

Louvain School of Management

Analysis of the diffusion of hydrogen in the automotive sector: Drivers and Barriers

Author(s): Magos Thomas
Supervisor(s): Gailly Benoit and Lejeune Christophe
Academic year 2020-2021

Abstract

The aim of this work is to analyze what factors influence the diffusion of innovation, and to apply the concepts to the diffusion of hydrogen in the automotive sector in order to identify the different barriers and drivers.

The work is articulated in three parts including a theoretical survey of the different theories discussing the diffusion and adoption of an innovation, an application to the diffusion of hydrogen in the automotive sector, and finally interviews aiming to verify complete and compare the results obtained in the second part. All five speakers are directly involved in hydrogen and the automotive industry.

The results show that there are currently three main barriers to the diffusion of hydrogen in the automotive industry. Firstly, the total cost of ownership is currently far too high. Secondly, the infrastructure is insufficient or even non-existent as far as filling stations are concerned. Finally, the hydrogen industry is still highly carbonated, which makes hydrogen cars polluting.

It would therefore be interesting to develop and subsidize the truck and taxi sector in the first instance in order to create an infrastructure that would then be sufficient to start large-scale commercialization. In addition, this will allow individuals to see the relevance of such a technology.

First of all, I would like to thank my thesis supervisor, Professor Benoit Gailly, as well as my co-supervisor, Professor Christophe Lejeune, for their knowledge, advice, guidance and availability which allowed the realization of this work.

Then I would like to thank the different people I interviewed. The different discussions I had with Mr. Mullier, Professor Jeanmart, Professor Jourquin, Mr. Ponteville and the product Manager of BMW/Mini, allowed me to confirm as well as to qualify the different results of my work. They also allowed me to discover certain aspects that were missing in my work.

I would like to thank Mr. Daniel Cloquet, former Director of Industrial Affairs at Business Europe, for having reviewed and helped me to improve the structure of this work

Finally, i'm deeply grateful to my family and friends for their permanent support since the begining of my academic journey. Their advices and support have enabled me to overcome many obstacles not only in this work but also during my whole my academic career.

Table of Contents

1. Context	1
2. Objective	3
3. Method	3
4. Structure	4
5. Limitations and further research	4
Part 1: Theoretical part	6
1. The different fuels and their attributes in the automotive sector	6
1.1 Gasoline and Diesel – Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV)	6
1.2 Gas	7
1.3 Hybrid – Hybrid Electric Vehicle (HEV)	8
1.4 Electric – Battery Electric Vehicle (BEV)	8
1.5 Hydrogen Fuel-Cell – Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)	9
1.6 Combustion of Hydrogen	10
2. Theory and concepts about the diffusion of innovation	12
2.1. Concepts and definitions	12
2.1.1. Innovation	12
2.1.2. Diffusion	13
2.1.3. Adoption	14
2.1.4. Synthesis	14
2.2 Some Theoretical models about the Diffusion of Innovation	15
2.2.1 The Diffusion Innovation Theory	15
2.2.2 Disruptive vs Incremental innovations (focus on disruptive innovations)	20
2.2.3 The Technology acceptance model	23
2.2.4 The Theory of Reasoned Action (TRA)	26
2.2.5 Theory of Planned Behaviour (TPB)	26
2.2.6 Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT)	27
2.2.7 Synthesis	29
Part 2: Diffusion of hydrogen in the automotive sector	31
1. Diffusion of innovation in the automotive sector	31
1.1 Characteristics of the automotive Sector	31
2.2 Innovation in the automotive sector	32
2.3 Automotive Value Chain	32

2.4 Identification of the different stakeholders	34
2. Case of the Hydrogen Cars	36
2.1 Hydrogen Value Chain	36
2.2 How is Hydrogen produced	36
2.2 Barriers to the diffusion process	37
2.3.1 Production of green hydrogen	37
2.3.2 Infrastructure	40
2.3.3 Hydrogen conditioning, storage and transport	42
2.3.4 High Cost and Competitiveness	44
2.3.5 Hydrogen Fear and Safety	47
2.3.6 Other barriers	48
2.4 Drivers in the diffusion process	50
2.4.1 Vector for low-carbon mobility	50
2.4.2 Governments' infatuation with hydrogen	52
2.4.3 Performance similar to ICEs	54
2.4.4 Good prospects in the application of heavy goods vehicles	56
2.4.5 Other drivers	58
2.3 Syntheses	58
<i>Part 3: Position of different players in the automotive sector</i>	60
1. Methodology	60
2. Interviews	60
1.1 Interview 1: Prof. Bart Jourquin	60
1.2 Interview 2: Pr. Hervé Jeanmart	61
1.3 Interview 3: M. Jean-Marc Ponteville (D'Ieteren)	64
1.4 Interview 4: Nicolas Mullier (Air Liquide)	65
1.5 Interview 5: Product Manager for BMW/Mini Group	68
3. Results of the interviews	70
<i>Conclusion</i>	72
<i>Bibliography</i>	74
<i>Appendix:</i>	89

1. Context

Since the end of the 20th century, global warming and ecology have become major global issues. Since then, we can no longer deny the fact that human activity harms biodiversity and accelerates global warming. According to a study of the PNAS, which followed the studies of more than 1300 climatologists, 97% to 98% of them supported the idea of an anthropogenic global warming. (Anderegg, Prall, Harold, & Schneider, 2009) (Changes, 2021). Every year since 1992, the 195 states that have ratified the UN climate convention meet for two weeks at the COP (Conference of the Parties). They negotiate and adopt decisions in favour of the climate and ensure their follow-up. The Kyoto Protocol as well as the Paris Agreements are the result of these meetings.

At the time of the Paris agreements, it was decided to continue efforts to limit global warming to 1.5°C compared to pre-industrial levels. The initial NDC (Nationally Determined Contribution) of the European Union at the time of the Paris agreements was to reduce greenhouse gas emissions by 40% by 2030 compared to 1990. In 2020, the EU has revised its targets and is now aiming for a 55% reduction in emissions (Européen, 2021).

As the EU's overall goal is to reduce greenhouse gas emissions in all economic sectors by 55% by 2030 and 60% by 2050 compared to 1990, it is interesting to observe the share of responsibility of each sector in greenhouse gas emissions (Annex 3). It can be seen that the electricity, gas and air conditioning sector accounts for the largest share of greenhouse gas emissions and that transport and storage only account for 12% (Olivier, 2021).¹

When we focus only on CO₂ (which represents 75% of greenhouse gases), we notice that transportation represents 30% of emissions (Européen, 2021). Moreover, it is the only industrial sector whose CO₂ emissions are constantly increasing. As we can see in the graph below, since 1990 only the transportation industry has shown a clear increase. It is important to note that more than 70% of CO₂ emissions from transportation come from ground transportation.

¹ It is important to note that CO₂ is not the only greenhouse gas. But, as this gas represents nearly 75% of greenhouse gas emissions, we will mainly talk about CO₂. If we focus only on CO₂ emissions, the transportation sector accounts for nearly 30% of them. (Européen, 2021)

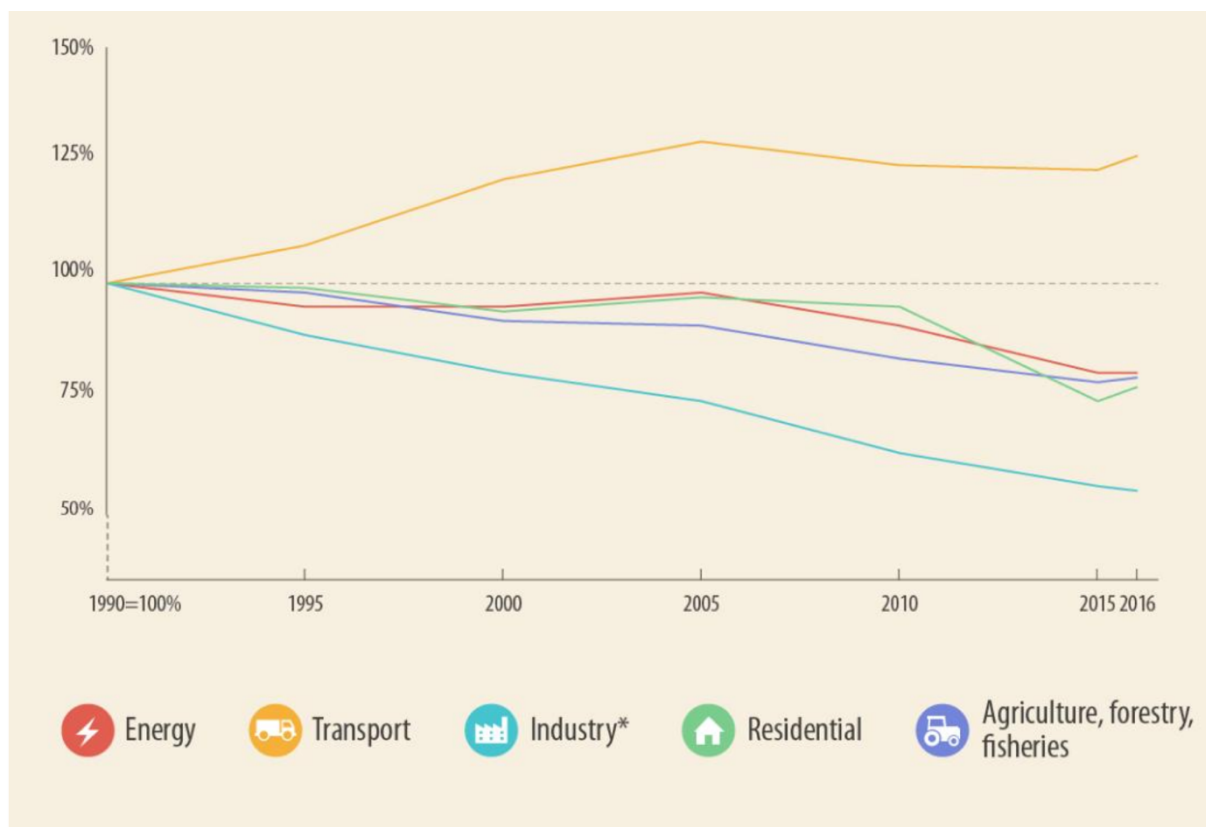


Figure 1: Evolution of the CO2 emissions by Sector in EU (1990-2016). (Européen, 2021)

The automotive industry is therefore faced with a major problem, which is to succeed in drastically reducing CO2 emissions while knowing that the number of vehicles on the road is constantly increasing (Statista, 2021). In order to reach the objectives of the Paris Agreement, the automotive industry has two options to reduce its CO2 emissions. Either the engines must be optimized to consume as little as possible, or the fuel used must be changed. Today, both solutions are used. Indeed, although manufacturers are constantly optimizing conventional engines (gasoline and diesel) to make them cleaner, the automotive industry is turning more and more to new types of more environmentally friendly fuels. For the moment it seems that the new "fuel" is electricity. Even though other alternatives are being studied, such as hydrogen and natural gas, it seems that in Belgium and in Europe in general, these fuels are not very popular. (Coste, 2020) (Van Aperlidoorn, 2021)

2. Objective

This work focuses on understanding the diffusion of engines using hydrogen as an energy source in order to identify the barriers and the drivers that could influence the diffusion or adoption of these engines. The goal will be to understand why the hydrogen engine is not more widespread while it seems very promising. Moreover, in our context, where the goal is to drastically reduce greenhouse gas emissions, it seems strange to rely only on the electric motor. Then we will try to understand what has already been put in place to push the stakeholders, and mainly the consumers, to adhere to the hydrogen engine, to finally see what could be done to boost its diffusion and its adoption.

3. Method

This work will focus mainly on the hydrogen combustion engine and the hydrogen fuel cell electric engine. The market analysed will focus mainly on the European Union and Belgium. It will be articulated around three main parts to which will be added a conclusion.

The first part will be mainly theoretical. In the first chapter our aim will be to identify the different types of fuel that we can find on the automotive market. We also incorporate a quick explanation of how they work and their position in the market. The second chapter will focus on a review of the different theories on the diffusion of innovation that we can find in the literature. As hydrogen engines are an innovation, it is necessary to understand first how innovation usually diffuses.

In the second part we will analyse the case of the diffusion of hydrogen engines. Throughout our work we will talk about hydrogen engines, which will mainly concern fuel cell electric vehicles (FCEV). We will first analyse the automotive industry and the way in which innovations diffuse before diving deeper into the case of hydrogen engines. We will try to understand what are the main barriers that slow down or could stop the diffusion of this technology but also the drivers that could accelerate the diffusion process.

In the third part of this work, we will compare what we have observed in the literature and the different reports available about the diffusion of hydrogen in the automotive sector, with the opinion of different actors of the sector. The interviews will be semi-structured. At the

beginning of the discussion, we will ask them a general question about what they think about the diffusion of hydrogen in the automotive industry. Then we will take the different barriers and drivers and report about the results of interviews conducted on this issue. We will do this in order to get a more accurate picture of reality.

Finally, we will end this work with a conclusion that will take the different results we have obtained, and we will try to determine by which means it would be judicious to optimally diffuse hydrogen in the automotive industry.

4. Structure

This work will therefore be divided into three different parts. The first part will be theoretical, the second part will be an empirical study based on the diffusion of hydrogen in mobility and the third part will highlight the different conclusions that we will have been able to identify from these first two parts.

The first part will be the subject of two chapters. First, we will make a technical analysis of the different engines present on the market. Next, we will review the theoretical literature on the diffusion of innovation.

The second part will focus on the diffusion of the hydrogen in the automotive sector. First, we will analyse the literature concerning the diffusion of innovation in the automotive sector. Then and more particularly the diffusion of hydrogen engines (mainly FCEVs) and we will try to find the drivers and the barriers to this diffusion. These two chapters will be summarized.

The Third part will be an analysis of the different interviews collected. It will also be the subject of a synthesis of the information and opinions collected.

5. Limitations and further research

The main limitation of this work is that it does not analyse the willingness of certain actors, such as public authorities and car manufacturers, to diffuse hydrogen. Indeed, the work focuses more specifically on the adoption of different "end users". It would therefore be relevant to complete this work by developing this cluster.

It is important to note that this work focuses on the European market and mainly on the Belgium market. The conclusions we have drawn in this work are not valid for other continents. This is especially true if the territories are developing countries. Indeed, in these countries, it will not be possible to decarbonise immediately because the technologies will remain very expensive and it is unthinkable to prevent these populations from moving.

Moreover, many of the studies we have mentioned throughout this work are based on a number of assumptions. TCO and life cycle analyses are complex calculations that rely on predictions.

It will therefore be interesting to regularly adjust the conclusions mentioned according to the evolution of the market.

Part 1: Theoretical part

In this part we will first identify the different types of engines and fuels that we can find on the market and that we will encounter in our different analyses. Then, after defining some concepts, we will focus on the different theories about the diffusion of innovation that we can find in the literature.

1. The different fuels and their attributes in the automotive sector

The purpose of this section is to identify in a non-exhaustive way and to explain in a simplified way the different engines and their fuels that we can find on the automotive market. Throughout this work we will be talking about these different concepts, so it seems relevant to develop them.

1.1 Gasoline and Diesel – Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV)

Across the world, liquid fuels are the main source of energy consumed by the transportation sector. Petrol and diesel are largely dominating as they've accounted for 39 and 36 percent, respectively, of the total consumption in 2012. While a decline in the use of these two fuels is projected between now and 2040, their share in the overall consumption will still be in excess of 65 percent by then (U.S. Energy Information Administration, 2016). In order to utilise their energy potential, these fuels are used in internal combustion engines, which will generally work with a four-stroke cycle (Ganesan, 2012). While both these fuels are using similar types of engines, their ignition method as well as their cycles do differ.

When using petrol, the motion starts with the suction stroke where a combination of air and fuel meets in the cylinder. This is followed by compression, during which the mix is ignited by a spark (U.S. Department of Energy, sd), leading to the expansion stroke that generates the power. The sequence finishes with the exhaust stroke that will release the products of the combustion. With diesel fuel, air alone is let into the cylinder during the suction stroke and is put under pressure during the compression stroke. The fuel is injected during the expansion stroke. It is the high compression that is used to set the fuel on fire (U.S. Department of Energy, sd; U.S. Department of Energy, sd). As with petrol, the final step is the exhaust stroke that will push out the remains generated by the combustion.

Both these fuels are products coming from the refining of crude oil. This process can be divided in three steps. The first being the upstream, where the deposits of oil will be located in order to

extract them. The second will be the midstream where the raw product is transformed to suit various applications. Finally, the downstream where the final product meets its end user (Penn State Department of Energy and Mineral Engineering).

Now that we have a better understanding of how this fuel can be used in transportation and where it comes from, we can look at the advantages and disadvantages of choosing for this type of fuel.

On the one hand, we have a mature technology that is backed by extensive existing infrastructure and knowledge. In Belgium alone, there are more than three thousand gas stations (Belgische Petroleum Federatie, 2020) offering quick and convenient refuelling. In addition, thanks to the advancements made to improve the efficiency of engines, a car can easily have a range of more than a thousand kilometres before needing to top up. On the other hand, with the urgency to fight climate change, more and more pressure is put onto car manufacturers to reduce the emissions of their gas and diesel engines. We've witnessed the limits of what could be achieved with the diesel emissions standards cheating software that was employed to meet these stricter standards (D.O.J. Office of Public Affairs, 2017). Not only do the cars using these fuels have to meet ever more strict standards but they are also threatened by complete bans in various countries or cities around the world. For example, Brussels plans to completely prohibit the entry of diesel-powered vehicles by 2030 (Bruxelles Environnement, 2021).

1.2 Gas

As it is the case with petrol, engines powered by natural gas rely on combustion to power vehicles. The gas is stored in a highly pressurized form in the fuel tank. From there it is sent to a regulator to lower its pressure in order to then be injected into the cylinders. After that, the process is similar to petrol powered engines (Messersmith, 2014). Just like petrol, gas has to be extracted from deposits. Natural gas is formed after decomposing matter has been exposed to severe heat and pressure for millions of years under the surface of the Earth. Once extracted, it is transported via pipelines, tankers and trucks to its final destination (Shell, 2018).

Although natural gas uses a similar system to gasoline to fuel vehicles, it has a cleaner combustion process. Burning natural gas instead of conventional fuels (petrol and diesel) not only reduces CO₂ emissions, but also reduces the emission of fine particles. (Le Fevre, 2019). This is the main selling point of gas as a fuel in transportation. As natural gas is mostly used in a highly compressed form, vehicles using it require heavy duty reinforced tanks to store it.

These tanks will reduce cargo space or offer a reduced range in order to keep a decent cargo area. In most countries, natural gas has been made economically attractive by government financial incentives, which means that it is unlikely to remain competitive in the long term when these incentives cease to exist. (Le Fevre, 2019). Finally, as with petrol and diesel, natural gas is a finite resource that will only become rarer and more difficult to extract as conventional deposits are being emptied.

1.3 Hybrid – Hybrid Electric Vehicle (HEV)

As the name suggests, this technology is a combination of two fuels; petrol or diesel associated with electric. A hybrid vehicle will thus have an internal combustion engine that will be supported by one or more electric motors. There are two main types of hybrid vehicles, conventional ones and plug-ins. In a conventional hybrid, the batteries that power the electrical motor are charged by the combustion engine acting as a generator or with regenerative braking (Hess, 2012). A plug-in does not rely on the engine or regenerative braking alone to provide energy to the batteries but can be charged similarly to a full electric vehicle. With their bigger batteries, they offer a greater range in all electric mode (Groupe PSA, 2020).

By using these fuels together, we have cars that can be very efficient and can even run without emissions for shorter trips while conserving an extended range with quick refuelling when needed. However, if not used appropriately, the added weight of the electrical system will increase consumption and of course emissions. By needing both an engine and electrical motor, the number of parts and failure points are increased potentially leading to more waste as those vehicles will have a shorter lifespan.

1.4 Electric – Battery Electric Vehicle (BEV)

While there are examples of electricity being used to power vehicles as early as the end of the 19th century (Chan, 2013), it's only recently that manufacturers have started to release and market these types of vehicles to the public. Indeed, with growing concerns about the availability of fossil fuels and the environmental impact they cause, we've seen a push towards alternatives. In Belgium, it is by far the most common alternative energy used for passenger cars, accounting for nearly 3,5% of all the registrations of new vehicles in the kingdom (Statbel, 2021).

In order to use electricity to power a vehicle, manufacturers will most commonly use alternating current motors powered by a battery to produce the desired mechanical energy that will drive

the wheels (Laurent, 2021). These motors utilize the physics of magnets to create the necessary rotation. As an electric current is going through a magnetic field, it will experience a force. By having pairs of forces at opposing angles, we create torque (Nave, 2017). In contrast to petrol and diesel, electricity cannot be extracted but must be generated. Most power plants rely on conversion of energy with the help of a turbine to provide current. This can be achieved with the help of among others nuclear, hydraulic and wind energy. In addition to turbine, there are also methods of direct production, such as photovoltaic, where sun is used (U.S. Energy Information Administration , 2020).

Having gained an insight into how electricity can be used as a fuel for transportation, we can better understand the positives and negatives of using it. As there is no combustion, vehicles using this fuel are not emitting harmful gasses when operated and if the electricity that is used was sustainably generated, the environmental benefits are even greater. With few moving parts, reliability is increased, and less maintenance is needed to keep a motor in good condition. Having a simple design leads to increased efficiency of the drivetrain (The University of Tennessee at Chattanooga, n.d.). While these motors have quite a few upsides, they do currently come with some limitations. The more affordable models only offer a limited range and charging remains problematic as the time needed to top up is still considerably longer than with a gas counterpart. In addition, the lack of charging infrastructure and the use of exclusive charging ports by manufacturers do not help in making the technology more appealing. Finally, even though their emissions are null, the batteries they use rely on rare metals which are finite resources.

1.5 Hydrogen Fuel-Cell – Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)

Hydrogen can be used to directly power an internal combustion engine, but it can also be used as a fuel to generate electricity and drive an electric motor. This is where the fuel-cell comes into action. To produce the energy, this technique relies on an electrochemical reaction from oxygen, coming from ambient air, and hydrogen (Airbus , 2020). This process is similar to a battery however, there is no need to recharge it or fear of it running flat, as long as fuel is coming, electricity and heat will be produced. A fuel cell has two electrodes, an anode and a cathode, they are fused around a conductive chemical substance. The fuel, in our case hydrogen, is supplied to the anode while oxygen will go to the cathode. It's at the anode that the reaction will separate hydrogen molecules into protons and electrons. These electrons go to a specific circuit creating a flow of electricity. At the end of the reaction, we are left with water and heat

(Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, n.d.). To produce the hydrogen needed for the reaction, the same methods are employed as with hydrogen destined for combustion engines. With the fuel cell, we can have a very environmentally friendly transportation solution as there are no emissions produced, only water is rejected. When used in conjunction with sustainably produced hydrogen, we have a promising solution for cleaner driving. Filling times and range are more on par with petrol powered cars, meaning drivers will not have to wait extensively before continuing their journey. Unfortunately, as few manufacturers have invested in this technology, the passenger cars that are available at the moment are sold at prohibitive prices and refuelling infrastructure is still very limited. Finally, as previously mentioned, specially reinforced tanks are needed to store the hydrogen.

1.6 Combustion of Hydrogen

With years of service to space agencies as one of the prime fuels for rockets, hydrogen is slowly trickling down to civilians as its properties can be put to good use to reduce emissions of vehicles (Lanz et al., 2001). As it was the case with natural gas, we are still relying on the internal combustion engine to transform energy into movement. Hydrogen can both be used in the compression as well as the ignition engine (Prasath et al., 2012), which we've explored previously. This means that existing engines can easily be adapted for use with this fuel. Hydrogen is an element that is found in abundance on earth but nearly consistently as part of a combination, such as water where it is associated with oxygen, this means that it will need to be separated in order to have pure hydrogen (Alternative Fuels Data Center, n.d.). Currently, more than 90% of the production comes from the separation of organic compounds, such as coal (Air Liquide, 2021). To isolate the hydrogen, a high temperature chemical reaction is used in order to break the bonds between the elements. As organic compounds usually contain carbon (Britannica, 2019), a by-product of this reaction is CO₂. Another popular method is via the decomposition of water, this is usually achieved via electrolysis. During this process, an electrical current will decompose the molecules into H⁺ protons at the electrode where current enters and into hydroxide ions at the electrode where current leaves the system. Finally, an oxidation reaction will form the hydrogen gas (Air Liquide, 2021).

As we can use existing internal combustion engine technologies with little change needed, hydrogen can be a cost-effective solution. As hydrogen can be produced, there is less dependence on scarce natural resources. Even though these vehicles produce less emissions as their petrol counterparts, when combusting with air, oxides of nitrogen will be produced (Lanz

et al., 2001) which are harmful. As hydrogen has to be stored in a gaseous form, it requires specially reinforced tanks that will reduce range or cargo space.

2. Theory and concepts about the diffusion of innovation

The role of this section is first to define some concepts, namely innovation, adoption and diffusion, which are at the basis of theories of diffusion of innovation. Then we will identify and analyze some of these theories in order to understand how an innovation can be diffused.

2.1. Concepts and definitions

The concepts of innovation, diffusion and adoption are the basis of theories dealing with the diffusion of innovation. It is therefore important in our view to define these concepts in order to have an equivalent view of them.

2.1.1. Innovation

The term innovation is an increasingly used concept, whether in our daily lives or in academic work. Since 2020, the term 'innovation' has been used in more than 140,000 articles, books and other writings (Google Scholar "innovation", 2021) The term is so widely used that it is difficult to find a single definition. However, in this paper it is important to start by defining the concept of innovation and the meaning it will have in this work.

According to the Collins dictionary (Collins, 2021), the word “Innovation” can be a countable word and so the definition is “An innovation is a new thing or a new method of doing something”. Or it can also be an uncountable word in which case the definition is “Innovation is the introduction of new ideas, methods, or things”. The dictionary proposes another definition which is “something newly introduced, such as a new method or device”.

If we try to find a definition in the literature that deals on innovation, we can find plenty of different definitions. For example, we can find, as the definition of the dictionary, some Rather broad definitions as “the process by which novelty is taken up and circulated in the public sphere (including the application of something existing to something entirely different), producing some kind of profound reordering of what-has-been” (de Saille & Medvecky , 2016). But there are also some more detailed definitions as the OECD proposes, “a new or improved product or process (or combination thereof) that differs significantly from the unit’s previous products or processes and that has been made available to potential users (product) or brought into use by the unit (process)” (OECD & Eurostat, 2018)

What we can see is the fact that two terms are recurrent in those definitions, which are “novelty” and “change”. Innovation is synonymous with change and novelty and can be categorized based on both characteristics (Gailly, 2018). It’s important to notice that the diffusion and/or the adoption of an innovation is not always positive. Some innovations can be undesirable. (Pierre, 2015) (Baillard, 2012)

The concept of innovation has been also tackled by Rogers (1995) and we will explain his vision of the innovation further in this paper. According to him, the fact that an innovation is really new is of little importance, what matters is the perception of novelty in relation to a practice or an object.²

Hydrogen engines, and more specifically hydrogen combustion engines, are not technological innovations in the sense that they have existed for several decades. In our opinion, the "innovative" character of hydrogen engines is mainly found in Rogers' (1995) definition of innovation, which emphasizes the perception of novelty.

2.1.2. Diffusion

This paper deals on “diffusion of innovation”, we have just defined what is an innovation, but we also need to clarify what *diffusion* is. Rogers (1995) define diffusion as “the process by which an innovation is communicated through certain channels over time among the members of a social system.” (Rogers, 1995, p. 5). He sees the diffusion as a “special type of communication” and define the *communication* as “a process where individuals are creating and sharing information with another in order to reach a mutual understanding”. It means that it is a process of convergence (or divergence) where two or more individuals are sharing information. Rogers comes with the idea of uncertainty in the process of diffusion. The information exchange is a way to reduce this uncertainty. This uncertainty is defined by Rogers as “the degree to which a number of alternatives are perceived with respect to the occurrence of an event and the relative probability of these alternatives.” (Rogers, 1995, p. 6).

The result of the diffusion process can be measured by two dimensions: the knowledge and the adoption of innovation. In fact, an innovation will be well diffused if people know that this

² “An innovation is an idea, practice, or object that is perceived as a new by an individual or other unit of adoption.” (Rogers, 1995, p. 11).

innovation exists and what it is for, but also if the innovation has been adopted by individuals (Alcouffe, 2004, pp. 119-120).

2.1.3. Adoption

Even if this paper deals on the diffusion of innovation, as we have just seen, diffusion and adoption are two very similar concepts. It is therefore difficult to talk about the process of diffusion of innovation without discussing the process of adopting an innovation.

Rogers defined the adoption process as the process by which an individual, or every other unit of analysis go through different stages from the awareness of the innovation, passing by the creation of an attitude toward this innovation and then the decision to adopt or not the innovation (Rogers, 1995). The big difference between *adoption* and *diffusion* is the fact that adoption is an individual process (or an organizational process) while diffusion is a group phenomenon that suggests how an innovation spread. The adoption process is therefore a decision-making process. We can identify two levels of decision-making, which are the individual and organizational level.

2.1.4. Synthesis

We can therefore say that hydrogen engines are indeed innovations according to the definition proposed by Rogers (1995). We can therefore say that the perception of novelty is sufficient to express the newness of hydrogen engines. Moreover, according to B. Gailly (2018), an innovation is characterized by change, which we believe is related to hydrogen, which seems to be part of a major change in automobile motorization.

The distinction between diffusion and adoption is quite complex and very fine. Indeed, the two concepts are, in our view, inseparable. When we talk about diffusion of innovation, we must talk about adoption of innovation. In the case of hydrogen in the automotive sector, in our eyes, the diffusion of innovation will be ensured by a social system, in the case of the automobile, this social system is influenced by some individuals, for example, the government authorities and the car manufacturers. By comparison, the adoption of innovation is, in a simplified view, dependent of the attitudes of individuals (or organizations). In the case of the hydrogen vehicles we take the example of the company's fleet vehicles.

2.2 Some Theoretical models about the Diffusion of Innovation

After defining what we think is an innovation and what is the adoption and diffusion of innovation we can analyze some theories about this diffusion. These theories will help us to understand how hydrogen has or can be diffused in the automotive sector. These different theories will allow us to elaborate a kind of analysis grid that we will apply in the case of the hydrogen car.

2.2.1 The Diffusion Innovation Theory

Rogers' theory of the diffusion of innovation is the leading work in the literature on the diffusion of innovation. It will serve as a basis for explaining how diffusion and adoption of an innovation takes place.

2.2.1.1 Four main elements in the diffusion of innovations

Rogers (1995) identified four main elements in the diffusion of innovations. Previously in this paper we defined *diffusion* as the process by which an innovation is communicated through certain channels over time among the members of a social system.” (Rogers, 1995, p. 5). This definition contains those four elements, which are, *the innovation, the communication channel, the time and the social system*.

The purpose of this section is not to define diffusion but to understand the different elements that are expressed in this definition.

- **The Innovation:** “An innovation is an idea, practice, or object that is perceived as a new by an individual or other unit of adoption.” (Rogers, 1995, p. 11). For Rogers, it is not important to know if an innovation is objectively something new. For him what is important is the perception of the individuals on the innovation. If people perceive an idea, practice as new Rogers considers that it’s an innovation. Newness is often linked to a lack of information. This lack of information generates uncertainty which is the main obstacle to the adoption of innovation (Rogers, 1995).

Rogers determined some characteristics of innovations that explain the different rates of adoption. Those characteristics are the subject of a further section

- **The communication Channels:** Previously we defined *communication* as “a process where individuals are creating and sharing information with another in order to reach a mutual understanding” (Rogers, 1995, p. 5). The communication spreads through

channels between individuals or other units of adoption. In order to communicate you need a minimum of two individuals (or other units of adoption). The first one, has the knowledge or the experience with the innovation and the second one does not. They will communicate through communication channels which is the means by which the message gets from the individual that has the knowledge to the other one.

Rogers distinguishes two types of communication: *Mass Media and Interpersonal Communication*.

Mass media are a quick and efficient channel to inform a large panel of individuals. Mass media are mass medium like TV, radio, newspaper. However, according to Rogers (1995), *interpersonal channels* are more effective channels to persuade people to adopt an innovation. This way of communication will be more efficient if the individuals involved are near peers.

Rogers notes that because communication involves humans, there is a degree of homophily that impacts the adoption of an innovation. In fact, Rogers says that the transfer of information or ideas appears more often when the communication takes place between two individuals that are very similar, homophilous or alike. Rogers (1995, p18) defined *homophily* as “the degree to which pairs of individuals who interact are similar in certain attributes, such as beliefs, education, social status and the like. *Homophily* is the exact opposite of *heterophily* which is defined by Lazarsfeld and Merton (1964, p. 23) as “the degree to which pairs of individuals who interact are different in certain attributes”. Rogers note that when people have the choice to discuss with a panel of different individuals, there is a strong tendency for them to interact people that are similar. Moreover, when communication involves two individuals with a high degree of homophily, this communication appears more effective than if individuals were heterophilous. But the biggest problem in communication of innovations is the fact that people are in general heterophilous.

Rogers says that communication channels can also be categorized in two other aspects: *Localite Channels* and *Cosmopolite channels*. We can assume that localite channels take interpersonal channels in while cosmopolite channels represent almost all mass media channels.

- **The Time:** Rogers notes that the *Time* is a variable that is often forgotten in most of behavioural research. According to him, *Time* is an obvious aspect of any communication process and the fact he included it in his theory is one of the main strengths of the model.

