Linde Group, Total S.A. et Toyota Motor Corporation. Elles veulent jouer un rôle de lobbyistes en assurant la promotion de ce carburant auprès des pouvoirs publics, des autres entreprises, des agences internationales et autres partenaires. Leur action prend place dans la suite de l'Accord de Paris sur le climat de 2015.

Un consortium composé d'Air Liquide et d'entreprises japonaises vient d'être créé également au Japon pour le développement de l'hydrogène au sein du pays. Il s'agit du projet Japan H2 Mobility. Ils envisagent 40 000 FC véhicules et 80 stations hydrogène dans la prochaine décennie.

ETUDE DE LA MISE EN APPLICATION D'UN RESEAU DE FC BUS EN WALLONIE ET A LIEGE

PARTIE I : LE COUT D'UN FC BUS

Si une entreprise souhaite constituer une flotte automobile, elle doit au préalable calculer l'ensemble des coûts qu'elle aurait à supporter. Bien qu'ils apparaissent comme les plus marquants, les coûts d'achat et de carburant ne sont que deux éléments isolés dans le coût total d'un parc automobile. Les coûts annexes sont tout aussi importants. Assurer l'entretien et la réparation au quotidien, garantir la fiabilité du véhicule, employer des collaborateurs formés à la technologie et gérer la flotte de manière optimale constituent des paramètres vitaux pour la pérennité d'une entreprise. Dans ce chapitre, il est étudié quel coût le groupe TEC devrait débourser pour l'achat d'un FC bus en comparaison avec les bus diesel et hybrides (diesel – électricité).

1 LE COÛT TOTAL DE POSSESSION

Face aux différents biens qui leur sont proposés à l'achat, les entreprises ont besoin d'un outil managérial d'aide à la décision qui prenne en considération l'ensemble des coûts à défrayer et qui permette ainsi de réaliser des comparaisons sur des valeurs égales. Le concept économique utilisé est celui du coût total de possession (Total Cost of Ownership, TCO). Il regroupe tous les coûts associés à un bien durant son cycle de vie, soit de l'acquisition jusqu'à la cession ou l'abandon.

Le TCO d'un bus reprend tous les coûts liés à l'exploitation, frais d'immobilisation compris, et se mesure en euro par kilomètre (€ / km). Il se décompose en trois catégories générales :

- le coût d'acquisition
- le coût de propriété
- le coût de démantèlement ou de retrait de service

Dans son étude de 2015, le FCH JU¹² évoque le TCO pour expliquer que, si une économie d'échelle est atteinte dans la production des FC bus (voir infra), leur TCO devrait diminuer progressivement. En parallèle, le TCO d'un bus diesel serait amené à augmenter d'ici 2030 suite aux différentes raisons suivantes (hormis l'inflation dont on ne tient pas compte) :

- une augmentation du prix du pétrole ;
- une hausse des taxes sur le diesel ;
- une maintenance plus importante des véhicules diesel en fin de vie.

Ces deux mouvements simultanés vont créer une convergence pour que, petit à petit, les TCO des bus diesel et des FC bus deviennent presque semblables.

2 LES COMPOSANTES DE COÛT D'UN BUS

Les composantes de coût d'un bus se décomposent dans les trois catégories du TCO citées ci-avant :

1. le coût d'acquisition : achat, financement et dépréciation
2. le coût de propriété : utilisation, carburant, maintenance, personnel et fiscalité
3. le coût de démantèlement ou de retrait de service

A des fins de comparaison, dans la suite de ce chapitre, les chiffres ne seront donnés que pour des bus simples.

2.1 Le coût d'acquisition : achat, financement et dépréciation

2.1.1 Le coût d'achat et les frais de financement

Pour une entreprise qui souhaite constituer une flotte automobile, le coût d'achat est l'élément-clé car elle doit le payer directement et en une seule fois à son fournisseur. Voici les coûts d'achat par propulsion :

- bus diesel : 250.000 €
- bus hybride : 350.000 €
- FC bus: 800.000 €

¹² Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU. (2015). Fuel cell electric buses – Potential for sustainable public transport in Europe.

La technologie des FC bus reste chère. Malheureusement, donner un prix précis est impossible car les informations sont maintenues secrètes par les constructeurs. Certaines informations donnent une fourchette entre 600.000 € et 750.000 € tandis que la SRWT, quant à elle, formule un prix de 800.000 €. Il est fait le choix de se baser sur ce dernier montant, le plus haut. Ce prix élevé a déjà connu de belles réductions depuis les tout premiers FC bus. Le projet JIVE tend encore à réduire ce coût de 30 % pour pouvoir lancer véritablement la commercialisation à grande échelle.

Pour financer ce coût en une seule fois à son fournisseur, la société de transports en commun doit passer par un crédit auprès des établissements bancaires. Ce sont les frais de financement. Il est considéré qu'ils sont semblables pour les trois modes de propulsion.

2.1.2 L'achat de bus hybrides par la Région wallonne

La Région wallonne s'oppose désormais à l'achat de bus diesel et ne promeut que les bus hybrides. Les bus diesel étant arrivés en fin de vie, la SRWT a lancé la première grande vague d'achat d'hybrides en 2016. L'appel d'offres lancé concernait l'achat de 298 véhicules, divisés en deux lots¹³ :

1. lot 1, une recharge aux terminus peut être autorisée.
 - 55 véhicules pour le TEC Charleroi
 - 35 véhicules pour le TEC Namur-Luxembourg
2. lot 2, aucune recharge en ligne n'est autorisée. Toute recharge se fera au dépôt et en dehors des heures de service.
 - 162 véhicules pour le TEC Liège-Verviers
 - 46 véhicules pour le TEC Hainaut

L'investissement total pour ces 208 bus s'élève à 72.800.000 millions d'euros hors TVA et hors infrastructure, ce qui donne bien un coût unitaire de 350.000 €. Selon la SRWT, le TCO ramené par véhicule serait de maximum 1.050.000€ HTVA sur 16 ans.

¹³ Société régionale wallonne de transport – SRWT. (2016). Cahier des charges « Fourniture d'une solution de transport public de type hybride ».

¹⁴ Région wallonne. (2018). – www.wallonie.be

Pour le TEC Liège-Verviers, les bus sont toujours en phase de test. Le recul n'est pas encore assez grand pour qu'ils se prononcent valablement sur la rentabilité et l'efficacité de la technologie. Les hybrides sont rechargeables de nuit au dépôt de Robermont.

2.1.3 La technologie hybride comparée avec celle de la pile à combustible

Un bus hybride associe un moteur thermique diesel et un moteur électrique alimenté par une batterie qui se recharge sur le réseau ou au dépôt. Le moteur électrique assiste le thermique lors des accélérations et récupère l'énergie à la décélération et au freinage. Le passage en mode électrique est géré par l'ordinateur de bord.

1. Economie en diesel et réduction des émissions

L'économie en carburant et la réduction des émissions de CO₂ sont les avantages principaux de la technologie. Les premiers bus hybrides mis en circulation par le TEC ont été testés à Namur depuis le 16 janvier 2017. En un an, leur mise en circulation a permis l'économie de 90.000 litres de carburant, la réduction à hauteur de 240 tonnes des émissions de CO₂¹⁵. A Liège, des bus hybrides sont testés actuellement sur 3 lignes du TEC dont la très fréquentée n° 48 "Opéra / Université de Liège, Sart-Tilman". Cette ligne a été choisie car la capacité zéro-émission est accordée en priorité aux trajets les plus courus. Selon Green Propulsion, dans un article accordé à la RTBF¹⁶ en 2017, l'Hybribus a permis de réaliser une économie de carburant de 60 à 70 %. Malgré ces beaux scores, un bus hybride reste très dépendant du diesel. Face aux FC bus qui n'émettent que de la vapeur d'eau en aval, le bus hybride est largement perdant.

Avantage : FC bus.

2. Emissions en amont

Un élément important dont il faut tenir compte sont les émissions en amont. Une technologie peut être 100 % propre à la sortie mais être fort génératrice d'émissions nocives en amont. Pour les FC bus, les deux procédés ont leur faiblesse : le SMR crée du CO₂ à concurrence de 10 kg pour 1 kg de H₂ et l'électrolyse a besoin d'électricité dont la production est aussi génératrice de CO₂. Un autre point négatif sont les matériaux rares ou nocifs composant

¹⁵ Rtl Info. (2018). Le Tec utilise des bus hybrides depuis un an à Namur: le bilan est positif, le voici. *Rtl Info.be*. Repéré à : <https://www.rtl.be/info/belgique/societe/le-tec-utilise-des-bus-hybrides-depuis-un-an-a-namur-le-bilan-est-positif-le-voici-992094.aspx>.

¹⁶ Dagonnier, E. (2017). Liège : Green Propulsion annonce le moteur de bus hybride le plus performant au monde. *Rtbf.be*. Repéré à : https://www.rtbf.be/info/regions/liege/detail_liege-green-propulsion-annonce-le-moteur-de-bus-hybride-le-plus-performant-du-monde?id=9731350

les batteries électriques. Ces deux problèmes se retrouvent aussi dans les bus hybrides pour le fonctionnement du moteur électrique. Dans le même ordre d'idées, l'alimentation des batteries peut poser question. Lors d'un reportage, la RTBF¹⁷ a mis en évidence que les bus hybrides du dépôt de Salzinnes étaient rechargés via un groupe électrogène... qui a besoin de beaucoup de mazout pour fonctionner ! Stéphane Thiery, Directeur marketing du groupe TEC, a répondu qu'il s'agissait d'une solution temporaire en l'attente d'une station et suite à un défaut de fournisseur. Comme expliqué supra, des méthodes 100 % propres sont en voie de développement pour l'hydrogène mais elles ne sont pas encore assez matures et ne permettront pas d'assumer les grandes quantités demandées.

Avantage : FC bus car l'énergie sera créée au sein du bus sans une alimentation externe de la batterie.

3. Autonomie

L'autonomie en pur électrique des bus hybrides reste faible : de 7 à 37 km. Face aux FC bus qui présentent une autonomie aussi grande qu'un bus diesel (350 à 400 km), les bus hybrides montrent immédiatement leurs limites. En outre, pour cette meilleure autonomie, le temps de recharge des FC bus est aussi beaucoup plus court (moins de 10 minutes), en opposition à celui des bus hybrides qui peut prendre plusieurs heures.

Avantage : FC bus

4. Récupération d'énergie à la décélération

Dans les centres-villes, les bus roulent à basse vitesse (50 km / h). La récupération d'énergie à la décélération ou au freinage est faible et limite les moments où le moteur électrique seul suffit à propulser le bus. Cette même remarque peut être formulée pour les FC bus.

Egalité.

5. Nuisances sonores

Les bus hybrides sont discrets lorsqu'ils roulent en tout électrique. Cependant, comme ils doivent encore utiliser souvent la propulsion diesel, le bruit restera toujours bien présent. Concernant les FC bus, ils sont beaucoup plus silencieux comme il sera montré infra dans le coût des externalités.

Avantage : FC bus

¹⁷ Lenaerts, C. (2018). Les bus hybrides de Namur: pas si verts que ça. *Rtbf.be*. Repéré à : https://www.rtbf.be/info/societe/onpdp/detail_les-bus-hybrides-de-namur-pas-si-verts-que-ca?id=9878024.

En conclusion, bien que la technologie de l'hybride soit une belle progression sur le diesel, elle présente des aspects négatifs qui ne la rendent pas si verte que ça. La dépendance au diesel reste beaucoup trop grande. Les véhicules alimentés par piles à combustible représentent une marge de progression bien plus importante et bien plus favorable à l'environnement, pour une performance équivalence à celle des bus diesel. Pour ces raisons, les FC sont vraiment la solution zéro-émission avec la plus grande flexibilité opérationnelle.

2.1.4 L'impasse de la Région wallonne

La SRWT et le TEC, organismes publics, sont soumis à de grandes contraintes financières. Ils doivent respecter un cahier des charges précis à l'achat d'un bus. Les normes du Système européen des comptes (SEC) limitent le montant d'investissement car ce coût est directement impacté dans la dette wallonne, et par voie de fait, dans la dette nationale. La méthode comptable SEC institue une base comptable commune aux Etats européens et permet de comparer des données macro-économiques. Il appartient aux pays de répartir les dépenses en leur sein, entre tous les membres du secteur public afin de tendre vers l'équilibre budgétaire. Pour y arriver, la Belgique a mis en place des balises d'investissement qui limitent le montant maximum empruntable. En ce qui concerne l'achat d'un bus, la SRWT est limitée à un coût de 350.000 € (prix des hybrides), très loin des 800.000 € estimés pour l'achat d'un FC bus. Les conséquences sont importantes : la Wallonie ne pourra pas avant longtemps, investir dans des FC bus car il faudra de nombreuses années encore pour que le coût d'achat diminue drastiquement pour passer sous la barre des 350.000 €. En outre, les bus des différentes Régions du pays arrivent à la fin de leur durée de vie (à l'heure actuelle, le TEC Liège renouvelle son parc avec le remplacement de 162 bus du dépôt de Robermont). Elles ont dû les remplacer. Comme le mot d'ordre était la fin des bus diesel et la promotion des technologies durables, les trois Régions ont investi dans l'hybride. Or, maintenant que ces hybrides sont achetés, il faut les rentabiliser au maximum, soit les utiliser jusqu'au bout de leur vie, d'environ 16 ans. C'est énorme !

Un cercle vicieux s'est enclenché de manière très déplorable. La mise en application des FC bus est reportée d'au moins une décennie... C'est d'autant plus décevant que les bus hybrides ne sont pas pour le moment un franc succès économique. La SRWT dit qu'elle n'est pas prête à se lancer avec 50 FC bus d'un coup car le coût est beaucoup trop cher mais le problème est le même avec les bus hybrides. Le TEC Charleroi a d'ailleurs fait aveu de difficultés financières suite à l'exploitation de leurs 55 bus hybrides. « Les bus hybrides

représentent un manque à gagner annuel d'un million » selon Philippe Charlier, administrateur¹⁸. Le différentiel entre les économies et les coûts est le suivant :

- économies en carburant et en matière : 700.000 €
- dépenses d'entretien, de pièces, de main d'œuvre, infrastructures : 1.700.000 €

Les sentiments qui ressortent de tout cela sont vraiment de la frustration et des regrets. La Wallonie restera en retrait pendant encore des années alors qu'elle aurait pu prendre le train en marche, beaucoup plus tôt.

2.1.5 Les frais de dépréciation

Les frais de dépréciation sont les frais d'amortissement. Dans la comptabilité, il est interdit de déduire le prix total d'achat du véhicule en une seule fois. La valeur de l'investissement doit être répartie sur toute la durée normale d'utilisation de votre véhicule. Voici les durées de vie des bus par propulsion :

- bus diesel : 16 ans
- bus hybrides : 16 ans
- FC bus : 18 ans

Les FC bus présentent une durée de vie équivalente à celle des autres propulsions. Il n'y aura donc pas de changement significatif pour les déductions comptables mais également en termes de durée de vie du parc automobile. Les différents projets européens ont globalement montré la fiabilité de la technologie qui s'explique par le fait que la pile à combustible a un fonctionnement de type statique qui génère moins d'usure que les moteurs à combustion interne avec leurs nombreuses pièces en mouvement.

2.2 Le coût de propriété : utilisation, carburant, maintenance, personnel et fiscalité

2.2.1 Les frais de carburant

Dans les frais de carburant, deux éléments entrent en jeu : le prix du carburant et la consommation moyenne du véhicule

¹⁸ Albin, D. (2018). Les bus hybrides mettent les comptes du TEC Charleroi dans le rouge. *LA dernière heure, dhnet.be*. Repéré à : <http://www.dhnet.be/regions/charleroi/les-bus-hybrides-mettent-les-comptes-du-tec-charleroi-dans-le-rouge-5a7b42d8cd70fdabb9dfa117>

Les bus diesel

Pour déterminer le prix du diesel dans le cadre de ce travail, il a été opté pour le prix moyen de carburant établi par le Service Public Fédéral (SPF) Finances pour l'année 2017 : 1,3277 € / L. La consommation moyenne du véhicule est de 45 L / 100 km.

Dans son cahier des charges pour les bus hybrides, la SRWT a estimé des prix évolutifs du diesel beaucoup plus bas (voir annexe). En conséquence, il est considéré que le prix du SPF Finances serait l'hypothèse pessimiste, quoique le prix du diesel a beaucoup de chances d'augmenter de par la hausse du prix du pétrole et, surtout, des taxes qui seront de moins en moins favorables au diesel.

Coût total pour 100 km : 59,75 €.

Les bus hybrides

Les bus hybrides utilisent deux sortes de carburants : le diesel et l'électricité.

- Diesel : chiffre du SPF Finances. La consommation moyenne du véhicule en diesel est de 7 L / 100 km.

Coût total pour 100 km : 9,29 €.

- Electricité : comme il s'agit d'une matière première, son prix est variable (voir coût évolutif estimé par la SRWT, en annexe) mais il est considéré 70 € / MWh, ou 0,07 € / kWh, comme prix moyen¹⁹. La consommation moyenne des véhicules hybrides est de 1 à 1,2 kWh / km²⁰.

Coût total pour 100 km : 8,40 €²¹.

Coût total pour 100 km : 17,69 €.

Il est à noter que le coût de l'électricité peut être réduit à 0,05 € / kWh si l'énergie est consommée essentiellement pendant la nuit.

¹⁹ Beeker, E. (2014). Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? *France Stratégie magazine (rélié au Commissariat général à la stratégie et à la prospective)*, n° 15. Repéré à : www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/201-08-06na-fs-hydrogene-hd.pdf

²⁰ Société régionale wallonne de transport – SRWT. (2016). Cahier des charges « Fourniture d'une solution de transport public de type hybride ».

²¹ Calcul effectué avec 1,2 kWh / km, hypothèse pessimiste.

Les FC bus

La consommation moyenne s'élève à 8 à 9 kg d'hydrogène pour 100 km. Ici, le prix de l'hydrogène est celui à la pompe. A l'heure actuelle, il n'existe pas encore de coût précis mais le FCH JU a fixé une barre maximum de 10 € / kg²². A titre d'exemple, c'est le prix auquel les stations-services allemandes fournissent l'hydrogène actuellement.

Coût total pour 100 km : 90,00 €

Ce coût reste le plus cher des trois propulsions. Avec le développement de la technologie FC, une demande toujours plus grande en hydrogène et de nouveaux procédés plus abordables, il ne peut que diminuer.

2.2.2 Les frais de maintenance

Les coûts de maintenance sont gérés entièrement par le TEC. Ils consistent en les frais de réparation suite à un accident ou à des actes de vandalisme, les frais de passage au contrôle technique, les taxes, les assurances, l'entretien et réparation des pneus, le remorquage, le nettoyage de l'intérieur, la maintenance des pièces, le coût des pièces de rechange et les interventions diverses. A la lecture de toutes ces catégories, le poste principal qui définit le montant de ces frais est le coût du personnel qui remplit ces tâches. Ainsi, dans le cadre de ce travail, les frais de maintenance peuvent être limités aux frais de personnel. Cela implique que ces frais sont communs aux bus diesel, aux bus hybrides et aux FC Bus. Dans le futur, ils évolueront de la même manière avec, notamment, l'indexation des salaires. Selon les TEC, le taux d'évolution de la main d'œuvre est de 2 % en moyenne. La SRWT évalue les frais de maintenance à 0.2 € / km.

Il faut néanmoins mettre en évidence que, pour les FC bus, un coût non négligeable en cas de grosse panne technique sera le coût de remplacement de la pile à combustible. Cela dépend du contrat de garantie signé avec le constructeur. Toutefois, le risque de panne est plus grand avec un moteur à combustion interne.

2.2.3 Les frais de personnel

Déjà évoqués ci-dessus, il faut aborder ici les frais de formation aux nouvelles technologies qui devront être fournies aux employés que ce soit pour la conduite, la motorisation

²² Plateforme solutions climat. (2015). La production d'hydrogène à partir de biogaz. *Plateformesolutionsclimat.org*. Repéré à : https://www.plateformesolutionsclimat.org/wp-content/uploads/2015/07/Le_hub_des_solutions_climat_VABHYOGAZ_4_pages_v2.pdf

ou pour les installations techniques. Pour les bus hybrides, les techniciens ont déjà reçu une formation spéciale. Définir un chiffre précis pour ces formations est impossible mais elles sont considérées être d'un montant égal, les frais de formateur étant constitué des honoraires de coût par séance ou par heure.

2.2.4 La fiscalité

Parmi les taxes appliquées sur les biens, la première citée est la taxe sur la valeur ajoutée (TVA). Le groupe TEC a un statut particulier car il dépend des autorités publiques mais est néanmoins assujetti à la TVA²³. Ainsi, elle est entièrement déductible. Le TEC peut récupérer un montant de 21 % sur le total d'acquisition mais, également, sur le total des défraitements aux fournisseurs. Elle n'est pas non plus intégrée dans le TCO, ni dans le montant de base à amortir.

Les autres domaines de la fiscalité restent une question en suspens. L'influence du monde politique est cruciale ce point. A l'heure actuelle, le différentiel de taxes est important : le gasoil est imposé via des accises tandis que l'hydrogène comme carburant ne supporte aucune taxe. Désormais, avec son développement, cela pourrait changer. Egalement, sera-t-il question de taxer l'électricité comme carburant ? Cela aurait un impact à la fois pour les bus hybrides et pour les FC bus. Autre élément compliqué en Belgique, la taxation dépend de pouvoirs différents : l'électricité est régionale (donc trois réglementations différentes possibles) tandis que les accises sur le carburant relèvent du fédéral (donc les Régions n'ont pas de marge de manœuvre). L'avenir nous dira le choix des gouvernements.

2.3 Le coût de démantèlement ou de retrait de service

Il s'agit du coût de la revente ou de la cession du véhicule. Il est impossible à déterminer et n'a pas d'impact dans le cadre de ce travail.

2.4 L'objectif d'une économie d'échelle

L'inconvénient majeur des FC bus par rapport aux bus diesel sont leurs coûts. Le prix beaucoup plus élevé à l'achat est un obstacle majeur à leur adoption. Avec les recherches et le développement des technologies, il est certain que les coûts liés à un FC bus vont diminuer dans le futur. C'est le but principal des différents projets en cours et des consortiums.

²³ Le transport de biens et de personnes est une activité explicitement citée comme exception au non-assujettissement des autorités publiques (article 6 Code TVA).

Une condition pour y parvenir est l'augmentation de la production des FC bus afin d'atteindre des économies d'échelle. Pour rappel, l'objectif du FCH JU est d'atteindre une commercialisation viable des FC bus à l'horizon 2020. L'économie d'échelle qui serait obtenue à ce moment-là engendrerait une diminution du prix des FC Bus et :

- les coûts de maintenance devraient atteindre un niveau similaire à celui des bus diesel ;
- le prix de l'hydrogène serait même inférieur à celui du diesel.

Pour obtenir cette économie d'échelle, une étude menée par le FCH JU²⁴ explique que deux scénarios sont à envisager. Selon ces scénarios, le nombre de FC bus à atteindre est différent.

1. Scénario de niche : il se produira si l'ampleur de l'utilisation des FC bus reste isolée.

Les FC bus ne seront pas utilisés sur l'ensemble du territoire européen, ni dans l'ensemble des métropoles. Seules quelques villes, comme à l'heure actuelle, feront rouler des FC bus.

Pour obtenir une économie d'échelle, 1.200 à 1.800 FC bus doivent circuler en Europe d'ici 2025 – 2030.

2. Scénario de production à grande échelle : il se produira si l'utilisation des FC bus s'étend à toute l'Europe, dans toutes les métropoles.

Pour obtenir une économie d'échelle, 8.000 à 10.000 FC bus doivent circuler en Europe d'ici 2025 – 2030. Ce nombre est peu élevé car il s'agit de moins de 10 % du nombre de bus en Europe.

Le FCH JU poursuit par le chiffrage de l'économie d'échelle qui serait réalisée d'ici 2030.

Tous les postes de coûts diminueraient :

- coût d'achat : baisse pour atteindre 400.000 à 450.000 € pour un bus standard d'ici 2030 (soit 40 à 45 % de moins que le coût actuel) ;
- coût de maintenance : baisse de 35 à 40 % ;
- coût des infrastructures : baisse de :
 - de 24 % pour les infrastructures liées à une production d'hydrogène hors-site
 - de 39 % pour les infrastructures liées à une production d'hydrogène sur-site, avec électrolyse.

Ces diminutions permettraient aux FC bus de se rapprocher du prix des bus diesel et hybrides comme le montre les graphiques suivants²⁵. Bien entendu, il faut rester conscients que l'inflation

²⁴ Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU. (2015). Fuel cell electric buses – Potential for sustainable public transport in Europe.

²⁵ Ibidem.

aura un rôle à jouer, principalement dans les coûts de personnel et dans les coûts des matières premières. Néanmoins, elle peut être considérée comme "neutre" dans ce travail car elle impactera aussi les bus diesel.

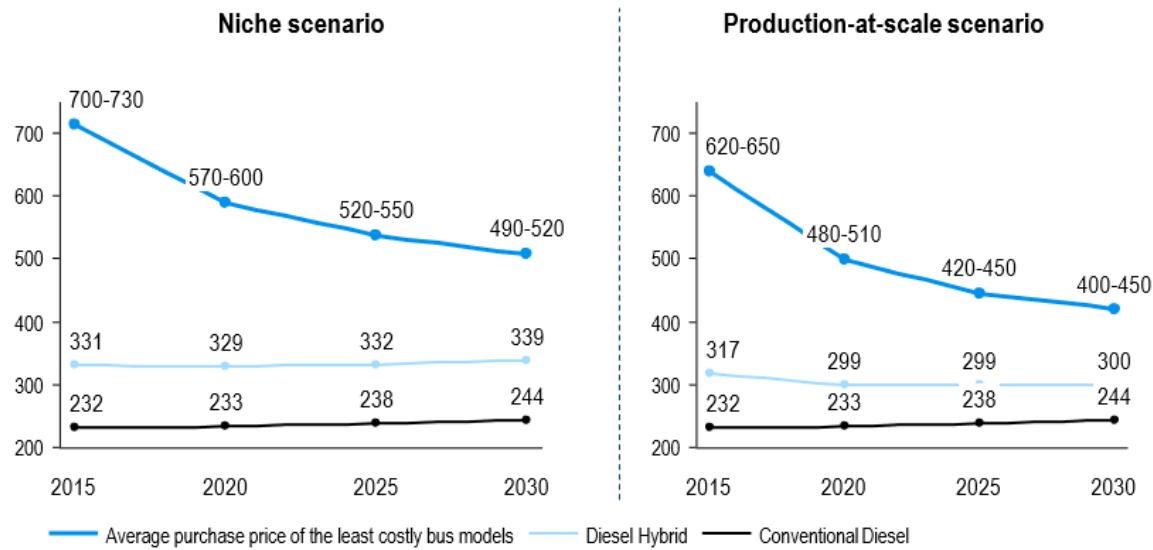


Figure 3 : évolution du prix des FC bus, scénario de niche / scénario à grande échelle

Enfin, le FCH JU conclut avec le chiffrage du rapprochement des TCO des bus diesel et des FC bus évoqués ci-dessus. Selon les deux scénarios, le TCO des FC bus diminuerait d'environ 15 % en 15 ans tandis que celui du diesel augmenterait d'environ 30 % sur la même période.