Time is involved in the innovation decision process, the adopter categorization, and rate of adoptions. These theories will be discussed later.

- **The Social System:** A *social system* is a “set of interrelated units that are engaged in joint problem solving to accomplish a common goal. The members or units of a social system may be individuals, informal groups, organizations, and/or subsystems.” (Rogers, 1995, p. 24). It’s important to notice that the units in the social system are different in their behaviour.

2.2.1.1 Attributes of innovations and rate of Adoption

Rate of adoption is “the relative speed with which an innovation is adopted by members of a social system” (Rogers, 1995, p. 219). In other words, it is the numbers of individual or other unit of adopters, that adopted an innovation, on a certain period. These different attributes will allow us to understand what is taken into account by the different individuals, and what are the elements that explain their choices to adopt or not innovations

In his theory Rogers identifies five characteristics that can help to understand the adopter’s behaviour. These five characteristics will influence the rate of adoption. It’s important to note that it should not be assumed that all innovations are equivalent units of analysis. These characteristics, as perceived by individuals only, help to explain the rate of adoption.

- **Relative advantage:** “It is the degree to which an innovation is perceived as better than the idea it supersedes.” (Rogers, 1995, p. 15). The fact that the innovation has objectively an advantage does not matter. Indeed, what does matter is the fact that individuals perceived this relative advantage.

Relative advantage can be measured in economic terms but the social prestige, the satisfaction and also the convenience are factors that have an important impact on the perceived Relative Advantage. A strong Relative Advantage leads to a high rate of adoption.

- **Compatibility:** “It is the degree to which an innovation is perceived as being consistent with existing values, past experiences, and needs of potential adopters.” (Rogers, 1995, p. 15). An idea, or a new behaviour can be incompatible with some norms or value of a social system. Rogers (1995) take the example of contraception. This innovation is not compatible in some countries where people have strong religious beliefs. The degree of compatibility has a positive influence on the rate of adoption.
- **Complexity:** “It is the degree to which an innovation is perceived as difficult to understand and use.” (Rogers, 1995, p. 15). Some innovations need some knowledge to be used. If an innovation is too complex it will be an important obstacle to its adoption. Thus, Rogers states that complexity has a negative impact on rate of adoption. When an innovation is very complex, it increases the uncertainty of potential adopters, which is a big obstacle for its adoption.
- **Trialability:** “It is the degree to which an innovation may be experimented with on a limited basis.” (Rogers, 1995, p. 15). When the individuals have the possibility to try a new idea or a new technology, the rate of adoption increases because people adopt it quicker. For example, Ryan and Gross (1943) founded that every farmer that had the possibility to try hybrid-seed corn, adopted it after their first trying.
- **Observability:** “It is the degree to which the results of an innovation are visible to others”. (Rogers, 1995, p. 15). In other words, if we can see the results of using a technology from one of our peers, then we will be more likely to adopt an innovation or not. In the case of hydrogen, there are currently very few people driving vehicles. It is therefore complicated to observe the results. Rogers notes that visibility stimulates peer discussion of new ideas.

2.2.1.2 The innovation decision process

The innovation decision process is a mental process which allows an individual, with the help of his knowledge, to reject or adopt an innovation, based on the advantages and disadvantages of this innovation. This process of selecting or rejecting this new idea takes place in five steps according to Rogers (Rogers, 1995), with a pre-established order of steps (Annexes 1).

- First of all, we have the **knowledge stage**. The individual has to be aware of the innovation. Three main questions are essential in order to understand the function and the “goal” of the innovation. Why? What? How?

Rogers distinguish 3 different stages during the knowledge stage:

- The “Awareness knowledge”: is the moment when the individual becomes aware of the existence of innovation.
- The “How-to-Knowledge”: it permits to an individual to understand how to use an innovation. The more complex an innovation, the more crucial this step is.
- The “Principles-knowledge”: An innovation could be adopted without this stage, but without knowing the functioning principles describing how and why an innovation works can cause a discontinuance.

Not clearly identifying the answer to these three questions can subsequently affect the innovation implementation process.

- Then we have the **persuasion stage**. Having a positive or negative attitude towards an innovation does not mean that you will directly accept or reject it. The affective will play an essential role. Our opinion on innovation will evolve because our beliefs will be influenced by our surroundings and the degree of uncertainty of the innovation.
- The third step of this process is the **decision stage**, where we will make the decision to reject or accept the innovation. It can be actively rejected; that is to try it, to think of accepting it but rejecting it later but also in a passive way such as rejecting it directly.
- The fourth step is the **implementation stage** where we put innovation into practice if we accepted it. Of course, there remains a high level of uncertainty. Therefore, the person in charge of implementing the innovation must collaborate with others in order to reduce the uncertainty. In addition, the innovation after its implementation can be modified by the user, which is called reinvention. Reinvention is more than beneficial because the more there are reinvention, the more quickly the innovation will be spread and adopted.
- The final step is the **confirmation stage** where the individual seeks support by looking at comforting messages in order to reassure him in his choice made previously. He can still cancel everything if he receives very negative messages. Attitude has a crucial role at this stage of the process.

2.2.1.3 The Organizational Decision Process

The difference between the organizational decision process and the innovation decision process, is the fact that in the organizational decision process we will focus on individuals that are members of *organizations* and adopt innovations in such a context. Rogers identifies two main phases: The *Initiation* and the *Implementation*.

Rogers identifies two stages in the **initiation phase**:

- **Agenda-setting:** During this stage, the company identifies a problem and decides to fix it by searching a solution. The problem could be a performance gap or a craze effect.
- **Matching:** Afterwards, once the problem has been clearly identified, the organization needs choose the innovation that could fix this problem.

He also splits the **implementation phase** in three different stages:

- **Redefining/ Restructuring:** In order to correctly adopt the innovation, the organization has to customize the innovation according to the needs, the structure and the culture of the organization.
- **Clarifying:** When an innovation is adopted within an organization, the use of this innovation spreads to the different members. During this stage the members begin to understand the purpose, benefits and how to use this innovation and they start forming a common understanding of it.
- **Routinizing:** This stage means that the innovation has been completely adopted by the organization. The innovation is now part of the organization.

2.2.1.4 Adopters Category

This part, being considered too basic, will be developed in detail in the appendix (Appendix 12).

2.2.2 Disruptive vs Incremental innovations (focus on disruptive innovations)

We have seen that hydrogen technologies in the automobile are for us innovations. However, there are many types of innovation. A first way of refining our thinking is to determine whether the use of hydrogen in the automobile would be a disruptive or incremental innovation.

In his work, Schumpeter distinguishes between disruptive innovations and "small displacements" which he calls incremental innovations. An incremental innovation does not lead to a major change in a product or service, whereas disruptive innovations lead to more significant changes. (Benezra, 2013).

2.2.2.1 Incremental Innovations

According to Devalan (2006), "Incremental innovation is characterised by an improvement in existing products or processes, it is an advance by small steps". The aim is to gradually change

the major innovation to improve and transform it so that it can be in line with new regulations or new market expectations. According to S. Lachat and D. Lachat (1997), "Innovations appear in clusters, suspended on the existence of a first innovation that we will call the "ancestor" innovation of a cluster of innovations". For example, the internal combustion engine is a perfect example of an ancestor innovation. Indeed, the latter has undergone several small changes, such as its cooling system, which was previously air-cooled and is now water-cooled, or the replacement of the carburettor by an injection system.

2.2.2.2 Disruptive Innovations

The term disruptive innovation, originally introduced by Clayton Christensen, has been widely used in the literature in recent years. He defines it as « a process by which a product or service takes root initially in simple applications at the bottom of a market and then relentlessly moves up market, eventually displacing established competitors. (Bower & Christensen, 1995).

Despite the widespread use of the term, the definition of a disruptive innovation remains rather ambiguous. For example, according to Danneels (2004), Christensen has not defined clear criteria for defining whether an innovation is disruptive or not.

In the work of Scott Hardman et al. (2014) they tried to define some criteria and then applied them to the case of the hydrogen fuel cell engine and battery electric cars. We will therefore analyse these different criteria. They first analysed disruptive technologies such as the introduction of quartz watches, the arrival of MP3s instead of CDs, etc. Through this analysis they were able to identify 7 common characteristics of disruptive technologies:

1. Firstly, they noted that new technology is generally not recognised as a threat by the market leaders. Even when the threat is perceived, the leaders do not take effective action. This was the case for Kodak, which took too long to switch to digital cameras.
2. When they enter the market, disruptive technologies tend to be more expensive than incumbent technologies. This higher price can be explained on the one hand by the more complex creation process, and on the other hand by the fact that there are no economies of scale yet. This price can later be reduced to a level equivalent to the incumbent technologies or even lower. For example, when the quartz watches came out, they were more expensive, but now they are much more affordable than automatic watches.
3. Initially the quality offered by the disruptive innovation tends to be of lower quality than the technology it aims to replace

4. However, disruptive technology tends to have added value. It is important to note that we can only talk about added value if the consumer wants this benefit. It is difficult to identify and predict what will be a benefit to the consumer
5. Before reaching the mass market, disruptive innovation will first be a niche market. Gradually it will reach other niche markets and then reach the mass market.
6. Old technologies do not disappear completely. Often it turns out that these technologies become niche markets.
7. Old and new technologies tend to be in constant competition for market share.

Of the seven characteristics they identified, Scott Hardman et al (2014) identified three fundamental characteristics that are always present and exclusive to disruptive innovations. According to them, a technology is disruptive as soon as it fulfils two of the three criteria, and the more criteria it fulfils, the more disruptive it is.

1. Disruptive to Market Leaders: The companies that produce the incumbent technologies are not the same companies that will produce the disruptive technology. In the case of the car industry when it goes electric, this is not really the case for the manufacturers, but it is the case for all their suppliers. This is also the case for fuel cell vehicles, which have the same motorisation as electric vehicles.
2. Disruptive to End Users: This means that the way end-users will use the disruptive technology will not be the same as the way they used the old technology. For example, if we take the case of the electric car, users will have to change their behaviour, mainly in the way they replenish the vehicle with energy.
3. Disruptive to Infrastructure: This means that the type of infrastructure needed for disruptive technology is not the same as for incumbent technology. Again, if we take the case of electric cars, petrol stations will have to be adapted to provide fast charging stations to recharge the batteries. In the case of hydrogen, it will also be necessary to change the various stations and adapt or replace them with hydrogen filling stations, as we will see in part 2.

In our opinion, it can be said that hydrogen cars and especially fuel cells are disruptive innovations because they have two of the three characteristics. In our view, they are indeed disruptive for market leaders and for the infrastructure. However, we do not believe that it is disruptive for end users, as the use of the hydrogen car is very similar to that of an ICE.

2.2.3 The Technology acceptance model

This model is one of the most widely used models to explain user acceptance behaviour. It is based on the theory of reasoned action of Fishbein and Ajzen (Fishbein & Ajzen, 1975). This theory wanted to identify the factors affecting the relationships between the attitude toward technology and the intention to use the technology. This model, proposed by Davis in 1989 has been reviewed (TAM 2) by Davis and Venkatesh in 2000. The TAM allows us to have a different view of the adoption of an innovation. Even if it shows similarities with Rogers' theory, it allows us to see the adoption and therefore the diffusion of innovation in a different way. Moreover, the TAM is the basis of another theory that will be discussed later, the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology.

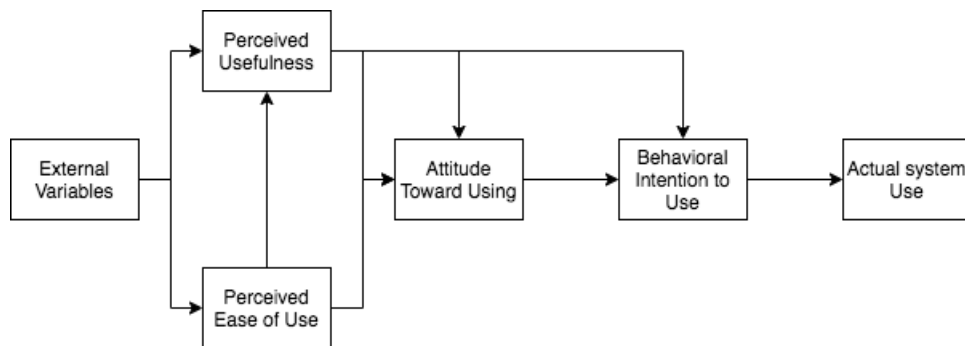


Figure 2 : The Technology Accpetance Model (Fishbein & Ajzen, 1975)

By proposing the TAM, Davis wants to analyse the individual characteristics of the potential users of an innovation that could influence an individual's final decision to adopt or not to adopt this innovation.

The model is based on two big determinants, which are the *Ease of use* and the *perceived usefulness* of the innovation. These two factors are crucial to explain the attitudes toward technologies and the intention to use them.

Davis tells us that people tend to use, or not use an application if they believe this application will help them to perform better in their job. This first variable will be the *Perceived Usefulness*. We also know that potential users tend to not adopt an application or an innovation if it is too hard to use and that the benefits of usage are outweighed by the effort of using or understanding the application. Davis calls this second variable the *perceived ease of use*.

- **Perceived Usefulness:** Davis defined it as “the degree to which a person believes that using a particular system would enhance his or her job performance”. Some research (Davis & Venkatesh, 2000) tend to show that a technology that does not necessarily help individuals to perform better in their tasks. Moreover, Davis showed the existence of a positive influence of the perception of the usefulness of an innovation and the intention of its adoption by the potential users for whom it is intended.
- **Perceived Ease of Use:** Davis defined it as "the degree to which a person believes that using a particular system would be free of effort". This follows from the definition of "ease": "freedom from difficulty or great effort". It is important to notice that the perceived ease of use will influence the Perceived Usefulness. In fact, the more complex an innovation is perceived, the less the individuals will see it as useful.

The concept of Perceived Usefulness” detailed by Davis can be compared with the concept of Relative Advantage from Rogers. Both focus on the perception of superiority of a new technology over another. The second concept of the TAM describes the Perceived Ease of Use”. This concept meets Roger’s theory which tells us about the complexity of a technology.

The TAM, however, has two important limitations compared to other models. Firstly, the TAM ignores the influence on the diffusion or the adoption of a new technology of possible controlling factors such as institutional and social factors. The second limitation is very linked with the first one. We can see that the TAM is only focusing on individual's factors and their influence on the decision of adoption.

In an effort to supplement the TAM and remove these limitations, Venkatesh and Davis created a revised TAM (TAM 2). The aim of this second model is therefore to explain the perceived utility and the intention of use in terms of social influence and instrumental cognitive processes. TAM 2 explains the concept of perceived utility in another way by developing the “external variables”. The TAM 2 proposes to explain those external variables by incorporating two additional theoretical constructs.

- **The Social Influence Processes:**

Venkatesh and Davis propose 3 social concepts that can influence an individual in his choice to adopt or not an innovation or a new technology.

- **Subjective Norm:** It means that an individual can be influenced by other people to adopt a behaviour. These "influencers" can be people whom the individual

trusts or who are important to him (Morris & Venkatesh, 2000). “In the context of technology usage, subjective norm has manifested itself as peer influence and superior influence”.

- **Voluntariness:** This concept is defined as “the extent to which potential adopters perceive the adoption decision to be non-mandatory” (Agarwal & Prasad, 1997) (Hartwick & Barki, 1994) (Moore & Bensabat, 1991).
- **Image and Social Influence:** In the society, people tend to adopt a behaviour (or an innovation in our case) in order to establish or maintain a good image within a reference group. Moore and Benbasat (1991, p195) defined this concept as “the degree to which use of an innovation is perceived to enhance one’s status in one’s social system”. It is important to notice that even if the social influence has a strong effect on individuals, it tends to decrease over time due to the personal experience of the user. Indeed, the more time passes, the more the user will form his own opinion independently from others.

- **The Cognitive Instrumental Processes:**

This process tries to explain how an individual tries to understand and compare what a new technology or an innovation is capable of doing with what he needs.

- **Job Relevance:** It explains the process which an individual uses to understand how a new system can be used in his work. It is a function of the tasks that this individual has to do in his job and of the tasks that the system can do.
- **Output Quality:** The fact that a technology can handle a lot of tasks is important. But the technology must perform in those tasks in order to be adopted. A system that can perform few tasks, but which succeeds in performing in those tasks will often be more desirable than a technology capable to handle a lot of tasks but with a weak performance.
- **Result Demonstrability:** Even if a system is effective, it can fail. In fact, if users do not see the added value of such a system, they will not adopt it. Even if it is efficient, if a system tends to be so in a hidden way, people will find it useless.

2.2.4 The Theory of Reasoned Action (TRA)

The TRA is the basis of the TPB (Theory of Planned Behaviour) which will itself be one of the bases of the last model we will analyse. It is therefore essential for us to briefly explain this theory.

The Theory of reasoned action created by Ajzen and Fishbein in order to explain volitional behaviour (Fishbein & Ajzen, 1975) and they assume that an individual has an intention to perform. This theory excludes behaviour that are not rational. For example, spontaneous, impulsive and habitual behaviours are not considered in this theory (Hale, Householder, & Greene, 2003). In other words, the TRA focuses its analysis only on voluntary behaviours and excludes every behaviour that might not be voluntary. It also excludes behaviours that required some specific skills, specific resources or the cooperation of others (Liska, 1984). The TRA explains that the main factor that predicts the volitional behaviour is the behaviour intention. This behaviour intention is the combination of two independent beliefs, which are the subjective norm and the attitude toward performing the volitional behaviour.

Fishbein and Ajzen (1975) explain that the attitude is the evaluation of an object and the belief the link between this object and some attribute. They also explain that the subjective norms are what individuals perceive in their peers' attitude about a behaviour. For example, if I see that all my colleagues are using a new smartphone I will be influenced).

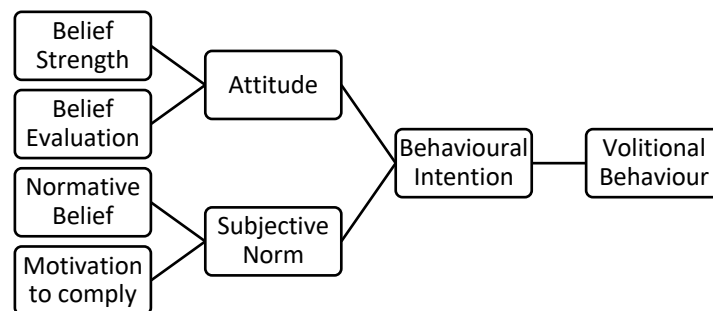


Figure 3: The Theory of Reasonable Action (Fishbein and Ajzen, 1975)

2.2.5 Theory of Planned Behaviour (TPB)

Davis and other authors have developed the TAM which was initially focused on individual's factors influencing the decision of adoption. As we said earlier, this focus on the individual proved, however to be a limitation and therefore a TAM 2 model, integrating the role of social influence processes was presented. Then, the TAM 2 still fails to capture the desire of an individual to understand in advance which level of control on his interaction with the

technology he will have. In this context I will introduce the Theory Planned Behaviour (TPB) which takes this expectation into account.

The reason why I chose to talk about the TRA is that the theory of planned behaviour is based on the TRA. So, it was important to talk about the TRA in order to better understand the TPB.

The aim of this theory is the same as the TRA. Ajzen tries to understand and predict the behaviour of individuals. The difference with the TRA is the fact that he added a new factor in the model which is the *perceived behavioural control*. This concept means that the behavioural intention will be influenced by how the individual perceives his control toward an innovation. By perception of control, we mean the assessment of the individual in relation to the factors that could prevent or facilitate the adoption of a behaviour (Ajzen, 1991). The more an individual will perceive that he has a good control on a new technology, or on an innovation, the more this individual will have the intention to adopt it. On contrary, if the individual perceives that he will have a lack of control on this innovation, he will limit his intention to adopt it.

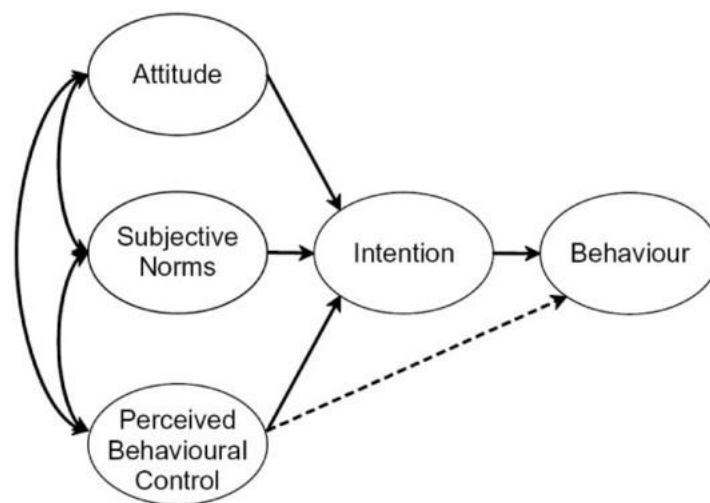


Figure 4: The Theory of planned Behaviour (Ajzen, 1991)

2.2.6 Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT)

The Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) has been created by Venkatesh, Morris, Davis and Davis. This model is based on previous other models that we saw in this paper, as the TAM and the theory of planned behaviour. In our view, it allows us to combine the different aspects of the previous theories and to have a more complete view of

what is involved in the process of deciding whether or not to adopt a technology or an innovation.

The model wants to explain the user acceptance and usage behaviour. The four authors of the UTAUT (Morris & Venkatesh, 2000) identified four constructs (Performance Expectancy, Effort Expectancy, Social Influence, Facilitating Condition) “that will play a significant role as direct determinants of user acceptance and usage behaviour”. (Venkatesh, Morris, Davis , & Davis, 2003, p. 447). They also identified some variables called “moderators” (Gender, Age, Experience, Voluntariness of use), which moderate the relations between various variables and Intention to Use (Ahmad, 2014).

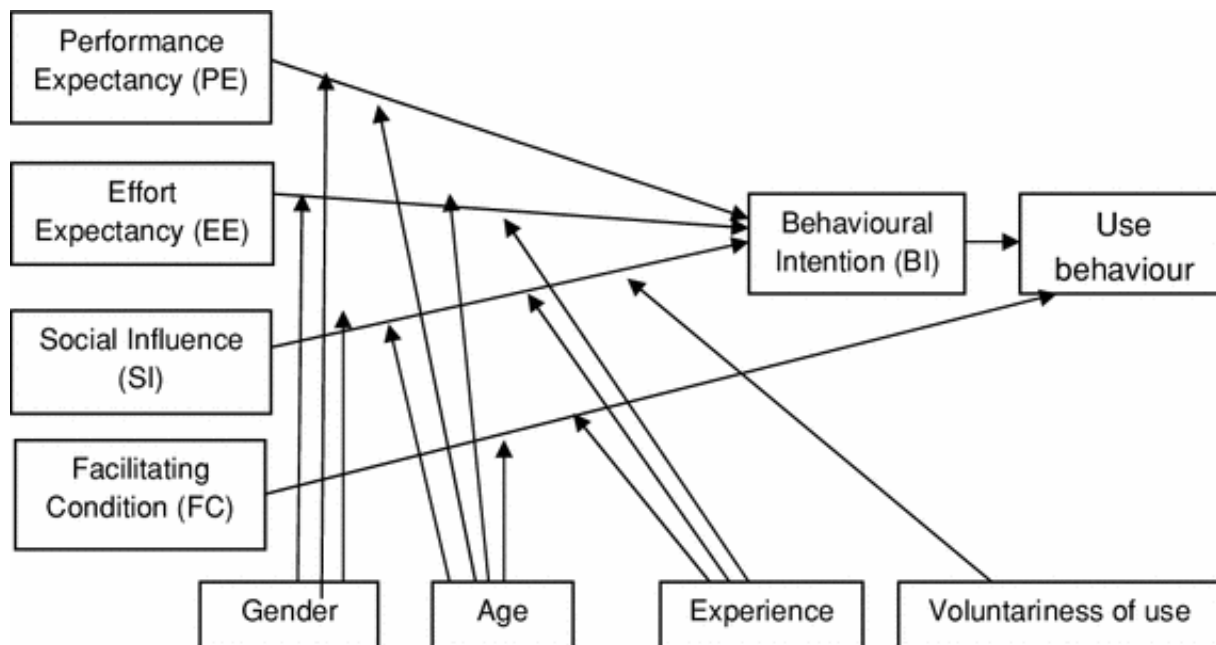


Figure 5 : Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) (Venkatesh, Morris, Davis, & Davis, 2003)

- **Performance Expectancy:** It is “the degree to which an individual believes that using the system will help him or her to attain gains in job performance” (Venkatesh, Morris, Davis , & Davis, 2003, p. 447). They determined five key variables inspired by the Technology Acceptance Model.
- **Effort Expectancy:** It is “the degree of ease associated with the use of the system” (Venkatesh, Morris, Davis , & Davis, 2003, p. 450). They determined three key variables inspired by the Technology Acceptance Model.

- **Social Influence:** It is “the degree to which an individual perceives that important other believe he or she should use the new system.” (Venkatesh, Morris, Davis , & Davis, 2003, p. 451). They determined three key variables inspired by the Technology Acceptance Model.
- **Facilitating Conditions:** It is “the degree to which an individual believes that an organizational and technical infrastructure exists to support the use of the system” (Venkatesh, Morris, Davis , & Davis, 2003, p. 453). They determined three key variables inspired by the Technology Acceptance Model.

2.2.7 Synthesis

In this section we have been able to determine that hydrogen vehicles are both innovations and disruptive innovations. In this sense, the analysis of the different models above dealing with the diffusion of innovation seems relevant to us. We will try to summarise the different elements that we have developed during this theoretical survey.

First, Rogers teaches us that the diffusion of innovation takes place through communication channels which can be interpersonal or from the mass media. Without communication there is no diffusion. It will therefore be important to determine whether such communication exists for hydrogen engines and if so to what extent.

Next, Rogers explains that several categories of adopters can be defined. In our opinion, given the number of hydrogen cars on the road now, hydrogen engines are still in a phase where only innovators and possibly a few early adopters have adopted this technology.

Even though the different theories we have analysed approach the subject of diffusion and adoption of innovation differently, in our view it is easy to see that there is a lot of similarity and that they come to similar conclusions. Three main similarities can be highlighted between the different theories.

The first is the fact that people generally look for improvement in an innovation, whether it is to have something that is cheaper, simpler, or more efficient in the different tasks of the individual. This concept is defined and called in different ways (Relative Advantage, Perceived Usefulness, Attitude and Performance Expectancy).

The second aspect is the fact that there is a social influence present. This is, as we explained earlier, one of the reasons why the TAM was adapted into TAM 2. A person will be strongly

influenced by his or her peers and by certain leaders. In addition, an innovation can be adopted to keep a good image in the eyes of society. Finally, there may also be a mandatory character.

The third aspect is that individuals will adopt an innovation more easily if it is not too complex for them, or if using the innovation is not more complicated.

Other attributes are important, such as the compatibility of an innovation and its environment, or the different conditions that facilitate diffusion as we have seen in the theories of the diffusion of innovation and the UTAUT.

Part 2: Diffusion of hydrogen in the automotive sector

1. Diffusion of innovation in the automotive sector

In this section we will try to apply the different theories about the diffusion of innovation to the case of the diffusion of hydrogen vehicles in the automobile.

Firstly, we will analyse the automotive sector in order to understand the context and environment in which the innovation will diffuse and secondly, we will look at hydrogen in the automotive industry by identifying the barriers and drivers of its diffusion based on what we have seen in the theory

1.1 Characteristics of the automotive Sector

The automotive industry has three links in its value chain. Indeed, although one might think that this industry is limited to the manufacturers, it also includes the suppliers and distributors. The suppliers (e.g. ZF Friedrichshafen, Magna International) are responsible for manufacturing parts upstream, then the manufacturers are responsible for assembling these different parts and finally the distributors and dealers are in charge of selling the vehicles. (ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, 2005) (Petit, Rakotomalala, Gollain, & Guery, 2019) (MacDuffie & Fujimoto, 2010) (Schmid & Grosche, 2008, p. 17)

The automotive industry is an oligopolistic structure categorized by very long production cycles as well as very high capital investments (Matoglu & Vate). Indeed, 90% of the market is held by the top 10 manufacturers (ACEA, 2016). On the European market this industry is in a mature phase (Krifa, 2001). It is characterised by intense competition and high entry barriers (Johnson, et al., 2014). However, one exception is Tesla, which has established itself as the leader in electric cars in recent years, even though it was founded only a short time ago. Manufacturers who are in this mature phase are characterised by a product development process which is now continuous and that allows them to remain competitive. This continuous development is possible thanks to the very high expenditure in Europe on research and development (OCDE, 2013). These technological innovations focus, on the one hand, on production systems to make them more efficient and flexible and, on the other hand on the technical characteristics of the car. For example, major efforts are being made to make vehicles more environmentally friendly (Coppens & van Gastel, 2003)

2.2 Innovation in the automotive sector

As we have just seen, innovation and technological advances are essential to remain competitive. Throughout its history, the car has never ceased to be improved, firstly in terms of performance, then in terms of safety and finally in terms of eco-responsibility (Schulze, MacDuffie, & Täube, 2015) (Benezra, 2013). However, all these technological advances are mainly incremental innovations that are in fact small moves (Schumpeter, 1954), such as replacing the carburettor with a fuel injection system or adding a turbocharger.

It is also worth noting that throughout its history the automobile has developed around two main axes, namely fossil fuels and petroleum-based motorisation. Chanaron and Lung (1995) have explained that it is because of the early French artisanal manufacturers that the petroleum-based automobile was imposed to the detriment of alternatives such as electric and steam batteries, which were nevertheless more than promising.

However, since the end of the 1990s, the challenges of innovation in the automotive industry have mainly revolved around two (closely related) poles: the rising price of oil and the need to reduce greenhouse gas emissions (Schulze, MacDuffie, & Täube, 2015) (Krifa, 2001). On the one hand, the increase in oil prices is causing some users to switch to substitutes, and on the other hand, government bodies are putting more and more pressure on the various industries to have a truly sustainable policy in order to achieve the objectives of the Paris agreements. For example, the Shell Group has been ordered by the Dutch courts to reduce its CO₂ emissions by 45% by 2030. The Dutch court ruled that a Shell Group's report, which foresaw a 20% reduction in CO₂ emissions, was insufficient (Rohart, 2021). The Shell planned incremental innovations, although necessary for an ecological transition, would have given too weak results in the context of climate change and of the disappearance of fossil fuels. In order to achieve the objectives of the Paris agreements, it is necessary to go also through disruptive innovations and thus to switch to a new energy sources. (Christensen C. M., 1997) (Midler, Maniak, & Beaume, 2012) (Briggs, Webb, & Clevo, 2015).

2.3 Automotive Value Chain

Again, in order to understand the automotive industry, it is important to understand the value chain and how the industry works.

In this section we will try to analyse the automotive Value Chain. "A company's value chain encompasses value activities in the order of their operational implementation" (Schmid &

Grosche, 2008, p. 17). The value chain concept developed by Porter (see Annex 4) is based on 9 clusters grouped into two categories: "Basic activities" and "Support Activities" (Kotler, Keller, & Manceau, 2015, pp. 43-44).

Basic Activities:

- **Inbound Logistics:** Here we are mainly talking about the process of acquiring the resources needed to create the offer. In the automotive industry, the creation of value is mainly based on the selection of these resources (raw materials, choice of equipment suppliers, etc.) (Nezha, 2018)
- **Operations:** This aspect mainly covers the entire production chain. It starts with processing, assembly, packaging and testing. In the case of the automobile, this consists of the creation and assembly of the different components of a car such as the chassis, engine, gearbox and paint. Most of the major manufacturers now have assembly lines around the world.
- **Outbound logistics:** Here we are mainly talking about logistics, which consists of managing stocks of finished products, transport and delivery. The aim is to reduce waiting times. In the automotive industry, this consists mainly of supplying the various retailers. For example the VW group has to provide vehicles to D'Ieteren who is the only retailer of this group in Belgium.
- **Marketing and sales:** Marketing and sales define how products and services will be offered to customers. In the case of marketing this adds value through building the image and reputation of a brand. Sales, on the other hand, focuses mainly on convincing potential customers of the advantages of one brand over another. In the case of the automotive industry, the sales process is mainly carried out by retailers.
- **Services:** This is the last activity at the primary activity level in the value chain. It consists of preserving or even increasing the final value of the product. In services we can find repair, installation, financing assistance, etc. In the automotive industry this mainly concerns after-sales service and the distribution of spare parts for the repair and maintenance of vehicles.