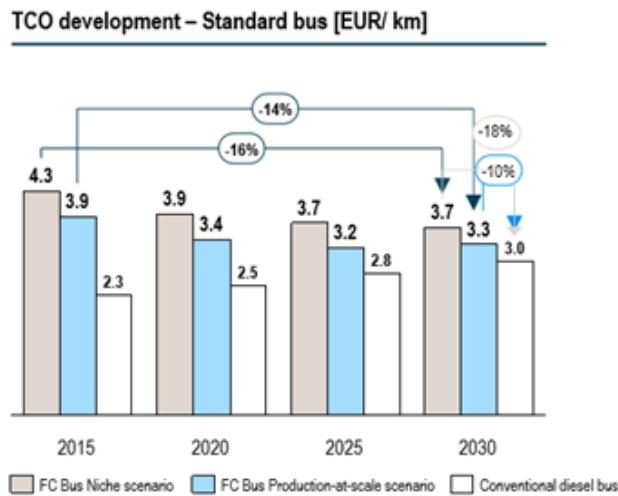


Figure 4 : évolution du TCO des FC bus et des bus diesel

Concomitamment à la réduction des coûts, la technologie des FC bus deviendra de plus en plus performante. Les sociétés acquerront une connaissance toujours plus accrue du fonctionnement.

Ainsi, les bus présenteront une disponibilité toujours plus grande, aligneront les kilomètres parcourus et connaîtront moins de pannes. Egalement, les partisans (entreprises, pouvoirs politiques, instituts de recherche, etc.) de la pile à combustible et de l'hydrogène comme carburant ont un rôle crucial à jouer. Grâce à leur lobbying et à leurs incitants, ils doivent convaincre du bien-fondé de la technologie. Ils sont en première ligne pour pousser les promoteurs potentiels, les personnes pour lesquelles la technologie est encore inconnue mais aussi pour rassurer les réticents. Ils veulent attirer plus de personnes à rejoindre le "mouvement de l'hydrogène" ce qui permettra d'enclencher un engouement plus grand autour du procédé et générer plus de recherches et études dans le domaine. Plus de personnes sont intégrées dans le mouvement, plus de résultats peuvent être obtenus pour développer des méthodes de production d'hydrogène moins chères.

A l'heure actuelle, il est difficile de dire vers quel scénario on se dirige. A la fois, de nombreux pays européens, soutenus par le FCH JU, promeuvent les nouvelles technologies mais pas encore au niveau d'un grand plan national (sauf en Allemagne). Cela donne l'impression que les initiatives viennent plutôt des villes et de leurs dirigeants qui souhaitent changer les choses. Si, comme en Wallonie, les Etats mettent la technologie totalement de côté car trop chère et si, comme elle, ils sont tenus aux mêmes règles concernant le système SEC, rien n'avancera. Enfin, les FC bus sont tellement plus coûteux que les bus diesel que la volonté de l'Union européenne d'obtenir une adoption massive aussi vite semble déraisonnée et hors de portée. En effet, le premier objectif était 2020. Mais l'échéance a rapidement changé pour devenir plutôt 2030, comme le montre l'étude du FCH JU. Cependant, face à l'urgence, le temps presse...

3 LES COMPOSANTES DE COÛT DES INFRASTRUCTURES

Plusieurs sortes d'infrastructures sont liées aux FC bus : les bâtiments (dépôt, atelier), les stations-services et les modules de production d'hydrogène sur-site.

Pour les bâtiments, le groupe TEC ne devra pas faire d'investissement particulier car il possède déjà ses dépôts et ses ateliers. Il faudra peut-être faire des aménagements complémentaires pour la disposition des ateliers ou des machines et outillage spécifiques aux FC bus. Des aménagements similaires doivent être faits pour les bus hybrides.

En ce qui concerne les stations-services, le montant d'installation est tenu secret par les constructeurs. Pour plus de détails, ainsi qu'une explication sur les modules de production d'hydrogène, voir infra dans la partie sur la supply chain. Pour les bus hybrides, des stations ne sont pas nécessaires mais bien des pantographes pour les recharges en électricité sur le réseau. Pour les bus hybrides du lot 1 (recharge en ligne au terminus), la SRWT a demandé au soumissionnaire de prévoir un contrat de maintenance pour les pantographes.

A nouveau, comme pour le coût d'acquisition, pour financer ce coût en une seule fois à son fournisseur, la société de transports en commun doit passer par un crédit auprès des établissements bancaires. Le montant total d'investissement sera amorti par l'entreprise à concurrence de la durée de vie du bien.

4 LE COÛT DES EXTERNALITÉS

Les externalités représentent l'impact positif ou négatif des actions d'un agent économique sur son environnement ; impact qui n'est pas pris en compte par l'agent dans ses calculs de frais.

4.1 Le coût psychologique

Il est indispensable de tenir compte du degré d'acceptation générale par le public des technologies liées à l'hydrogène. Sans cela, un développement futur, à grande échelle a peu de probabilités de fonctionner. Des personnes peuvent être réticentes à son utilisation. Comme expliqué supra, l'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable mais qui a une vitesse de diffusion dans l'air très rapide. Il faudra former le public sur la dangerosité du gaz tout en le rassurant sur son utilisation. La SRWT et le TEC rappellent qu'il faudra aussi former les composantes externes comme les pompiers et les entreprises de remorquage.

Face au développement de la technologie de la pile à combustible, des réglementations, des standards et des guides doivent être rédigés. Au niveau international, des normes ISO²⁶ y sont déjà consacrées. Au niveau européen, il existe aussi des directives quant à la protection des travailleurs et des équipements pour les applications stationnaires²⁷. Concernant

²⁶ Les normes ISO sont établies par des experts internationaux. Elles fournissent des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques relatives à des activités ou à leurs résultats, dans le but de réaliser le degré optimal d'ordre dans un contexte donné - www.iso.org

²⁷ Protection des travailleurs (Directive 89/391/CE du 12 juin 1989) – Protection des travailleurs exposés au risque d'atmosphère explosive (Directive 99/92/CE du 29 avril 1999) – Protection des équipements (Directive Machines

les applications mobiles, le projet European Integrated Hydrogen Project (EIHP) a travaillé jusqu'en 2004 sur la préparation d'un canevas européen sur les véhicules à hydrogène et leurs infrastructures en vue d'une harmonisation des standards en la matière. Celui-ci est consacré à six sujets ou work packages (WP) :

- généralités ;
- stations-services ;
- infrastructures de recharge ;
- véhicules ;
- sécurité ;
- relations Union européenne – Etats-Unis.

On y trouve toutes les informations sur les éléments nécessaires pour construire, entretenir et faire fonctionner de manière sûre tous les aspects liés à l'hydrogène (entre autres des minimum requis ou la liste de composants ou un protocole d'inspection des risques)²⁸. Le dernier sujet est la création et le maintien de liens internationaux, principalement avec les Etats-Unis. Ceux-ci disposent aussi d'une agence (Fuel Cell & Hydrogen Energy Association – FCHEA) qui rédigent des codes et standards d'utilisation de l'hydrogène.

Parmi les projets de l'EIHP, il y avait Hysafe (Safety of Hydrogen as an Energy Carrier) consacré à un consortium de 24 partenaires dont l'objectif commun était l'amélioration de la sûreté d'utilisation de l'hydrogène (exercices de simulations de fuite de gaz, prévention des dégâts, analyses de risques, etc.) afin de créer une réglementation adéquate et promouvoir la technologie. Créé en 2004, ce projet a été conclu en 2009. Maintenant, il faudrait passer à la vitesse supérieure et concrétiser cette ébauche de cadre légal. A l'heure actuelle, l'usage de l'hydrogène comme "base de carburant" reste méconnu pour une bonne partie du public. Les promoteurs de l'hydrogène doivent travailler sur cette zone d'incertitudes afin de donner un élan beaucoup plus grand à leurs projets. Le public a également peur d'une éventuelle hausse des prix des tickets pour prendre un FC bus.

98/37/CE du 22 juin 1998, Directive 94/9/CE du 23 mars 1999, Directive Appareils à pression 97/23/CE du 29 mai 1997).

²⁸ Pour plus de détails, la liste des publications de l'EIHP est disponible en ligne, sur leur site internet.

4.2 Les nuisances sonores

L'agence européenne de l'environnement estime que 60 % de la population des grandes villes européennes souffrent des nuisances sonores causées par le trafic. Les FC bus réduisent les nuisances sonores de 2/3, à l'arrêt et en mouvement, comme l'a estimé le FCH JU dans son rapport de 2015²⁹.

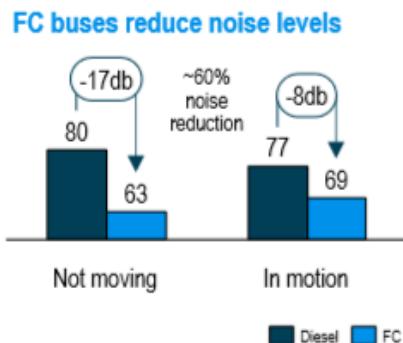


Figure 5 : nuisances sonores comparées FC bus – bus diesel

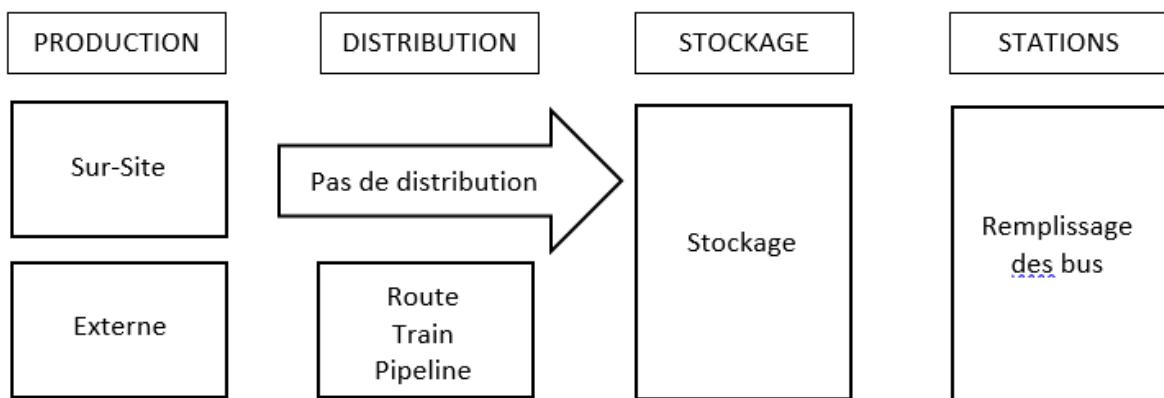
²⁹ FCH JU. (2015). Fuel cell electric buses – Potential for sustainable public transport in Europe.

ETUDE DE LA MISE EN APPLICATION D'UN RESEAU DE FC BUS EN WALLONIE ET A LIEGE

PARTIE II : LA SUPPLY CHAIN

Dans ce chapitre, il est étudié la supply chain des FC bus, chaîne logistique de la production à la distribution aux véhicules, afin de voir comment un réseau peut être mis en application en Wallonie et à Liège.

SUPPLY CHAIN



1 LA PRODUCTION

1.1 La production sur-site

1.1.1 La théorie

Une production sur-site implique que des unités de production soient créées aux dépôts de bus, où ceux-ci viennent se recharger. La solution est uniquement la production via électrolyseur qui convient aux petits et moyens volumes. Il est nécessaire de se procurer :

- un électrolyseur de petite ou moyenne capacité (à déterminer en fonction de la taille de la flotte du dépôt) ;
- la fourniture d'eau ;
- la fourniture d'électricité.

D'un point de vue global, les avantages d'une production sur-site sont la production d'un hydrogène un peu plus pur via l'électrolyse et une meilleure adaptabilité aux variations de la demande en gaz. L'inconvénient majeur est que cette solution reste pour les systèmes à petite ou moyenne capacité. La quantité d'hydrogène produite reste donc limitée.

1.1.2 La concrétisation

Pour déterminer le nombre et la capacité des électrolyseurs ainsi que pour fixer dans quel dépôt il faut en installer, la SRWT et le TEC devront tenir compte de différents paramètres :

- le nombre de bus au sein de chaque flotte : une flotte plus grande requiert plus d'hydrogène à produire ;
- l'autonomie de 350 à 400 km : quelle est la taille du réseau lié au dépôt ? Quelle distance les lignes de bus doivent-elles parcourir ? Si la boucle du trajet fait 350 km, alors aucune recharge n'est nécessaire sur le chemin.
- le budget total dont ils disposeront pour les infrastructures. Le coût du matériel reste le point le plus considérable. Quel sera le budget à disposition de la SRWT ? Le coût dépendra de la taille de l'unité de production. Plus elle aura la capacité de produire du gaz, plus elle coûtera cher. Cette capacité sera directement déterminée par les éléments cités ci-dessus.

A l'heure actuelle, le TEC dispose de 49 dépôts en Wallonie :

- Namur-Luxembourg : 23 dépôts
 - o Salzinnes, Bauce, Onoz, Mehaigne, Fooz, Andenne, Forville, Ohey, Havelange, Florennes, Mariembourg, Ermeton, Wellin, Dinant, Menuchenet, Amberloup, Houffalize, Marloie, Saint-Hubert, Manhay, Arlon, Florenville, Martelange, Stockem
- Liège-Verviers : 11 dépôts
 - o Robermont, Rocourt, Bassenge, Oreye, Jemeppe, Omal, Warzée, Stembert, Eupen
- Brabant wallon : 3 dépôts
 - o Baulers, Jodoigne, Chastre
- Charleroi : 4 dépôts
 - o Anderlues, Montignies-sur-Sambre, Jumet, Nalinnes
- Hainaut : 8 dépôts
 - o Mons, Casteau, Eugies, Roisin, Tournai, Mouscron, La Louvière, Houdeng

1.1.3 La faisabilité

Ce mode de production semble adapté à la création d'un réseau wallon de FC bus. La SRWT et le TEC contrôleraient leur production d'hydrogène et en seraient les seuls propriétaires. C'est d'ailleurs le souhait de la SRWT dont des responsables ont exprimé leur volonté de posséder tous les équipements sur place afin de pouvoir produire leur propre hydrogène et ne pas devoir l'acheter. Cela leur permettrait aussi de contrôler le mode de production qu'ils pourraient choisir 100 % vert si l'électricité est produite à partir d'énergies renouvelables. Cette solution a déjà été choisie par différentes villes, comme Oslo et Milan dans le cadre du projet CHIC. En cas de rupture de la production, le système d'appoint est une livraison par remorque.

L'inconvénient est le coût d'installation d'une telle infrastructure. Une unité qui peut produire jusqu'à 20 kg d'hydrogène par jour peut coûter jusqu'à 500.000 €, accessoires inclus³⁰. 20 kg d'hydrogène par jour est une faible capacité pour des dépôts comme ceux du TEC et par rapport au nombre de véhicules d'une flotte d'un dépôt. Selon la consommation moyenne de 8 à 9 kg d'hydrogène pour 100 km et sachant qu'un bus a une autonomie de 400 km, cela signifie qu'il faut 36 kg d'hydrogène pour faire fonctionner un seul bus pour un seul trajet. En outre, dans le cas d'un dépôt comme Robermont, 300 bus doivent être alimentés. Il est donc évident que 20 kg d'hydrogène par jour sont une trop petite quantité. Il n'y a que deux solutions : soit il faut des électrolyseurs de plus grande capacité mais qui alors coûtent plus cher à l'unité, soit il faut installer plusieurs électrolyseurs dans les gros dépôts.

En conclusion, ce plan ne paraît pas réalisable à moyen terme. Si la SRWT est déjà limitée par un coût d'achat pour les FC bus, il est difficile de croire qu'ils pourront disposer des fonds nécessaires pour mettre des électrolyseurs dans tous les dépôts de la Wallonie.

1.2 La production externe

1.2.1 La théorie

La production est réalisée par une entreprise professionnelle. Plus que probablement, la technique utilisée sera celle du SMR car la plus fréquente, la plus économique et la plus adéquate pour la production à grande échelle. Dans ce cas, la SRWT et le TEC devraient acheter l'hydrogène auprès de grands groupes, tel Air Liquide. Alors, au coût

³⁰ Alpeha Hydrogène, Clean Horizon. (2015). Etude de faisabilité sur le déploiement d'une "Route de l'hydrogène" en Nord-Pas-de-Calais : Partie B – Analyse technique.

de production, il faut ajouter les coûts de compression et de livraison du gaz. Pour prendre l'exemple du projet CHIC, cette solution a été choisie par Londres, Cologne et Whistler.

D'un point de vue global, l'avantage d'une production externe est de ne pas devoir engager un investissement énorme dans les unités de production. Après compression et livraisons, l'hydrogène n'a plus qu'à être inséré dans les véhicules.

1.2.2 La concrétisation

Pour les dépôts pour lesquels la SRWT et le TEC choisirraient cette solution de production sur-site, s'il fait appel à l'entreprise Air Liquide, la seule unité de production d'hydrogène implantée en Belgique est située dans la zone portuaire d'Anvers. Pour la zone Benelux, les autres unités sont implantées aux Pays-Bas – à Bergen-op-Zoom (à 30 km d'Anvers) et à Rozenburg (zone de Rotterdam) – et en France, à Waziers (à 60 km de Mons, uniquement pour de l'hydrogène liquide). L'unité de production d'Anvers verra bientôt l'arrivée d'un SMR de nouvelle génération, le SMR-X, dont l'efficacité énergétique est améliorée et l'empreinte carbone de production diminuée.

1.2.3 La faisabilité

Cette solution est faisable sans problème. La SRWT et le TEC doivent passer un contrat avec une entreprise fournisseur de gaz. Le coût du SMR à la production est le plus bas, entre 1,5 et 2,5 € / kg avec un supplément entre 0,5 et 1 €/ kg si décarbonation.

1.3 Conclusion

1.3.1 La préférence pour la production externe

Dans le cadre de la création d'un réseau wallon, le TEC et la SRWT devront choisir d'utiliser la livraison externe dans un premier temps. Ce choix serait motivé par des raisons budgétaires car il n'est besoin d'aucun investissement dans des infrastructures de production et frais liés.

1.3.2 La production sur-site par la suite

Par la suite, le réseau wallon pourra passer petit à petit à la production sur-site.

Pour la zone Liège-Verviers, où le TEC déciderait-il de placer des électrolyseurs ? Cela pourrait être d'abord envisagé pour les lieux d'accueil de bus plus petits comme les remises de Wanze,

de Verlaine ou d'Oreye car le prix de l'électrolyseur serait le plus bas. L'alimentation des grands dépôts comme celui de Robermont devrait être envisagée après. A terme, ils devraient être alimentés par leur propre électrolyseur de grande capacité. En effet, la livraison externe de l'hydrogène peut vite devenir non rentable pour de grandes quantités.

Il faut attendre quelques années avant d'appliquer la technologie des électrolyseurs à grande capacité car, à l'heure actuelle, elle n'est pas encore assez mature pour pouvoir l'envisager. La solution pourrait-elle être alors d'alimenter les dépôts comme Robermont via les électrolyseurs de petite capacité déjà installés ? Pour y arriver, il faudrait qu'ils atteignent un excédent de production et que les lieux possèdent une capacité de stockage du gaz assez grande pour ensuite le livrer aux grands dépôts. Toutefois, à un rythme de 20 kg d'hydrogène par jour, cette solution d'alimenter les grands dépôts par les petits semble peu probable. Ainsi, la solution pour les grands dépôts reste la livraison externe ou l'installation de plusieurs modules d'électrolyseurs, si le budget le permet.

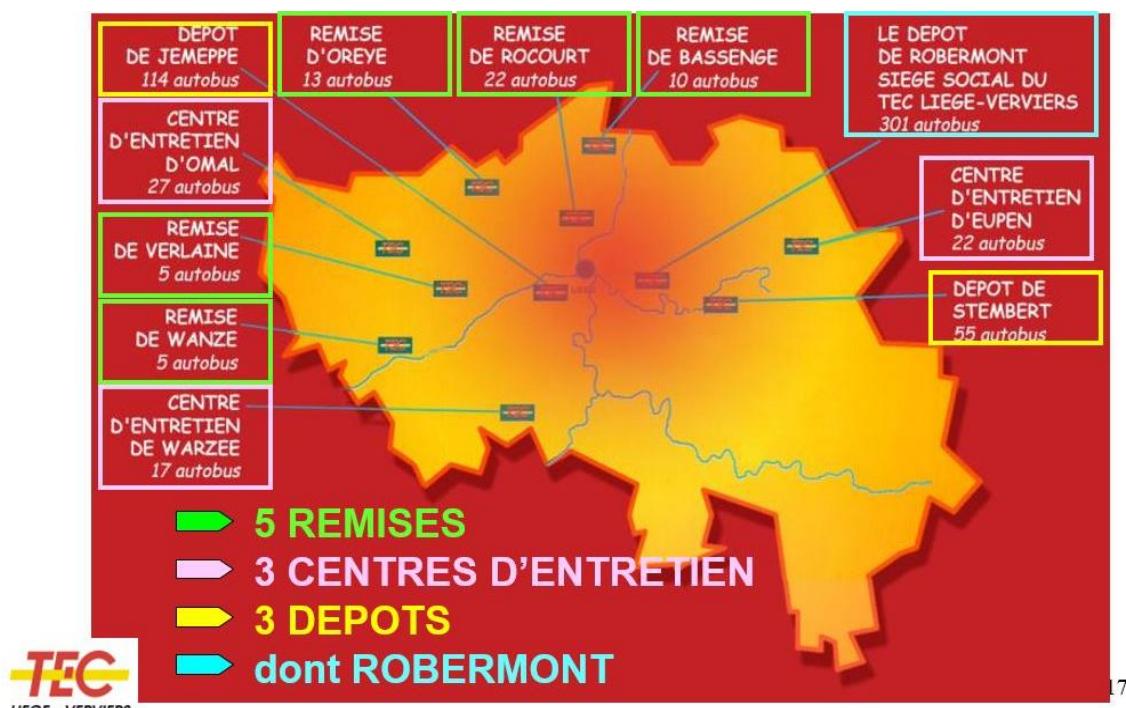


Figure 6 : le TEC Liège-Verviers

2 LA DISTRIBUTION

La distribution n'aura principalement un impact que si la SRWT et le TEC choisissent la solution de production externe. Le gaz doit être transporté depuis l'unité de production aux dépôts. Plusieurs solutions sont envisageables pour la Wallonie :

- par train
- par pipeline
- par camion

La distribution jouera aussi un rôle si un excédent de production des électrolyseurs sur-site est attribué aux autres dépôts. Alors, la distribution de l'un à l'autre se fera par camion.

2.1 Le transport par train

Cette solution est la moins probable car le gaz devrait être transporté par camion de l'usine à la gare, ensuite en train jusqu'à la gare proche du dépôt et puis à nouveau en camion de la gare au dépôt. Ce besoin de plusieurs modes de transport différents est nécessaire car aucune gare wallonne ne correspond aux dépôts de bus. En plus de la difficulté logistique, les coûts sont multipliés par le nombre de modes de transport.

2.2 Le transport par pipeline

2.2.1 La théorie

Air Liquide exploite 879 km de conduites d'hydrogène, dans le Benelux³¹. D'après leurs informations, la consommation d'hydrogène par les entreprises en Wallonie est beaucoup trop faible. Ce sont les industries de pétrochimie qui consomment beaucoup de ce gaz et il y en a peu en Wallonie. Ainsi, le réseau de conduites d'hydrogène wallon est quasi nul. En Belgique, d'après la cartographie du réseau Air Liquide (voir annexe), le pipeline existant démarre du port d'Anvers pour prendre deux directions : l'une est la traversée de la Flandre jusqu'au nord de la France, en faisant un détour par Zeebruges ; l'autre est la descente vers Bruxelles pour ensuite aller jusque Feluy et Jemeppe (entreprise Solvay).

D'un point de vue global, l'avantage de ce mode de transport est qu'une connexion peut être établie en tout point du réseau et qu'une importante quantité est livrée. Il y a également

³¹ Ibidem.

peu de risque de rupture de l'alimentation. L'inconvénient majeur est, quant à lui, le coût de raccordement qui est considérable. Selon Etienne Beeker, les investissements dans un pipeline véhiculant l'hydrogène sont deux fois plus élevés que pour le gaz naturel et ses besoins énergétiques de fonctionnement cinq fois plus importants³². Certains chiffres évaluent le coût économique à 1,5 millions d'euros par km de canalisation³³ ; Air Liquide avance plutôt un coût d'1 million d'euros par km. Même si le coût est investi par l'entreprise fournisseur, il est répercuté dans le prix du gaz.

2.2.2 La concrétisation

Dans l'état actuel du réseau Air Liquide, le seul endroit où une station alimentée par canalisation pourrait être créée est en province du Hainaut sur le trajet du pipeline. Le TEC devrait passer un contrat avec Air Liquide pour la fourniture. Pour limiter le coût du raccordement, il faudrait alors qu'un dépôt concorde au plus près avec le trajet du pipeline. Le TEC pourrait aussi envisager une autre solution si aucun dépôt ne se situe sur le pipeline : elle pourrait créer un gros dépôt de stockage d'hydrogène. Par exemple, la station de Rotterdam alimentée par canalisation peut débiter jusqu'à 250 kg d'hydrogène par jour³⁴. L'afflux d'hydrogène par canalisation permettrait d'alimenter de nombreux dépôts. L'hydrogène est délivré à un prix autour de 2 € / kg³⁵.

2.2.3 La faisabilité

En conclusion, cette solution semble peu probable pour la SRWT et le TEC car le coût en infrastructures est beaucoup trop élevé. Le choix le plus réalisable serait celui d'une unité de stockage sur le trajet du pipeline. Cela demanderait à la SRWT et le TEC de créer, dans le Hainaut ou en province de Namur, un entrepôt de grande taille avec les machines adéquates pour réceptionner l'hydrogène et le mettre en conditionnement. L'hydrogène stocké pourrait ensuite être délivré dans toute la Wallonie.

Une entreprise comme Air Liquide n'investira jamais dans un pipeline dédié au seul TEC car leur consommation est beaucoup trop basse par rapport au prix du projet.

³² Beeker, E. (2014). Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? *France Stratégie magazine* (relié au Commissariat général à la stratégie et à la prospective), n° 15. Repéré à : www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/201-08-06na-fs-hydrogene-hd.pdf

³³ Alpeha Hydrogène, Clean Horizon. (2015). Etude de faisabilité sur le déploiement d'une "Route de l'hydrogène" en Nord-Pas-de-Calais : Partie B – Analyse technique.

³⁴ Ibidem.

³⁵ Ibidem.

2.3 Le transport par camion

2.3.1 La théorie

L'avantage de ce mode de transport est la possibilité de livrer le gaz sur tout le territoire. Cependant, les inconvénients majeurs sont la capacité limite transportable par trajet et l'augmentation du coût avec la distance de livraison. Les frais de transport et de logistique représentent toujours une part importante de la facture finale pour le client.

2.3.2 La concrétisation

L'hydrogène gazeux peut être livré par camion, en bouteilles ou dans des tubes trailers³⁶, de capacité variable suivant les besoins.

2.3.3 La faisabilité

En conclusion, dans le cas d'un réseau de FC bus, le TEC envisagera probablement la sous-traitance du service de livraison. Il ne dispose pas des moyens matériels ni financiers de constituer sa propre flotte de camions pour gérer les transports. Il peut demander à des entreprises comme Air Liquide qui disposent de leurs sous-traitants avec des camions adaptés à ces livraisons spéciales. Par exemple, Air Liquide assure toutes les étapes.

Air Liquide donne un chiffre de 3 € / kg pour le transport d'hydrogène gazeux et de 0,7 € / kg pour le transport d'hydrogène liquide³⁷.

3 LE STOCKAGE

3.1 La production sur-site

3.1.1 L'étape préalable au stockage : la compression

Air Liquide³⁸ explique parfaitement la problématique liée au stockage de l'hydrogène qui est le gaz le plus léger dans l'univers. Il occupe un volume important dans les conditions de pression standard, c'est-à-dire à la pression atmosphérique. En comparaison, le volume du coffre d'un grand utilitaire (11 m³) permet de stocker 1 kg d'hydrogène. La seule solution

³⁶ Réservoirs cylindriques à grande capacité

³⁷ Source confidentielle.