2.4 Identification of the different stakeholders

In order to understand how an innovation spreads in the automotive sector, we have defined, based on various documents listed below, a non-exhaustive list of stakeholders. We also explain the different interests they have in the sector. (Collantes, 2007) (Bakker, Maat, & van Wee, 2014) (Fraga-Lamas & Fernandez-Carames, 2019)

- **The users:** They don't have much influence and their choices have little weight with manufacturers. They don't make things happen, waiting to see what is offered to them, but their desires influence supply because it changes demand.
- **Car manufacturers:** Car manufacturers will directly influence the supply side of the automotive industry, adapting to current and future consumer demand as well as to new market trends on technological evolution and the production of low emission vehicles. In order to comply with EU regulations to reduce the average carbon emissions of their vehicles, car manufacturers are diversifying by creating fully electric, hydrogen or hybrid vehicles.
- **Governments and public organisations:** They can act on three different levers. Firstly, they can give subsidies to encourage car manufacturers to engage in the energy transition. Secondly, they can impose fines and bans on technologies that are not in line with the energy transition. And finally, the last lever they can use is communication, on the one hand to inform about the new technology but also to motivate consumers to engage in the transition.
- **Oil Companies:** The oil companies have an important role to play as they have a vested interest in the continued use of oil for a long time. These companies are not very worried about the electric car at the moment because it represents a small proportion of the world market (about 0.5% of all new passenger cars according to Bakker, Maat, & van Wee, 2014). Examples include Total and Shell, who are already in the process of transitioning to electric power with Total becoming Total Energy.
- **Energy Producers:** Mobility and choice of energy are inseparable, there must be coherence between the energy system chosen and the fleet of vehicles produced by the cars manufacturers.
- **Fleet management companies:** Companies choose the cars they offer to their employees, so it is the first vector of diffusion of new cars. The users, on the other

hand, have a narrower vision and do not want to change while the fleet managers have a broader vision to offer new technology to their employees.

- **Grid operators:** Grid companies are extremely important in the diffusion of new fuels in the automotive sector. Indeed, the supply of the new resources to be delivered is synonymous with investment for the grid companies. They must be able to offer the required quantity of these resources, otherwise these innovations will not be able to spread effectively.
- **Infrastructure providers:** Infrastructure can be an important brake on innovation, because if the infrastructure is too expensive or unprofitable, it will not be built, so there will be no stations, no petrol, so no cars.
- **Recycling companies:** Nowadays, recycling companies are essential to promote the circular economy. Indeed, a large part of a vehicle is recyclable, so there is a real interest for recycling companies because the environmental impact of the materials will decrease thanks to the increase of the life span by recycling.

This list, which is not exhaustive, can be completed by two additional points that we think it would be useful to add to what we have read in the various articles.

Firstly, it is important to note that new entrants are arriving on the market and Tesla is for the moment a concrete example. The latter seem to be rare.

Secondly, as this work is about the diffusion of hydrogen in the automotive industry, it is important to note that some lobbyists such as the Hydrogen Council and hydrogen companies such as Air Liquide are influencing the market.

2. Case of the Hydrogen Cars

Now that we know the context in which the hydrogen car will be diffused, we can begin to analyse its diffusion in the automotive industry. First, we will briefly analyse the value chain of the hydrogen industry and then we will analyse the different ways of producing hydrogen. These elements are important for a good understanding of the rest of this work. Then we will analyse the barriers and drivers for the diffusion of the hydrogen car.

2.1 Hydrogen Value Chain

There are three main parts in the hydrogen value chain. The first step is to develop a suitable site for hydrogen production and then to equip this site according to the method of hydrogen production. Today it is mainly reforming, but there are also electrolyzers. We will then have to be able to take care of maintenance.

The second is conditioning, which includes compression, transport and storage. To be transported, hydrogen is first compressed and then stored for transport to its end user.

Thirdly, there is its end use. Hydrogen is today mainly used in industry, but what interests us is its application in mobility. Its application to mobility therefore involves the entire process of manufacturing a car, from the creation of the parts to their assembly. There is also, of course, the maintenance of these vehicles, but also the development of recharging stations. (République Française, ADEME, EY, 2019) (Frischauf, et al., 2013)

2.2 How is Hydrogen produced

There are three different ways to produce hydrogen, by reforming natural gas, by decomposing water (water electrolysis) and by photosynthesis.

- **Reforming natural gas:** The principle consists of letting methane, which can be found in abundance in natural gas, reacting with water that is heated at high temperatures. This triggers a chemical reaction which ultimately produces dihydrogen (H_2) and CO_2 . This technique accounts for 90% of current hydrogen production. (Air Liquide, 2021)

This process is therefore polluting because it emits CO_2 ; this type of hydrogen is more commonly known as "*grey hydrogen*". However, techniques have been developed to capture this CO_2 and drive it underground. When this technique is used, the hydrogen is called "*blue hydrogen*". (Commission Européenne, 2021)

- **Decomposing water:** A water molecule (H_2O) is composed of two hydrogen atoms and one oxygen atom. The aim is therefore to dissociate them. The most common method for doing this is to use electrolysis of water. For this process to work, electricity is needed. Studies are also being conducted to use thermochemical cycles. Indeed, at high temperatures decomposition is spontaneous but it is possible to do it at lower temperatures thanks to chemical reaction cycles. (Air Liquide, 2021)
This type of hydrogen is called "*green hydrogen*" because it emits no pollution. However, care must be taken, as electricity is needed, and for this hydrogen to remain "non-polluting", the electricity used to create it must be obtained from renewable energy sources such as wind turbines or solar panels. (Commission Européenne , 2021)
A fourth type of hydrogen called "*yellow hydrogen*", which is specific to France, is hydrogen produced in electrolyzers, but unlike "*green hydrogen*", the electricity used in the process comes from nuclear energy. (IFPEN, 2021)
- **The gasification process:** gasification, which produces a mixture of CO and H_2 from coal (a solution that emits a lot of CO_2) or biomass by combustion. The hydrogen produced in this way is part of the "*grey hydrogen*" family (IFPEN, 2021).
- **Photosynthesis:** This technique is still under development, but it may be possible to create hydrogen using micro-organisms. (Air Liquide, 2021)

2.2 Barriers to the diffusion process

In this section we will discuss different barriers to the diffusion of hydrogen in the automotive sector that are related to the different concepts we have seen in the theory.

2.3.1 Production of green hydrogen

The first major challenge facing hydrogen-powered engines will be the production of hydrogen. Currently, as we have seen previously, grey hydrogen emitting greenhouse gases represents 95% of hydrogen production. As we have seen above, there are different ways of producing hydrogen with more or less or no greenhouse gas emissions. We have classified these different types of hydrogen by color code according to their greenhouse gas emissions: grey hydrogen with high emissions, blue and yellow hydrogen with low emissions and green hydrogen with no emissions. However, today 95% of hydrogen production is grey hydrogen and therefore highly carbonated. Moreover, this hydrogen is today mainly intended for industrial use (IFPEN,

2021). As we are in a context where the reduction of greenhouse gas emissions is one of the main objectives of the European Union, it seems logical that if the production of hydrogen remains highly emissive of greenhouse gases, hydrogen cannot be used as a "fuel" in mobility. The challenge is therefore to reduce and completely decarbonate hydrogen production by 2030 and 2050 through environmentally friendly processes. Today the cleanest and most promising way is the creation of hydrogen through the electrolysis of water. However, even if this technique does not produce any greenhouse gases, it still has several weaknesses (République Française, ADEME, EY, 2019).

First of all, hydrogen produced by electrolysis of water is much more expensive than hydrogen produced by steam reforming. In France, the cost of hydrogen production varies between 1.5 and 2.5 €/kg of hydrogen, whereas the production of hydrogen by water electrolysis has a cost that varies between 4 and 12 €/kg. This price varies according to the efficiency of the electrolyser, the number of hours of operation of the electrolyser, the cost (and therefore the type) of electricity. (République Française, ADEME, EY, 2019) (Hydrogen Council, 2020) (Whitmarsh & Wietschel, 2008) (Beeker, 2014).

In the long term, green hydrogen is primarily related to the cost of electricity. Indeed, for hydrogen to be called "green hydrogen", it is imperative that the electricity needed for the electrolyser is created from renewable energy sources such as solar panels, wind turbines and hydroelectric dams. However, this electricity remains relatively more expensive than electricity from fossil fuels. (République Française, ADEME, EY, 2019)

The other problem is that there are currently not enough electrolyser to produce green hydrogen in sufficient quantities. There is therefore a significant investment to be made in order to produce these. (République Française, ADEME, EY, 2019). Through all our readings we have also been able to identify that there is also the problem of being able to cover the world's electricity demand with renewable energy alone. It may therefore seem complicated to meet additional demand for hydrogen. However, according to the IPFEN, hydrogen could be a vehicle for storing electricity, thus making it possible to compensate for the intermittence of renewable energies (solar and wind). (IPFEN, 2021)

Moreover, according to the Hydrogen Council (2017), global hydrogen demand could explode by 2050, with demand almost ten times higher than in 2015 (Figure 7). This demand could already nearly double by 2030. ADEME (2019) points out that another study by DNV GL (a

Norwegian registration and classification company active in the renewable energy sector) proposed low, medium and high scenarios with annual growth rates 1.5 to 4 times lower than those of the Hydrogen Council.

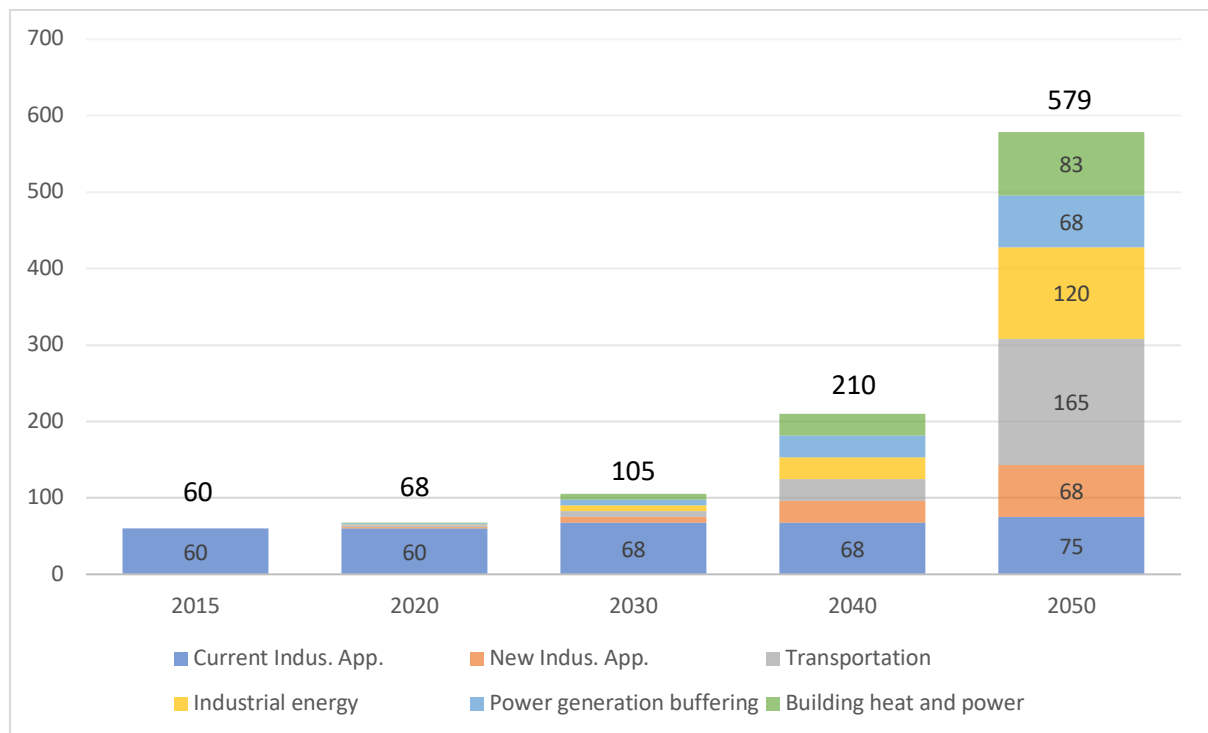


Figure 6: World demand for pure hydrogen, by application, in million tonnes, according to Hydrogen Council (2017) and ADEME (2019)

The different governments (mainly German and French) as well as the European Union are aware of the stakes of green hydrogen and have launched decarbonization plans in the hydrogen industry. The European Union estimates the investment in hydrogen at between 180 and 430 billion by 2050. It also has a multi-stage plan. Indeed, it plans to create a production capacity of 6 Gigawatts by 2024 and 40 GW by 2030. (European Commission , 2020) (European Commission, s.d.) (Grésillon, 2020) (Shiu, Steinberger-Wilckens, Turrentine, & Hardman, 2017) (Whitmarsh & Wietschel, 2008) (European Commission , 2020) (European Commission, s.d.)

In our opinion, this challenge of having to take into account two problems, namely creating a sufficient quantity of hydrogen on the one hand, while the expected growth in demand is exponential, and decarbonizing hydrogen on the other hand, brings to the fore different aspects that we have seen in the theory.

First of all there is the compatibility developed by Rogers. If we end up in an energy environment (in Europe) where the main source of energy is electricity and therefore hydrogen production is not sufficiently developed then the hydrogen car will not be compatible with this environment. Then there is the aspect of decarbonization which is linked to the social influence developed in the TAM, TPB and UTAUT. From our point of view, in a decarbonized way, it would be badly perceived to drive a car which in fact would be more polluting than an electric car if the production of hydrogen was highly carbonated.

2.3.2 Infrastructure

The second major challenge facing hydrogen is that today the infrastructure for its deployment in the car fleet is almost non-existent³. Indeed, we currently have 3 hydrogen charging stations in Belgium (Hayez, 2021) and 177 in Europe (ServiceStation, 2020). Even if small projects for the deployment of these pumps have recently seen the light of day, they remain insignificant compared to the number of petrol pumps that are available (McDowall & Eames, 2006).

Not having the necessary infrastructure to be able to use an innovation refers directly to the concept of Facilitating Condition developed in UTAUT. Not having this infrastructure will not affect the intention to use the technology but will negatively influence the final decision to adopt or not the innovation, or its use.

Moreover, one can easily see an analogy with the concept of Relative Advantage developed by Rogers and the Perceived Ease of Use of the TAM. Indeed, if the individual has little or no possibility of refueling with hydrogen, this will diminish his advantage over BEVs and he will have to make an extra effort to use his car.

P. E. Meyer and J. J. Winebrake (2009) categorize hydrogen vehicles and refueling infrastructure as complementary goods. “Complementary goods are goods which operate in a system and must be consumed together”. For example, a Nintendo DS and Nintendo DS games are complementary goods (Meyer & Winebrake, 2009). A Nintendo DS needs compatible games (Nintendo DS) to be used and Nintendo DS games can only be used if you own the system. This example is an analogy of the relationship between hydrogen powered vehicles and

³ In this section we will talk about filling stations and not about transport, which will be the subject of the next point.

hydrogen and refueling stations. If there is no hydrogen and no refueling stations, a hydrogen car cannot run, just as a hydrogen station is useless if there is no consumer demand.

In this system, a consumer will not buy a hydrogen car if he or she does not have the capacity to find the necessary infrastructure to recharge the car. The problem is that the companies capable of deploying this kind of infrastructure are thinking in the opposite direction. Setting up a hydrogen filling station is expensive and if there is no demand for hydrogen, the company will not have a big plan to deploy these stations. In addition, hydrogen filling stations have a very high cost of operation and maintenance as there is no widespread knowledge in the sector at this level (Xu, Wu, & Dai, 2020). We find ourselves in a situation akin to the "chicken and egg" dilemma of who should come first (DOE, 2002) (Marchetti, 2006) (Melendez & Milbrandt, 2006) (Melaina, 2003) (Zaho & Melaina, 2006). If there is not sufficient penetration from both goods, the use and purchase of one of the two goods becomes highly inconvenient. This will lead to new types of costs for consumers. These new costs are called "convenience costs" (Winebrake & Farrell, 1997). This case occurred at the beginning of the diffusion of natural gas vehicles in the United States. Indeed, due to the low number of filling stations, a new cost appeared for the consumers. Due to the low density of suitable filling stations, consumers had to make longer journeys to fill their tanks.

In their studies, P. E. Meyer and J. J. Winebrake (2009) noted that in their simulations of the diffusion of these two complementary goods, only the scenarios where there were incentives for the purchase of hydrogen vehicles and for the installation of hydrogen stations were viable. Indeed, in the other scenarios, if the incentives were only for one good, it would not be sufficient to allow a market penetration of hydrogen vehicles. They therefore concluded that if the various political institutions had the objective of diffusing this type of vehicle, they would have to propose policies encouraging hydrogen vehicles as well as hydrogen filling stations.

It is also important to note that the cost of a hydrogen filling station is extremely expensive (about €1.5 million). This adds uncertainty and therefore makes potential large-scale deployment cautious (Becker, 2014). In comparison, the price of a diesel or petrol filling station requires an investment of between €50,000 and €200,000 (Demangeon, 2018)

In comparison, the distribution of charging stations is less problematic (IEA, 2020). First of all, the installation of an electric charging point is much less of a constraint, and we can have access to electricity almost everywhere. (De Paepe, 2019; Shiu, Steinberger-Wilckens, Turrentine, &

Hardman, 2017). Indeed, the electrical network is already present on most of the European territory, which is not the case for hydrogen. Secondly, all electric cars can be recharged by a simple AC socket and can therefore be easily recharged in any home (Bebat, s.d.) (Ores, s.d.) (Bruxelles Mobilité, Bruxelles Environnement, Sibelga, Brugel, & Be.Bruxelles, 2020). Moreover, the fact that you can charge your car at home seems to be an advantage that is not overlooked by early adopters who have already chosen to buy an electric car. Some of the people interviewed in a study seem to think that being able to charge your car in 5 minutes is not so advantageous compared to being able to charge your car at home (Shiu, Steinberger-Wilckens, Turrentine, & Hardman, 2017).

2.3.3 Hydrogen conditioning, storage and transport

Another challenge to the diffusion of hydrogen in the automotive sector is the conditioning and transport of this gas. Indeed, these two aspects act as different brakes that slow down the diffusion of hydrogen (McDowall & Eames, 2006).

While in the previous section we focused on filling stations, here we will concentrate on the complexity of revitalizing them. This is therefore an extension of the infrastructure issue. Again, as in the previous point, we can link this barrier to the UTAUT concept of Facilitating Condition. Indeed it is necessary to have refueling stations but if these stations are not properly refueled then this will impact on the decision to adopt the technology and not the intention to adopt.

As mentioned earlier, hydrogen is the smallest element in the Mendeleev table, which means that it is also the lightest gas in the universe. To store 1 kg of hydrogen at atmospheric pressure (the amount of hydrogen needed to travel 100km) would require a volume of 11 m³, the size of the boot of a large commercial vehicle. In order to transport and store this hydrogen in a cost-effective way, it is necessary to find ways to reduce the space it takes up (Air Liquide) (Becker, 2014) (République Française, ADEME, EY, 2019).

Today, there are two main methods of storing hydrogen. The first and most common and simple is to store it in gaseous form but under pressure at a constant temperature. The hydrogen is then compressed to pressures varying between 200 and 900 bars depending on the needs. The other method is to transform it into liquid form. It is in this form that the density of hydrogen is the highest (71kg/m³) twice as high as compressed gaseous hydrogen at 700 bars, which is 39kg/m³). However, this process requires high-performance cryostatic equipment. Other

methods such as solid storage are being studied, which could deliver promising results. (Eliasson, Taylor, & Bossel, 2004) (AFHYPAC, 2019) (Air Liquide, s.d.).

Hydrogen is transported in several different ways. Firstly, when it is in gaseous form, it can be transported by a pipeline network or by land (trucks and trains). Europe is currently crossed by a network of pipelines of more than 1500km dedicated to the distribution of hydrogen. These pipelines allow hydrogen to be transported at nearly 40km/h. This hydrogen is compressed to a pressure varying between ten and a hundred bars. This transport system is obviously reserved for large quantities. It is also possible to use the pipeline network reserved for natural gas by mixing with a proportion of 80-20%. It is then necessary to separate the two gases at the end of the process. (AFHYPAC, 2019; Malbrunot & AFHYPAC, 2019) (Air Liquide, s.d.; Dhers, 2005). This method, even if it is very expensive at the beginning, due to the cost of setting up the pipeline, is relatively advantageous because the energy loss during transport is only 1.4% (Malbrunot & AFHYPAC, 2019; Eliasson, Taylor, & Bossel, 2004).

The second method of transporting hydrogen is by land. The hydrogen is then compressed in tanks or cylinders and transported to the place of use. The hydrogen is then compressed to pressures of between 200 and 500 bar (Dhers, 2005). There are two big problems with this method. Firstly, the ratio between the transported mass of the truck and the amount of energy transported is relatively small. For example, a 40-tonne truck carrying hydrogen will carry 10 times less than methane and 80 times less than petrol or diesel. The second problem is the compression of the gas. When compressed to between 200 and 800 bars, the corresponding loss in available energy is of the order of 10 to 20% (Eliasson, Taylor, & Bossel, 2004; Malbrunot & AFHYPAC, 2019; AFHYPAC, 2019; Beeker, 2014).

A third way to transport hydrogen is by ship. This system is very new and was recently introduced by Japan. The hydrogen is first liquefied by cooling it to temperatures around -250°C, and then stored in suitable tanks. It is still too early to draw conclusions on this way of transporting, but this solution would allow larger quantities of hydrogen to be transported over longer distances (Torregrossa, 2019).

To overcome these transport problems, it is possible to create hydrogen in a decentralized way by creating small electrolyzers that would be installed next to the filling stations. (Beeker, 2014; Malbrunot & AFHYPAC, 2019)

2.3.4 High Cost and Competitiveness

Another barrier to the diffusion of a technology is the total cost of ownership, especially when it comes to reaching the general public and not just the early adopters (Rogers, 1995).

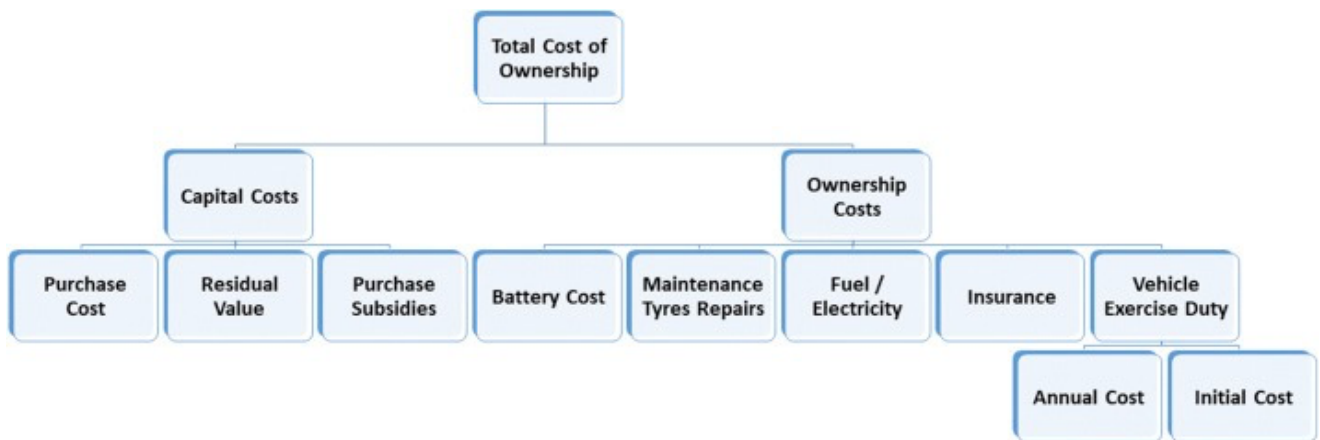


Figure 7: TCO Approach (Jones, Genovese, & Tob-Ogu, 2020, p. 4)

This barrier is linked to the concept of Relative Advantage developed by Rogers. The fact that hydrogen vehicles are more expensive than ICEVs reduces this relative advantage. There is however a nuance to be developed which is the fact that in his theory Rogers speaks of the perception of a Relative Advantage. In this case, it is necessary to be aware of two things: an individual and a company will have a different perception of the cost. While companies (e.g. leasing companies) will analyze a complex TCO when investing in vehicles, the average End User will have a more distorted perception of cost. Indeed, in our opinion, it is easy to imagine that the latter will mainly base themselves on the purchase price as well as the price of fuel, which is only a part of the CTO. Moreover, as we have seen, the measurements of the quantities of energy needed to drive are different and the consumer may not perceive the real cost.

It is important to understand what is included in the total cost of ownership for the final consumer and to compare this with the different substitutes for the hydrogen car. Several aspects are important to consider, and the total cost of ownership is divided into two main parts, namely the cost of ownership (or cost of use) and the capital cost. (Becker, 2014). This price depends today mainly on the cost of the car, which remains very high because the technology is still immature and there are no economies of scale yet. (Jones, Genovese, & Tob-Ogu, 2020) (Contestabile, Offer, Slade, & Jaegar, 2011). Compared to the electric car, this price is much higher. For example, a Toyota Mirai powered by a fuel cell costs €67,000 (Automobile Propre), while a Volkswagen ID 4 is priced at €45,000 (Volkswagen Belgium). Another cost that remains higher for the hydrogen car than the electric car is the cost of fuel. Indeed, today filling

a hydrogen car tank (approximately 5kg) costs 68\$ at the price of 13,60\$/kg of hydrogen, while recharging an electric car at home costs 8,18\$ for a comparable range. The price of a full tank of hydrogen is relatively comparable today to the price of gasoline, while electricity is extremely cheap. (Shiu, Steinberger-Wilckens, Turrentine, & Hardman, 2017). It is important to note, however, that in one of its reports, Deloitte (2020) predicts a sharp decline in the price of hydrogen. By 2030, it estimates that the average price will be less than \$3 (USD).



Figure 8: US hydrogen price (Unit: USD/kg) (Deloitte; Ballard, 2020)

In their study, Michael M. Whiston et al. (2021) estimated the average price per kilometer of a hydrogen car, despite considerable uncertainty. They estimate that in 2020 the price per kilometer of a hydrogen car would be between \$0.24 and \$0.28, between \$0.19 and \$0.21 between 2035 and 2050 and between \$0.17 and \$0.19 from 2050 onwards. In Figure 11 page 47, it can be seen that today fuel cell (hydrogen) vehicles are significantly more expensive than other types of vehicles. However, according to their estimates, this cost per kilometer appears to be decreasing much faster than its competitors and will reach a relatively similar price from 2050. A study by ADEME (2019) analyzing the industrial potential of hydrogen in France, estimates that the total cost of ownership is currently 80 to 100% higher than for combustion engines. At its commercial maturity, estimated between 2020 and 2025, ADEME estimates that the TCO will be 20 to 40% higher than thermal engines today. However, it is much more optimistic about commercial vehicles, buses and heavy goods vehicles, but these will be dealt with in a separate section. (République Française, ADEME, EY, 2019).

As we have just seen, even if we manage to increase the production of green hydrogen significantly, it must be competitive in the automotive sector. In the long term, hydrogen's main competitor in mobility and transport is electricity. Indeed, in the very long term, Europe wants

to completely decarbonate the mobility sector. However, CNG, hybrid and BioFuel systems, although more environmentally friendly than diesel and petrol, also emit greenhouse gases. It therefore appears that, even if they play a very important role in the ecological transition, these fuels will also disappear (Contestabile, Offer, Slade, & Jaegar, 2011). A comparative competitiveness study by Geoff Morrison et al (2018) shows that currently there is no doubt that battery-electric vehicles retain a clear competitive advantage over fuel cell vehicles. However, according to him this advantage could rapidly diminish from 2030 onwards. Moreover, the hydrogen advantage becomes more important the larger the size of the vehicle and the greater the daily distances covered. On the other hand, electric vehicles seem to remain more advantageous when the size and distances travelled decrease. This notion is widely shared in different studies (Morrison, Stevens, & Joseck, 2018; Eberle & Von Helmolt, 2010; Williams, et al., 2015). This idea is confirmed in a report by some twenty hydrogen players with the help of McKinsey (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Mckinsey). As can be seen in their table, it is easy to see that according to them only J-segment vehicles (SUVs) will be less expensive than all other motorizations by 2050 (Table and Annexes 5/6). Furthermore, it can be seen that by that time FCEVs will be almost as competitive as their competitors.

Table 1: TCO of the different type of Vehicle by size segment (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Mckinsey)

EUR thousands						EXCLUDING ALL TAXES	2050
A/B Segment	Vehicle	Purchase price +	Maintenance +	Fuel cost ¹ +	Infrastructure ² =	TCO	
	FCEV	14.3	2.3	3.7	1.0	21.4	
	BEV	13.4	2.2	2.4	2.5	20.5	
	PHEV	12.8	2.8	3.5	1.4	20.5	
	ICE - gasoline	10.8	2.9	4.6	0.5	18.8	
	ICE - diesel	11.0	2.9	4.6	0.4	18.9	
C/D Segment	Vehicle	Purchase price +	Maintenance +	Fuel cost +	Infrastructure =	TCO	
	FCEV	23.7	4.0	4.0	1.1	32.8	
	BEV	23.5	3.5	2.8	2.5	32.3	
	PHEV	23.5	4.8	3.6	1.4	33.3	
	ICE - gasoline	20.5	5.1	5.8	0.6	32.0	
	ICE - diesel	21.2	5.4	5.8	0.5	32.9	
J Segment	Vehicle	Purchase price +	Maintenance +	Fuel cost +	Infrastructure =	TCO	
	FCEV	30.4	5.0	4.6	1.3	41.4	
	BEV	33.3	5.1	3.4	2.5	44.3	
	PHEV	32.6	6.6	5.1	1.4	45.7	
	ICE - gasoline	27.9	6.9	7.7	0.8	43.2	
	ICE - diesel	28.7	7.2	8.0	0.7	44.6	

1 Includes production and distribution cost
2 Includes retail cost
NOTE: Assuming 15 year lifetime, annual driving distance of 12,000 km, no tax (e.g., fuel excise, VAT)

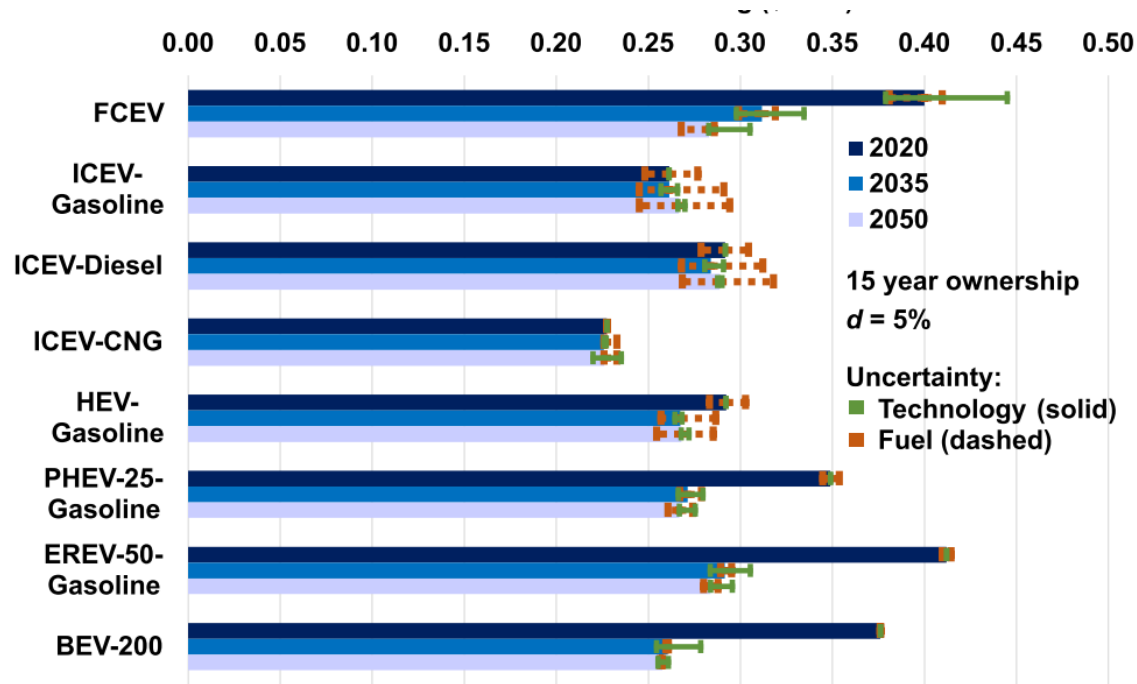


Figure 9: Evolution of the cost (\$/USD) per kilometer of the different types of vehicles on the horizon 20250 (Whiston, et al., 2021)⁴

The acquisition cost of the vehicle remains the most important deterrent in terms of cost, the other costs being quite comparable to the prices of an internal combustion car. Even if, according to the studies analyzed, this acquisition price and the TCO tend to decrease drastically, these studies still warn that the exercise of analyzing a TCO over the long term is purely informative in view of the large number of uncertainties.

2.3.5 Hydrogen Fear and Safety

Many people are still traumatized by the crash of the Hindenburg in 1937. As a reminder, the airship burst into flames during its landing and caused the death of 36 people. At the time, hydrogen, a highly flammable element, was blamed for the fire. Today, this theory is increasingly questioned by the aeronautical engineer Jem Stansfield. It would rather be static electricity that caused the back of the zeppelin to ignite, setting fire to the highly infallible structure of the balloon, which in turn ignited the hydrogen (Fleurot , 2013). However, even

⁴ FCEV LCDs (top cluster) compared with those of other vehicles. The ownership period is 15 years and the discount rate is 5%. Large bars represent the reference case (medium technical progress and medium fuel prices), solid error bars represent technical uncertainty while keeping fuel prices at their medium values, and dashed error bars represent fuel price uncertainty while keeping vehicle prices at their medium values. All costs are expressed in 2017 USD/mile.

though this event happened a long time ago, and even though the responsibility of hydrogen has been questioned, many people still see hydrogen as dangerous and unsafe, which goes against the current vision of the automobile as being increasingly safe. (Vilars, 2017) (Air Procuets).