³⁸ Air Liquide. (2018). *Energies*. <https://energies.airliquide.com/fr>

est ainsi la réduction de son volume, opération qui nécessite l'augmentation de sa densité par la compression (augmentation de la pression). La pression généralement retenue est celle de 700 bars, niveau auquel 5 kg d'hydrogène sont stockés dans une réservoir de 125 L³⁹.

Une unité de compression coûte entre 200.000 et 300.000 €⁴⁰. La SRWT et le TEC devront en acheter quoi qu'il arrive pour amener le gaz au niveau de pression auquel il doit se trouver dans le moteur.

3.1.2 Le stockage

L'hydrogène est stocké dans des bouteilles, des réservoirs ou des tubes trailers.⁴¹

La SRWT et le TEC devraient en outre acheter des réservoirs ad hoc. Selon Air Liquide, un stockage gazeux dans un réservoir de 100 kg sous une pression à 700 bars, coûte environ 20.000 €. Le montant est élevé car l'enveloppe est fabriquée en matériaux très spécifiques qui permettent d'éviter les fuites et de soutenir le gaz sous pression. Ce coût énorme rend la solution de la production sur-site très délicate. A l'avenir, des progrès sur les matériaux de l'enveloppe permettraient de réduire les coûts.

Pour des raisons budgétaires déjà évoquées, il semble peu probable que la SRWT et le TEC arrivent à mettre de telles infrastructures de compression et de stockage en place. Le tout demande des investissements beaucoup trop importants qu'ils ne peuvent pas se permettre. Il faudrait en mettre à tous les endroits où ils choisissent une production sur-site.

3.2 La production externe

3.2.1 La compression et le stockage

La SRWT et le TEC ne s'occupent ni de la compression, ni du stockage, réalisés directement en usine. Air Liquide estime que le coût total de l'opération est de 1 €/ kg⁴². D'autres sources parlent de 2 € supplémentaires par kg transporté pour le coût de la compression⁴³.

Cette solution permet d'éviter des investissements énormes qui ne peuvent pas être assumés.

³⁹ Alphea Hydrogène, Clean Horizon. (2015). Etude de faisabilité sur le déploiement d'une "Route de l'hydrogène" en Nord-Pas-de-Calais : Partie B – Analyse technique.

⁴⁰ Ibidem.

⁴¹ Source confidentielle.

⁴² Source confidentielle.

⁴³ Beeker, E. (2014). Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? *France Stratégie magazine* (rélié au Commissariat général à la stratégie et à la prospective), n° 15. Repéré à : www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/201-08-06na-fs-hydrogene-hd.pdf

S'il est fait le choix d'une unité de stockage sur le trajet du pipeline, il faudra investir dans une unité de compression car le gaz circule dans le réseau à une pression inférieure à 100 bars.

3.2.2 L'hydrogène liquide

L'hydrogène est produit sous deux formes : gazeux ou liquide.

Ce dernier possède un avantage sur le gazeux : il prend moins de place. Une plus grande quantité d'hydrogène peut être obtenue en une livraison. Il est transporté par camion-citerne et la capacité maximale livrable avoisine généralement 4 tonnes⁴⁴. A contrario, les inconvénients sont grands car les infrastructures nécessaires sont chères. La SRWT et le TEC devront acheter une unité de compression car elle doit être réalisée après la distribution, à l'arrivée du gaz sur le site. De plus, l'hydrogène liquide coûte plus cher à la production car il demande une étape supplémentaire : le refroidissement du gaz à très basse température pour le faire devenir liquide.

Pour toutes ces raisons, le choix de l'hydrogène liquide est très peu probable car beaucoup trop cher.

4 LES STATIONS-SERVICES

4.1 La situation actuelle

Actuellement, l'entreprise Air Liquide a déjà conçu une centaine de stations dont une en Belgique, à Zaventem. Elle dispose d'une seule pompe (700 bars) et d'une cuve de 200 kg d'hydrogène. Le gaz est produit hors site et est conduit par camion à la station depuis Anvers. Entre 30 et 40 véhicules par jour peuvent venir se ravitailler. Le lieu de la station, ouverte en 2016, n'a pas été choisi par hasard car il s'agit du siège de Toyota dans le pays. Toyota est un constructeur automobile qui a développé ses voitures FC.

⁴⁴ Alpheia Hydrogène, Clean Horizon. (2015). Etude de faisabilité sur le déploiement d'une "Route de l'hydrogène" en Nord-Pas-de-Calais : Partie B – Analyse technique.

4.2 La concrétisation

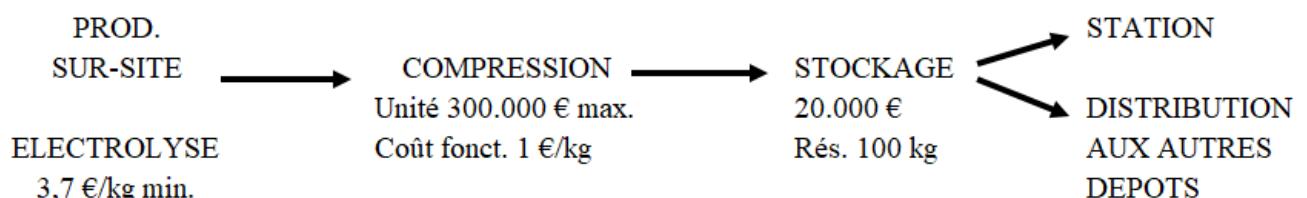
Le coût d'une station-service reste confidentiel. Selon Beeker, il peut être estimé à 1,5 millions d'euros⁴⁵. Le prix dépendra de différents facteurs dont la taille, la quantité distribuée et la pression du gaz à la sortie.

4.3 La faisabilité

En conclusion, les stations-services sont l'infrastructure indispensable pour la mise en application d'un réseau. Sans station, pas de véhicule roulant car l'hydrogène ne pourrait pas être injecté dans le bus. La SRWT et le TEC seraient donc obligés d'avoir une station d'hydrogène dans chaque dépôt de FC bus. Cela leur demanderait un budget énorme. Pour réduire ce coût, ils pourraient envisager une réorganisation des dépôts de bus.

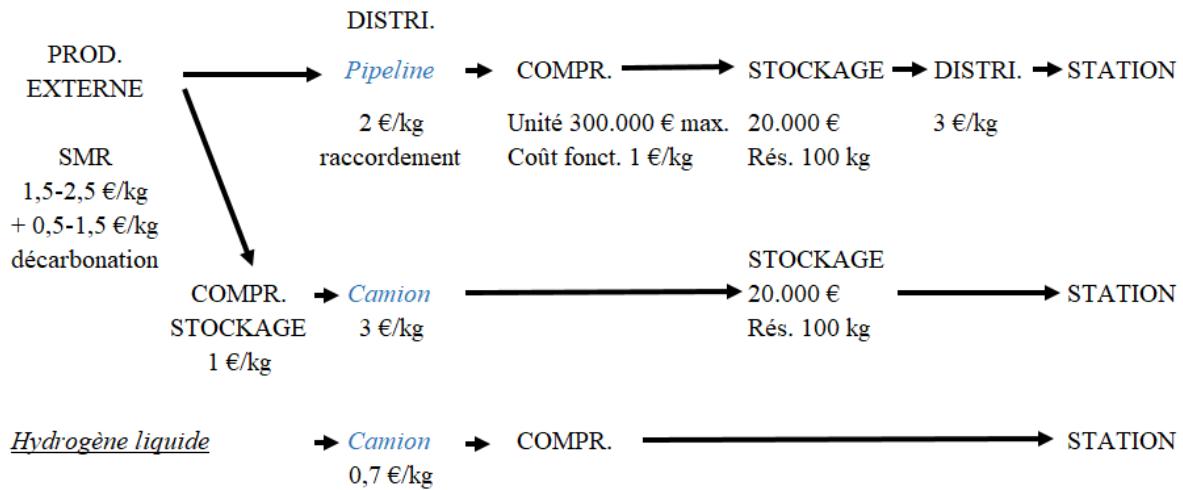
5 LE SCHÉMA RÉCAPITULATIF DE LA SUPPLY CHAIN

5.1 La production sur-site



⁴⁵Beeker, E. (2014). Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? *France Stratégie magazine* (rélié au Commissariat général à la stratégie et à la prospective), n° 15. Repéré à : www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/201-08-06na-fs-hydrogene-hd.pdf

5.2 La production externe



6 LA VILLE DE LIÈGE

Depuis le début de ce travail, la ville de Liège prend peu de place dans l'infrastructure d'un réseau de bus hormis la présence de bus hybrides. Elle est citée au travers du TEC Liège-Verviers mais l'autorité compétente est la Région. Cette dernière décide des politiques de transport et la commune les exécute à son niveau. La ville ne peut qu'aider à instaurer les plans de mobilité et à augmenter la fréquentation des bus par la prise d'incitants.

En conclusion, instaurer un réseau de FC bus au simple niveau de la ville de Liège n'a aucun sens. Dans un pays comme la Belgique, avec nos capacités budgétaires, il faut envisager un plan régional pour atteindre des économies d'échelle, comme prôné par le FCH JU. Sans une telle envergure, les coûts resteront trop chers et ne pourront jamais être assumés par la SRWT, ni les autorités locales si elles décident d'intervenir via un quelconque moyen (subside ou autre).

Liège a déjà envisagé des modifications de son réseau de transport et la diminution des voitures en centre-ville avec l'implantation du tram. Celui-ci répond à un réel besoin de désengorgement. Comme l'explique les autorités communales, la demande en transports publics explosent et l'offre sature⁴⁶. Et cela continuera dans le même sens avec la croissance de la clientèle encore

⁴⁶ Ville de Liège. (2018). *Projet du tram.* <https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/mobilite/projets/tram>

attendue. Avec ce projet, le réseau de bus devra être réorganisé. Le tram prendra la place des bus sur une partie du trajet. Le TEC concentrera son effort sur les zones non desservies par le tram pour y implanter des lignes de bus fortes et pour créer une complémentarité bus – tram. Ces bus ne seront que des hybrides. Pour le moment, il a été affirmé par un responsable des TEC que les FC bus étaient totalement hors de propos. La priorité est le tram. Le projet est ambitieux : « Les 21 stations planifiées sur le tracé permettent de desservir 70.000 habitants, 40.000 étudiants et 40.000 emplois. [...] Un tram permet de déplacer jusqu'à 300 personnes. Le projet porté par la SRWT propose une fréquence en pointe de 4 minutes 30, soit une capacité maximale de 4.000 personnes par heure et par sens. »⁴⁷ Le tram doit devenir la « colonne vertébrale du transport en commun » à Liège.

Une projection encore plus grande dans l'avenir serait de songer à une infrastructure hydrogène commune aux bus et aux trams puisque ceux-ci peuvent également être propulsés par une pile à combustible, avec l'avantage de ne nécessiter que des rails, sans aucune ligne électrique, ni caténaires. Mais cela dépasse le sujet de ce travail...

⁴⁷ Ville de Liège. (2018). *Projet du tram.* <https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/mobilite/projets/tram>

POTENTIALITES DE LA TECHNOLOGIE

1 LES VOITURES ET LES CAMIONS

Les premières voitures FC ont été commercialisés à partir de 2013 par Hyundai et Toyota ((Hyundai ix35, Toyota Mirai). D'autres constructeurs comme Honda, Lexus et Audi ont ensuite suivi le mouvement, séduits par la belle autonomie (500 km), par le plein rapide (5 minutes) et bien évidemment par leur caractère zéro-émission. Ils espèrent commercialiser à grande échelle les véhicules individuels d'ici 2025.

Le Japon mettra en avant ces véhicules lors des Jeux Olympiques de Tokyo en 2020. Pour l'occasion, Toyota présenta la Mirai nouvelle génération, d'autonomie plus grande, ainsi que leur premier FC bus. Ils souhaitent produire une centaine d'exemplaires pour assurer le transport lors des Jeux. La particularité de ces bus est d'avoir une utilité double. En plus du transport de personnes, ils servent de générateurs de secours en cas de tremblement de terre. Ils ont été baptisés Sora, Sky Ocean River Air, en rappel du cycle de l'eau sur terre et pour insister sur la non pollution en aval de la technologie de la pile à combustible.

Des taxis à hydrogène ("Hype") sont déjà en train de rouler en région parisienne. L'entreprise espère voir leur nombre grimper à 200 véhicules hydrogène d'ici la fin de l'année.

Le développement des poids lourds est aussi très important. Notamment l'entreprise Nikola aux Etats-Unis qui connaît déjà 30 000 précommandes pour ses camions (chiffres d'avril 2018).

L'univers des courses automobiles risque aussi de ne pas manquer le tournant de l'hydrogène car une voiture prototype LMP1 hydrogène participera certainement aux 24 heures du Mans dans quelques années avec l'écurie BMW⁴⁸.

Pour conclure sur les voitures et pour revenir au domaine de la supply chain, une belle initiative d'infrastructure complète de production et de distribution d'hydrogène d'origine renouvelable, couplée à une offre de location de véhicules, va être installée dans le Morbihan⁴⁹. L'image promotionnelle de leur supply chain illustre très bien les possibilités à laquelle les collectivités

⁴⁸ Watkins, G. (2018). BMW pense à un retour en LMP1 avec l'hydrogène. *Motorsport.com*. Repéré à : <https://fr.motorsport.com/lemans/news/bmw-retour-lmp1-hydrogene-24h-1027036/>

⁴⁹ Lamoureux, M. (2018). Le Morbihan dans la course à l'hydrogène. *Flottes automobiles : La gestion des véhicules professionnels*. Repéré à : <https://www.flotauto.com/morbihan-hydrogene-20180411.html>

pourront arriver s'ils réfléchissent bien à l'agencement de toutes les interactions entre les différents acteurs. Ce réseau représente l'avenir.