In addition to this poorly-informed assessment of hydrogen, some potential adopters of the technology are uncomfortable with the idea of carrying a high-pressure tank. In addition, some people fear storing their cars in a confined area such as a garage because the highly flammable hydrogen would not easily escape in case of a leak. (Shiu, Steinberger-Wilckens, Turrentine, & Hardman, 2017) (O'Garra, Mourato, & Pearson, 2005)

In 2008, INERIS (2008) listed the dangers of using hydrogen. They point out that hydrogen is an extremely flammable element and can explode in contact with air. Hydrogen also has the particularity of leaking at the slightest crack. Today, hydrogen is mainly used in industry and refining and is handled by trained personnel under strict safety measures. The problem is that if hydrogen is released into the automotive industry, it will be handled by unqualified people. In addition, care must be taken to ensure that there are no cracks that could lead to hydrogen leakage. (Malbrunot & AFHYPAC, 2019) (Beeker, 2014; Tigreat & INERIS, 2008). In addition, it should be considered that even if hydrogen is eventually released to the general public, certain accidents could eventually slow down its release.

Even if this fear of hydrogen is diminishing, it is still a barrier to adoption for some people.

2.3.6 Other barriers

First of all, it is important to understand that mobility will quickly be revolutionized and will undergo major changes (Deloitte, 2019; Shiu, Steinberger-Wilckens, Turrentine, & Hardman, 2017). The mobility we know today is about to change. First of all, we are seeing a reorganization of the road network in European cities in order to have a public space better shared between soft mobility, shared transport and cars (Comité européen des régions, 2021; Mulley, Nelson, & Wright, 2018). For example, in Brussels, of the 40km of new cycle paths announced, more than 25km have already been built (RTBF, 2020). We can also see the emergence of shared cars such as Poppy and Cambio (Poppy, s.d.). We can therefore expect to see a decrease in Europe in the number of cars in circulation over the next few years, even if PWC only announces a slight decrease of 0.5% in the number of cars on the road (De Paepe, 2020).

Some point out that the performance of the car could play a role. Currently there is no doubt that a Tesla has better acceleration and top speed performance. Other vehicles, such as the Nissan Leaf, offer comparable performance to today's hydrogen cars. (Hidrué, Parsons, Kempton, & Gardner M, 2011) (Morrison, Stevens, & Joseck, 2018)

As we have seen in Rogers' theories, communication channels are crucial to the diffusion of an innovation (Rogers, 1995). It is relatively easy to see that electric vehicles have a strong presence in the media, whereas hydrogen does not have this notoriety (Delaforge & Moinet). A study analyzing the awareness and acceptability of hydrogen vehicles in London shows that less than 50% of respondents had heard of hydrogen cars and less than 30% had heard of fuel cells (O'Garra, Mourato, & Pearson, 2005). In Rogers' theory, we are therefore at the first stage of the innovation decision process for most of the population (Rogers, 1995). Moreover, peers play a very important role in diffusion. However, early adopters who have bought an electric car can convince their peers of the efficiency of these vehicles. Hydrogen-powered cars, on the other hand, do not even have 50 registrations (in Belgium) (Van Aperlidoorn, 2021). Finally, it can be noted that some opinion leaders, such as Elon Musk, promote the electric car and do not believe in the future of hydrogen vehicles. (Chevalier & Maroselli, 2015)

Another problem with hydrogen is that the efficiency of the overall chain is much lower than that of the battery. Indeed, ADEME estimates that the loss of energy during the whole hydrogen chain, from the production by electrolyser to the energy available at the wheel, is 70%. Depending on the data, this figure varies between 25 and 35%. Battery powered vehicles are much more efficient. In fact, it is estimated that there is only a 30% loss for a wheel efficiency of 70%. (Bodineau & Sacher, Rendement de la chaîne d'hydrogène: Cas du "Power-to-H₂-to-Power", 2020) (Trends Tendances, 2021).

2.4 Drivers in the diffusion process

Now that we have identified the different barriers to the adoption and diffusion of hydrogen drivers, we now need to analyze the different drivers that can accelerate diffusion.

2.4.1 Vector for low-carbon mobility

The desire to spread hydrogen in mobility is directly linked, as with electric cars, to the fact that hydrogen used as a fuel does not emit greenhouse gases. Indeed, as we saw at the beginning of this work, the engine using hydrogen, whether⁵ it is burnt in an internal combustion engine or used in a fuel cell, does not emit any CO₂. Of course, the whole chain produces greenhouse gases, but the use of hydrogen and electricity in a car does not emit CO₂, unlike a conventional internal combustion car and hybrid cars (Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020).

The fact that adopting a technology that is more environmentally friendly is directly related to social influence. The fact that more and more people, and therefore peers and influencers, are driving low or even zero emission cars has a positive influence on the diffusion of hydrogen.

In order to certify that the hydrogen car is more sustainable than internal combustion cars, it is necessary to analyse the life cycle of these cars. In this life cycle analysis several elements are considered (Bodineau, 2020).

First of all, there is the manufacturing of the vehicle. Today, whether it is an electric or fuel cell vehicle, its manufacture will have a greater environmental impact (10.3 tonnes of CO₂ for a commercial vehicle) than an internal combustion car. This can easily be explained by the fact that internal combustion technology is a mature and mastered technology. If good management is put in place, ADEME predicts a reduction in this CO₂ cost of 40% (Bodineau, 2020).

Then there are the greenhouse gas emissions of the whole energy supply and production chain used to run the vehicle (petrol and diesel for ICEs, hydrogen for FCEVs, and electricity for BEVs). This stage is very special because you have to make assumptions. Indeed, it is necessary to know how the hydrogen on board of the car was created and if it was transported to the filling station or if it was created directly on site by means of a small electrolyser. This

⁵ The hydrogen combustion engine does not emit any CO₂. However, even if it is in very small quantities, it does emit NOX and hydrocarbons (due to the oil used to lubricate the engine) (AFHYPAC, 2014)

stage is the one that most influences whether the fuel cell is sustainable or not (Bodineau, 2020). The most favourable scenario (production by on-site electrolyser powered by renewable energy) would emit less than 3kg of CO₂ per kilo of hydrogen, whereas in the worst-case scenario, the production of one kilo of hydrogen would emit 17kg of CO₂ (CEA; DGEC, 2017).

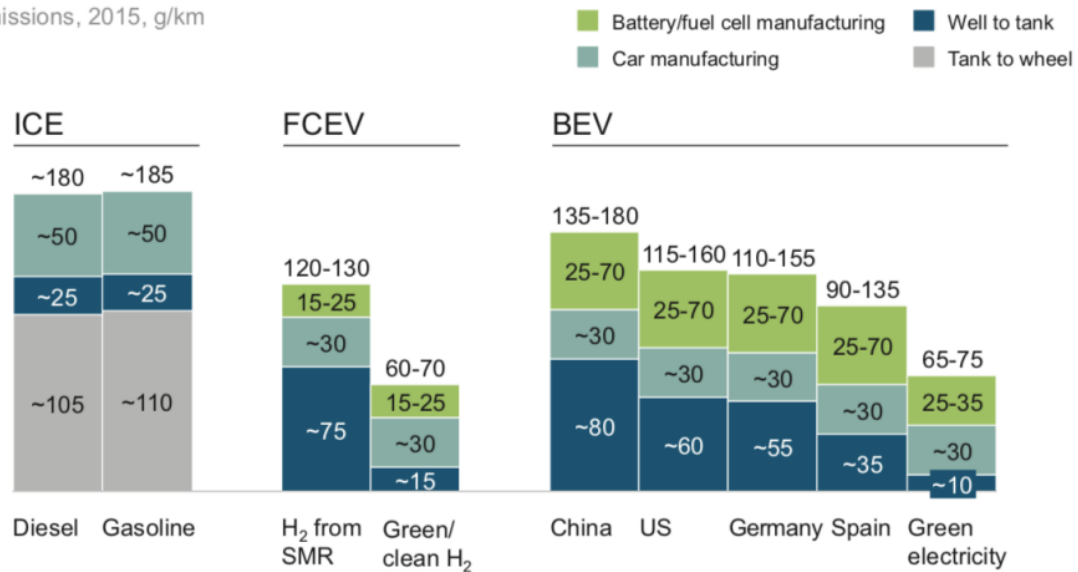
Thirdly, the emissions directly emitted during the use of the vehicle must also be considered. Here the calculation is quite simple. As we have explained throughout this work, an FCEV does not produce greenhouse gases directly. A fuel cell, when activated, only emits water.

Finally, it should also be considered that at the end of its life, the vehicle is recycled and therefore contributes to reducing the total impact of the whole life cycle of the vehicle (Choi, Yoo, Seol, Myoungsoo, & Song, 2020).

The Hydrogen Council has also focused on this study by incorporating the end of life of the vehicle into the manufacturing process. They arrived at similar figures as the ADEME study. They estimate that, on the basis of a segment C vehicle, and a total mileage of 120,000 km, if the hydrogen is produced by steam reforming, the vehicle would emit 125 to 130 grams of CO₂ per kilometre and that if it were produced by electrolysis powered by electricity produced by renewable energy the vehicle would emit 60 to 70 grams of CO₂ per kilometre (CEA; DGEC, 2017) (Hydrogen Council; McKinsey, 2017).

In Figure 12, it is easy to see that FCEVs and BEVs have great potential in decarbonising the automotive industry. Furthermore, in the best-case scenario for both BEVs and FCEVs, FCEVs have a small advantage over BEVs.

CO₂ emissions, 2015, g/km



Assumption: compact car (C-segment) as reference vehicle (4.1 l/100 km diesel; 4.8 l/100 km gasoline; 35.6 kWh battery), 120,000 km lifetime average grid emissions in China, Germany, Spain in 2015; EV manufacturing (excl. fuel cell and battery) 40% less energy-intensive than ICE manufacturing; 10 kg CO₂/kg H₂ from SMR; 0.76 kg H₂/100 km; 13 kWh/100 km
 SOURCE: EPA; A Portfolio of Powertrains for Europe (2010); Toyota Mirai LCA; IVL; Enerdata; expert interviews

Figure 10: Life cycle CO₂ emissions by fuel type (Hydrogen Council; McKinsey, 2017)

2.4.2 Governments' infatuation with hydrogen

A key driver for hydrogen can also be found in the current regulatory and government inclination to promote its development. Hydrogen indeed seems to be fitting within agendas of decarbonization, Green Deals and general energy transitions. This section aims at introducing the motives behind government's choice to promote hydrogen in a first instance and uncover application of such initiatives in three regions of choice; the EU, France, and Germany in a second instance – from which conclusions for Belgium can also be derived.

Governments and public entities in general face two different sets of motives to promote hydrogen under their legislation: the decrease of CO₂ emissions generally speaking and the promotion of hydrogen as a solution of choice for environmental issues. While the former can be regarded as a the “stick” limiting vehicle emissions or imposing quotas for the production of ZEV⁶ (Trencher & Edianto, Drivers And Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany, 2021), the former can be regarded as the “carrot” which proposes direct incentives for the development of the hydrogen vehicles market on both ends of the value chain, such as funding for R&D, information sharing networks, subsidies for the

⁶ Zero Emission Vehicles

set-up of refueling stations, or consumer purchase initiatives (monetary and non-monetary alike) (Trencher & Edianto, Drivers And Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany, 2021).

These initiatives evidently largely depend on the degree to which governments are adopting measures. Different angles taken are uncovered in the EU, France and Germany, which this section aims at introducing. Despite differing in application, it is clear that the three governments show a clear tendency towards the promotion of hydrogen, with the EU leading the way with an ambitious roadmap towards 2050.

This ambitious roadmap for hydrogen is prioritizing the development of renewable hydrogen in the long term, while promoting other forms of low carbon hydrogen in the short and medium term (European Commission, 2020). In its official communication on the topic, which was published in 2020, the European Commission lays out the context, ambition and roadmap for hydrogen in the Union. The different levers proposed include investments, initiatives to boost production and demand, the development of the required infrastructure as well as the promotion of research and innovation on the topic. The publication also explores the possibility of - and incentives for - international energy partnerships with neighboring countries and regions to help meet goals set in the publication. By developing this plan and listing a collection of 20 key actions for Europe, the Commission sees hydrogen as a key building block in Europe's broader clean energy transition and Green Deal and outlines the urgency of investing now.

In France, hydrogen is also considered a key priority to meet environmental goals, as presented in a study by the ADEME, the French Ecological Transition Agency in collaboration with EY in 2019. Moreover, the study outlines the growth in fierce international competition despite hydrogen being at the emergence of its development and deployment. This in turns calls the legislators to swiftly promote hydrogen in France through a list of initiatives in different sectors, including (and prioritizing) automobile and transport in order to secure a leadership position in what promises to be a clearly lucrative market (ADEME; EY, 2019).

The German context faces limitations of FCEVs due to the high cost of production, lack of German automakers producing FCEVs, the availability of refueling stations or the generally low demand ((Trencher & Edianto, Drivers And Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany, 2021). In light of this, policies and general governments inclination towards hydrogen are a priority to boost its development. In particular,

the German government placed high importance on schemes fostering innovation and production capabilities of hydrogen, notably by setting up a National Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technologies, which administered close to 1.5 billion Euros over the course of ten years (Trencher & Edianto, Drivers And Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany, 2021).

Arguably, the three states mentioned above represent key influencers for Belgium's initiatives (European Union, 2021). One could therefore expect from the Belgian government a similar set of actions to promote Hydrogen fuelled vehicles and ZEV altogether.

This shows that hydrogen is high on nations' current agendas, as exposed in the couple of case studies laid out in this section. A key driver for hydrogen can therefore be found in the regulations in place and promotion policies by public entities.

2.4.3 Performance similar to ICEs

First, we know that consumers don't like change, especially when it affects their habits. When a new product enters the market, the consumers are initially reluctant and suspicious. In order to get to know the product better, they will have to reduce their uncertainty by seeking information. (Munashighe, Mcmeekin, & Southerton, 2009) (Rolland & Serville, 1976) (Rogers, 1995).

In terms of pure use, hydrogen seems to have an advantage here. Indeed, with regard to the characteristics of use such as filling time and range, hydrogen combustion cars and FCEVs offer performances strongly comparable to conventional combustion vehicles (petrol and diesel).

Indeed, a full tank of petrol/diesel takes on average between 3 and 5 minutes, which is also the case for a hydrogen car. Filling up is carried out at a suitable filling station in both cases by means of a pistol that is inserted into the car. In the case of the hydrogen car, a gas rather than a liquid is filled, so the nozzle is different from the nozzle for petrol or diesel (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, McKinsey; République Française, ADEME, EY, 2019; Community Environmental Council, s.d.).

Then, in terms of autonomy, it is considered that an ICE can run on a full tank of fuel between 500 and 650 km. Hydrogen cars, and more particularly FCEVs, come very close to these figures and even tend to be able to exceed them. In fact, it is estimated that an FCEV can travel an

average of 500 km on a full tank of fuel, while the new Toyota Mirai of 2020 is expected to be able to travel more than 800 km on a single tank of fuel, although these figures may need to be revised downwards (between 650 km and 750 km) (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, McKinsey; République Française, ADEME, EY, 2019; Community Environmental Council, s.d.; Möller, s.d.).

It can be seen that in this respect the FCEV has a big advantage over electricity. Indeed, the most efficient electric cars have a range of 650 km (even if this figure is to be revised downwards as for hydrogen cars). The truth is that an electric car has a range of 200 to 250 km for small vehicles, 400 km for larger vehicles such as the Audi e-Tron (De Brauwer & Babot, s.d.) and more for premium models such as Tesla (Tesla, s.d.) (République Française, ADEME, EY, 2019) (Community Environmental Council, s.d.) (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, McKinsey)..

As far as recharging time is concerned, this depends on the type of charger available and the battery. However, it is safe to say that the refueling time for an electric vehicle is much longer than the refueling time for a hydrogen vehicle. On average it will take 20 to 30 minutes (or more) to fully recharge a car on a fast-charging station and between 3.5 to 12 hours on other types of stations (République Française, ADEME, EY, 2019) (Community Environmental Council, s.d.) (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, McKinsey).

The fact that using a hydrogen car is relatively equivalent to using an ICE can be related to Cognitive Instrumental Processes. Indeed here we can see that hydrogen vehicles will have a Job Relevance for example for Taxi's who cannot afford to lose time on their working day to recharge their vehicles. This driver can also be compared to the relative advantage. Hydrogen cars have the advantage that they can be filled with fuel in 5 minutes and have a longer range.

Table 2: Summary table of charging time and range of ICEs, FCEVs and BEVs

	<i>Internal Combustion Engine (ICE)</i>	<i>Battery Electric Vehicle (BEV)</i>	<i>Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)</i>
<i>Average Driving Range</i>	500 - 650 km	200 – 600 km	500 – 750 km
<i>Fueling time</i>	3 – 5 min	20 – 30 min (Fast Charging) 3,5 – 12h (Other Chargers)	3 – 5 min

2.4.4 Good prospects in the application of heavy goods vehicles

Again, we think that this driver is relatively similar to the cognitive instrumental process of the TAM 2. It is therefore also linked to job relevance, the relative advantage.

As we saw earlier, it seems quite clear that as distances and vehicle size increase, BEVs become less efficient than FCEVs (Trencher & Edianto, Drivers and Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany, 2021). It is therefore appropriate to focus on a segment with extremely high distances and weight, namely heavy goods vehicles. On average, a bus and a truck travel between 30,000 and 40,000 km per year (Statista, s.d.). Obviously, the greater their size and weight, the greater the distance they cover in a lifetime. For example, a truck weighing more than 10 tonnes will travel an average of 500,000 km over its lifetime (ADEME, RDC ENVIRONMENT, 2019).

First of all, hydrogen makes it possible to travel longer distances without having to stop to refuel. Secondly, the recharging time is considerably reduced, which optimizes journey times. Finally, in terms of space and weight, the fuel cell has a considerable advantage over the battery. There are many expectations regarding the use of hydrogen in road transport, but this technology has already been used extensively in bus fleets (Cano, et al., 2018; Ajanovic & Haas, 2020; International Energy Agency, 2020). These aspects show that fuel cells should be more suitable than batteries.

Today the Total Ownership Cost of a hydrogen truck is more or less twice as high as the TCO of a traditional internal combustion truck and is also 1.5 times higher than a battery electric

truck. However, it would appear that by 2030 the total cost of ownership of a FCEB (Fuel Cell Electric Bus) would be equivalent to an ICE (Internal Combustion) bus and a BEB (Battery Electric Bus). Deloitte (2020) predicts that by 2023 FCEBs will be breakeven with BEBs and 2024 for ICEs (Deloitte; Ballard, 2020; Monitor Deloitte, 2020). A report from the Hydrogen Council seems to support this projection (Hydrogen Council, 2020). Moreover, if we take into account the abatement cost, which "allows us to prioritize decarbonization actions" (Criqui, 2021), we realize that zero emission vehicles such as BEVs and FCEVs are all the more competitive. (Meunier & Ponssard, 2020).

Ballard also proposed an analysis of the different advantages and complementarities of battery-electric and fuel cell buses. According to him, when a small fleet of buses is needed it is more advantageous to opt for battery buses, whereas when the fleet is larger it is better to opt for fuel cell buses. Furthermore, he also observes that terrain and climate play a role. Indeed, a temperate climate and flat terrain will be perfect for a battery bus, whereas when the terrain is rough and the temperatures are more extreme (very hot or very cold) the fuel cell seems to have the advantage (Ballard, 2019).

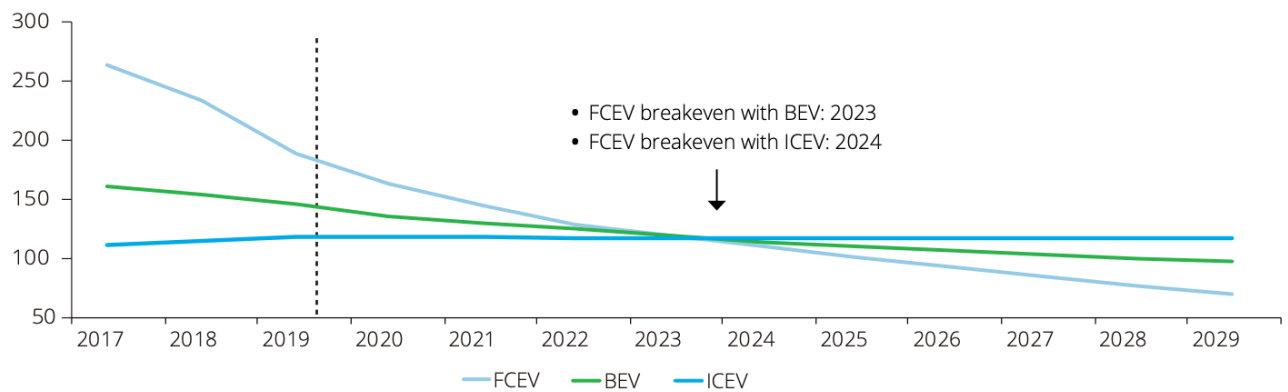


Figure 11: Bus TCO outlook in Europe (unit: USD/per 100 km) (Deloitte; Ballard, 2020)

Some of the barriers to the diffusion and adoption of hydrogen passenger vehicles appear to be less significant for heavy duty vehicles. Indeed, at the infrastructure level, as fleets tend to be centralised, it is much easier to determine strategic locations for filling stations. In addition, the other major barrier to adoption, cost, also seems to be more easily overcome for heavy duty vehicles. For example, in Germany, companies that decide to decarbonise their fleets by purchasing FCEVs receive more subsidies and also benefit from higher tax breaks. (Trencher

& Edianto, Drivers and Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany, 2021)

2.4.5 Other drivers

It is important to note that hydrogen is the most abundant element in the atmosphere, which makes it an inexhaustible energy source, just like renewable energies. This is a considerable advantage, because apart from the fact that it emits greenhouse gases, oil and its derivatives are doomed to disappear if we continue to exploit the deposits as we do now. With hydrogen this problem does not exist (IFPEN, 2021; Air Liquide, s.d.; Air Liquide, 2021).

Another advantage that we haven't mentioned is that hydrogen provides a second weapon to reduce greenhouse gases. Relying only on electricity would be a mistake because we would be too dependent on one technology (Trends Tendances, 2021) (ADEME, RDC ENVIRONNEMENT, 2019).

2.3 Syntheses

In this section we have identified several barriers and drivers related to the different concepts we have seen in the first part of this work.

Firstly, there is the aspect of relative advantage and the fact that the individual is always looking for an improvement to his or her current situation. The fact that the infrastructure (filling station, storage and transport of hydrogen) is not developed enough will reduce the relative advantage. In addition, it has been noted that today the total cost of a FCEV is more expensive than an ICEV or BEV, even though over time this TCO is tending to decrease significantly and in some cases is approaching that of BEVs and even ICEVs. Despite these two barriers, two drivers can also be identified. Firstly, the fact that the performance in terms of range and refuelling time is equivalent to that of ICEs, which gives them a big advantage over electric cars. This aspect is even more true when the concept of Job Relevance is put forward. Indeed, taxis and freight transport are subject to demands and cannot afford to recharge for long periods of time.

Secondly, we were also able to identify barriers and drivers to social influence. The fact that the hydrogen car is theoretically carbon-free is a rather positive thing and therefore a driver. However, at present, hydrogen production is still a major emitter of greenhouse gases. This will be negatively impacted by social influence, and people will prefer electric. We can also note

the fact that some opinion leaders such as the president of VW and Elon Musk are saying that only 100% electric is the future of the automobile.

Thirdly, there is compatibility. If there is no real effort by public authorities to boost hydrogen production at the same time as decarbonising this industry, there will be no compatibility. However, as we have seen authorities like France and Germany, which are the two most influential and powerful nations in the European Union, strongly believe in the future of hydrogen and offer incentives to develop the sector.

Fourthly, with regard to complexity, we realise that this aspect is neither a barrier nor a driver for individuals. We believe, through the different readings, that this aspect will be a challenge for the companies that will have to develop and improve the infrastructures as well as the vehicles (Air Liquide, Toyota, Fluxys ...). However, this work and the theories we have analysed do not really deal with this aspect.

Fourthly, with regard to complexity, we realise that this aspect is neither a barrier nor a driver for individuals. We believe, through the different readings, that this aspect will be a challenge for companies that will have to develop and improve infrastructures as well as vehicles (Air Liquide, Toyota, Fluxys ...). However, this work and the theories we have analysed do not really deal with this aspect.

Part 3: Position of different players in the automotive sector

1. Methodology

The purpose of the interviews is to confirm or discuss the barriers and drivers for the diffusion of hydrogen engines in the automotive sector.

In this sense, five stakeholders have been chosen, and we have tried to ensure that these stakeholders have different profiles. Two of them are professors, two others work directly in the automotive sector and the last one works at Air Liquide, one of the leaders in the production and distribution of hydrogen.

The interviews were conducted in a semi-structured manner. We first asked a general question, asking them all what they thought about the diffusion of hydrogen in the automotive sector in general. Then we went through the different barriers and drivers that we had identified one by one and asked them for their opinions. Some of them also brought in new elements that we were able to add later.⁷

2. Interviews

1.1 Interview 1: Prof. Bart Jourquin

Professor B. Jourquin is a management engineer by training. He is currently a full professor at the Louvain School of Management and is specialised in mobility and mainly in freight transport.

According to Prof. Jourquin, a hydrogen car is still an electric car. The main reason why manufacturers first proposed the battery-electric car is that the engine technology is essentially the same. According to him, this is the reason why BEVs are 10 years ahead of FCEVs.

Furthermore, as we have seen in the literature, he confirms that the road transport industry (and thus the truck industry) is beginning to show a strong interest in fuel cells and FCEVs as a replacement for diesel trucks (European manufacturers CNH, Daimler, Daf, Ford, Man, Scania and Volvo have announced that they have committed to no longer producing trucks that run on

⁷ You will find in the annexes the transcripts of the interviews

fossil fuels by 2040). The main reason for this interest in hydrogen and fuel cells is the fact that at present it is not possible to use batteries to power an electric motor in a truck. Indeed, the weight of the batteries needed to power a 40-ton truck is too important to think about this use. Moreover, the filling time is much more advantageous than the time needed to recharge a battery, just as the range is much greater thanks to the fuel cell (Dath-Delcambe, 2021).

According to him, FCEVs will first make inroads in heavy trucks. He also explains that fuel cell technology is more complex and expensive than electric cars.

Pr. Jourquin also explains that in the automotive industry there are cycles that appear. In the 80s and 90s, many people drove natural gas cars. It is therefore necessary to see if such a cycle can appear for hydrogen.

He also said that when we analyse the life cycle of a car, we notice that recycling FCEVs and BEVs is currently a complicated and dangerous stage, and that in some cases, even if they have a slightly better CO₂ emission record than ICEs, this is still very low. He explains that this CO₂ impact also depends on how the electricity is produced. In France and Belgium this is more nuanced because the electricity is mainly produced by nuclear power, but in Germany and Poland this is more of a problem because the electricity is produced by coal-fired power stations.

Moreover, if we analyse the environmental impact of a car only when it is on the road, we notice that 50% of the CO₂ emissions and pollutants come from components that are also found in so-called zero-emission cars, such as tyre wear but also brake pads, which are all the more affected as these types of vehicles have a higher weight.

1.2 Interview 2: Pr. Hervé Jeanmart

Professor H. Jeanmart is a civil engineer. He is currently a full professor at the Polytechnic of Leuven and is specialised in thermodynamics and fluid mechanics.

According to Prof. H. Jeanmart, the first mistake we make is to oppose hydrogen engines and electric engines. He makes the analogy with home heating. He explains that it would have been foolish to use only fuel oil and not natural gas. For him the two will coexist, but the question will be "for whom" and "for what". This is very difficult to imagine because it will depend on political decisions. In Belgium, the choice was made for 100% electric, but according to him, it is a mistake to deprive oneself of an avenue that could alleviate the problem of mobility.

When the discussion about the creation of hydrogen was brought up, he explained that if we want to produce hydrogen in sufficient quantities, we must necessarily anticipate it and that by 2030-2035, the hydrogen industry will be highly carbonised. We will first have to determine the quantity of hydrogen we will need, then develop the fossil hydrogen sector, and then replace it with electrolyzers little by little. The question will therefore also be whether hydrogen mobility will be a niche market or a global market. For him, answering this question is very complicated because today the markets are not clear and do not know how to answer this question.

For Professor Jeanmart, the hydrogen sector will develop for another reason. We could ask ourselves the question: why not do everything with electricity?. The problem that arises is how to store this electrical energy. In the future, certain territories will produce electricity in enormous quantities, well beyond their needs. This electricity will therefore need to be stored in some form, and it is specially de case if there is no solidarity in terms of electricity production and use. The problem is that batteries, which are extremely efficient for storing small amounts of energy, are not suitable for storing industrial quantities. The idea is therefore to store this electricity in the form of hydrogen molecules. The other problem is the transport of this electricity. To transport this electricity, a network of power lines would have to be established, which would be extremely expensive over thousands of kilometres. At this point, the transport of this electricity in the form of hydrogen also makes sense. The question after that is: what are we going to do with this energy once we arrive at our destination? We could convert it back into electricity or we could use it directly in its hydrogen form, which would be more efficient and therefore use the hydrogen directly in vehicles. According to Professor Jeanmart, it is impossible to dissociate the mobility and automobile industry from the energy system we will be in by 2050.

According to him, Belgium is a rather special market. Indeed, according to him, countries like France or Germany, which have the necessary resources to produce energy, can make the decision to bet everything on one energy and only develop this sector (even if we do not observe this behaviour at all). Belgium, on the other hand, will not be able to generate energy to meet the demand for electricity. It will therefore be completely dependent on the choices made by other nations and the European Union. The problem is that for the moment there is no clear vision and that these different organisations are investing in both sectors. If Belgium chooses the wrong sector and/or misses a sector, we are heading for disaster.

However, he is a little reluctant to see the spread of fuel cells in freight transport. Indeed, according to him, ICEs are extremely efficient when they run at constant speed over long distances, and it would be foolish to do without them. However, if politicians decide to remove this option, he sees no other alternative than the spread of hydrogen and fuel cells in this industry.

As far as the safety of hydrogen is concerned, according to him, the problem must be separated into two aspects, namely the vehicle and the network. For the first, he believes that hydrogen is no more dangerous than petrol and would even be less dangerous given its physical properties. Moreover, even if compressed gas can be frightening, the materials used are adapted to compression and protocols are put in place to avoid problems as much as possible. As for the hydrogen grid, he explains that it is perhaps more dangerous than electricity but that there are safety protocols and that it is therefore still safe.

Secondly, we raised the problem of the supply of vehicles which limits the diffusion of FCEVs. According to him, the various manufacturers all have access to the technology. However, in the current context it is much easier to sell electric cars, due to the current political decisions. If tomorrow the tide were to turn and political actors were to push the market to adopt FCEVs, manufacturers, who are very reactive, would be ready to change part of their production lines to meet this need.

As far as costs are concerned, Professor Jeanmart remains rather vague on this point, even if he is convinced that the price will decrease but that electricity will have the advantage in this respect. For the moment it is clear that the fuel cell involves materials that have no substitutes for the moment, which are very expensive, which makes the vehicle itself rather expensive. This price is however a smaller brake for professional use. For example, taxi and bus companies will be less reluctant to pay the price for the benefits of this technology.

Professor Jeanmart also mentions the fact that it is possible that in the future Belgium will not be able to provide electricity to everyone at all times, and that grid saturations may, in rare cases, occur. In this sense, the choice to adopt hydrogen could be an additional security.

At the end of the discussion, Professor Jeanmart insisted that the problem of choosing BEV or FCEV technology is a rich country problem. In developing countries, this question is not even relevant, because there only combustion engines will be possible because of the costs.

1.3 Interview 3: M. Jean-Marc Ponteville (D'Ieteren)

Mr. Jean-Marc Ponteville is responsible for public and press communication in the D'Ieteren group, which is the sole dealer of the Volkswagen group in Belgium.

Mr Ponteville began our discussion by explaining the revolution that is taking place in mobility. According to him, this sector will change completely, and we will no longer move around as we do today. According to him, on the one hand, private cars will be more expensive than they are today, whether they are powered by hydrogen, petrol or electricity. So, we're going to think differently when we have to move around. He explains that in 2020, car sales figures have dropped by 20%. This is a consequence of the health situation. However, while one might think that vehicle sales would slowly return to their "pre-Covid-19" level, the forecasts drawn up by D'Ieteren and Volkswagen Belgium show that the market will not return to its previous level. However, he remains cautious about these figures, which in his opinion remain very theoretical. In addition, there will be a reorganisation of the road network. On the other hand, according to him, there will be relocation trends. In other words, people are starting to consume locally again, and travel will become more and more expensive, so we will travel less. Business travel will be reduced, because during this health crisis we have noticed that technology allows us to work from many different places.

He then explained that he does not see a future for hydrogen in the automotive sector or in niche markets or in certain places where it is difficult to develop sufficient power lines. According to him, in Europe, electric vehicles will certainly not compete with hydrogen for several reasons.

Firstly, in terms of cost, hydrogen vehicles will always have a higher TCO than BEVs.

On the one hand, because fuel cell technology is relatively expensive (and in any case more expensive than battery technology) and this cost is not going to decrease as much as people would believe, and in any case will not be able to compete in terms of cost with batteries. On the other hand because the fuel will also have a much higher cost. Indeed, as we have seen, electricity is needed to produce hydrogen in a sustainable way. This means that the cost of hydrogen production will be directly linked to the price of electricity. In other words, if the cost of electricity increases, the cost of hydrogen will also increase, making it no more attractive than electricity. The other problem is that today this hydrogen is used almost exclusively for industrial purposes. It is therefore necessary, on the one hand, to decarbonise this hydrogen, which is already a major challenge, but also to drastically increase the total production of

hydrogen in order to be able to meet the demand for hydrogen for the mobility sector. This represents a major investment in electrolyzers, which will also add a cost to the production of hydrogen.