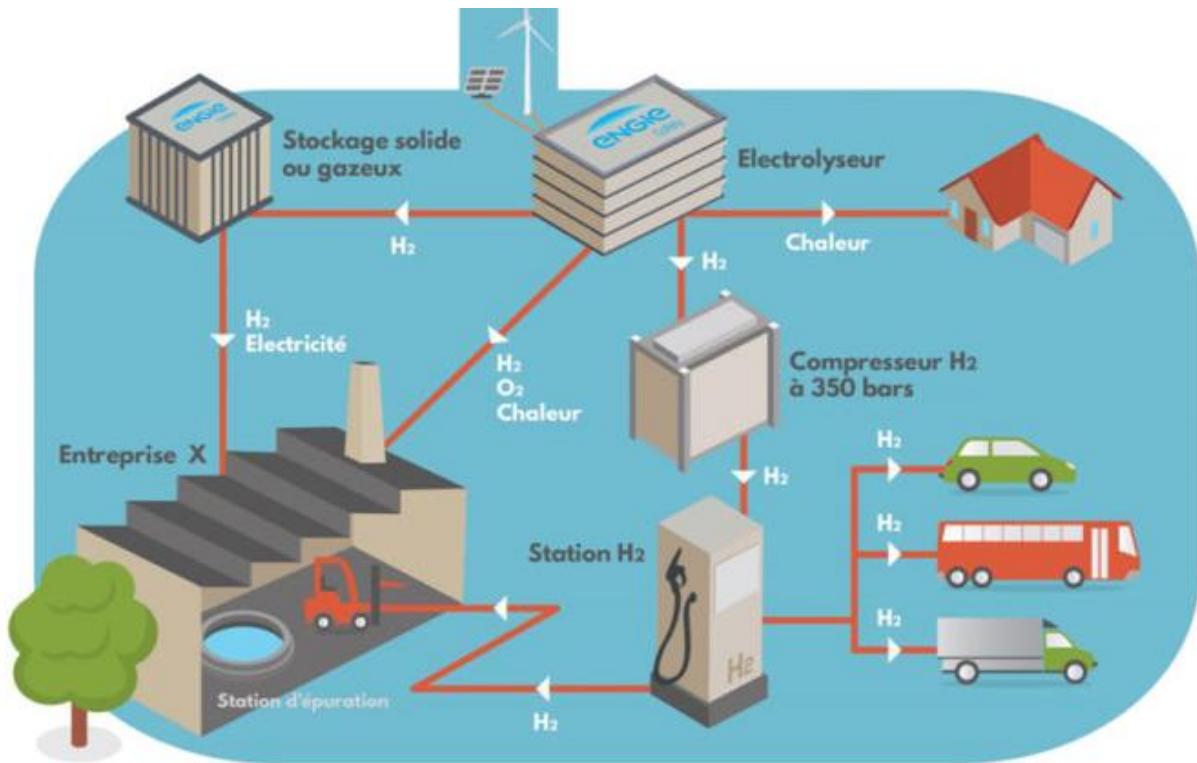


Figure 7 : image promotionnelle du réseau hydrogène dans le Morbihan

2 LES TRAINS ET TRAMWAYS

La société Alstom a déjà développé un train en exploitation dans le land de Basse-Saxe en Allemagne. Il est capable de transporter 300 passagers à une vitesse de 160 km / h sur une distance de près de 1000 km. L'avantage est la fin des lignes électriques et des caténaires qui sont une énorme infrastructure. Sachant que, dans le monde, la moitié des lignes ferroviaires ne sont pas électrifiées⁵⁰, cette solution est promise à un bel avenir.

Le constructeur belge Van Hool produit 8 FC tramways pour la ville française de Pau. Ils possèdent une autonomie de 300 km et le remplissage des réservoirs prend moins de 10 minutes. Ce serait une première mondiale pour des tram-bus. Leur livraison est prévue pour fin 2019.

⁵⁰ Air Liquide. (2018). Assemblée générale des actionnaires du 16 mai 2018.

La Chine entreprend aussi une prise de conscience environnementale et tente de résoudre ses problèmes de mobilité et de pollution. En 2016, elle a lancé son tramway qui peut parcourir une distance de 100 kilomètres, transporter jusqu'à 380 passagers et atteindre une vitesse maximale est de 70 km/h.

3 LES VÉLOS ET LES BATEAUX

Des vélos à hydrogène ont aussi été développés. Ils possèdent une capacité de stockage de 35 grammes de gaz et disposent d'une autonomie doublée par rapport aux vélos électriques. Pour les recharges, soit une sortie adaptée serait prévue dans les stations, soit des petites stations seraient créées.

Un catamaran laboratoire énergétique propulsé à l'hydrogène, Energy Observer, est en train de naviguer en Méditerranée pour tester l'hydrogène pour le stockage. Il est sponsorisé par Engie qui promeut l'hydrogène vert. Des entreprises réfléchissent aussi à des bateaux traversiers.

4 LES CHARIOTS ÉLÉVATEURS ET LES ÉQUIPEMENTS STATIONNAIRES

Un marché en forte croissance est aussi celui des véhicules en lieux fermés : les chariots élévateurs en entrepôt de logistique et les véhicules de transport de bagages en aéroport. Air Liquide fournit d'ailleurs des stations de recharge pour des chariots élévateurs. L'entreprise a aussi formé un partenariat avec Toyota qui produit de tels véhicules.

L'hydrogène est aussi envisagé pour la fourniture d'énergie aux équipements stationnaires éloignés du réseau comme les antennes de téléphonie mobile.

CONCLUSION

Aujourd’hui, les véhicules alternatifs se font encore rares au niveau mondial. Selon le magazine L’automobile & L’entreprise⁵¹, la part de chaque propulsion dans le mix global était la suivante pour le premier trimestre 2018 :

- Diesel : 50 %
- Essence : 44,68 %
- Electrique : 1,37 %
- Hybride : 3,79 %

Comme le souligne le FCH JU dans son étude de 2015⁵², investir dans les FC bus est bénéfique pour quatre raisons :

1. politiquement, la tendance est à la réduction des émissions dans le transport public ;
2. pour l’environnement, les FC bus permettent de réduire les niveaux de bruit et ouvrent la voie à des villes et à un transport vert ;
3. économiquement, les FC bus réduisent les coûts externes du transport public ;
4. opérationnellement, les FC bus représentent la solution zéro-émission la plus flexible.

Il poursuit en disant que la technologie des FC bus a connu un formidable développement sur ces dernières années. Ce progrès, dû notamment aux projets européens qui les ont testés sur le terrain, ont permis aux constructeurs d’améliorer les procédés.

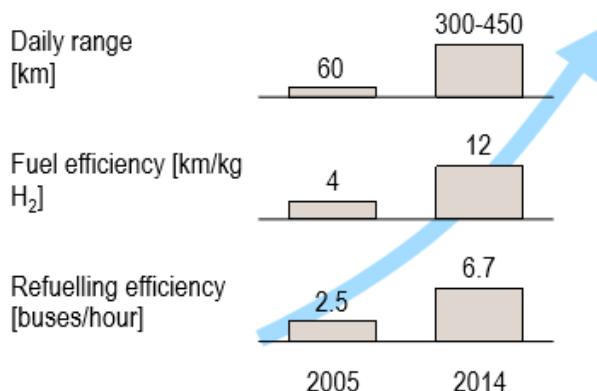


Figure 8 : progrès de la technologie des FC bus

⁵¹ Faucher, E. (2018). Le diesel se tasse dans les flottes au premier trimestre 2018. *L’automobile & l’entreprise*. Repéré à : https://www.automobile-entreprise.com/_Helene-Faucher,70_

⁵² Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU. (2015). Fuel cell electric buses – Potential for sustainable public transport in Europe.

La société a conscience du besoin urgent en technologies de développement durable. En zones urbaines, l'utilisation des FC bus permettra d'augmenter l'attractivité des villes et la qualité de vie. Le potentiel économique qui en résultera est aussi énorme. La demande et la production d'hydrogène devraient croître de manière exponentielle dans les prochaines décennies. Le secteur du transport sera celui qui profitera le plus de la technologie. Il en sera son meilleur promoteur grâce aux tonnes de diesel qui seront économisées. Le nombre de véhicules en jeu (voitures particulières, taxis, cars, camions, etc.) tentera facilement les entreprises de se lancer dans la course pour ne pas rater de belles opportunités de profit. Ainsi, l'hydrogène peut tendre la voie à une croissance économique respectueuse de l'environnement et garantissant un usage meilleur et réfléchi des ressources terrestres. L'Hydrogen Council utilise le terme de « croissance économique durable » pour désigner ce nouveau courant.

Pour atteindre cet objectif, les nations doivent oser passer le pas de la technologie. Avant toute chose, un cadre réglementaire est nécessaire quant aux normes d'utilisation et à la fiscalité. L'hydrogène est un nouveau mode de vie. Il aura un impact sur tous les aspects de la société. En développer des applications sans base juridique est impossible et représente un trop gros flou. Les gouvernements doivent prendre acte des changements à venir et les anticiper pour être prêts quand le changement sera amorcé à grande échelle.

Quelle est la position de la Wallonie ? Le choix de la technologie hybride est dommage. Oui, cette propulsion est un pas en avant vers un monde plus propre mais elle présente des lacunes qui la font plier face aux piles à combustible. A long terme, elle risque de ne pas être efficiente. La situation wallonne reflète un choix à court terme. Il semble que les autorités ont vite pris une solution « écologique » quand elles se sont rendu compte qu'il était temps de changer toutes les flottes de bus des dépôts. La mise en application parfois hasardeuse (infrastructures de pantographes manquantes, sources d'alimentation des batteries insuffisantes) démontre que les organismes ne maîtrisent pas la technologie. Un responsable du TEC a exprimé son désarroi face au changement qui avait dû être réalisé et terminé sur une seule année. Maintenant, le TEC doit conserver pendant 16 ans ses bus hybrides ; période pendant laquelle les autres pays risquent de la dépasser. A sa décharge, le moment de renouvellement des flottes est vraiment mal tombé. Si les flottes avaient dû être remplacées d'ici 5 à 7 ans, peut-être les autorités auraient-elles privilégié l'hydrogène sur l'hybride ?

Pourtant, que peut faire la SRWT avec les contraintes budgétaires qui sont les siennes ? Rien malheureusement. Le retard qu'elle accumule dans le développement de la technologie est et restera dû au coût beaucoup trop élevé de celle-ci à l'heure actuelle. Le cœur du problème

est une affaire de gros sous. L'argent reste encore et toujours le nerf de la guerre, au détriment de l'environnement.

Mais prendre uniquement l'argent comme excuse serait tomber dans la facilité. La Région a aussi fait preuve d'un énorme manque de volonté politique. Il est à déplorer que personne n'ait pris ni le temps, ni le recul, ni l'anticipation nécessaire il y a des années pour réfléchir au changement de carburant qui tendait pourtant les bras.

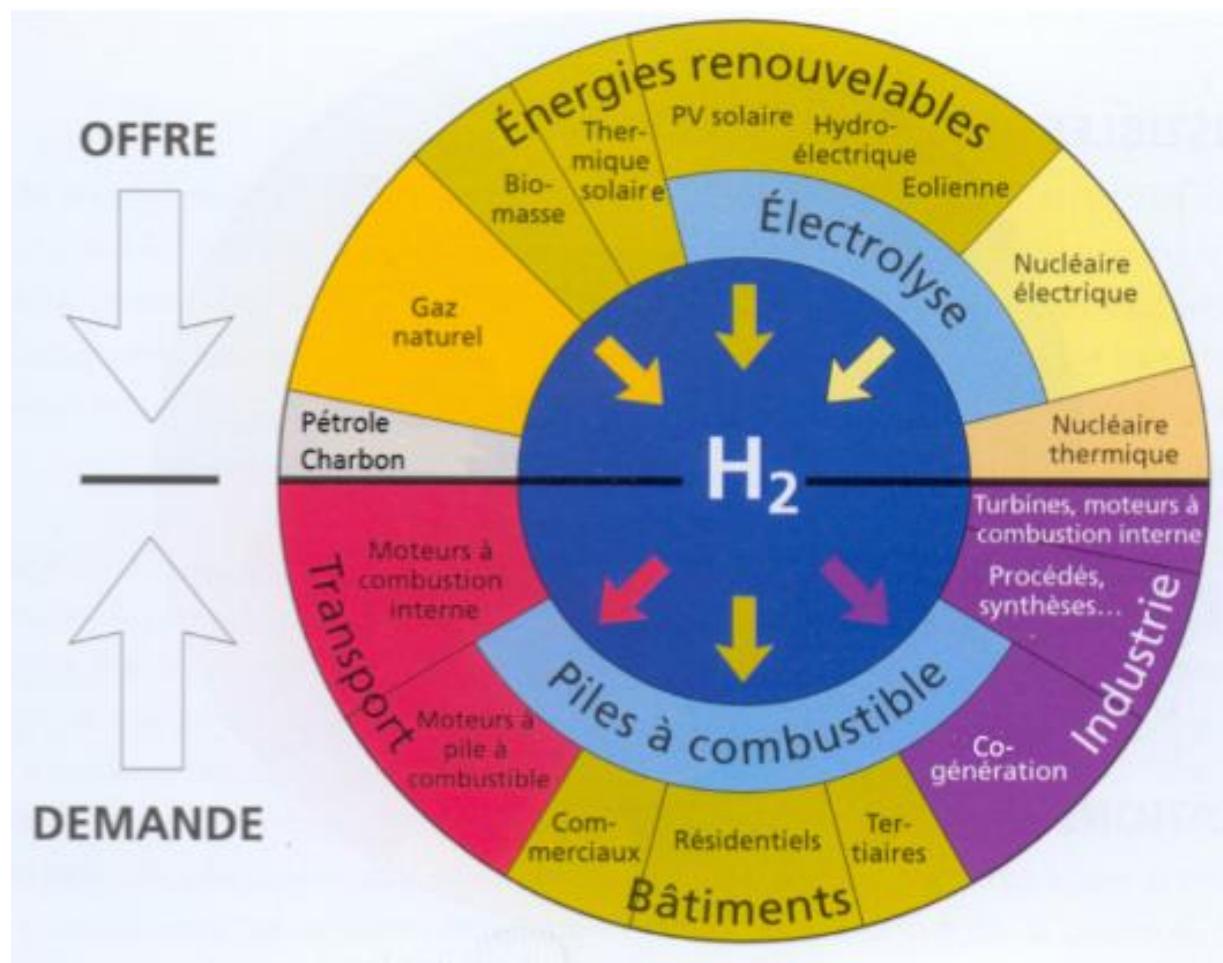
Tous ces éléments sont vraiment très malheureux. Ils donnent l'impression que la Région wallonne reste en recul face à la technologie. Si elle veut être compétitive et être partie prenante du mouvement quand il prendra son essor, c'est maintenant qu'il faut prendre une décision.