He also added that in the price of hydrogen, it was necessary to consider that the creation of hydrogen filling stations is extremely expensive, as we have seen, whereas electric stations are still very advantageous and easy to deploy.

Mr. Ponteville also explains that in Belgium in particular, new technologies are spread mainly through the leasing fleets of companies. According to him, they are the very first, along with the few early adopters who represent a minority of the population, to adopt the new technologies in the automobile. It is easy to see today that companies are offering less and less petrol and diesel vehicles, and that they are almost all opting for hybrid or electric vehicles.

When we discussed the diffusion of hydrogen in the truck sector, it did not seem as optimistic as the literature. In his opinion, batteries are still being improved. Not only in terms of the amount of energy they can carry and therefore their size, but also in terms of the speed of charging and in terms of their components. He explains that if batteries continue to improve as they are doing now, they will soon be able to be used in heavy goods vehicles and in professions requiring a long range and the possibility of rapid recharging. According to him, the fuel cell and hydrogen tanks will certainly take up less space than the batteries, but the difference will be negligible because, in his opinion, it will be easier to optimise the batteries than the fuel cells.

According to Ponteville, for the end consumer, cost and infrastructure are the two biggest barriers to the adoption and diffusion of a new fuel type. But for him, the battery has a clear advantage over the fuel cell in this respect. Even in sectors where mobility is a profession, such as taxis, buses and trucks, the costs of a BEV will be much more attractive to users than those of an FCEV, he says. For him there is no doubt that hydrogen has little future in the automobile.

1.4 Interview 4: Nicolas Mullier (Air Liquide)

Mr Nicolas Mullier is a civil engineer by training. He works as Hydrogen Solution Developer Manager at Air Liquide.

According to him, hydrogen has a role to play in mobility. From small pallet trucks to planes and large ships. However, according to him, the two main obstacles are the high cost of the technology and the almost non-existent infrastructure. He also explains that the use of hydrogen in the market for private vehicles will be strongly challenged by electricity, which is less sensitive to the obstacle of infrastructure and whose technology is a decade ahead of its time and therefore remains more accessible for the moment. Where Air Liquide and Nicolas Mullier are convinced that hydrogen has a bright future is in heavy goods vehicles.

In terms of hydrogen production, he seems rather optimistic. Indeed, according to him, hydrogen producers know that the European Union's deadlines for CO₂ emissions are fast approaching, and that hydrogen production will have to be entirely decarbonised. At Air Liquide, projects for the creation of high-capacity electrolyzers are being developed. For example, while the largest electrolyser in the world had a capacity of 20 megawatts, in 2024 the ELYGATOR project, a 200-megawatt electrolyser (Airliquide, s.d.), will be launched. Moreover, European players are also aware that the hydrogen industry needs to be decarbonised, and that is why European subsidies are also being provided. According to him, even if all this is still theoretical, blue hydrogen, as well as yellow hydrogen, will no longer have a future by 2050, even if they will be of capital importance in the energy transition.

Regarding the infrastructure of the hydrogen filling stations, which he had raised as one of the biggest obstacles, he explained that investment in these infrastructures is to be deployed by different groups such as Total, Air Liquide and Dats24 which deploy these stations. However, these investments are currently supported by governmental actors. In the literature we have seen that the price of a hydrogen station varies between 1.5 and 2.5 million euros (Meyer & Winebrake, 2009), but he is much more pessimistic, explaining that a station for cars would cost more than 2 million euros and more than 6 million euros for trucks. He explains, as we have seen in the literature, that without incentives from governmental actors, these stations would have great difficulty in being built. He confirms the "chicken and egg" theory that we have seen in the literature (Meyer & Winebrake, 2009). In order to overcome this problem, he explains that in freight transport, consortia are being formed between the different actors to facilitate the deployment of hydrogen powered routes (Port of Antwerp, s.d.)

When we talk about mobility for private vehicles, it seems to be agreed that it will be mostly electric, because BEVs offer unbeatable performance for short journeys. However, when it

comes to mobility for public transport and freight transport, or in industries where there is a need to recharge vehicles quickly, he sees hydrogen as the reference technology. Especially since in these industries, the concern for the filling infrastructure is much less important than if hydrogen were to be used for all mobility. Indeed, when a hydrogen taxi and/or bus industry is developed in a city, it is easy to think that the location of the filling stations can be optimised and thus drastically reduce the cost of developing these stations. This would reduce the risk for the companies launching these projects. He first took the example of the city of Paris which launched its fleet of electric taxis in collaboration with Toyota and Air Liquide under the name of the "Hype" project. This project, which currently has 30 vehicles (Toyota Mirai), is about to expand to a fleet of 600 taxis. He then explained that the STIB had decided to bet on 100% electric vehicles. For him, this decision was perhaps a mistake because hydrogen could be much more efficient.

According to Mr Mullier, the electric motor is clearly more efficient than the hydrogen motor. However, the fact that the batteries must be recharged for a considerably long time and that the range of battery-electric vehicles is shorter are major drawbacks, especially in freight transport. In addition, the weight of both systems is an advantage for the fuel cell. This weight saving is very small for passenger cars but becomes considerable when it comes to trucks and buses.

We have seen that some people fear that hydrogen has highly flammable properties. Mr Mullier is much less pessimistic. He explains that all the fuels we use today, whether methane, petrol or diesel, are also highly flammable. Moreover, hydrogen is the smallest element in the universe and can disperse quickly and rise very high. It is therefore not likely, unlike gasoline, to spread out on the ground and destroy a larger radius. According to him, as long as safety protocols are put in place as is the case for other fuels, there is no problem at all.

On the second barrier we identified, which was the cost of the FCEV, Mr Mullier is more cautious than the literature. According to him, the most expensive element (compared to other cars) is the fuel cell itself. This fuel cell is composed of catalysts that are created from platinum in order to save space. An alternative technology exists but is not currently usable in cars due to the space problem. According to him, all the players are aware of this barrier and research is being carried out to reduce the costs of these fuel cells, but it is still too early to say whether it will be possible to bypass platinum. As far as the cost of hydrogen is concerned, Mr Mullier is

very optimistic about the reduction in costs, although he remains cautious as this will depend on many factors such as the price of electricity, the efficiency of electrolyzers etc.

For him, hydrogen has a future in the automotive industry, especially in certain areas where the disadvantages of electricity, such as recharging time and range, are becoming too great a cost factor. He is thinking of freight transport and buses, as he told us, but also of services such as taxis. As far as private vehicles are concerned, he explains that if we can reduce the costs of fuel cells and hydrogen, and if a real infrastructure is put in place, then even in this sector hydrogen will have a big role to play depending's on the incentives of the different governments.

1.5 Interview 5: Product Manager for BMW/Mini Group

This speaker wishes to remain anonymous. He is a Manager in the BMW Group. He has an master's degree in Advanced Automotive Management.

According to the BMW Group, the spread of hydrogen in the automotive industry makes sense. The BMW Group sees hydrogen as a solution for the future. However, it does not see this energy as the main player in mobility. For the group, hydrogen will have its place but only in markets where batteries are less suitable.

According to the speaker, Belgium is less conducive to the diffusion of hydrogen in mobility than other countries. According to him, hydrogen will be reserved mainly for people who travel a lot of kilometres, who will therefore need to have a longer range and shorter recharging times, as is the case with ICEs and FCEVs. However, as Belgium is a small country, individuals tend to travel fewer kilometres and BEVs make more sense than in other countries. He cites for example the USA, as well as Germany and France (to take European examples), where in his opinion the spread of FCEVs will make more sense due to the greater distances involved.

When asked how hydrogen could be spread, he explained that leasing companies play a big role. Indeed, apart from the early-adopters, who want to be among the first to adopt technologies, leasing companies are the first to bet on them. He took the example of BEVs, explaining that when a private individual bought an electric car 8 years ago, he had no idea of the residual value the vehicle would have. A leasing company is much better suited to take this risk and is therefore prepared to offer new engines to its customers while taking the risk of having a lower resale value than expected.

When we discussed the different price estimates we had seen in the literature, he was much more cautious than some of the reports. Indeed, for him, if the government institutions had decided to massively spread the production of hydrogen-powered passenger vehicles by 2030, and thus to reduce their costs, important measures would have had to be taken a few years ago. According to him, hydrogen-powered passenger vehicles will be available by 2030 but will not be massively used until 2050.

According to the speaker, the argument that the use of FCEVs, whose performance in terms of autonomy and filling is close to that of ICEs, would be a driving force for the diffusion of hydrogen in the automotive industry should be put into perspective. Indeed, 95% of consumers are people who make average journeys of less than 40km per day. This is in line with the argument that hydrogen vehicles are much less suitable for short distances. According to the speaker, the consumer must change his behaviour and be more conscious of his use of the car in general.

Our speaker also spoke about the link between energy policy choices and manufacturers' choices. It is clear that political decisions in terms of energy choices will directly influence manufacturers. If tomorrow it was decided to stop subsidising BEVs and to focus solely on hydrogen, manufacturers would already be ready to develop vehicles adapted to this choice.

3. Results of the interviews

In the course of these different interviews, we notice that there is a sort of consensus between what is said in the literature and what is actually happening in the market, even if there are some nuances to be added.

First of all, we notice that almost all speakers (all but one) agree that the near future of hydrogen in the automotive industry lies in its application to heavy trucks and long-distance users. Indeed, according to them, if hydrogen is to be diffused throughout the mobility market, it must first be diffused in this sector. Indeed, in this sector the costs of creating and developing infrastructures can be optimised by agreements between the various players. Europe also provides subsidies to help companies develop the filling infrastructure. These infrastructures can also be used by private vehicles and will serve as a basis for a larger scale deployment and would thus make it possible to overcome one of the most important barriers to the diffusion of hydrogen.

Secondly, it seems that the hydrogen industry is aware of the challenge that awaits it in the coming years, which is to decarbonise as well as to increase hydrogen production. This sector is strongly supported by European policies willing to create a hydrogen industry. According to the speakers, the sector will be able to meet this challenge. However, there is a real unknown in relation to the price at which a kilo of hydrogen will be sold. Although the literature was rather optimistic, the speakers were more cautious.

Thirdly, regarding the future cost of these vehicles, stakeholders were also cautious about the forecasts that are available. The TCO forecasts are, according to them, consistent with what has been observed, but they are still extremely theoretical and based mainly on hypotheses that are not fully verified, such as the price of the electricity needed to power an electrolyser. Moreover, they are also aware that the cost of fuel cells, which remains the most expensive element of the FCEV, will only be able to decrease significantly if we manage to find a substitute as efficient as platinum. However, we do not yet know whether this is possible. We can therefore see that opinions differ when we look at the opinions on the competitiveness of hydrogen in relation to its competitors. While some see hydrogen spreading massively, even in private vehicles (even if all agree that BEVs will be in the majority), others claim that hydrogen will not be spread very much, or even not at all for some, in private vehicles. However, they all remain cautious, explaining that this will also depend on political choices in terms of energy systems.

As far as the safety of FCEVs and the hydrogen industry in general is concerned, everyone is quite optimistic about this. There is therefore work to be done with consumers to make them understand that hydrogen is no more dangerous than petrol and natural gas used for heating. It would even be safer according to the two engineers interviewed.

It also seems quite clear to the different stakeholders that the diffusion of hydrogen in mobility is a different solution than the battery solution. They all agree that the development of a hydrogen sector would allow us not to be 100% dependent on the battery solution which has and will have its limits. As we have explained, there is nevertheless a nuance that is made by the various stakeholders. Indeed, two of them are convinced that the future of hydrogen is in private vehicles and in heavy goods vehicles. Two others see hydrogen spreading mainly to heavy goods vehicles and very slightly to private vehicles, and one last one sees a future for hydrogen only in boats and aviation.

Conclusion

In this work we have identified the barriers and drivers for the diffusion of innovation, applied to the case of hydrogen engines in the automotive sector. This was done with the aim of understanding how the different actors could influence or not the diffusion of hydrogen.

We have seen that despite several drivers for the diffusion of hydrogen in the automotive industry, there are still many barriers that need to be overcome in order to be able to diffuse hydrogen engines on a large scale in the automotive industry.

Today, there are three main barriers that are related to Relative Advantage, Social Influence, Compatibility and Facilitating Conditions. The first is the fact that the CTO of the car is still very high. Moreover, the part that is really perceived by individuals as the total cost remains the purchase price which is the main reason for the high TCO. Secondly, there is the problem of the infrastructure, which is almost non-existent today, whether it is the filling stations which are too limited in number or the methods of transporting hydrogen. If this infrastructure is not developed, even if individuals have an intention to adopt the innovation, they would not do so. The last main problem in this respect is that today the production of hydrogen is still highly carbon intensive. If we want to have a positive social influence on hydrogen, we will first have to decarbonise almost the entire hydrogen chain. This is all the more of a challenge as hydrogen production will have to be doubled by 2050 if it is to have any application in mobility.

We were also able to analyse some drivers mainly related to the concepts of Perceived ease of Use, Relative Advantage, Job Relevance and Social influence. First of all, if we manage to make the hydrogen sector 100% green, we would achieve a similar or even better ecological performance for FCEVs than for BEVs. Then there is the practicality of the hydrogen car. Its performance in terms of autonomy is quite comparable to that of the ICEV. This gives it a big advantage, especially when applied to services like freight transport and taxis. Taxis cannot afford to stop for long periods of time to recharge, so being able to recharge instantly gives them a strategic advantage. As far as trucks are concerned, we have noticed that electric batteries are currently not suitable for them because of their size and weight. Again, as with taxis, lorry drivers cannot afford to spend several hours working at a standstill just to recharge.

If public authorities are willing to develop hydrogen mobility, which seems to be quite complementary to electric mobility, they will have to overcome the barriers we mentioned earlier. This is why we believe that Europe and its member states should continue to promote

the development of a true carbon neutral hydrogen industry. Secondly, as we have seen, hydrogen seems to be more suitable than electric power for trucks and taxis. It would therefore be interesting to support and continue to develop infrastructures around commercial routes and in large cities adapted to these two sectors as is the case for the Hype and HyTrucks projects. Once tested, duplicated, and optimised, these infrastructures could serve as a basis for a more general development of the hydrogen car. This will also allow individuals to observe the performance of this innovation. However, public authorities will also have to subsidise the purchase of fuel cell vehicles until their prices reach the same level as BEVs.

Bibliography

- ACEA. (2016). Consolidated Registrations – By Manufacturer.
- ADEME, RDC ENVIRONNEMENT. (2019). *Modélisation et évaluation environnementale de produits de consommation et biens d'équipement*. Angers: ADEME.
- ADEME; EY. (2019). *Hydrogène : analyse des potentiels industriels et économiques en France*.
- AFHYPAC. (2014). *Mémento de l'Hydrogène FICHE 5.1.1 : Moteurs Thermiques à Hydrogène*. Association Française pour l'hydrogène et les piles à combustibles.
- AFHYPAC. (2019). *Transport et Distribution de l'Hydrogène Fiche 4.1*. Association française pour l'hydrogène et les piles à combustibles.
- Agarwal, R., & Prasad, J. (1997). J. "The Role of Innovation Characteristics and Perceived Voluntariness in the Acceptance of Information Technologies. *Decisions Science*, 28, pp. 557-582.
- Ahmad, M. I. (2014). Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT): A Decade of Validation and Development. *in Proc. of Fourth International Conference on ICT in Our lives 2014*. Alexandira.
- Air Liquide . (2021). *Producing Hydrogen*. Retrieved from Air Liquide .
- Air Liquide. (2021, May). *Produire de l'hydrogène*. Retrieved from Air Liquide: <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-produire-lhydrogene>
- Air Liquide. (n.d.). *Stocker l'hydrogène*. Retrieved June 2021, from Air Liquide: <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/comment-stocker-lhydrogene>
- Air Procuts. (n.d.). *Idées fausses courantes sur les dangers liés à l'utilisation d'hydrogène*. Retrieved June 2021, from Air Procuts: <http://www.airproducts.be/fr/Industries/Energy/Power/Power-Generation/common-misconceptions.aspx>
- Airbus . (2020, October 15). *Hydrogen fuel cells, explained*. Retrieved from Airbus : <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2020/10/hydrogen-fuel-cell-cross-industry-collaboration-potential-for-aviation.html>

- Airliquide. (n.d.). *De l'hydrogène renouvelable par électrolyse pour alimenter la mobilité*. Retrieved June 2021, from Airliquide: <https://industrie.airliquide-benelux.com/belgique-luxembourg/electrolyseur-hydrogene-elygator>
- Ajanovic, A., & Haas, R. (2020). Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Ajzen, I. (1991). The Theory of Planned Behavior. In I. Ajzen, *Organizational Behavior and Human Decision processes* (pp. 179-211).
- Alcouffe, S. (2004). *La diffusion et l'adoption des innovations managériales en comptabilité et contrôle de gestion: le cas de l'AFC en France*. Paris: HEC.
- Alternative Fuels Data Center. (n.d.). *Hydrogen Production and Distribution*. Retrieved from Alternative Fuels Data Center.
- Alves Costa Filho, B., Pirès, P. J., & Cunha, J. (2011). Technology Readiness Index (TRI) Factors as Differentiating Elements between Users and Non Users of internet Banking, and as Antecedents of the Technology Acceptance Model (TAM). *Communication in computer and information Science*.
- Anderegg, W. R., Prall, J. W., Harold, J., & Schneider, S. H. (2009). *PNAS*. Proceedings.
- Automobile Propre. (n.d.). *Toyota Mirai*. Retrieved June 2021, from Automobile propre: <https://www.automobile-propre.com/voitures/toyota-mirai/>
- Baillard, L. (2012, Juin 27). *LA MAZDA RX-8 TIRE SA RÉVÉRENCE : LA FIN DU WANKEL*. Retrieved from AutoPlus: <https://www.autoplus.fr/mazda/rx-8/la-mazda-rx-8-tire-sa-reverence-la-fin-du-wankel-118573.html>
- Bakker, S., Maat, K., & van Wee, B. (2014, May 27). Stakeholders interests, expectations, and strategies regarding the development and implementation of electric vehicles: The case of the Netherlands. *Transportation Research Part A*, 66, pp. 52-64.
- Ballard. (2019, February 14). *How to Scale Up Your Zero Emission Bus Fleet [Infographic]*. Retrieved June 2021, from Ballard: <https://blog.ballard.com/zero-emission-bus-scalability>
- Barthélémy, P. (2012, April 23). *Quel consensus scientifique sur le réchauffement climatique ?* Retrieved March 2021, from Le monde: https://www.lemonde.fr/passeurdesciences/article/2012/04/23/quel-consensus-scientifique-sur-le-rechauffement-climatique_5986199_5470970.html#:~:text=Une%C3%A9tude%20publi%C3%A9e%20en%202010,Cette%20non%20Dunanimit%C3%A9%20est%20salutaire.

- Bebat. (n.d.). *Installer une borne de recharge à la maison ? Voici quelques informations utiles !* Retrieved June 2021, from Bebat: <https://www.bebat.be/fr/blog/borne-de-recharge-a-la-maison>
- Becker, E. (2014, August). Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? *La note D'analyse*, 15.
- Belgische Petroleum Federatie. (2020). *Kern Cijfers 2020*. Brussels : BPF.
- Benezra, C. (2013). *Eco-innovation dans le secteur automobile: vers un nouveau sentier de dépendance? Une Lecture évolutionniste*. Grenoble: Université de Grenoble.
- Bodineau, L. (2020). *Analyse du Cycle de Vie relative à l'hydrogène - Production d'hydrogène et Usage en Mobilité Légère*. Angers: ADEME.
- Bodineau, L., & Sacher, P. (2020). *Rendement de la chaîne d'hydrogène: Cas du "Power-to-H2-to-Power"*. Angers: ADEME.
- Bower, J., & Christensen, C. (1995). Disruptive technologies: catching the wave. *Harvard Business Review*, 43-53.
- Briggs, M., Webb, J., & Clevo, W. (2015, March). Automotive Modal Lock-in: The role of path dependence and large socio-economic regimes in market failure. *Economic Analysis and Policy*, 45, pp. 58-68.
- Britannica. (2019). *Organic compound*. Retrieved from Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/science/organic-compound>
- Bruxelles Environnement. (2021). *Stratégie « Low Emission Mobility »*. Retrieved from Bruxelles Environnement : <https://environnement.brussels/thematiques/mobilite/strategie-low-emission-mobility>
- Bruxelles Mobilité, Bruxelles Environnement, Sibelga, Brugel, & Be.Bruxelles. (2020). *Vision sur le déploiement d'une infrastructure de recharge pour véhicules électriques*. Bruxelles: BE.Bruxelles.
- Cano, Z. P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z. (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nat. Energy*, 3, pp. 279-289.
- Catoire, S. (2014, MAi). Les chaînes de valeur dans l'industrie automobile. *Annales des Mines - Réalités industrielles*, 2, 53-59.
- CEA; DGEC. (2017). *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique*. Paris: Ministère de la transition écologique et solidaire.

- Chan, C. C. (2013). The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned . *Proceedings of the IEEE*, 206-212.
- Chanaron, J. J., & Lung, Y. (1995). L'économie de l'automobile. *La découverte*, 171, 125.
- Changes, U. N. (2021, Mars 01). *Conference of the Parties (COP)* . Retrieved from United Nations Climate Changes: <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop?page=%2C%2C%2C2%2C%2C%2C%2C%2C%2C%2C%2C0%2C0>
- Chevalier, J., & Maroselli, Y. (2015, January 16). *Elon Musk : la voiture à hydrogène est "particulièrement idiote"*. Retrieved July 2021, from Le Point: https://www.lepoint.fr/automobile/innovations/elon-musk-la-voiture-a-hydrogene-est-particulierement-idiote-16-01-2015-1897202_652.php
- Choi, W., Yoo, E., Seol, E., Myoungsoo, K., & Song, H. H. (2020, March 17). Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea. *Applied Energy*, 265.
- Christensen, C. M. (1997). *The innovator's Dilemma: The revolutionary Book That Will Change the Way You Do Business*. (HarperBusiness, Ed.)
- Christensen, C. M., Raynor, M. E., & McDonald, R. (2015, Décembre). *Disruptive Innovation: What Is Disruptive innovation*. Retrieved May 2021, from Harvard Business Review: <https://hbr.org/2015/12/what-is-disruptive-innovation>
- Collantes, G. O. (2007). Incorporating Stakeholders' perspectives into models of new technology diffusion: The case of fuel-cell vehicles. *Technological Forecasting & Social Change*, 74, pp. 267-280.
- Collins. (2021, Mars 4). *collinsdictionnary*. Retrieved from Collins: <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/innovation>
- Comité européen des régions. (2021, July 01). *Les villes et les régions prêtes à prendre les rênes d'une révolution de la mobilité durable en Europe*. Retrieved June 2021, from Comité européen des régions: <https://cor.europa.eu/fr/news/Pages/mobility-revolution.aspx>
- Commission Européenne . (2021, May 19). *À la une: L'hydrogène, moteur de la révolution verte* . Retrieved from Commission européenne : https://ec.europa.eu/info/news/focus-hydrogen-driving-green-revolution-2021-abr-14_fr
- Community Environmental Council. (n.d.). *Fuel Cell Electric Vehicles : Why Fuel-Cell Electric vehicles Matter*. Retrieved June 2021, from Community Environmental Council: <https://resource.cecsb.org/fcev/>

- Contestabile, M., Offer, G., Slade, R., & Jaegar, F. (2011). *Battery electric vehicles, hydrogen fuel cells and biofuels. Which will be the winner?* ICEPT.
- Conti, A. (2021). Strategy of Innovation (course). HEC Lausanne.
- Coppens, F., & van Gastel, G. (2003, June). *L'industrie de l'automobile en Belgique: importance de la sous-traitance dans l'assemblage de véhicules automobiles*. Banque Nationale de Belgique.
- Coste, V. (2020, 06 16). [Data] *Les européens et leurs millions de voitures* . Retrieved from Euronews: <https://fr.euronews.com/2020/06/16/data-les-europeens-et-leurs-millions-de-voitures>
- Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren , D. P., & Mutel, C. L. (2020, April 29). Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*, 269.
- Criqui, P. (2021). *LES COÛTS D'ABATTEMENT*. France Stratégie.
- D.O.J. Office of Public Affairs . (2017). *Volkswagen AG Agrees to Plead Guilty and Pay \$4.3 Billion in Criminal and Civil Penalties*. Washington DC: Department of Justice .
- Danneels, E. (2004). Disruptive Technology reconsidered - a critique and research agenda. *Journal of Product Innovation Management*, 246-258.
- Dath-Delcambe, P. (2021, June 11). *Le jour où les camions vont carburer à l'hydrogène*. Retrieved June 2021, from La Libre: <https://www.lalibre.be/archives-journal/2021/06/11/le-jour-ou-les-camions-vont-carburer-a-lhydrogene-QQLXTZJHNZCUDLVL2P3HOZG7CM/>
- Davis, F. (1989). *Perceived Usefulness, Perceived ease of use, and User acceptance of information technology*. Michigan: University of Michigan.
- Davis, F. D., & Venkatesh, V. (2000, February). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, 46, pp. 186-204.
- De Brauwier, L., & Babot, N. (n.d.). *En voyage avec l'Audi e-tron : quelques conseils*. Retrieved June 2021, from Audi Magazine: [https://www.fr.audi.be/be/web/fr/magazine/e-tron/voyager-avec-l-audi-e-tron.html#:~:text=En%20Norv%C3%A8ge%2C%20la%20plupart%20des,'Audi%20e%2Dtron\).](https://www.fr.audi.be/be/web/fr/magazine/e-tron/voyager-avec-l-audi-e-tron.html#:~:text=En%20Norv%C3%A8ge%2C%20la%20plupart%20des,'Audi%20e%2Dtron).)
- De Paepe, P. (2019, May 29). *Dossier bornes de recharge | Combien, où charger et qu'est-ce que ça coûte ?* Retrieved June 2019, from Fleet: <https://www.fleet.be/dossier-bornes-de-recharge-combien-ou-charger-et-quest-ce-que-ca-coute/?lang=fr>

- De Paepe, P. (2020, November 05). *PWC : vers une (légère) diminution du parc automobile en Europe*. Retrieved June 2021, from Fleet: <https://www.fleet.be/pwc-strategy-global-digital-automotive-report-2020-vers-une-legere-diminution-du-parc-automobile-en-europe/?lang=fr>
- de Saille, S., & Medvecky, F. (2016, 01 02). Innovation for a steady state: a case for responsible stagnation. *Economy and Society*, 45, 1-23.
- Delaforge, A., & Moinet, N. (n.d.). Le rôle de la communication dans l'adoption d'une technologie innovante. *Hermès la revue*, 50(1), pp. 157-162.
- Deloitte. (2019, January 25). *Réussir la troisième révolution de la mobilité*. Retrieved June 2021, from Deloitte: <https://blog.deloitte.fr/reussir-la-troisieme-revolution-de-la-mobilite/>
- Deloitte; Ballard. (2020). *Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation*. Financial Advisory. Deloitte China.
- Demangeon, E. (2018, December 12). Combien coûte une station-service privative ? *Négoce*.
- Devalan, P. (2006). *L'innovation de rupture: clé de la compétitivité*. Paris: Lavoisier.
- Dhers, J. (2005). *10 questions sur l'hydrogène*. Académie des technologies - Commission Energie - Environnement.
- DOE. (2002). *A National vision of America's transition to a hydrogen Economy - To 2030 and beyond*. Washington DC: United States Department of Energy.
- Dr. Leif Singer. (2020, 10 24). *On the Diffusion of Innovations: How New Ideas Spread*. Retrieved from Dr. Leif Singer: <https://leif.me/on-the-diffusion-of-innovations-how-new-ideas-spread/>
- Eberle, U., & Von Helmolt, R. (2010). Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: a brief overview. *Energy Environment Science*, 6, pp. 689-699.
- Eliasson, B., Taylor, G., & Bossel, U. (2004). The Future of the hydrogen economy bright or bleak? *Journal of Kones Internal Combustion Engine*, 11(1-2), 87-111.
- European Commission. (2020). *Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions*. Bruxelles: European Commission.
- European Commission. (2020). *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions : A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe*. Brussels: European Commission.

- European Commission. (n.d.). *European Clean Hydrogen Alliance*. Retrieved June 2021, from European Commission: https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-clean-hydrogen-alliance_en
- European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, McKinsey. (n.d.). *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis; The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*.
- European Union. (2021). *Learning corner - Who were the these founding members of the EU?* Retrieved from European Union: https://europa.eu/learning-corner/quiz/what/question_1_en#:~:text=The%20founding%20members%20of%20the,Denmark%20joined%20in%201973.
- Européen, P. (2021, march 18). *Émissions de CO2 des voitures : faits et chiffres (infographie)*. Retrieved from Actualité parlement européen : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20190313STO31218/emissions-de-co2-des-voitures-faits-et-chiffres-infographie>
- Européenne, C. (2021, March 16). *Accord de paris*. Retrieved from Commission Européenne: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_fr#:~:text=L'accord%20de%20Paris%20d%C3%A9fini,%C3%A0%201%2C5%20%C2%B0C.
- Fishbein, M., & Ajzen, I. (1975). *Belief, Attitude, Intention and Behavior: An introduction to Theory and Research*. Addison-Wesely.
- Fleuret , G. (2013). Le mystère du crash du zeppelin Hindenburg résolu, 76 ans après. *Slate*.
- Fraga-Lamas, P., & Fernandez-Carames, T. M. (2019). A Review on Blockchain Technologies for an Advanced and Cyber-Resilient Automotive Industry. *IEEE Access*, 1-21.
- Frischauf, N., Acosta-Iborra, B., Harskamp, F., Moretto, P., Malkow, T., Honselaar, M., . . . Socek, A. (2013, january 23). The hydrogen value chain: applying the automotive role model of the hydrogen economy in the aerospace sector to increase performance and reduce costs. *Acta Astronautica*, 88, pp. 8-24.
- Gailly, B. (2018). *Navigating innovation: How to identify, prioritize and capture opportunitities for strategic succes*. New-York: Springer International Publishing .
- Ganesan, V. (2012). *Internal combustion engines*. New Delhi: McGraw Hill Education.
- Ghosal, V. (2004). Pre-Emptive Investment Behaviour and Industry Structure. *Economic Issues*, pp. 47-68.
- Godoe, P., & Johansen, T. S. (2012, Mai 06). *Understanding adoption of new technologies: Technology readiness and technology acceptance model*. (EFPSA, Producer) Retrieved from EFPSA: <https://jeps.efpsa.org/articles/10.5334/jeps.aq/>

- Goodhue, D. L., & Thompson, R. L. (1995, June). Task-Technology Fit and Individual Performance. *MIS Quarterly*, 19(2), pp. 213-236.
- Grésillon, G. (2020, 8 July). *Le plan de Bruxelles pour faire « décoller » l'hydrogène en Europe*. Retrieved June 2021, from Les Echos: <https://www.lesechos.fr/monde/europe/le-plan-de-bruxelles-pour-faire-decoller-lhydrogene-en-europe-1222344>
- Groupe PSA. (2020). *How does a hybrid motor car work?* Retrieved from Groupe PSA.
- Hale, J. L., Householder, B. J., & Greene, K. L. (2003). The theory of Reasoned Action. *The Persuasion Handbook: Developments in Theory and Practice*, 259-286.
- hardman, S., Steinberger-Wilckens, R., & van der Horst, D. (2014). Disruptive innovations: The case for hydrogen fuel cells and battery electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1-14.
- Hartwick, J., & Barki, H. (1994). Explaining the Role of User Participation in Information System. *Management Science*, 40(4), pp. 40-465.
- Hayez, V. (2021, January 12). *L'hydrogène, carburant idéal pour nos voitures?* . Retrieved from Touring Blog: <https://www.touring.be/fr/articles/lhydrogene-carburant-ideal-nos-voitures>
- Hess, P. (2012). *Electric vehicles and hybrids : where are we now ?* Retrieved from Harvard Science in the News .
- Hidrué, M., Parsons, G., Kempton, W., & Gardner M. (2011). Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. *Resource Energy Econ*, 33(3), pp. 686-705.
- Hydrogen Council. (2020). *Path to hydrogen competitiveness A cost perspective*. Hydrogen Council.
- Hydrogen Council; McKinsey. (2017). *Hydrogen scaling up: A sustainable pathway for the global energy transition*. Hydrogen Council.
- Hydrogen Council; McKinsey. (2017). *Hydrogen Scaling Up: A sustainable pathway for the global energy transition*. Hydrogen Council.
- IEA. (2020). *Global EV Outlook 2020*. International Energy Agency.
- IFPEN. (2021, May). *Tout savoir sur l'hydrogène* . Retrieved from IFPEN: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene#>
- International Energy Agency. (2020). *Future of Hydrogen*. Paris: IEA.