En conclusion, beaucoup s'attendent à ce que, d'ici l'horizon 2030, l'hydrogène représente 20 % de l'énergie totale utilisée dans le monde et qu'il contribue à une baisse de 20 % des émissions de CO₂, oxyde d'azote (NO_x) et autres particules. Avec les potentialités de technologie qui sont les siennes, l'hydrogène aura une place centrale dans la vie de chacun.

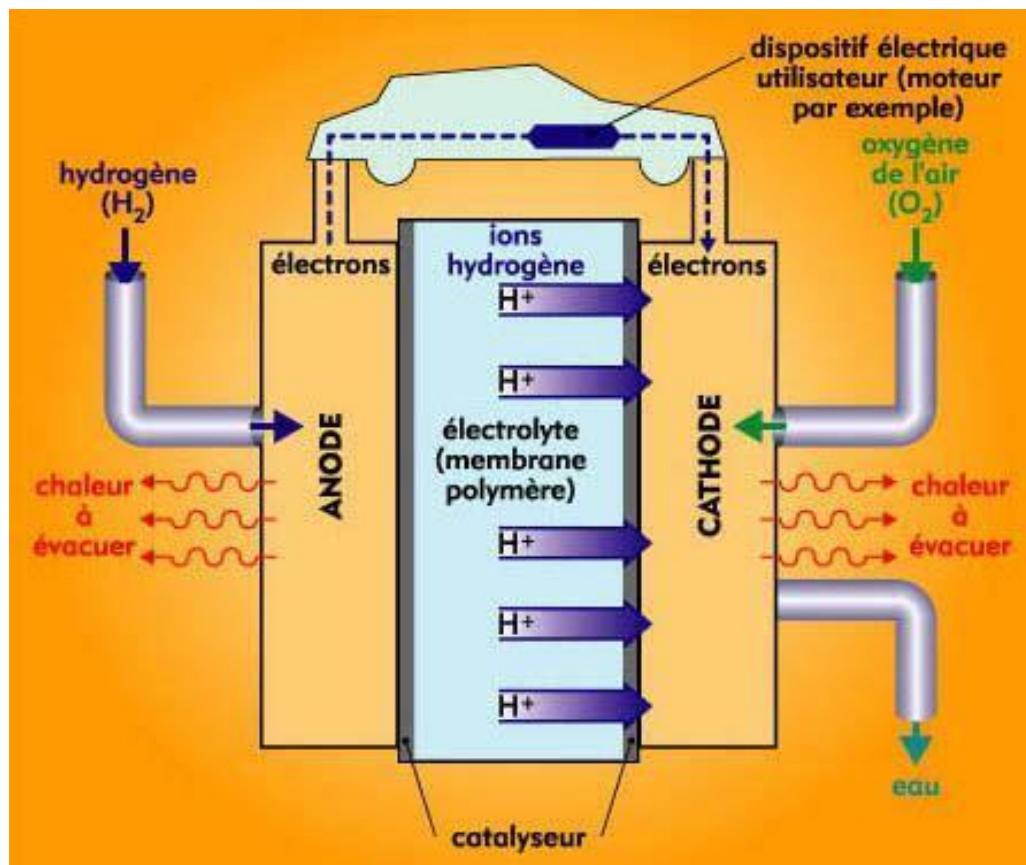
ANNEXES

- Annexe 1 Chaîne hydrogène
- Annexe 2 Schéma d'une pile à combustible
- Annexe 3 Prix évolutifs pour le gasoil et l'électricité estimés par la SRWT
- Annexe 4 Réseau des conduites Air Liquide dans le Benelux
- Annexe 5 Projets européens
- Annexe 6 H2Mobility

Annexe 1 : Chaîne hydrogène – schéma issu de l'AFHYPAC



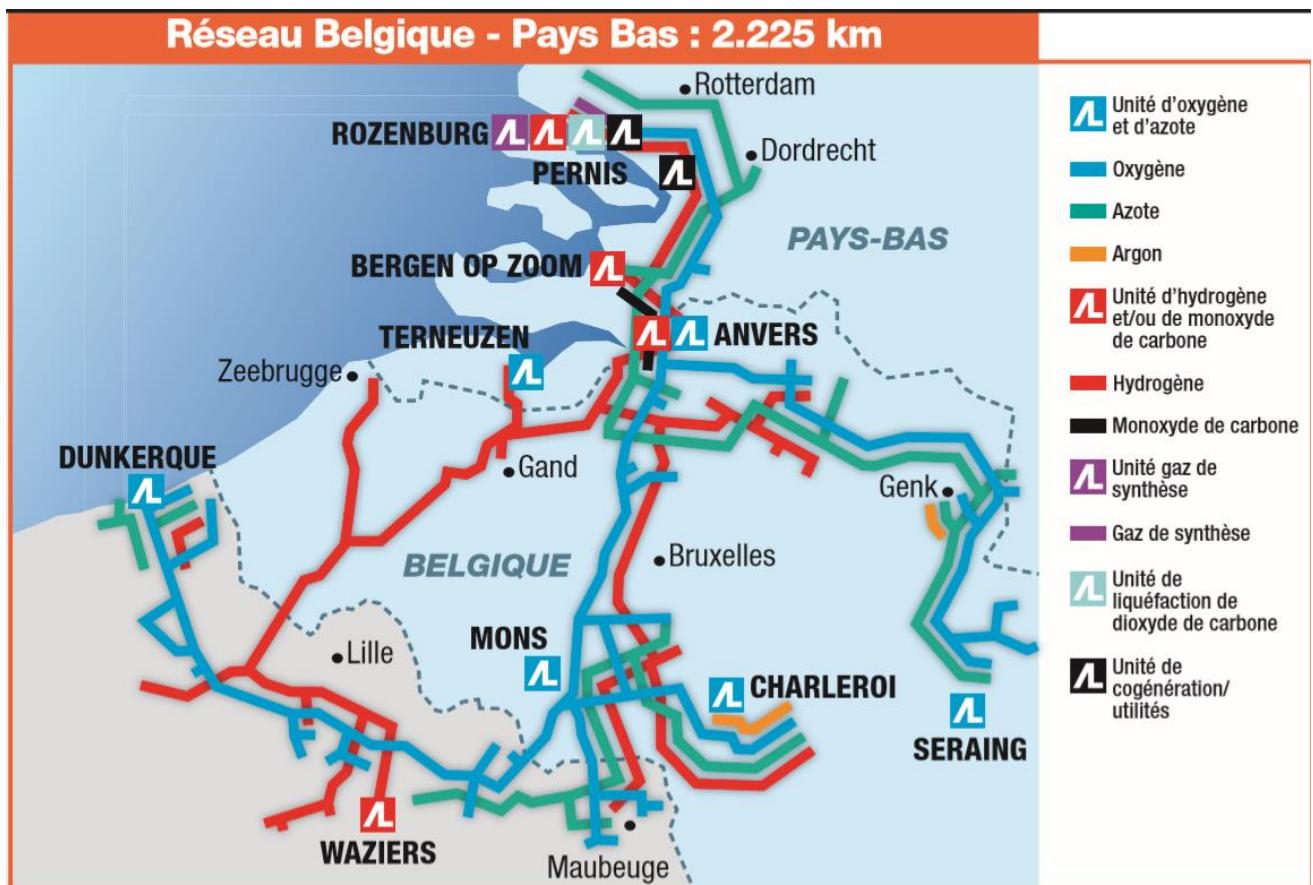
Annexe 2 : Schéma d'une pile à combustible



Annexe 3 : Les prix évolutifs pour le gasoil et l'électricité estimés par la SRWT dans son cahier des charges de 2016

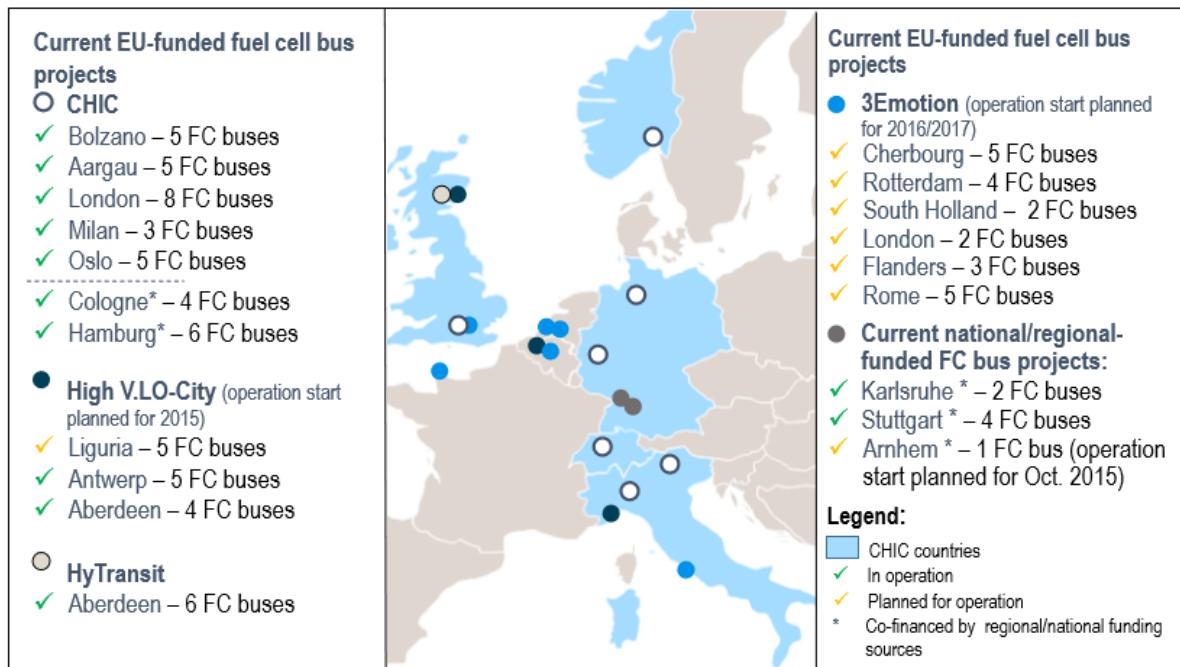
Gasoil (€ / L)		Électricité (€ / kWh)	
Année 1	0,9787	Année 1	0,140
Année 2	1,0293	Année 2	0,141
Année 3	1,08	Année 3	0,143
Année 4	1,1306	Année 4	0,144
Année 5	1,1812	Année 5	0,146
Année 6	1,2318	Année 6	0,147
Année 7	1,2824	Année 7	0,149
Année 8	1,3331	Année 8	0,150
Année 9	1,3837	Année 9	0,152
Année 10	1,4343	Année 10	0,153

Annexe 4 : Réseau des conduites de gaz Air Liquide dans le Benelux



Annexe 5 : Les différents projets européens

Voici une carte datée de 2015 résumant l'exploration des FC bus suivant les différents projets européens. Elle est issue du site internet du projet CHIC.



Annexe 6 : Réseau de stations-services que veut créer l'Allemagne – H2 Mobility



TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1 Table d'équivalences des densités énergétiques
- Figure 2 Représentation schématique d'un FC bus
- Figure 3 Evolution du prix des FC bus – scénario de niche / à grande échelle
- Figure 4 Evolution du TCO des FC bus et des bus diesel
- Figure 5 Nuisances sonores comparées entre les FC bus et les bus diesel
- Figure 6 TEC Liège-Verviers
- Figure 7 Image promotionnelle du réseau hydrogène dans le Morbihan
- Figure 8 Progrès de la technologie des FC bus

BIBLIOGRAPHIE

MONOGRAPHIES

Franc, P-E. (2015). *Hydrogène : la transition énergétique en marche !* Paris, France: Gallimard.

SOURCES LEGALES

Union européenne

Directive 89/391/CE du 12 juin 1989. Protection des travailleurs.

Directive Appareils à pression 97/23/CE du 29 mai 1997. Protection des équipements.

Directive Machines 98/37/CE du 22 juin 1998. Protection des équipements.

Directive 94/9/CE du 23 mars 1999. Protection des équipements.

Directive 99/92/CE du 29 avril 1999. Protection des travailleurs exposés au risque d'atmosphère explosive.

RAPPORTS OFFICIELS ET ETUDES

AFHYPAC. (2018). Rapport Mobilité Hydrogène France : L'opportunité bus électriques à hydrogène.

Air Liquide. (2018). Assemblée générale des actionnaires du 16 mai 2018.

Alphea Hydrogène, Clean Horizon. (2015). Etude de faisabilité sur le déploiement d'une "Route de l'hydrogène" en Nord-Pas-de-Calais : Partie B – Analyse technique.

Clean Hydrogen in European Cities – CHIC. (2015). Présentation du projet CHIC : déploiement de bus électriques à pile à combustible.

Commission européenne. (2013). L'UE lance une stratégie pour des carburants propres.

European Integrated Hydrogen Project – EIHP. (2004). Joint final report – Final technical report.

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU. (2015). Fuel cell electric buses – Potential for sustainable public transport in Europe.

Groupe TEC. (2018). Rapport annuel 2017.

Hydrogen Council. (2017). How hydrogen empowers the energy transition.

Hydrogen Council. (2017). Hydrogen scaling up : A sustainable pathway for the global energy transition.

HyFleet :Cute. (2009). Hydrogen transports : Bus technology & Fuel for TODAY and for a sustainable future.

Ministère français de l’écologie, de l’énergie, du développement durable et de l’aménagement du territoire. (2018). Accidentologie de l’hydrogène.

Société régionale wallonne de transport – SRWT. (2016). Cahier des charges "Fourniture d'une solution de transport public de type hybride".

TEC Liège-Verviers. (2017). Rapport annuel 2016 du TEC Liège-Verviers.

U.S. Department of Energy. (2015). Safety, codes and standard section.