- IPFEN. (2021). *Tout savoir sur l'hydrogène*. Retrieved July 2021, from IPFEN: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene>
- Johnson, G., Whittington, R., Choles, K., Angwin, D., Regneér, P., & Fréry, F. (2014). *Stratégique*. Montreuil: Pearson.
- Jones, J., Genovese, A., & Tob-Ogu, A. (2020). Hydrogen vehicles in urban logistics: A total cost of ownership analysis and some policy implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119.
- Kotler, P., Keller, K., & Manceau, D. (2015). *Marketing Management*. Montreuil: Pearson.
- Krifa, H. (2001). *Concurrence oligopolistique et concentration dans le secteur automobile*. Retrieved 2021 April, from <http://gerpisa.org/rencontre/9.rencontre/S04Krifa.pdf>
- Lacaht, S., & Lachat, D. (1997). *Stratégie de rupture et innovation dans la firme*. L'Harmattan.
- Lanz et al., A. (2001). Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. *Module 3: Hydrogen use in internal combustion engines*.
- Laurent, A. (2021, February 22). *How does an electric car motor work ?* Retrieved from Groupe Renault : <https://easyelectriclife.groupe.renault.com/en/outlook/technology/how-does-an-electric-car-motor-work/>
- Lazarsfeld, P., & Merton, R. K. (1964). *Friendship as a social process: A substantive and methodological theory*. New-York: Octagon Books.
- Le Fevre, C. N. (2019). *A review of prospects for natural gas as a fuel in road transport*. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies.
- Les Echos. (2020, October 16). *L'hydrogène va-t-il révolutionner l'énergie ?*. Retrieved June 2021, from Youtube: <https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/FMfcgzGkXvztgfvShBvdHlmPPNvSZpML>
- Liska, A. E. (1984). A critical examination of the causal structure of the Fishbein-Azjen model. *Social Psychology Quarterly* 47, 61-74.
- Möller, Y. (n.d.). *Toyota Mirai : les premiers détails de la deuxième génération de FCEV sont connus*. Retrieved June 2021, from Le moniteur Automobile: <https://www.moniteurautomobile.be/actu-auto/scoops/toyota-mirai.html>
- MacDuffie, J. P., & Fujimoto, T. (2010, June). *Why Dinosaurs Will Keep Ruling the Auto Industry*. Retrieved April 2021, from Harvard Business Review: <https://hbr.org/2010/06/why-dinosaurs-will-keep-ruling-the-auto-industry>

- Malbrunot, P., & AFHYPAC. (2019). *La Distribution de l'hydrogène pour les véhicules automobiles; Memento de l'hydrogène Fiche 4.5.1*. Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible.
- Marchetti, C. (2006). Long-term global vision of nuclear-produced hydrogen. *International Journal of Nuclear hydrogen production and application*, 1(1), pp. 13-19.
- Matoglu, O., & Vate, V. (n.d.). Build-to-Order Meets Global Sourcing: Planning Challenge for the Auto Industry. In K. G. Kempf, P. Keskinocak, & R. Uzsoy, *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise : A State-of-the-Art Handbook* (pp. 231-247). New-York.
- Matoglu, O., & Vate, V. (n.d.). Build-to-order Meets Global Sourcing: Planning Challenge for the Auto Industry. In K. G. Kempf, P. Keskinocak, & R. Uzsoy, *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise: A State-of-the-Art* (Vol. 2, pp. 231-247). New-York: Springer.
- McDowall, W., & Eames, M. (2006, January 24). Forecasts, scenarios, visions, backcasts and roadmaps to the hydrogen economy: A review of the hydrogen futures literature. *Energy Policy*, 34, pp. 1236-1250.
- Melaina, M. W. (2003). Initiating Hydrogen Infrastructures: Preliminary analysis of a sufficient number of initial hydrogen stations in the US. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(7), pp. 743-755.
- Melendez, M., & Milbrandt, A. (2006). *Hydrogen infrastructure transition analysis*. US Department of Energy National Renewable Energy Laboratory.
- Messersmith, D. T. (2014). *Natural Gas Vehicle Basics*. Retrieved from PennState Extension.
- Meunier, G., & Ponssard, J.-P. (2020). *Quelles politiques publiques pour la filière hydrogène? Les enseignements tirés du cas des bus urbains*. Institut des Politiques Publiques.
- Meyer, P., & Winebrake, J. J. (2009). Modeling technology Diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure. *Technovation*, 29, pp. 77-91.
- Midler, C., Ben Mahmoud-Jouini, S., & Maniak, R. (2012). *Management de l'innovation de rupture: Nouveaux enjeux et nouvelles pratiques*. Ecole polytechnique.
- Midler, C., Maniak, R., & Beaume, R. (2012). *Réenchancer l'industrie par l'innovation: L'expérience des constructeurs automobiles*. Dunod.
- Monitor Deloitte. (2020). *Fueling the future of mobility: hydrogen and fuel cell solutions for heavy duty long-haul freight transportation*. Paris: Monitor Deloitte.

- Moore, G. C., & Bensabat, I. (1991). Development of an Instrument to Measure the Perceptions of Adopting an Information Technology Innovation. *Information System Research*, 2(3), pp. 192-22.
- Morris, M. G., & Venkatesh, V. (2000). Age Differences in Technology Adoption Decisions: Implications for a Changing Workf. *Personnel Psychology*, 53, pp. 375-403.
- Morrison, G., Stevens, J., & Joseck, F. (2018, February). Relative economic competitiveness of light-duty battery electric and fuel cell electric vehicles. *Transportation Research Part C*, 87, pp. 183-196.
- Mulley, C., Nelson, J. D., & Wright, S. (2018). Community transport meets mobility as a service: On the road to a new a flexible future. *Research in Transportation Economics*, 69, pp. 583-591.
- Munashighe, M., Mcmeekin, A., & Southerton, D. (2009). *Consumers, business and climate change*. The University of Manchester:, Sustainable Consumption Institute, Manchester.
- Nave, C. R. (2017). *How Does an Electric Motor Work?* Retrieved from HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/mothow.html#c1>
- Nezha, D. A. (2018). Chaines de valeur et strat gies de concurrence sur l'industrie automobile. *ALGERIAN BUSINESS PERFORMANCE REVIEW*, 13, pp. 361-374.
- OCDE. (2013). *Industrie automobile: ajustements à moyen terme des capacités de production*. Notes de politique économique du Département des affaires économiques de l'OCDE. OCDE.
- OECD, & Eurostat. (2018). Récupéré sur <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>.
- O'Garra, T., Mourato, S., & Pearson, P. (2005). Analysing awarness and acceptability of hydrogen vehicles: A London Case Study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, pp. 649-659.
- Olivier, A. (2021, 30 03). *Les émissions de gaz à effet de serre dans l'Union européenne*. Retrieved from Toute l'europe.eu: <https://www.touteleurope.eu/environnement/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-dans-lunion-europeenne/>
- Ores. (n.d.). *RECHARGER MA VOITURE ÉLECTRIQUE À LA MAISON*. Retrieved June 2021, from Ores: <https://www.ores.be/particuliers-et-professionnels/recharge-maison>
- ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL . (2005). *Les évolutions de l'industrie automobile qui ont une incidence sur les équipementiers*. Genève: BUREAU INTERNATIONAL DU TRAVAIL GENÈVE .

- Parasuraman, A. &. (2001). *Techno-Ready Marketing: How and why your customers adopt technology*. New-York: The Free Press.
- Penn State Department of Energy and Mineral Engineering. (n.d.). *The process of crude oil refining*. Retrieved 2021, from Penn State: <https://www.e-education.psu.edu/eme801/node/470>
- Petit , T., Rakotomalala, D., Gollain , V., & Guery, P. (2019). *L'automobile en Ile de France, Les défis et enjeux d'une filière en mutation : Vers une industrie de la mobilité*. Paris: Institut d'aménagement et d'urbanisme.
- Pierre. (2015, Juillet 14). *Histoire de moteurs : le moteur à piston rotatif*. Retrieved from News D'anciennes: <https://newsdanciennes.com/histoire-de-moteurs-le-moteurs-a-piston-rotatifs/>
- Pompili, B., & Le Maire, B. (2020). *Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France*. Paris: Gouvernement Français.
- Poppy. (n.d.). *Smart mobility for smart cities*. Retrieved June 2021, from Poppy: <https://poppy.be/fr>
- Port of Antwerp. (n.d.). *Le consortium HyTrucks vise à mettre en circulation 300 camions à hydrogène en Belgique d'ici 2025* . Retrieved from Port of Antwerp: <https://newsroom.portofantwerp.com/le-consortium-hytrucks-vise-a-mettre-en-circulation-300-camions-a-hydrogene-en-belgique-dici-2025>
- Porter, M. (1996). *L'Avantage Concurrentiel*. Paris: InterEditions.
- Prasath et al., R. (2012). Hydrogen Operated Internal Combustion Engines. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 52-57.
- République Française, ADEME, EY. (2019). *Hydrogène: analyse des potentiels industriels et économiques en France*. Angers: ADEME.
- République Française, Ministère de la transition écologique et solidaire. (n.d.). *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique*. Paris: République Française, Ministère de la transition écologique et solidaire.
- Rogers, E. M. (1995). *Diffusion of innovations*. New-York: The Free Press.
- Rohart, F. (2021, May 27). Le groupe Shell condamné à réduire ses émissions de CO2 de 45% pour 2030. *L'Echo*, 1.
- Rolland, M., & Serville, Y. (1976). Le consommateur face au changement. *Annales de la nutrition et de l'alimentation*, 30(2/3), 467-479.

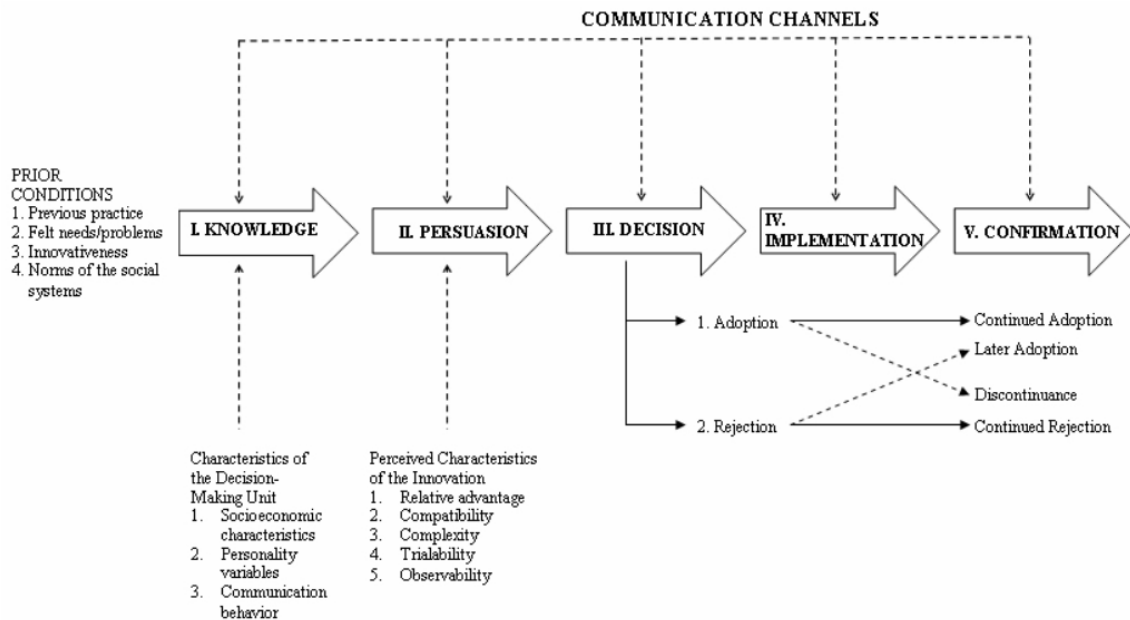
- RTBF. (2020, July 16). *Découvrez la carte interactive des nouvelles pistes cyclables créées à Bruxelles*. Retrieved June 2021, from RTBF.be: https://www.rtbef.be/info/regions/detail_la-carte-interactive-des-nouvelles-pistes-cyclables-creees-a-bruxelles?id=10543681
- Ryan, B., & Gross, N. (1943). "The Diffusion of Hybrid Seed Corn in Two Iowa Communities,". *Agricultural Experiment Station Research Bulletin*, 372., pp. 15-24.
- SAHIN, I. (2006, April). Detailed Review of Rogers' diffusion of innovations theory and educational technology-related studies based on rogers' theory. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 5, pp. 14-23.
- Schmid, S., & Grosche, P. (2008). *Managing the International Value Chain in the Automotive Industry*. Gütersloh: BertelsmannStiftung.
- Scholar, G. (2021, april 04). *Google Scholar "innovation"*. Retrieved from Google Scholar: https://scholar.google.com/scholar?as_ylo=2020&q=innovation&hl=fr&as_sdt=0,5
- Schulze, A., MacDuffie, J. P., & Täube, F. A. (2015, April 24). Introduction: knowledge generation and innovation diffusion in the global automotive industry—change and stability during turbulent times. *Industrial and Corporate Change*, 24(3), 603-611.
- Schumpeter, J. A. (1954). *Capitalisme, Socialisme, Démocratie*. Payot.
- ServiceStation. (2020, February 28). *L'année passée, 83 nouvelles stations de distribution d'hydrogène ont été ouvertes dans le monde*. Retrieved from ServiceStation : <https://www.servicestationmagazine.be/fr/nieuws/station/lannée-passée-83-nouvelles-stations-de-distribution-dhydrogène-ont-été-ouvertes-dans>
- Shell. (2018). *Natural Gas : The Facts* . Retrieved from Shell.
- Shiu, E., Steinberger-Wilckens, R., Turrentine, T., & Hardman, S. (2017). Barriers to the adoption of fuel cell vehicles: A qualitative investigation into early adopters attitudes. *Transportation Research Part A*, 95, pp. 166-182.
- Statbel . (2021). *Immatriculations de véhicules neufs et d'occasion 2020*. Brussels : Statbel .
- Statista. (2021). *Nombre de voitures particulières en circulation dans l'UE 2012-2016 Publié par Statista Research Department, 13 déc. 2018 Cette statistique présente l'évolution du nombre de voitures particulières en circulation dans l'Union européenne entre 2012 et 2016*. Retrieved from Statista: <https://fr.statista.com/statistiques/950693/nombre-voitures-particulieres-en-circulation-union-europeenne/#:~:text=Cette%20statistique%20pr%C3%A9sente%20l'%C3%A9volution,environ%20240%20millions%20en%202012.>

- Statista. (n.d.). *Distance annuelle parcourue par des véhicules lourds en France 2004-2018*. Publié par Statista Research Department, 8 sept. 2020 Cette statistique montre les parcours annuels moyens des véhicules lourds en France entre 2004 et 2018, selon le type de véhicu. Retrieved June 2021, from Statista: <https://fr.statista.com/statistiques/484468/distance-parcourue-en-moyenne-par-vehicule-lourd-france/>
- Tesla. (n.d.). *Model S Plaid*. Retrieved June 2021, from Tesla: https://www.tesla.com/en_eu/models
- The University of Tennessee at Chattanooga. (n.d.). *Electric Vehicles*. Retrieved from The University of Tennessee at Chattanooga.
- Thomas, C. E. (2009). *Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared*. Alexandria, Virginia: H2GEN Innovation, Inc.
- Tigreat, D., & INERIS. (2008). *Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés*. Verneuil en Halatte Oise: INERIS.
- Torregrossa, M. (2019, December 17). *Un navire transporteur d'hydrogène liquide présenté au Japon*. Retrieved July 2021, from H2 Mobile: <https://www.h2-mobile.fr/actus/navire-transporteur-hydrogene-liquide-japon/>
- Trencher, G., & Edianto, A. (2021, 05 February). Drivers and Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany. *Energies*, 14(833), pp. 1-26.
- Trencher, G., & Edianto, A. (2021). Drivers And Barriers to the Adoption of Fuel Cell Passenger Vehicles and Buses in Germany. *Energies*.
- Trends Tendances. (2021, 25 March). Les doutes sur la voiture à hydrogène. *Trends Tendances*, 12, 42-44.
- U.S. Department of Energy. (n.d.). *How Do Diesel Vehicles Work?* . Retrieved 2021, from U.S. Department of Energy: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-diesel-cars-work>
- U.S. Department of Energy. (n.d.). *How Do Gasoline Cars Work?* Retrieved 2021, from US Department of Energy: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-gasoline-cars-work>
- U.S. Energy Information Administration . (2020). *Homepage - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. Retrieved from U.S. Energy Information Administration (EIA).
- U.S. Energy Information Administration. (2016). *International Energy Outlook 2016*. Washington DC: U.S. Energy Information Administration.
- Van Aperldoorn, R. (2021, March 25). Les doutes sur la voiture à hydrogène. *Trends Tendances*, 12, 42-44.

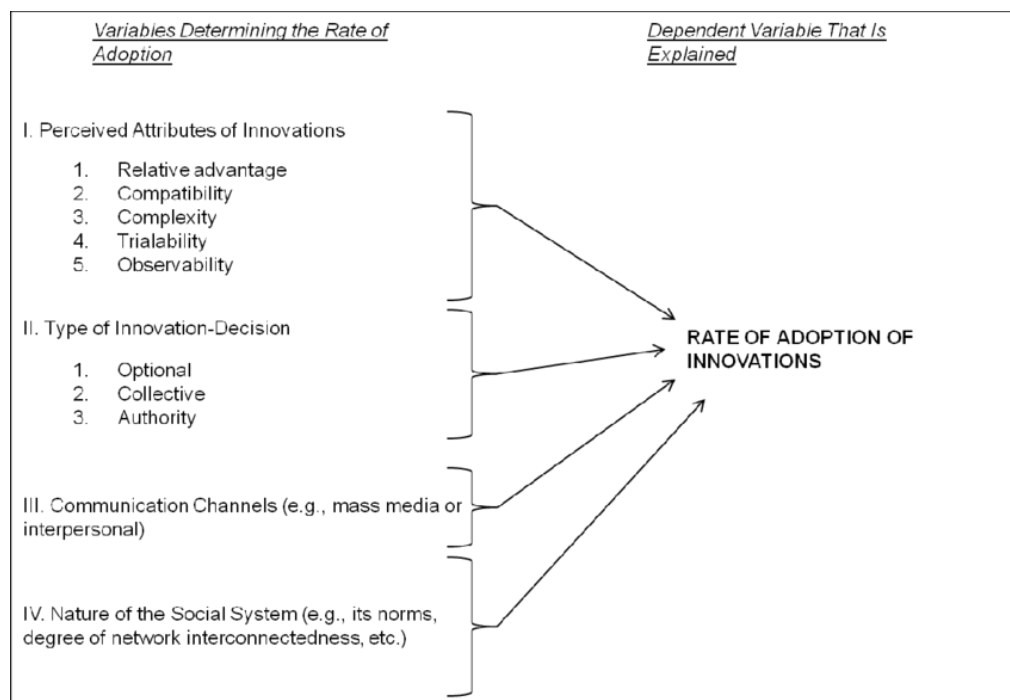
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003, September). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27, pp. 425-478.
- Vilars, T. (2017, July 19). "Oh l'humanité..." La catastrophe du "Hindenburg", le jour où le zeppelin est mort. Retrieved June 2021, from OBS: <https://www.nouvelobs.com/photo/20170719.OBS2315/oh-l-humanite-la-catastrophe-du-hindenburg-le-jour-ou-le-zeppelin-est-mort.html>
- Volkswagen Belgium. (n.d.). *Découvrez nos offres spéciales*. Retrieved from Volkswagen: https://offers.volkswagen.be/fr?_ga=2.131295695.1727242100.1626368469-1836773336.1626368469&active=433
- Whiston, M. M., Lima Azevedo, I. M., Lister, S., Samaras, C., Whitefoot, K. S., & Whitarce, J. F. (2021). Hydrogen Storage for Fuel Cell Electric Vehicles: Expert Elicitation and a Levelized Cost of Driving Model. *Environmental Science & Technology*, 55(1), pp. 552-563.
- Whitmarsh, L., & Wietschel, M. (2008). Sustainable Transport Visions: What Role for Hydrogen and Fuel Cell Vehicle Technologies? *Energy and Environment*, 2(19), pp. 207-226.
- Williams, B., Haley, B., Kahrl, F., Moore, J., Jones, A., Torn, M., & Mcjeon, H. (2015). *Pathways to deep decarbonization in the United States, Revisions with Technical Supplement. The US report of the deep decarbonization Pathways Project of the sustainable Solutions Network and the institute for sustainable Development and International Rel.* San Francisco, CA: Energy and Environment Economics Inc.
- Winebrake, J. J., & Farrell, A. (1997, June). The AFV credit program and its role in future AFV market development. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(2), pp. 125-132.
- Xu, C., Wu, Y., & Dai, S. (2020). What are the critical barriers to the development of hydrogen refueling stations in China? A modified fuzzy DEMATEL approach. *Energy Policy*, 142.
- Zaho, J., & Melaina, M. W. (2006). Transition to Hydrogen-Based Transportation in China: Lessons Learned from Alternative Fuel Vehicle Programs in the United States and China. *Energy Policy*, 34(11), pp. 1299-1309.

Appendix:

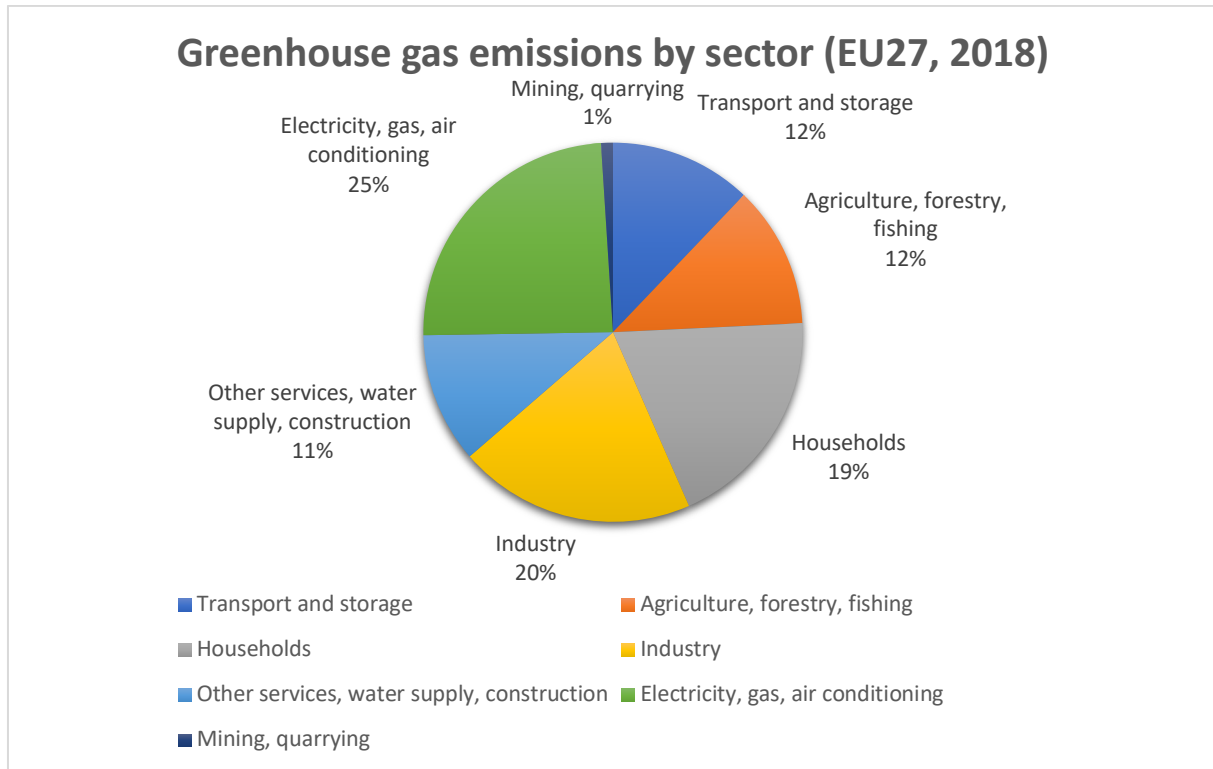
- 1) Appendix 1: Individual decision-making process for adopting the innovation (Rogers, 1995, p.163)



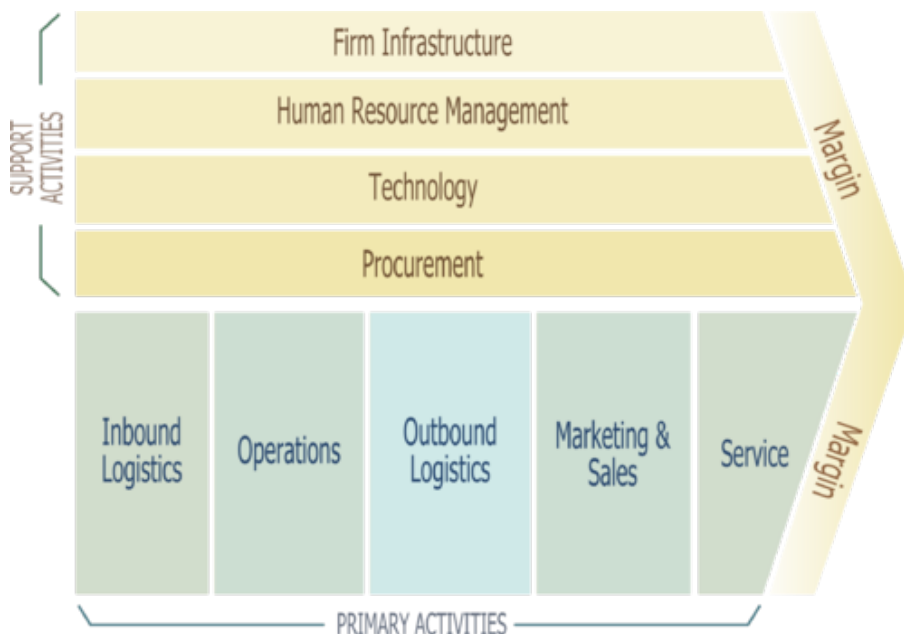
- 2) Appendix 2: A paradigm of variables determining the rate of adoption of innovations. (Rogers, 1995, p. 233)



3) Appendix 3 : Greenhouse gas emissions by sector in the European Union (27) in 2018 (Olivier, 2021) Data: Eurostat



4) Appendix 4: Value Chain of Porter (Porter, 1996, p. 37)



5) Appendix 5: TCO of the different type of Vehicle by size segment (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Mckinsey)

EUR thousands

EXCLUDING ALL TAXES | 2020

	Vehicle	Purchase price +	Maintenance +	Fuel cost ¹ +	Infrastructure ² =	TCO
A/B Segment	FCEV	20.0	2.8	4.6	2.2	29.6
	BEV	16.9	2.3	2.8	2.5	24.5
	PHEV	14.7	2.9	3.3	1.4	22.3
	ICE - gasoline	11.3	3.0	3.7	0.5	18.5
	ICE - diesel	11.3	3.0	3.7	0.4	18.4
C/D Segment	FCEV	30.9	4.5	5.6	2.7	43.8
	BEV	28.9	3.7	3.4	2.5	38.5
	PHEV	26.8	4.9	3.8	1.4	36.9
	ICE - gasoline	21.4	5.5	4.7	0.6	32.3
	ICE - diesel	21.9	5.7	4.7	0.5	32.8
J Segment	FCEV	38.9	5.6	6.9	3.3	54.8
	BEV	41.0	5.4	4.2	2.5	53.1
	PHEV	37.0	6.7	5.1	1.4	50.2
	ICE - gasoline	28.5	7.1	6.2	0.8	42.5
	ICE - diesel	29.5	7.5	6.5	0.7	44.1

1 Includes production and distribution cost

2 Includes retail cost

NOTE: Assuming 15 year lifetime, annual driving distance of 12,000 km, no tax (e.g., fuel excise, VAT)

6) Appendix 6: TCO of the different type of Vehicle by size segment (European Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Mckinsey)

EUR thousands

EXCLUDING ALL TAXES | 2030

	Vehicle	Purchase price +	Maintenance +	Fuel cost ¹ +	Infrastructure ² =	TCO
A/B Segment	FCEV	16.0	2.5	4.4	1.2	24.0
	BEV	15.2	2.2	2.7	2.5	22.6
	PHEV	13.7	2.8	3.4	1.4	21.3
	ICE - gasoline	11.1	3.0	4.1	0.5	18.7
	ICE - diesel	11.2	3.0	4.1	0.4	18.7
C/D Segment	FCEV	25.7	4.2	5.2	1.4	36.5
	BEV	26.3	3.6	3.2	2.5	35.6
	PHEV	25.0	4.9	3.7	1.4	35.0
	ICE - gasoline	21.1	5.4	5.3	0.6	32.3
	ICE - diesel	21.6	5.6	5.2	0.5	32.9
J Segment	FCEV	32.7	5.3	6.2	1.7	45.9
	BEV	37.3	5.2	3.9	2.5	48.9
	PHEV	34.7	6.7	5.1	1.4	47.9
	ICE - gasoline	28.3	7.0	6.9	0.8	42.9
	ICE - diesel	29.1	7.4	7.2	0.7	44.4

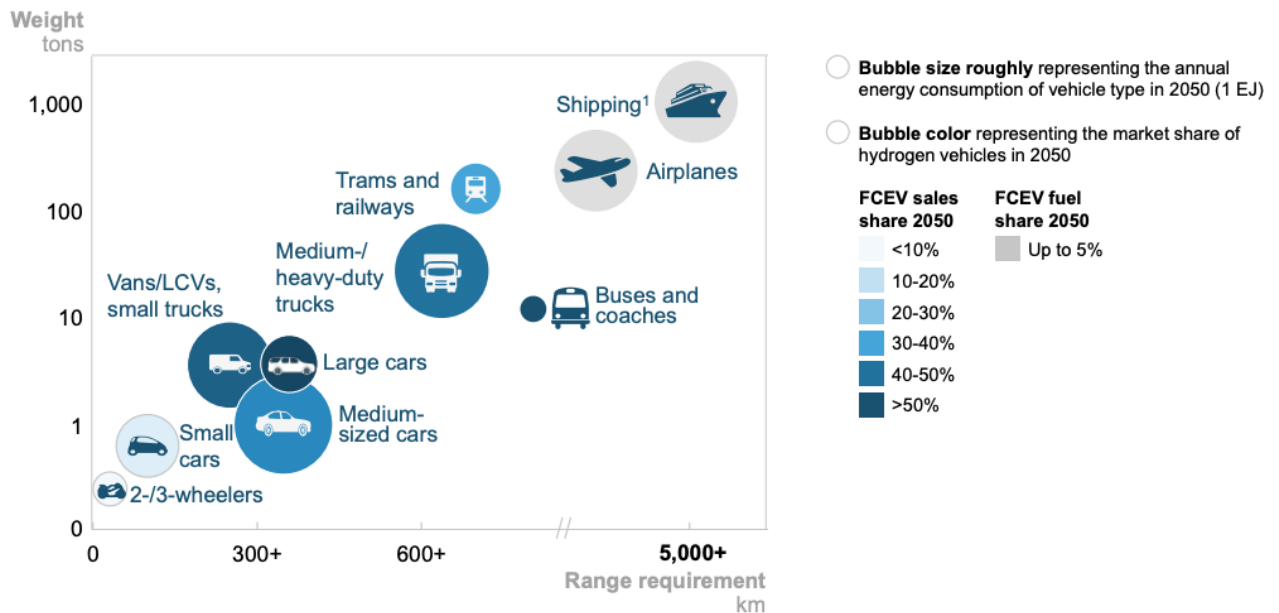
1 Includes production and distribution cost

2 Includes retail cost

NOTE: Assuming 15 year lifetime, annual driving distance of 12,000 km, no tax (e.g., fuel excise, VAT)

7) Appendix 7 : Transportation Market Segmentation (Hydrogen Council; McKinsey, 2017)

Transportation market segmentation



¹ Hydrogen-based fuels or fuel cells

8) Appendix 8: Transcript of interview 1 (Pr. Bart Jourquin)

Thomas : que pensez-vous de l'application de l'hydrogène au niveau des véhicules terrestres (voitures, camions et camionnettes).

Pr. B. Jourquin : Les voitures à hydrogènes restent des voitures électriques et donc c'est une façon de produire de l'électricité. Donc à la question de savoir pourquoi on a d'abord travaillé sur les voitures électriques.

Tout simplement parce que la voiture à hydrogène n'est pas un moteur à combustion traditionnel

Thomas : Il me semble qu'il y en a.

Pr. B. Jourquin : on réfléchit de plus en plus à des camions.

Il y a d'ailleurs un article dans La Libre du 11 juin 2021 qui s'intitule : « Le jour où les camions vont carburer à l'hydrogène : « D'ici 2027, le coût de possession d'un camion à l'hydrogène sera plus bas que celui d'un diesel ». Donc la réflexion aujourd'hui est plus de penser à un camion à hydrogène qu'à des voitures à hydrogène. Pourquoi ? Parce qu'aujourd'hui on ne voit pas de possibilité de faire des gros camions électriques. Simplement parce que la quantité de batterie qu'il faudrait pour faire fonctionner un camion est impossible. A mon avis, cette technologie va percer à travers les camions. Ça reste un moteur relativement complexe et le plus facile aujourd'hui ce sont les voitures électriques. Mais il y a des cycles, dans les années 80-90, il y a eu la grande époque du LPG. C'étaient des voitures au gaz, c'était simple à faire parce que, il y avait très peu de modification technique donc la plus part des voitures à essence pouvaient être équipées au LPG. Ce n'est pas du tout le cas pour l'hydrogène, ce sont vraiment des moteurs spécifiques.

Tom : Pourquoi est-ce que l'on semble abandonné un petit peu l'idée d'avoir un moteur à combustion à l'hydrogène et l'on se retourne 100% vers un moteur électrique alimenté par de l'hydrogène ?

Pr. B. Jourquin : Écoute franchement, il faudrait que je me renseigne un peu sur les véhicules à l'hydrogène parce que c'est quelque chose que j'ai vraiment très peu suivi.

Benoît m'a présenté comme spécialiste en mobilité, mais bon je travaille essentiellement, en fait pratiquement exclusivement d'ailleurs sur le transport de fret, de marchandise. Et très peu sur les voitures, donc les technologies voitures récentes à part les voitures électriques j'ai pas mal suivi mais pour les voitures hydrogène. J'ai très peu suivi. En fait, la technologie reste compliquée donc je sais que Colruyt, par exemple possède un camion de test, un gros camion de 44 tonnes qui est donc entièrement électrique. Avec système où on utilise des piles à combustible donc ici c'est l'hydrogène qui est transformé en électricité pour alimenter les batteries. On est plutôt dans des modèles qui sont électriques, l'idée c'est de pouvoir finalement d'utiliser la pile à combustible comme étant la production d'électricité. Autrement dit, on en roulant, on peut continuer à charger ses batteries. C'est ce que moi je connais en tout cas par rapport aux véhicules, ou en tout cas les camions à hydrogène. C'est dans cette logique-là qui travaille pour le moment et donc logiquement, évidemment la question des voitures électriques se pose avant puisque. Finalement, la pile à combustible autant que c'est bien de cette technologie-là dont tu parles, la pile à combustible sert finalement alimenter les batteries. A la question aussi de l'investissement des pompes donc aujourd'hui à peu près une vingtaine je pense de pompe à hydrogène en Belgique, mais pas plus que ça. Donc aujourd'hui, c'est pas suffisant en fait donc ça c'est un des gros problème la question se pose évidemment : Qui doit faire l'investissement ? Si on multiplie le nombre de carburant, ça veut dire qu'il faut une pompe pour ceci pour cela et donc qui va le payer on n'en sait rien. La question se pose d'ailleurs aussi pour l'alimentation des bornes électriques même si, il est beaucoup moins coûteux d'installer des bornes électriques que des tank de l'hydrogène.

Thomas : Au niveau du stockage de l'hydrogène en fait, ce que j'ai vu c'est que le stockage de l'hydrogène prend énormément de place. Du coup, on est obligé de le compresser, il est compressé à 200 bars et ses 700 bars pour l'avoir sous forme liquide. Et alors la question était, j'ai l'impression que ça demande quand même une forte énergie de pouvoir compresser ce type...

Pr. B. Jourquin : Tu viens avec des questions qui sont très techniques, moi je ne suis pas ingénieur en mécanique. Je suis un économiste de transport. Voilà, moi je veux bien faire des analyses coût-bénéfice les choses comme ça. Mais là des questions comme celles-là moi je ne suis pas capable de répondre.

Thomas : Alors, c'est vrai que je n'ai pas bien, je n'ai pas encore créé des questions au niveau coût bénéfice donc ça je n'ai pas vous poser mais je vais vite regarder. J'avais plutôt une question d'un point de vue organisationnel. Une entreprise comme Scania qui crée des camions enfin qui fait des camions principalement au diesel a une supply chain et a une chaîne d'assemblage qui est créée principalement pour le diesel. Est-ce que d'un point de vue organisationnel c'est compliqué de faire ce changement, de faire cette transition vers une chaîne d'assemblage qui assemblerait les moteurs électriques utilisant une pile à combustible ?

Pr. B. Jourquin : Je pense qu'aujourd'hui non, parce que on a par exemple Volvo qui a mis au point des chaînes de construction qui sont hyper flexibles et qui peuvent changer de modèle pratiquement en quelques heures donc ça ce n'est plus vraiment un problème. On ne travaille plus dans des chaînes comme on les inventait avant où finalement on produisait des grandes quantités du même modèle tout le temps. Ici les nouvelles chaînes permettent de finalement être très flexibles. Donc ça je ne pense pas qu'il y a des investissements à faire, je connais pas le cas de Scania, je n'en sais rien mais je sais que Volvo par exemple à l'échelle qui sont très flexibles y compris d'ailleurs pour les véhicules de privé.

Thomas : Ok ça c'est bon à savoir et alors là c'était plus une question aussi au niveau de la diffusion enfin on remarque qu'en gros, là par exemple le moteur diesel le moteur a été fortement diffusé au moment où on en a parlé, ou on a dit que le diesel était mieux que le moteur essence et du coup je me demandais est-ce que on parle assez du moteur à hydrogène pour le moment et du coup ce qui donnerait un peu pas une en popularité mais une moins grande popularité que le moteur électrique ou à essence, diesel LPG et CNG.

Pr. B. Jourquin : Les débats qui ont lieu là-dessus ils sont toujours au moins dix ans en retard par rapport à la science. Alors aujourd'hui, on a l'air de louer les voitures électriques, les voitures hybrides et les voitures à essence. On n'oublie qu'aujourd'hui rien ou très peu de choses obligent les constructeurs à mettre des filtres à particules catalyseur sur les voitures à essence. Or en fait la question du diesel pendant longtemps on s'est dit tient le diesel est intéressant parce que ça moteur qui

consomme moins qu'un moteur essence et donc en termes de CO₂, le moteur diesel émet moins de CO₂ qu'un moteur à essence. Ce qui est parfaitement vrai, mais après on s'est rendu compte que le moteur au diesel émettaient d'autres produits nocifs et paradoxalement ce sont les moteurs diesel les plus récents en tout cas à l'époque donc ce qu'on appelle le moteur à injection direct, c'est moteur-là ont comme particularités qu'ils chauffent moins, consomment moins. Mais contrairement aux anciens diesels, ils ne brûlent pas entièrement les résidus. Ce sont les moteurs à injection direct qui ont plus finalement émis ce qu'on appelle les microparticules, les PM_{2,5} et PM₁₀. Bon ça on s'est rendu compte assez rapidement que c'était assez cancérigène. Du coup les gens ont eu peur des moteurs diesel et il y a une sorte de bashing des moteurs diesel et puis les gens se sont tournés vers les moteurs à essence et en fait on oublie de dire que oui mais attention que les moteurs essence récente sont aussi des moteurs à injection directe et donc il souffre exactement du même problème et donc les moteurs à essence de maintenant à injection directe émettent pas mal de microparticules et ça personne n'en parle. Donc on a pas du tout résolu le problème en raison des questions de moteur à combustion avec des émissions, il y a 2 problèmes, c'est effectivement le processus de combustion qui reste polluant et l'autre problème c'est évidemment que l'on consomme énormément de ressources naturelles pour pouvoir le faire. Donc les moteurs à combustion ont par essence un problème. Alors est-ce que le moteur électrique est meilleur ? Oui et non ça dépend ce qu'on veut regarder, ici les gens réfléchissent : « Ah oui mais mon moteur électrique il ne pollue pas ». Alors c'est vrai, ce n'est pas vrai parce que d'abord on regarde l'ensemble du cycle de vie d'un véhicule électrique donc y compris la construction jusqu'au recyclage et bien la production et le traitement des batteries usagées est un processus excessivement polluant et dangereux et donc en termes d'émission de polluants les voitures électriques peuvent avoir un bilan légèrement meilleur qu'un moteur à combustion mais ce n'est pas si flagrant que ça, loin de là d'autant que dans certains pays. Bon ce n'est pas le cas en Belgique, on utilise beaucoup de production d'électricité nucléaire mais bon ça c'est un autre débat mais lorsque dans certains pays comme la Pologne ou l'Allemagne ont produit encore pas mal d'électricité à base de charbon. Bas l'électricité que vous consommez, alors localement effectivement quand tu roules tu n'émet pas grand-chose et c'est bon, mais la production d'électricité, elle émet des CO₂ et puis il ne faut jamais oublier, ça les gens l'oublie aussi, c'est que quand une voiture roule la moitié des émissions d'une voiture sont des émissions qui ne sont pas dû au moteur directement. Donc c'est l'usage, c'est l'usure des pneus, ce sont les particules des plaquettes de frein les choses comme ça et donc là on oublie que même un moteur hyper propre la voiture elle émet des polluants donc il y a tout ce contexte que les gens ignorent on en parle très peu. Donc je viens de faire un bilan relativement négatif finalement disons que quel que soit la technologie qu'on va utiliser, bah se déplacer continuera d'une manière ou d'une autre à générer de la pollution. Alors qu'est-ce qu'on a essayé de mettre en place un moment donné on a eu l'idée du LPG. Alors l'idée du LPG, c'était assez pratique dans la mesure où le LPG finalement on récupère des gaz qui sont des gaz qui finalement sont des résidus entre guillemets du raffinage du pétrole donc au lieu de les brûler on les utilisait. Donc c'était mieux parce que finalement on utilisait sur une masse de pétrole brut on utilisait une partie que d'habitude on n'utilisait pas, mais ça reste une énergie fossile. Alors aujourd'hui, on reste avec maintenant des autres idées en disant on va produire effectivement les gaz entre guillemets propre et c'est tout le débat qu'on a et que tu as que tu as entamé dans ton mémoire. Mais avec aujourd'hui de toute manière dans la technologie que moi je connais le mieux, ce sont les technologies qui ne sont pas des technologies à combustion. Tu es certain qu'il y a des moteurs à hydrogène qui sont des moteurs à pistons ?

Thomas : Oui il y en a. Je peux essayer de les retrouver et vous envoyer par e-mail après mais oui il y a des moteurs qui le sont.

Pr. B. Jourquin : Ok, moi je connaissais l'histoire des piles à combustible.

Thomas : Mais je pense que le projet, en fait ils ont plus ou moins abandonné en fait ce projet d'utiliser l'hydrogène comme dans un moteur à combustion classique. Le projet est plus ou moins abandonné. Maintenant je sais que ça a été utilisé ça même utilisé il y a longtemps, mais certaines personnes mettaient du coup des bombonnes d'hydrogène pour alimenter leur moteur à combustion.

Pr. B. Jourquin : Oui dans ce sens-là. Mais ici l'idée c'est plutôt de produire l'hydrogène. L'idée, c'est la pile à combustible. Si maintenant, on produit de l'hydrogène à l'ancienne c'est aussi un processus qui est polluant. Donc l'idée, c'est justement d'utiliser l'hydrogène parce qu'il y a une possibilité de le produire entre guillemets plus proprement. Et le débat aujourd'hui, il est là et à ma connaissance en tout cas ce sont à chaque fois des technologies qui sont liées à des piles à combustibles.

Thomas : Il me semble qu'il y a quand même un rendement qui est vraiment inférieur mais alors le coût de développement du véhicule est quand même aussi inférieur et du coup je pense que c'est pour ça aussi qu'ils ont abandonné le projet, c'est à cause du fait que le rendement d'une voiture à combustion roulant à l'hydrogène est extrêmement faible comparé à...

Pr. B. Jourquin : Oui, c'est possible mais je ne connais pas.

Thomas : Alors au niveau de la production d'hydrogène, je pense si je ne me trompe pas, il y a 90% qui est produit du coup par reformatage de l'hydrogène et dont le CO₂ créé par cette technique n'est pas enfui. Il y a je crois 8% qui utilise la même technique mais qui capte le CO₂ pour l'enfuir dans le sol. Et alors, il y a que 2% de de l'hydrogène produit qui est produit par l'électrolyseur je pense.

Pr. B. Jourquin : Je ne sais pas, franchement ce sont des questions beaucoup plus techniques dont je n'ai vraiment pas besoin dans mes recherches, donc je ne sais pas.

Thomas : Ok.

Pr. B. Jourquin : Il faudrait il faudrait aller voir du côté de l'EPL par exemple.

Thomas : Oui, vous auriez un éventuellement un professeur que vous connaîtriez qui serait...

Pr. B. Jourquin : Non pas comme ça, pas immédiatement.

Thomas : Je regarderai alors. J'avais vu un professeur qui avait écrit un article ou en tout cas qui avait été interviewé dans Trends-Tendances au niveau du moteur à hydrogène mais j'ai oublié le nom mais je l'ai noté mais je ne l'ai plus en tête.

Pr. B. Jourquin : Quelqu'un de Louvain ?

Thomas : Oui qui est à Louvain. J'essaie de le retrouver, c'est monsieur Joris Proost.

Pr. B. Jourquin : Je ne le connais pas.

Thomas : Je vais demander alors, et alors il y a monsieur Francesco Contino et Hervé Jeanmart.

Pr. B. Jourquin : Oui.

Thomas : Je sais qu'ils sont plus spécialisés dans tout ce qui est...

Pr. B. Jourquin : Ce sont des professeurs de l'ULB ça ?

Thomas : Ce sont des professeurs qui ont été renseignés par mon frère qui est en EPL à Louvain.

Pr. B. Jourquin : Oui c'est possible, je pense qu'il donne cours, oui c'est possible. Moi je ne suis pas ingénieur, oui de gestion au départ donc au niveau technologique ce n'est pas, moi je suis plus-tôt dans des modèles mathématiques de simulation de fluide des choses comme ça. Mais vraiment sur la technique elle-même de ce type de véhicule, je ne me suis pas vraiment intéressé, je me suis plus intéressé à un moment donné aux voitures électriques parce qu'on m'interroge souvent dans la presse sur les questions de mobilité. Donc, il fallait que je m'y connaisse un minimum mais sur les moteurs d'hydrogène franchement. Je suis tombé sur cet article par hasard en fait ce week-end sur la libre et donc ça sera peut-être intéressant pour toi d'aller discuter avec les gens du Colruyt.

Thomas : Oui, c'est prévu. Il y a aussi Volvo vous m'aviez renseigné éventuellement d'aller voir Volvo ou pas en fait.

Pr. B. Jourquin : Je t'ai parlé de Volvo parce que je sais qu'en termes de souplesse dans leur supply chain, ils sont assez forts mais je ne sais pas du tout. Je n'en sais rien.

Thomas : Je sais qu'il y a les bus Van Hool qui utilise la pile.

Pr. B. Jourquin : C'est aussi avec une pile à combustible.

Thomas : Oui, c'est de nouveau la pile à combustible. Je sais qu'éventuellement Toyota avait essayé ça mais plus pour des modèles prototype de course et utiliser l'hydrogène comme carburant du coup d'un moteur à combustion. Mais c'est vrai que je

ne vois pas de modèle de voiture ou de de camion qui utiliseraient la technologie hydrogène autrement qu'avec une pile à combustible.

Pr. B. Jourquin : Moi non plus.

Thomas : Alors, je vais voir si j'ai encore éventuellement une dernière question. D'un point de vue de tout ce qui est sécurité autour de l'hydrogène est-ce qu'il y a une crainte ?

Pr. B. Jourquin : Franchement je n'en sais rien. Ce que je vais pouvoir répondre, c'est que la crainte du gaz existe donc quand on stock vraiment du gaz c'est un problème qui peut se poser donc à un moment donné on avait déjà interdit des voitures au LBG de ce garer dans des parkings souterrains etc. Maintenant, si on est dans une logique de piles à combustibles, la quantité d'hydrogène d'abord n'est pas énorme non plus, vu qu'on la consomme au fur et à mesure.

Thomas : Alors c'est le même principe pour le moteur à LPG où non. C'est que l'utilisation du gaz se consomme au fur et à mesure tout de même.

Pr. B. Jourquin : Non dans les LPG tu as un réservoir de gaz. A mon avis dans un véhicule avec pile à combustible la quantité de gaz présents à un instant T restera relativement faible parce qu'on le produit pour l'utiliser en même temps.

Thomas : Oui je vois parfait. Merci beaucoup !

9) Appendix 9: Transcript of interview 2 (Pr. Hervé Jeanmart)

Thomas : Qu'est-ce que vous pensez de l'idée d'un d'inclure le moteur à hydrogène et quand je parle de moteur à hydrogène, fonctionnellement à l'hydrogène, ce soit le moteur à combustion ou le moteur au fuel cell, dans le cadre de de l'automobile, toujours dans cette optique de réduire les émissions de carbone. Qu'en pensez-vous ?

Pr. H. Jeanmart: On a tendance à quelque part opposé où mettre en concurrence le moteur électrique d'un côté et les applications de l'hydrogène de l'autre. Je pense que c'est une erreur à l'échelle globale alors peut-être dans un pays comme la Belgique on peut envisager ce genre de choix assez radical, dans d'autres pays ils n'auront pas la possibilité de le faire parce qu'on va se retrouver dans un système énergétique où on aura différentes sources d'énergie, d'une part de l'électricité qui sera abondante à certains moments mais qui sera quand même plus critique à d'autres voir quand je dis abondante, c'est surabondant. Et une des idées c'est de la stockée sous forme d'hydrogène. Alors, on aura 2 options une fois qu'on aura l'hydrogène en main, c'est soit de refaire de l'électricité mais avec un certain rendement soit je vais utiliser l'hydrogène tel quel est. Quand je parle d'hydrogène, c'est l'hydrogène où forme dérivée de l'hydrogène forme simple dérivé l'hydrogène. Alors, il faudra faire intervenir la nuance sera utile mais donc de l'hydrogène, je peux relativement facilement faire de l'ammoniac. Ce n'est pas un combustible mais c'est utilisé comme combustible. Et puis si j'ai du carbone mais encore faut-il que j'aie du carbone je peux me diriger vers du méthane ou du méthanol. Et donc les applications vont être un peu différentes. On va se retrouver dans des systèmes énergétiques où les 2 secteurs principaux seront effectivement l'électricité d'un côté qui sera majoritaire mais également des formes stocker d'électricité sous forme de gaz et d'hydrogène. Donc, on va avoir la coexistence d'utilisation de ces 2 vecteurs aux différentes applications. Où consomme-t-on l'énergie ? Au niveau domestique et industriel pour tout ce qui est utilisation d'électricité pour l'électricité, donc tout ce qui est éclairage ordinateur etc. On en a besoin pour le chauffage et on en a besoin pour la mobilité. C'est un peu les 3 grands postes globalement. L'électricité reste, voilà pour s'éclairer je ne vais pas mettre une pile à combustible dans mon ordinateur, donc autant rester sur l'électricité. Pour le chauffage, je ne suis pas sûr que de faire rentrer de l'hydrogène chez les gens soit une super idée ou l'ammoniac ce genre de choses. Voilà, si sont des gaz qui circule dans des réseaux ça peut se faire mais voilà il y a quand même des difficultés. La mobilité s'y prête très bien et donc pour moi je ne vois pas d'impossibilité technique ou je dirais de freins à part politique pour que l'on puisse développer des véhicules qui sont alimentés par l'hydrogène au travers, alors c'est là qu'il faut faire la nuance, si c'est de l'hydrogène, ce sont des piles à combustible. C'est une technologie qui est déjà assez ancienne et on a l'impression que c'est tout nouveau, mais des véhicules à l'hydrogène, piles à combustible, il existe depuis un certain nombre d'années. Alors, c'est peu confidentiel mais la technologie est maîtrisée. Si on va à l'écoute d'autres combustibles donc hydrogène et ammoniac, c'est plutôt piles à combustible, si je viens du méthane méthanol, là plutôt moteur à combustion interne c'est à dire dérivés des moteurs actuels. Donc pour moi, on va se retrouver confronté à effectivement différentes sources d'énergie et différents besoins et tout va coexister alors la question à se poser c'est pour qui pour quoi dans quelle proportion et ça c'est très difficile à estimer parce que ça dépendra véritablement de la politique énergétique n'ont pas d'un pays mais d'un ensemble de pays comme l'Europe. Parce que, s'il y a une solidarité renforcée en termes d'échanges d'électricité. L'électricité sera plus importante, et s'il n'y a pas cette solidarité, on risque de se tourner localement vers le stockage sous forme d'hydrogène ou l'importation d'hydrogène de manière plus abondante. Donc je dirais que la répartition sera un peu différente et les moteurs pile à combustible auront plus de sens à ce moment-là. Voilà, moi je crois à la coexistence des 2 et je suis contre les politiques actuelles qui disent : « à on va faire de l'électricité parce que c'est bien, ça ne fait pas de CO2 », et donc tout le monde doit faire l'électricité. Je pense que c'est une erreur, c'est comme si on avait

dit : « regardé on a du mazout, tout le monde se chauffe au mazout, on ne met pas de gaz ». Il faut se projeter en arrière, le gaz a beaucoup d'avantages dans les villes, et donc on se serait privé d'une solution qui avait de l'intérêt à certains endroits. Et dire, on fait uniquement électricité c'est se priver de pistes qui pourraient soulager en fait la problématique, donc en Belgique on risque vite de se rendre compte que ce n'est pas nécessairement le choix le plus pertinent.

Thomas : C'est un petit peu ce que j'ai pu comprendre dans toutes mes lectures et dans les interviews que j'ai déjà eu auparavant. Mais alors, quand vous parliez de dérivés de l'hydrogène dans les moteurs sous forme de méthane, de méthanol. Le problème, c'est que ce combustible émet quand même des gaz à effet de serre.

Pr. H. Jeanmart : C'est toute la complexité. Alors, il y a 2 éléments pour lesquels on parle de ces 2 raisons, une la raison pour laquelle on parle de ces combustible-là. C'est que l'hydrogène est très difficile à stocker. Ce n'est pas difficile à stocker, ce n'est pas complexe dans le sens, on n'arrive pas à le stocker, non. Sa densité énergétique est faible. Si je veux avoir une économie qui est en bas en partie basé sur l'hydrogène, je vais devoir être capable de stocker l'hydrogène dans des formes plus compactes qu'à l'heure actuelle. Il y a des études qui sont faites actuellement pour essayer de stocker l'hydrogène à l'intérieur de matériaux solides, donc en chargeant les matériaux solides en faisant globalement de l'absorption. Ça c'est une manière de faire, on peut le mettre sous pression simplement et on le fait, on va jusque 700 bars donc pour les véhicules notamment on parle de 700 bars ce qui n'est pas négligeable mais c'est faisable on sait mettre de l'hydrogène à 700 bars. Et puis une voie, c'est de dire, si l'hydrogène en plus il ne sera pas totalement, pas totalement mais quand même en partie importée. Si je dois l'apporter bateau et que je mets de l'hydrogène sur un bateau, il va se déplacer avec peu de masse d'hydrogène donc ce n'est pas très rentable. Les gens voudront d'autres formes qui sont plus aptes au stockage. Et la plus naturelle, c'est l'ammoniac et donc c'est pour ça qu'on parle d'ammoniac parce qu'il ne faut pas de carbone. Donc, si j'ai de l'hydrogène et de l'air je peux faire de l'ammoniac. Je n'ai pas dit que c'est simple mais je peux faire de l'ammoniac. Et donc, on fait de l'ammoniac qui se stocke sous forme liquide, c'est comme du LPG. On peut faire l'analogique avec le LPG même si ce n'est pas parfait. Et puis l'étape suivante, c'est de se dire que l'ammoniac il faut avoir travaillé avec pour savoir que ce n'est pas quelque chose qui est simple, il vaut mieux passer sur des vecteurs que l'on maîtrise bien. À savoir le méthane et le méthanol, mais il faut du carbone. Parce le carbone on va le chercher où ? Là c'est la grosse question est-ce qu'on va chercher dans des sources concentrées qui existeront encore pendant un certain nombre d'années avant d'être encore par la suite comme la sortie de centrale thermique ou bien est-ce qu'on va le chercher dans l'atmosphère. C'est une question économique, on peut prendre du CO₂ dans l'atmosphère pour l'utiliser pour faire du méthane, méthanol avec de l'hydrogène, c'est faisable donc les technologies existent elles ne sont pas encore, je dirais à une maturité telle qu'on puisse les diffuser, mais les essais sont faits etc. C'est un coup et donc ce coût un impact le coût de l'hydrogène et donc c'est toute la question du stockage qui est posée et effectivement le carbone quoi qu'il arrive au bout du compte, si je l'ai dans le moteur il est diffusé dans l'atmosphère. Donc, il sera perdu il faudra le récupérer dans une boucle et donc le capter dans l'atmosphère.

Thomas : Voilà, je crois qu'on a fait le tour, je vais aller un petit peu plus dans les détails dans la suite. Il y a une chose que j'ai vue, c'est que dans tous les modèles de voitures qu'on propose dans les nouveaux modèles. Il y en a énormément qui sont électriques, il y en a très peu qui sont équipés de piles à combustible et du coup fonctionnant à l'hydrogène. Et du coup, tous les moteurs de toutes les nouvelles voitures que j'ai pu voir qui sortait ou tous les projets de voiture roulant à l'hydrogène, en fait sont basés que sur la technologie de la pile à combustible et pas du tout sur la voiture à combustion d'hydrogène. J'ai déjà quelques éléments de réponse mais pourquoi est-ce que on a abandonné cette piste de voiture à combustion à l'hydrogène qui semble quand même être beaucoup plus simple niveau technologique et beaucoup plus simple d'application que la pile à combustible qui relèvent quand même de nouveau moteur à créer de nouvelle chaîne d'assemblage à créer etc.

Pr. H. Jeanmart : Alors non, il y a une vingtaine d'années, on a développé des moteurs à combustion interne à l'hydrogène, c'est faisable. Donc on peut faire des moteurs à combustion interne on se dirait tiens pourquoi est-ce qu'on ne fait pas. Ce n'est pas nécessairement simple c'est un combustible qui est un peu complexe au niveau de ses propriétés, il est quand même très différent de ce que l'on connaît et donc il y a un challenge à créer un moteur mais ça c'est fait effectivement avec des technologies très proches de celle que l'on connaît et donc avec des coûts qui étaient proches. Par ailleurs, on sait que l'on peut faire des piles à combustible et notamment l'hydrogène s'y prête très bien parce que c'est une molécule assez simple ce qui fait que ça se prête bien à ce type de devoirs chimiques. Et l'avantage principal de la pile à combustible, il n'y a pas 36 éléments, l'élément principal c'est le rendement. Ces installations pile à combustible ont un meilleur rendement que le moteur en moyenne qu'en fait des parcours, je ne parle pas de puissance de rendement maximum. Je parle bien de rendement moyen, la pile à combustible à un bien meilleur rendement que la pile à combustion interne. Donc, on peut espérer faire une économie de carburant ce qui permet quelque part de compenser le coût supplémentaire de l'installation. Alors là où j'ai plus de mal à donner des chiffres, c'est entre, alors il y a les rendements que l'on annonce aujourd'hui comme étant obtenus par rapport à ceux qui sont réellement obtenus, et la crédibilité des rendements qu'on annonce demain, sachant que nous avons des rendements très élevés mais ce sont des technologies qui sont à pile à combustible. Mais qui deviennent plus complexes que celles que l'on met en œuvre aujourd'hui, et qui parfois sont à ce point complexes qu'on se dit oui c'est faisable dans certaines niches, on pourra le faire mais ça ne va pas se développer d'une manière, je dirais large parce qu'il y a une question de coût de mise en œuvre etc. Et donc, la pile combustible a un très bon rendement, c'est sans doute l'argument principal. On dit que ça ne fait que de l'eau mais à priori, si je brûle de l'hydrogène dans un moteur ça ne fait que de l'eau aussi. Le seul inconvénient c'est que j'aurai des NO_x, donc l'avantage de la pile à combustible c'est que sa jette de l'eau mais ça ne fait pas non plus de polluant. Donc le rendement et les polluants le NO_x, c'est le seul qu'on pourrait mettre en avant comme polluant d'un moteur combustion interne classique avec de l'hydrogène, donc rendement et polluant mais qui sont quand même les 2 éléments critiques, donc c'est un peu logique,

l'inconvénient majeur c'est le coût du véhicule. Donc le coût d'achat de la pile à combustible est beaucoup plus élevé que celui d'un moteur. Parce que les matériaux sont des matériaux catalytiques, platine etc. Qui ont un coût au kilo qui est énorme et donc, il en faut des quantités relativement importantes. D'où une question sur non pas sur notre capacité à aller chercher tôt ou tard ces matériaux dans le sol parce qu'ils sont là et à quel coût, sachant qu'il en faudra beaucoup et que ce ne sont pas les plus abondants et donc si on se retrouvait des piles à combustible excessivement cher ça va affecter la capacité à mettre en œuvre cette technologie. Et là, je dois avouer que je n'ai pas assez de connaissances sur les enjeux sur les matériaux qui sont utilisés pour vous dire, ça va coïncider dès que l'on aura, mettons ça va coïncider à partir de 1%, 10%, 50%. Je n'ai aucune idée, ou ça va coïncider, quand ça va coïncider au niveau du déploiement de cette technologie- là. Mais il y aura un train tôt ou tard parce que les prix ne vont pas devenir exorbitant, en fonction de l'utilisation du véhicule on pourra juger. Sinon moi j'ai conduit alors c'est pour la petite histoire, j'ai conduit mais juste en démonstration, un véhicule hydrogène c'était en 2004 je crois. Donc pile à combustible hydrogène en 2004 et je sais plus la marque, je pense que c'était Volvo qui faisait tout un tour d'Europe et qui montrait la faisabilité donc ce sont des choses qui sont quand même développées depuis un certain temps. Enfin, pour avoir un véhicule qui ressemble à n'importe quelle voiture mais je sais plus si c'est Volvo.

Thomas : Je sais que Volkswagen avait lancé des moteurs à hydrogène mais à combustion d'hydrogène et non à piles à combustibles.

Pr. H. Jeanmart : La pile à combustible, c'est l'électricité et après vous avez des moteurs électriques et donc vous le sentez quand vous conduisez. Vous savez si c'est un moteur électrique qui vous drive. À l'époque, on faisait des bus pile à combustible. En fait au début des années 2000, il y a eu beaucoup d'interrogations sur les carburants parce que le prix du pétrole était élevé à ce moment-là, peut-être bien que ce fût juste avant, peut-être une conséquence d'un pays, il faut faire autre chose et donc les piles à combustible était étudiée de manière assez large pour les applications mobiles qui vous intéresse de mobilité qui vont être étudié assez largement à cette époque-là. L'intérêt est un peu tombé sur cela mais il y a eu un pic de recherche et le développement au début des années 2000 et avant sur ces véhicules-là. On n'est pas en train de dire, on va mettre cette pile non ? On va réfléchir à ça, les gens y ont déjà réfléchi et ils ont déjà fait pas mal de chose. Alors aujourd'hui, le seul qui en vend de manière un peu significative, c'est Toyota. Mais Toyota est un des plus grands constructeurs mondiaux, donc lui peut se permettre sur l'ensemble de son marché d'avoir une distribution suffisante pour voir une ligne qui fait des voitures.

Thomas : Il y a Toyota, Hyundai qui a sorti aussi une voiture et alors je il y a BMW qui lance un projet, je pense, en coopération avec Toyota sûr la BMW x 5 en fuel cell.

Pr. H. Jeanmart: Pour moi ça a un intérêt d'avoir des véhicules à piles à combustible dans la mobilité.

Thomas : Je vais passer à la question suivante. Dans les grands défis que l'on a au niveau de l'hydrogène, c'est la création d'hydrogène alors pour le moment la création d'hydrogène de ce que j'ai pu lire, c'est de l'hydrogène gris qui est créé 95%. C'est à dire que c'est un hydrogène qui émet quand même du carbone. Je pense que y a une très faible partie qui est de l'hydrogène bleu qui est au moment de la création de l'hydrogène, c'est de nouveau de l'hydrogène qui émet du CO2 mais ce CO2 est capté et enfoui dans le sol et alors il a une très faible partie, c'est 2-3% qui est fait à partir d'électrolyseur qui sont alimentés du coup par de l'électricité qui est « divers ». Il y a même l'hydrogène jaune qui du coup créé par des électrolyseurs mais alimenté par des centrales nucléaires. La question était, est ce qu'on est capable de créer suffisamment d'hydrogène de manière ouverte d'ici 2030-2050 qui sont des horizons peut être large d'un point de vue d'être humain mais qui sont assez court d'un point de vue industriel, il me semble. Toujours dans ce but d'être carbone neutre ou d'atteindre un le 0 carbone. Est-ce qu'on est capable d'arriver à produire uniquement de l'hydrogène vert pour alimenter les voitures, puisque ça n'a aucun sens de commencer à alimenter ces voitures en disant qu'elles sont carbone neutre, alors que l'hydrogène créé énormément de carbone.