SITES INTERNET

3EMOTION. (2017).

<http://www.3emotion.eu/>

Air Liquide. (2018). *Energies*.

<https://energies.airliquide.com/fr>

Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible – AFHYPAC. (2017).

<http://www.afhypac.org/>

Bruxelles Environnement. *Low Emission Zone*.

<http://www.lez.brussels/fr>

Clean Hydrogen in European Cities – CHIC. (2003)

<http://chic-project.eu/>

Commission européenne. (2018). *Urban Access Regulations in Europe*.

<http://urbanaccessregulations.eu/>

Connaissance des énergies. (2017). *Service de presse en ligne*.

<https://www.connaissancedesenergies.org/>

Encyclopédie de l'énergie. (2017).

<http://encyclopedie-energie.org/>

Fuel Cell & Hydrogen Energy Association - FCHEA. *Agence américaine*. (2017).

<http://www.hydrogenandfuelcellsafety.info/>

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking – FCH JU. (2017).

<http://www.fch.europa.eu/>

Futura-sciences. (2017). *Portail web d'informations liées à la connaissance*.

<https://www.futura-sciences.com/>

H2Bus France. (2017). *Le groupement H2bus France*.

<https://www.h2bus-france.fr/>

Highvlocity. (2012).

<http://highvlocity.eu/>

Hydrogen Tools. (2018). *Focusing on Safety Knowledge and Hydrogen Analysis Tools*.

<https://h2tools.org/>

HyTransit. (2013).

<http://hyer.eu/eu-projects/hytransit/>

IFP Energies nouvelles. (2017). *Organisme public de recherche, d'innovation et de formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement*.

<http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>

Organisation internationale de normalisation – ISO. (2018).

<https://www.iso.org>

Planete-energies. (2017). *Portail web sur les énergies à l'initiative de l'entreprise Total*.

<https://www.planete-energies.com/>

Région wallonne. (2018). *Portail de la Wallonie, Transport et Mobilité*.

<http://www.wallonie.be/fr/competences/transport-et-mobilite>

Safety of Hydrogen as an Energy Carrier – HySafe. (2007).

<http://www.hysafe.org/>

Sociétés d'exploitation TEC. (2018).

<https://www.infotec.be/>

Transbus. (2017). *Le site des transports urbains & interurbains (France)*.

<https://www.transbus.org/>

Union européenne. (2018). *Politique des transports de l'UE*.

https://europa.eu/european-union/topics/transport_fr

Ville de Liège. (2018). *Keskistram, le tram au fil des jours*.

<http://keskistram.eu/>

Ville de Liège. (2018). *Projet du tram*.

<https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/mobilite/projets/tram>

SOURCES ELECTRONIQUES

AFHYPAC. (2015). Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. *Mémento de l'Hydrogène, fiche 3.2.1.* Repéré à : www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%203.2.1%20-%20Electrolyse%20de%20l%27eau%20revjanv2017%20ThA.pdf

AFHYPAC. (2015). Inflammabilité et explosivité de l'hydrogène. *Mémento de l'Hydrogène, fiche 7.1.* Repéré à : <http://docplayer.fr/27748009-Inflammabilite-et-explosivite-de-l-hydrogene.html>

AFHYPAC. (2015). Daimler - Les bus à pile à combustible. *Mémento de l'Hydrogène, fiche 9.2.1.* Repéré à : http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/fiche_9.2.1_daimler_les_bus_pac_rev.mars_2015_th.pdf

AFHYPAC. (2016). La sécurité hydrogène en France, en Europe et dans le monde : normes et règlements. *Mémento de l'Hydrogène, fiche 7.3.* Repéré à : <http://www.afhypac.org/documents/toutsavoir/Fiche%207.3%20%20Normes%20et%20r%C3%A9glements%20rev.fev2016%20Th.pdf>

AFHYPAC. (2016). L'Union européenne et l'hydrogène. *Mémento de l'Hydrogène, fiche 8.1.* Repéré à : <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%208.1%20-%20Programme%20UE%20revjuin2016%20ThA.pdf>

AFHYPAC. (2016). Les bus à hydrogène. *Mémento de l'Hydrogène, fiche 9.2.* Repéré à : <http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche%209.2%20-%20Les%20bus%20H2%20rev.sept2016%20Th.pdf>

Air Liquide (2018). La voiture à hydrogène. Youtube.com. Repéré à : <https://www.youtube.com/watch?v=xeEU8-MFJUo>

Albin, D. (2018). Les bus hybrides mettent les comptes du TEC Charleroi dans le rouge. *LA dernière heure, dhnet.be.* Repéré à : <http://www.dhnet.be/regions/charleroi/les-bus-hybrides-mettent-les-comptes-du-tec-charleroi-dans-le-rouge-5a7b42d8cd70fdabb9dfa117>

Beeker, E. (2014). Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? *France Stratégie magazine (rélié au Commissariat général à la stratégie et à la prospective)*, n° 15. Repéré à : www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/201-08-06na-fs-hydrogene-hd.pdf

Dagonnier, E. (2017). Liège : Green Propulsion annonce le moteur de bus hybride le plus performant au monde. *Rtbf.be.* Repéré à : https://www.rtbf.be/info/regions/liege/detail_liege-green-propulsion-annonce-le-moteur-de-bus-hybride-le-plus-performant-du-monde?id=9731350

Faucher, E. (2018). Le diesel se tasse dans les flottes au premier trimestre 2018. *L'automobile & l'entreprise.* Repéré à : https://www.automobile-entreprise.com/_Helene-Faucher,70_

Lamoureux, M. (2018). Le Morbihan dans la course à l'hydrogène. *Flottes automobiles : La gestion des véhicules professionnels.* Repéré à : <https://www.flotauto.com/morbihan-hydrogene-20180411.html>

Lenaerts, C. (2018). Les bus hybrides de Namur: pas si verts que ça. *Rtbf.be.* Repéré à : https://www.rtbf.be/info/societe/onpdp/detail_les-bus-hybrides-de-namur-pas-si-verts-que-ca?id=9878024.

Plateforme solutions climat. (2015). La production d'hydrogène à partir de biogaz. *Plateformesolutionsclimat.org.* Repéré à : https://www.plateformesolutionsclimat.org/wp-content/uploads/2015/07/Le_hub_des_solutions_climat_VABHYOGAZ_4_pages_v2.pdf

Porrometo, G. (2017). Les nouvelles voitures diesel libèrent plus d'azote que les nouveaux camions. *Numerama.com*. Repéré à : <https://www.numerama.com/sciences/222971-les-nouvelles-voitures-diesel-liberent-plus-doxyde-dazote-que-les-nouveaux-camions.html>

Rtl Info. (2018). Le Tec utilise des bus hybrides depuis un an à Namur: le bilan est positif, le voici. *Rtl Info.be*. Repéré à : <https://www rtl.be/info/belgique/societe/le-tec-utilise-des-bus-hybrides-depuis-un-an-a-namur-le-bilan-est-positif-le-voici-992094.aspx>.

Watkins, G. (2018). BMW pense à un retour en LMP1 avec l'hydrogène. *Motorsport.com*. Repéré à : <https://fr.motorsport.com/lemans/news/bmw-retour-lmp1-hydrogene-24h-1027036/>

Zone bourse, Air Liquide. (2018). A suivre aujourd'hui, 18 avril 2018. *Zonebourse.com*. Repéré à : <http://www.zonebourse.com/AIR-LIQUIDE-4605/actualite/Air-Liquide-A-suivre-aujourd'hui-26373300/>

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
L'HYDROGÈNE	3
1 <i>L'hydrogène et ses modes de production</i>	4
1.1 L'hydrogène, vecteur énergétique	4
1.1.1 Les sources d'hydrogène.....	4
1.1.2 Les sources d'énergie.....	4
1.2 Les modes de production.....	4
1.2.1 Le vaporeformage (steam methan reforming ou SMR)	4
1.2.2 L'électrolyse de l'eau	5
1.2.3 L'oxydation partielle.....	5
1.2.4 Les autres procédés en voie de développement	5
1.3 Les coûts de production	6
1.3.1 Le vaporeformage (steam methan reforming ou SMR)	6
1.3.2 L'électrolyse de l'eau	6
2 <i>Les propriétés du gaz.....</i>	6
2.1 L'énergie du futur	6
2.1.1 La combustion non émettrice en CO ₂	7
2.1.2 La densité énergétique.....	7
2.2 Les risques d'inflammabilité et de détonation.....	7
2.2.1 Une inflammabilité extrême.....	7
2.2.2 ... mais un gaz très léger	8
2.3 Synthèse.....	8
2.3.1 Les qualités de l'hydrogène.....	8
2.3.2 Les défauts de l'hydrogène.....	8

LES TRANSPORTS EN COMMUN ET LES NOUVELLES TECHNOLOGIES	9
1 <i>La situation des transports en commun en Belgique</i>	9
1.1 Une compétence fédérée.....	9
1.2 Les chiffres du groupe TEC.....	10
1.3 Les missions du TEC	10
2 <i>Les bus et le carburant diesel.....</i>	11
2.1 Vers la fin de la propulsion au diesel	11
2.1.1 Les zones de basses émissions	11
2.1.2 Les normes Euro.....	11
2.1.3 L'interdiction pure et simple.....	11
2.2 Les alternatives choisies aux bus diesel	12
2.2.1 La Région flamande	12
2.2.2 La Région Bruxelles-Capitale	12
2.2.3 La Région wallonne	12
3 <i>Les FC Bus</i>	12
3.1 La pile à combustible.....	13
3.2 Le fonctionnement des FC bus	13
3.3 Les avantages et les inconvénients	14
3.4 Les projets de développement	15
3.4.1 L'Union européenne	15
3.4.2 Les projets internationaux	18
ETUDE DE LA MISE EN APPLICATION D'UN RESEAU DE FC BUS EN WALLONIE ET A LIEGE PARTIE I : LE COÛT D'UN FC BUS.....	19
1 <i>Le coût total de possession</i>	19
2 <i>Les composantes de coût d'un bus.....</i>	20
2.1 Le coût d'acquisition : achat, financement et dépréciation.....	20
2.1.1 Le coût d'achat et les frais de financement.....	20

2.1.2	L'achat de bus hybrides par la Région wallonne	21
2.1.3	La technologie hybride comparée avec celle de la pile à combustible	22
2.1.4	L'impasse de la Région wallonne	24
2.1.5	Les frais de dépréciation	25
2.2	Le coût de propriété : utilisation, carburant, maintenance, personnel et fiscalité	25
2.2.1	Les frais de carburant	25
2.2.2	Les frais de maintenance	27
2.2.3	Les frais de personnel.....	27
2.2.4	La fiscalité	28
2.3	Le coût de démantèlement ou de retrait de service	28
2.4	L'objectif d'une économie d'échelle.....	28
3	<i>Les composantes de coût des infrastructures</i>	31
4	<i>Le coût des externalités</i>	32
4.1	Le coût psychologique	32
4.2	Les nuisances sonores.....	34
ETUDE DE LA MISE EN APPLICATION D'UN RESEAU DE FC BUS EN WALLONIE ET A LIEGE PARTIE II : LA SUPPLY CHAIN		35
1	<i>La production</i>	35
1.1	La production sur-site	35
1.1.1	La théorie.....	35
1.1.2	La concrétisation	36
1.1.3	La faisabilité.....	37
1.2	La production externe	37
1.2.1	La théorie.....	37
1.2.2	La concrétisation	38
1.2.3	La faisabilité.....	38
1.3	Conclusion	38

1.3.1	La préférence pour la production externe.....	38
1.3.2	La production sur-site par la suite	38
2	<i>La distribution</i>	40
2.1	Le transport par train	40
2.2	Le transport par pipeline.....	40
2.2.1	La théorie.....	40
2.2.2	La concrétisation	41
2.2.3	La faisabilité.....	41
2.3	Le transport par camion.....	42
2.3.1	La théorie.....	42
2.3.2	La concrétisation	42
2.3.3	La faisabilité.....	42
3	<i>Le stockage</i>	42
3.1	La production sur-site.....	42
3.1.1	L'étape préalable au stockage : la compression	42
3.1.2	Le stockage.....	43
3.2	La production externe	43
3.2.1	La compression et le stockage.....	43
3.2.2	L'hydrogène liquide	44
4	<i>Les stations-services</i>	44
4.1	La situation actuelle.....	44
4.2	La concrétisation.....	45
4.3	La faisabilité	45
5	<i>Le schéma récapitulatif de la supply chain</i>	45
5.1	La production sur-site	45
5.2	La production externe	46
6	<i>La ville de Liège</i>	46

POTENTIALITES DE LA TECHNOLOGIE.....	49
1 <i>Les voitures et les camions</i>	49
2 <i>Les trains et tramways</i>	50
3 <i>Les vélos et les bateaux</i>	51
4 <i>Les chariots éléveurs et les équipements stationnaires</i>	51
CONCLUSION.....	53
ANNEXES.....	59
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	65
BIBLIOGRAPHIE	67
TABLE DES MATIERES	73

ABSTRACT

Today, finding the way to a cleaner future is one of the main goals of our society. The key question is the development of a bright future, environmentally friendly. There is a solution with the fuel cell electric vehicles. They would allow us to change driving propulsions with hydrocarbon fuels onto zero-emission motors. This is the future.

Car companies have already started the production of small cars. However, rather than writing about these, it is more interesting to think of the possibilities it would give with public transport. Make a change and try to obtain a zero-emission public transport network is a wonderful challenge. No one wants to miss it. The time is now because the Earth is facing climate change and countries, the energy transition. Lots of European and international projects have already promoted the fuel cell technology.

What are the plans of our city of Liège ? The city has decided to change transport networks with the installation of a tramway. The authorities are willing to decrease the numbers of cars downtown.

How would Liège and Wallonia create a fuel cell electric buses network ? Which steps do they need to follow ? This work studies two major aspects :

1. the costs - in comparison with diesel and hybrid motor propulsions ;
2. the supply chain, from the production of hydrogen to the distribution and gas stations

Environment – Future – Buses – Fuel Cell – Hydrogen – Supply chain - Network