Pr. H. Jeanmart: Il y a beaucoup d'éléments dans votre question. Le premier peut être, pour me donner un éclairage, c'est que si je veux en 2035, 2030, 2035, 2040 avoir de l'hydrogène verte, on ne va pas attendre d'avoir des électrolyseurs en suffisance et puis on démarre donc en fait on doit l'anticiper et l'anticipation veut dire que l'on va développer une filière hydrogène fossile. Qui existe aujourd'hui pour des applications d'hydrogénation principalement de produits pétroliers etc. Donc, l'hydrogène utilisé industriellement est très peu utilisé dans les véhicules mais on pourrait effectivement augmenter la production d'hydrogène à partir de méthane, de gaz naturel en fait. C'est du fossile, on rejette du CO2, pour se dire OK mais on va utiliser cet hydrogène ça permet de développer la filière industrielle les pompes à hydrogène que je peux alimenter, les véhicules enfin tous ces éléments-là, et petit à petit je substitue. Donc, je démarre la filaire, je la fais augmenter puis je substitue petit à petit, une fois qu'elle est mise en place et tout ce que je prends en vert c'est ce que je dois plus faire en fossile. Donc, petit à petit la proportion change et j'arrive à 100% de vert. Donc ça ce serait un petit peu la vision que l'on aurait du développement industriel de la pile à l'hydrogène. Alors, la question qu'il faut se poser c'est de combien d'hydrogène aurais-je besoin en 2035, 2040. Parce que ça ne sert à rien développer une filière qui représente, j'exagère 100% de la consommation, si in fine je n'ai besoin que de 20% des véhicules à l'hydrogène dans mon système énergétique. Donc la grosse question, c'est de combien d'hydrogène aurai-je besoin à l'horizon pour la transition et c'est sur cette base qu'on va développer la filière. Si c'est un marché de niche nécessaire, les choses qu'on fait en très petite quantité mais qui sont strictement nécessaires pour la société, on pourrait très bien dire que j'ai besoin de véhicules à l'hydrogène mais ça peut représenter peut-être 10% du parc. Mettons, j'ai 10% du parc des véhicules hydrogène dont le rôle, c'est dire mais je ne sais pas tout alimenter à électricité, j'ai besoin d'autre chose donc voilà ces 10% permettent de soulager et de donner un équilibre global au système. C'est peut-être 10%, mais si c'est 10%, il

faut développer une filière pour 10% de la mobilité au 10% des véhicules. C'est à dire qu'on doit plutôt réserver ça à la mobilité qui est, je dirais captif, c'est à dire les véhicules d'entreprise de transport, les bus, les taxis à tous ces éléments qui quelque part peuvent avoir un dépôt ou ils vont recharger en hydrogène donc on ne doit pas développer toute une filière sur toutes les rues, enfin dans toutes les stations-services etc. Si maintenant c'est 50%, il faut commencer avec des stations partout, c'est un peu là en fait ou on coince aujourd'hui et on ne sait pas. D'un côté on dit filière hydrogène et on promeut la filière hydrogène et de l'autre en Belgique au dit voiture électrique pour tout le monde. De manière très large les bus sont électriques, la STIB ne veut plus entendre parler d'autre chose que le bus électrique. Et donc, on est en train de nous dire il faut développer une filière hydrogène et de l'autre la mobilité on dit c'est purement électrique. Alors, on dit à quoi va servir l'hydrogène ? A autre chose. Alors, oui mais peut-être qu'il pourrait être utile dans la mobilité, donc en fait aujourd'hui on ne voit pas clair et c'est un énorme problème. Du coup, les messages sont parfois contradictoires où ne sont pas cohérents. Il n'y a pas une vision globale de ou on sera en 2050 bien établi, donc on ne sait pas ce que l'on va faire. Et c'est important parce que si vous dites aux gens acheter des véhicules hydrogène admettons où essayer de nous aider à lancer la filière ou vous aide, on vous donne des primes pour les véhicules mais il faut mettre des stations-service. Si je développe toutes les stations-service hydrogène et que 10 ans après je mets ça à la poubelle, les gens ne vont pas être très heureux parce que ça coûte quand même assez cher. In fine, c'est quand même du gaspillage. Donc, on ne peut pas se planter, donc ce n'est pas évident de savoir que faire comme politique, je pense que ça joue beaucoup sur le fait de, est-ce que on doit développer fort ou pas l'hydrogène fossile ou bien on doit plutôt dire qu'il y en a déjà une partie, il y a quelques taxis et quelques brols ça suffit ils ne toucheront pas plus. Donc c'est ça qu'on ne s'est pas très bien jusqu'où il faut pousser. Mais selon moi, si on veut faire de l'hydrogène vert de manière significative, on devra passer par de l'hydrogène fossiles dans les 10 prochaines années jusque 2030 voir 2035 hydrogènes fossiles de manière substantielle. Autre élément, c'est est-ce qu'on ne pourrait pas simplement se passer de l'hydrogène, est-ce que l'on ne pourrait pas faire toute électrique. Parce que l'hydrogène ce sont des tuyaux, c'est complexe ce n'est pas nécessairement quelque chose que l'on souhaite. Et là intervient la notion de stockage énergie électrique puisque si j'ai un système renouvelables électriques, je dois stocker l'énergie. Les batteries très bien pour stocker des petites quantités d'énergie, les batteries sont imbattables. Et quand je veux stocker des très grosses quantités, les batteries ça coûte très cher. Au départ la présence d'hydrogène dans le système énergétique, ce n'est pas parce que je le fais du fossile et que ça fait un tout, non c'est juste parce que on imagine qu'à l'horizon 2035-2040 et au-delà je devrais stocker de l'énergie électrique de manière importante et que le pompage-turbinage, ce n'est pas assez, les batteries ce n'est pas assez, le stockage air comprimé ce n'est pas assez et que quand j'élimine tout ce qui n'est pas bon, il me reste le stockage sous forme de molécules via électrolyseur. C'est ça aussi qui pose question, je vais devoir stocker l'énergie électrique, j'aurai une certaine quantité d'hydrogène mais combien. Et deuxièmement, il y a sans doute des pays qui vont se lancer dans la production d'hydrogène de manière intensive et c'est eux qui poussent aussi au développement. Ils vont pousser pourquoi, parce qu'eux sont dans une situation énergétique favorable, ils vont produire énormément localement en grand excès, par rapport à leurs besoins. Parce qu'ils ont beaucoup de soleil, parce qu'ils ont du vent, les circonstances sont intéressantes pour eux. Et puis, ils vont se retrouver avec beaucoup d'électricité, alors il y a deux options, soit je tire une ligne électrique, soit je transporte autrement. Les lignes électriques ça coûte très cher d'installer des lignes électriques sur des milliers de kilomètres. Il vaut mieux mettre des bateaux et donc prendre l'électricité faire de l'hydrogène ou de l'ammoniac mettre sur des bateaux l'amener au Port d'Anvers et soit le reconverter en électricité, soit l'utiliser. Et là, la question se pose qu'est-ce que je fais avec l'hydrogène que j'emporte. Et si je n'ai pas envie de l'hydrogène, alors converti en électricité il y a des pertes, il vaut peut-être mieux directement le diffuser dans les véhicules et faire des véhicules à l'hydrogène. La question du véhicule hydrogène est une question qui est au cœur, la mobilité consomme énormément d'énergie, la mobilité serait un petit pourcentage du système énergétique. On n'en tiendrait pas compte et on dirait on peut réfléchir indépendamment mais c'est un gros morceau, c'est pour ça qu'on ne peut pas dissocier le type de moteur que l'on va mettre du système énergétique dans lequel on sera.

Thomas : Mais ce que j'ai pu voir, c'est que même tous les secteurs qui émettent des gaz à effet de serre avaient tendance à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre est le seul secteur dont les émissions de gaz à effet de serre augmentent depuis les accords de Kyoto, en fait, c'est uniquement le secteur de la mobilité qui augmente, dans les rapports que j'ai pu lire.

Pr. H. Jeanmart : La mobilité est un sujet très sensible, parce que l'on a une mobilité qui est énorme et qui consomme énormément d'énergie. On sait que c'est un secteur qui est très sensible, puisque réduire la mobilité, les gens le perçoivent comme étant une atteinte à leurs libertés. Donc, c'est un sujet qui est politiquement très sensible, donc dans tous les plans que l'on voit qui sont émis par des organes relatifs à l'état, je ne parle pas de plan par des citoyens ou par des organismes indépendants mais par l'état la mobilité augmente donc en fait ils sont sur une tendance d'augmentation de mobilité. On se demande comment on pourrait plus se déplacer que ce qu'on fait déjà, une augmentation de la mobilité parce que ça va dans le sens du vent par rapport aux citoyens et donc effectivement la mobilité a augmenté, augmente est un très gros consommateur d'énergie et donc a un impact considérable sur le système énergétique et réciproquement, le système énergétique a beaucoup d'impact sur le type de mobilité. Alors à l'échelle de la Belgique, on peut encore avoir des effets de bien par exemple la prépondérance des moteurs diesel en Belgique étaient une situation très particulière liée aux taxations des véhicules, aux taxations du carburant, une série de d'éléments ce qui fait qu'en Belgique vous avez beaucoup de véhicules diesel mais à l'échelle mondiale si vous faites ça il y a un problème. Donc la Belgique peu individuellement prendre des décisions qui n'aurait pas de sens à une échelle plus large et là je pense que pour les véhicules de demain, elle n'a pas trop le choix. Elle pourrait dire je fais uniquement l'un ou l'autre, je vais expliquer pourquoi elle ne peut pas faire ça mais elle sera tributaire de ce qui se fait ailleurs, si ailleurs dans l'Europe tout le monde fait des piles à combustible, la Belgique aura des véhicules piles à combustible, le marché là. Si ailleurs dans le monde et en Europe ont fait que des véhicules électrique la Belgique aura des véhicules électriques. Et donc, la Belgique sera plutôt spectatrice et utilisatrice que créatrice de tendances. Parce qu'on n'a pas la puissance. On est de très petits consommateurs

donc on suit ce que les autres décident. Mais là où ça va coïncider pour la Belgique, c'est que l'on ne se pose plus la question de savoir si on aura assez d'électricité pour alimenter tous les véhicules, alors c'est vrai qu'ils consomment beaucoup mais on produit aussi beaucoup d'électricité donc ce n'est pas tellement dangereux. Les gens ne vont pas arrêter de se chauffer, de s'éclairer ou d'utiliser leurs ordinateurs parce qu'il faut aller mettre de l'électricité sur le véhicule. Donc en Belgique, on risque d'avoir une situation qui est un peu particulière qui est que l'accès à l'électricité sera quelque part contraint. Ce qui fait que la Belgique devra importer comme elle le fait déjà une grosse partie de son énergie. Et si elle apporte son énergie elle pourra apporter l'électricité mais quantité limitée, parce que les lignes à hautes tensions, on ne peut pas en mettre partout à toutes les frontières. Vous avez déjà vu dernièrement on a parlé de ces lignes à haute tension dans la région du Hainaut, vous avez entendu les levées de boucliers pour cette ligne à haute tension qui est nécessaire pour les éoliennes. Donc, ce n'est pas évident de construire des lignes électriques, donc la Belgique ne va pas être capable d'approvisionner toute la file électrique qu'elle souhaiterait. Il va falloir apporter par ses ports ou par ces réseaux gaziers des vecteurs stockés comme l'hydrogène ou autre. Et donc on va se retrouver en Belgique avec de l'énergie sous forme de gaz et alors on aura deux filières à ce moment-là. Je dis OK je prends l'hydrogène je fais de l'électricité je mets ça dans les véhicules mais avec un rendement parce qu'il faut d'abord convertir l'hydrogène en électricité, stocker cette électricité dans le véhicule puis la réutiliser. Ou bien dire, je mets directement une pile à combustible sur mon véhicule et là on n'a pas tranché, comme vous voyez les politiciens ne se rendent pas compte comme, quand vous interdisez les véhicules thermiques, je pense qu'il se rend pas vraiment compte du fait que il risque de regretter, parce que on n'aura pas les moyens de fournir l'électricité à tout le monde pour leur véhicule donc je sais pas importer, parce qu'on sera sous tension du point de vue du réseau qui va vite montré ses limites le jour où on n'aura pas soleil et vent. Un peu comme aujourd'hui, on s'attend à du soleil au mois de juillet mais il n'y en a pas beaucoup et le vent non plus. S'il n'y a pas de soleil c'est la mort, vous devez alimenter les véhicules écrit dans les circonstances pareil et bien vous n'aurez pas la capacité de le faire. Donc il y a des enjeux qui sont autres que purement techniques, enfin c'est technique mais c'est un aspect plutôt de logistique et d'approvisionnement en énergie au bon moment. Tout ça joue, vous voyez que c'est pour ça que ces filières de développement sont passées d'abord par du fossile et puis du renouvelable. C'est excessivement compliqué.

Thomas : Ça je l'ai un petit peu remarqué.

Pr. H. Jeanmart : Pour moi ça ne m'est pas et que du contraire ça renforce la pertinence de garder les 2 filières pendant au moins un certain temps, mais pas nécessairement accessible à tout le monde, je parlais plutôt de choix de captive. De maintenir des technologies, et les constructeurs le font, l'électricité d'un côté, hydrogène et pile à combustible de l'autre, et alors une 3e voie thermique mais qui est déjà bien développée qui est connue parce qu'il y aura encore un centre de véhicules qui seront encore des véhicules thermiques. On n'est pas obligé de tout supprimer et dans certaines applications c'est intéressant d'avoir des véhicules thermiques. Quand, j'ai besoin de puissance sur de longues distances comme les camions etc.

Thomas : D'ailleurs lorsque j'ai discuté avec quelqu'un de chez Air Liquide, quelqu'un qui a pas mal de relations avec le groupe Volkswagen m'expliquait que pour lui il ne voyait pas d'avenir ou alors très peu d'avenir pour l'hydrogène dans l'automobile. La voiture de monsieur tout le monde, en revanche tout ce qui est application pour des camions où là la batterie en elle-même coûte encore extrêmement cher pour le moment à beaucoup plus de pertinence parce que c'est beaucoup plus facile de stocker de l'électricité sous forme d'hydrogène sur un camion pour qui puisse parcourir des longues distances que sur une voiture de monsieur Madame monsieur tout le monde. D'autant plus, qu'un camion est censé faire des longues distances et ne pas s'arrêter trop souvent et du coup l'idée de pouvoir recharger ou quasi aussi rapidement qu'on le fait à la pompe est d'autant plus pertinent. La même chose pour l'application à des taxis comme vous avez dit où certains utilitaires.

Pr. H. Jeanmart : Je pense que la majorité des gens qui ont une utilisation de la mobilité sur des petites distances et distance raisonnable etc., une voiture électrique convient très bien je suis tout à fait d'accord donc c'est clair que la majorité des gens auront un véhicule électrique. Donc ça, je pense que la mobilité sera principalement électrique donc ça, ça ne fait pas de doute parce qu'au niveau européen ce sera le cas et donc la Belgique va suivre même si ses circonstances ne sont pas les plus favorables. Et c'est juste que l'hydrogène sera plutôt dans ce que j'appelle les fautes captives ou autres, utilitaires ce genre de chose ou le besoin de « plein » rapide est important. Mais pour les camions, je suis un peu plus modéré sur l'hydrogène, parce que ça reste quand même très peu dense énergétiquement et donc on aura des volumes de stockage plus importants, alors on peut concevoir les camions ça se fait de ce point de vue-là mais tout le volume qu'occupe le fuel c'est du volume en moins pour la charge. Et donc, dans ce genre d'application, je ne vois pas qui pourrait s'opposer à ce qu'on aille une étape plus loin et disent : bon on va garder des moteurs à combustion interne, ils ont un très bon rendement donc sur les camions comme ça qui roule à des vitesses relativement constantes sur l'autoroute, les rendements des moteurs sont très bons donc il commence à s'approcher très fort des piles à combustible la différence n'est plus très grande. Et en termes de combustible, si je vais sur du méthane synthétique et cetera ou même du méthane fossile dans ces cas-là on peut les garder. C'est imbattable, il a raison, j'entends ce qu'il dit mais moi j'ai un avis un peu différent, je trouve que c'est pas mal de garder des moteurs à combustion interne pour certaines applications. Ce n'est pas le plus important là où je le rejoins, c'est que l'hydrogène sera toujours plus facile sur les endroits où on a un besoin régulier et important parce que ça évitera de localiser les stations, ça évitera de diffuser de faire des réseaux l'hydrogène, ou de devoir créer des stations dans tous les sens. Et donc, c'est pour ça qu'à la STIB quand ils disent on fait des bus électriques, ils pourraient se dire, je fais des bus hydrogène. Par exemple, à Paris il y a une compagnie de taxi qui fait des taxis à l'hydrogène, elle est assez connue.

Thomas : Oui, c'est en partenariat avec Air Liquide.

Pr. H. Jeanmart : Oui, tout à fait. Donc tout ça ce sont effectivement les meilleurs créneaux pour démarrer et est-ce qu'un particulier aura un véhicule à hydrogène, moi je ne vois pas d'opposition mais ce n'est pas la priorité et donc je suis d'accord les avantages, c'est recharge très rapide par rapport à l'électricité qui demande quand même que ce soit des installations d'une puissance considérable avec des rendements faible soit du temps de chargement qui est assez long.

Thomas : Et alors j'ai encore deux questions, je ne sais plus trop si c'est d'actualité mais on sent quand même qu'il y a une certaine réticence de la part des consommateurs vis à vis de l'utilisation de gaz lorsqu'il s'agit de se déplacer. D'abord, il y a eu un peu de réticence vis-à-vis du LPG et du CNG, mais on remarque qu'il y a toujours une certaine frayeur. L'hydrogène c'est quoi dans la tête des gens, c'est le Zeppelin qui prend feu et tue beaucoup de monde. De ce que j'ai pu lire c'est que l'hydrogène n'est pas spécialement plus dangereux au niveau sécuritaire que ce qui est essence, diesel ou autre moyen de se déplacer enfin ou autre carburant. Je ne sais pas ce que vous en pensez-vous au niveau de la sécurité de l'utilisation de l'hydrogène, a priori, il n'y a pas de problème à ce niveau-là.

Pr. H. Jeanmart : Disons que vous avez le véhicule et puis le réseau, ce qui fait peur, c'est que l'on met de l'hydrogène à 700 bars, les gens ne savent pas ce que c'est. Et 700 bars ce n'est pas rien. Finalement, on a des matériaux pour faire ça ou toute la technologie. Et je dirais que le danger devrait in fine être du même ordre de grandeur que celui d'un véhicule à essence, c'est à dire que si vous avez un problème, une fuite ça s'enflamme. Ça ira plus vite que l'essence mais peu importe les détails, globalement il y a un risque d'embrasement. Mais l'hydrogène brûlant très vite et étant très léger, il y a d'abord une fuite et l'hydrogène partira très vite. Et donc c'est même moins dangereux que l'essence globalement. Je dirais que je mettrai ça en moins dangereux. Si je les classais par ordre de dangerosité, je mettrais le LPG le plus dangereux. Ensuite, l'essence, l'hydrogène et en dernier le diesel étant beaucoup moins volatile. Il y a toujours un risque, il y a aussi le risque du réseau donc ça ce n'est pas négliger, si on a des canalisations ou si on a beaucoup de transport d'hydrogène, beaucoup de camions qui circulent avec de l'hydrogène par pour brûler dans son moteur mais pour l'alimenter dans les stations, on risque d'avoir des accidents plus nombreux. L'électricité, un véhicule qui crame ce n'est pas triste non plus donc ça arrive aussi. Ce n'est pas évident, je ne sais pas si on peut classer sur cette base-là. On aura des critères, oui ça c'est mieux, ça c'est moins bien, ça c'est ci, ça c'est cela. Je ne connais pas assez que pour juger, je ne sais pas vous dire si l'électricité est moins dangereuse que l'hydrogène mais effectivement l'hydrogène à le risque, c'est un combustible donc ce n'est jamais une chose. Mais je voulais dire une batterie qui crame, c'est un truc qui est épouvantable et donc ce n'est pas bon non plus, on le voit bien, enfin quand c'est un téléphone ce n'est pas trop grave mais quand on a certaines voitures qui crame, les pompiers ont du mal à maîtriser. Je pense qu'il y a des inconvénients pour les 2 mais avec les progrès technologiques et cetera, on va quand même vers une sécurité qui est augmentée par rapport à l'existant, je n'ai pas trop d'inquiétude. Donc ce n'est pas un critère que j'éliminerai mais ça peut être un critère pour limiter l'utilisation auprès du citoyen lambda, mais lui il ne le verra pas, il ramène son système et il connectera son raccord rapide, il chargera son moteur, il tira le peu d'hydrogène qui sortira, il ira directement très haut car il est très léger il va s'en aller. Je ne pense pas que cette opération, que le plein ne sera pas plus compliqué qu'avec de l'essence, je pense qu'on peut les mettre dans les mains de tout le monde mais d'un point de vue globale, système énergétique, ce n'est peut-être pas la meilleure question.

Thomas : Au niveau des rendements des moteurs, ce que j'avais pu voir c'est qu'en tout cas au niveau des voitures l'électricité garde quand même le meilleur rendement. C'est 70% de rendement par rapport à l'énergie fournie jusqu'à l'énergie fournie au niveau des roues, qui est réellement transmis au niveau des roues, je pense que c'était 70%. Au niveau de la pile à combustible, on était dans l'ordre de 50- 60% dans le meilleur cas. Et au niveau de moteur à combustion roulant à l'hydrogène, on était de l'ordre de 25-30%. Vous parliez des moteurs de camion qui avait du coup un meilleur rendement que les camions électriques sur le long terme. Est-ce que vous avez des chiffres à ce niveau-là ?

Pr. H. Jeanmart : Je n'ai pas dit qu'ils avaient un meilleur rendement. J'ai dit que les camions ont un moteur thermique. Ils ont un bon rendement parce qu'ils utilisent leur moteur de manière stable. On ne peut pas battre les moteurs électriques au niveau rendement, mais la question doit se poser, de savoir d'où vient l'électricité. Parce que si elle était faite à partir de l'hydrogène la conversion de l'hydrogène à l'électricité a aussi un rendement. Donc ça dépend d'où on regarde. Les gens ont tendance à regarder le véhicule électrique uniquement, en ne s'inquiétant pas de la source d'énergie électrique. Dans ce cas-là effectivement, il y a la perte du stockage de la batterie, la perte des machines, des moteurs électriques. Donc, on doit arriver à du 80% de rendement, donc ce sont des rendements très élevés. La piles à combustible n'est pas limitée par le rendement de Carnot, elle ne passe pas par une température donc elle n'est pas limitée par Carnot, donc elle a potentiellement un rendement plus élevé. En pratique, je dirais on vise 50% on annonce 60%, mais c'est avec des matériaux et des circonstances dont je ne suis pas certain qu'elle est vraiment une l'application directe sur l'automobile. Mais, on les annonce donc on serait plutôt à 60% effectivement. Et alors, les moteurs à hydrogène, vous parlez de 25-35%, j'ai tendance à penser que si on fait, alors ça ne va pas changé la donne totalement, mais si on fait une bonne machine avec une application qui utilise plutôt, je dirais de manière constante le moteur, voir une application hybride, je pense qu'on peut atteindre 40% de rendement, 45% ça me paraît beaucoup. Voilà, c'est un peu plus que ce que vous avancez mais ça reste meilleur effectivement, la pile à combustible. C'est que j'ai dit au début, c'est une question de coût parce qu'une pile à combustible ça coûte très cher. Suivant le type d'utilisation du véhicule et cetera. Utilisation intense ça marche, utilisation ponctuelle le coût d'achat serait exorbitant, mais c'est vrai aussi pour le

véhicule électrique. L'électrique c'est le plus cher à l'achat. Et donc par rapport à un véhicule thermique, si vous roulez très peu, acheter un véhicule électrique. C'est du bon sens.

Thomas : je n'ai pas bien saisi quelque chose, lorsque l'électricité est stockée sous forme d'hydrogène, le remettre sous forme d'électricité, donc il y a une perte au niveau de cette transformation. Mais dans la pile à combustible, il y a aussi ce système donc cette perte qui arrive, que ce soit dans l'électricité ou dans la pile à combustible.

Pr. H. Jeanmart : Si vous avez stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène ou vous devez stocker ou on vous l'a apporté sous forme d'hydrogène. Sois-vous refaite de l'électricité avec, donc la transporter, la convertir, la stocker dans une batterie, alimenter le moteur électrique et faire rouler la voiture. Donc de l'hydrogène, vous avez toute la filière pour aller jusque-là. Et puis vous vous dites j'ai de l'hydrogène, j'ai un réseau de distribution à l'hydrogène et je charge le réservoir du véhicule, j'ai une pile à combustible, moteur électrique et la roue tourne. En fait, vous avez 2 filières avec des rendements et on a tendance à regarder que le véhicule en disant que l'électricité c'est meilleur que l'hydrogène mais si l'électricité que je mets dans le véhicule vient de l'hydrogène. Il vaut mieux que je mette cet hydrogène directement dans le véhicule, et pas repasser par l'électricité que je transport. Alors, ça dépend circonstances, il y a des cas on pourra montrer que l'un est meilleur que l'autre etc., mais ce n'est pas nécessairement évident que le véhicule électrique, malgré son rendement très élevé depuis la conversion de la batterie puisque la roue soit la meilleure solution, si une partie significative de l'énergie a été stockée sous forme d'hydrogène. Et donc, on revient au système énergétique, est ce que je devrais stocker ou pas ou ce que je vais importer beaucoup d'énergie sous forme d'hydrogène. Et là, tant que l'on n'a pas la réponse à ces éléments-là, on peut difficilement établir, je dirai la stratégie au niveau mobilité. Ce qui est certain selon moi, et qui n'est pas vraiment ce qu'on annonce dans la presse c'est que on aura une mobilité qui sera répartie entre les 2 avec des proportions qui vont dépendre du pays des circonstances. Les 2 vont coexister, alors qu'aujourd'hui le message politique que l'on donne c'est qu'il n'y aura que des véhicules électriques. Si vous lisez des documents non techniques au sujet de la mobilité du type de carburant vous verrez que c'est la mobilité électrique partout et pour tout. Et ça, je pense que c'est une erreur et pour moi y aura des véhicules piles à combustibles, fuel cell. Il y en aura, où, combien et cetera, c'est la question comme j'ai déjà dit mais ils seront là et donc ça à de l'avenir c'est véhicules. C'est pour ça que les constructeurs continuent à développer et cetera, ils savent bien, ils ne sont pas idiots, ils savent bien qu'on aura besoin dans un certain nombre de ces solution-là. Malgré ce que peut dire un état aujourd'hui, si un politicien dit je n'en veux pas, il y en aura quand même, parce que ce n'est pas lui qui dicte, il peut faire des choix des choix que basé sur une certaine réalité. Tôt ou tard, la réalité va nous rattraper et certains pays vont faire le choix de l'hydrogène parce que les circonstances sont déjà plus claires. Quand vous avez un pays où la situation énergétique est beaucoup plus simple que la Belgique, et qui se dit tient demain on est comme ça, et ils peuvent faire leur plan disons qu'on aura ça donc on fait ça. En Belgique, on ne sait pas. On ne sait déjà pas si dans 5 ans, dans quelques années on aura encore des centrales pour produire de l'électricité. Puisqu'on aura plus de nucléaire, on ne sait pas très bien ce qu'on aura à la place, donc en Belgique on ne sait pas très bien vers où l'on va. On est attentiste, on n'est pas proactif ce qui fait que c'est ça qu'on ne voit pas clair et du coup on peut raconter n'importe quoi surtout parce qu'on ne sait pas où on sera. Dans d'autres pays, ils ont une vision politique, une politique énergétique beaucoup plus claire et ils savent où ils vont aller et ils savent se dont ils auront besoins et donc il faut la promotion des bonnes technologies dont ils auront besoin y compris les piles à combustibles.

Thomas : En France et en Allemagne ou il y a plusieurs plan hydrogène qui ont été énoncés.

Pr. H. Jeanmart : L'Europe a lancé des plans à l'hydrogène. L'hydrogène vient en force mais pas seulement pour la mobilité donc pour les processus industriels, en fait faire de l'acier avec de l'hydrogène, du charbon et cetera. Donc il y a d'autres utilisations énergétiques. Effectivement, il y a des plans à l'hydrogène et la Belgique se lance mais parle très peu de mobilité au niveau hydrogène, selon moi pas assez.

Thomas : C'est ce que j'ai pu lire aussi, c'est qu'au niveau de la communication, il y a très peu en tout cas en Belgique. En Chine, il y a quelques applications je pense. Tout ce qui est hydrogène se développent beaucoup plus dans les pays asiatiques. D'ailleurs les 2 seuls constructeurs qui proposent la technologie hydrogène, ce sont des constructeurs asiatiques. Je ne sais pas si vous savez, que des groupes comme VW, qui a maintenant dépassé le groupe Toyota, ne développe aucune technologie au niveau de la pile à combustible.

Pr. H. Jeanmart : Ils les ont, elles ne sont simplement pas mises en avant et il le continue, donc ils ont des véhicules pile à combustible. Ils ont la technologie, ils savent la faire, c'est juste que les circonstances aujourd'hui favorisent les véhicules électriques partout en Europe et donc il faut des véhicules électriques. Ils répondent aux contraintes politiques et aux demandes du marché, c'est plus facile de vendre un véhicules électriques qu'un véhicule pile à hydrogène, quand on n'a pas de réseau à hydrogène. Voilà, le véhicule électrique les gens peuvent encore le chargé chez eux mais le véhicule à l'hydrogène, ils vont dire si j'achète un véhicule à hydrogène, je fais quoi, rie. Donc aujourd'hui, on n'est pas prêt pour avoir des véhicules à l'hydrogène sur nos routes. Et donc, ils les ont dans leurs cartons, ils les ressortiront et ils continueront à les étudier, améliorer. Mais il n'en faut pas beaucoup quand on voit le marché de l'automobile, la part des piles à combustible, il n'y a rien. Ce n'est pas non plus comme s'ils avaient, comme si tout le Japon était sous piles à combustibles, ce sont vraiment des marchés de niche. Donc aujourd'hui, les constructeurs automobiles, ils mettent de l'électrique, de l'hybride, parce que le marché veut, c'est parce que les politiciens veulent etc. Et parce que les circonstances énergiques sont favorables à cette solution-là, si dans 5 ans il voit que le vent tourne et que l'hydrogène devient à la une, ils sont prêts et ils sont réactifs. Maintenant, une pile à combustible

ça coûte très cher, donc même si on avait les réseaux. Essayer de vendre à quelqu'un une voiture pile à combustible, vous lui demandez 70000€, il va vous dire que pour faire quelque millier de kilomètre par ans, ça fait cher. Et donc le taxi, il ne réfléchit pas comme ça c'est son outil de travail donc lui il peut payer un véhicule cher, mais quand vous êtes un particulier, vous vous dites ça je ne vais pas prendre. Il y a aussi un fait de coût du véhicule. Aujourd'hui, le véhicule électrique, on diminue les prix. La pile à combustible ça va rester coûteux.

Thomas : Vous pensez qu'il y a moyen d'atteindre des prix plus compétitifs avec le véhicule à hydrogène.

Pr. H. Jeanmart : C'est toujours la question de : est-ce que si je développe une filière industrielle à grande échelle pour les fuel cell, est-ce qu'elles seront moins chers ? Oui mais, c'est un peu comme les batteries, les batteries ça reste cher parce que les matériaux sont complexes à mobiliser et ce sont des choses qui restent complexes à mettre en œuvre donc on améliore mais le prix ne diminue pas de manière aussi importante qu'on l'imaginait, même s'il diminue. Donc, les piles à combustible ça va être pareil mais donc ça reste des technologies chères mais elles deviendront sans doute plus proches, parce qu'une va descendre moins, les véhicules électriques vont moins descendre maintenant, les autres pourraient descendre plus. On va s'approcher et puis il faut faire le bilan avec le nombre de kilomètres parcourus, le prix de l'électricité, le prix de l'hydrogène. Enfin, tout ça devient un peu un peu compliqué, ici je pense que les premiers essais sont toujours subventionnés. Donc le prix n'est pas le prix d'un marché, c'est un peu artificiel. Mais maintenant, comme en Belgique, on n'aura guère le choix, il y a certains acteurs qui seront prêts à payer plus, parce qu'ils ont besoin de mobilité qui est assurée que l'hydrogène sera plus facile. S'il n'y a pas d'électricité, les gens vont dire vous ne chargez pas votre voiture, ou vous ne vous éclairez pas, ou vous ne travaillez pas mais on devra faire des choix donc il y aura des moments d'insécurité. Ce n'est pas pour faire peur, c'est juste que c'est une réalité. Il y aura peut-être des moments où on n'aura pas assez d'électricité en Belgique et donc si on nous dit qu'il y a de l'hydrogène, il sera sûr d'avoir de l'hydrogène par contre donc c'est une sécurité en plus, si on va rouler beaucoup, si on a ceci. Quand on fait le bilan complet le prix du véhicule commence à devenir moins important que tout le reste et ça peut se faire. Donc, c'est plutôt ça, la réflexion doit s'inscrire plus dans une réflexion de type entreprises, qu'une réflexion de particulier pour les véhicules à l'hydrogène.

Thomas : Je vais terminer par cette question-là, qui est plutôt une remarque que j'avais reçue d'une interview précédente, la personne me disait que lui pensait que l'hydrogène n'avait pas vraiment sa place dans l'automobile, ni-mêmes dans tout ce qui est applications mobiles, train, bateau, avion, etc., parce que les batteries qui sont en cours de développement sont de plus en plus performantes etc., et du coup quoi qu'il arrive auront un meilleur rendement et seront même moins cher que l'utilisation de l'hydrogène in fine même pour les camions etc. Et il m'a parlé de ça dans un laps de temps plus ou moins court, enfin d'ici 2050.

Pr. H. Jeanmart : 2050 ce n'est pas très court. Les batteries n'auront pas un meilleur rendement, elles ont déjà un très bon rendement, elles ont la densité énergétique. Enfin, une des faiblesses c'est que j'ai besoin de beaucoup de masse pour stocker pas beaucoup d'énergie. Il y a des perspectives mais ça reste quand on voit les chiffres, les tendances ont n'est pas dans des ordres de grandeur, on est dans l'amélioration mais on n'est pas dans une révolution à ce niveau-là. De ce que j'en sais, je ne suis pas expert en batterie mais globalement, on ne voit pas. Ils ont toujours des défauts, il y en a qui sont plus denses mais elle se décharge plus vite. Donc, c'est toujours en équilibre, on a du mal à avoir toutes les bonnes propriétés simultanément, c'est un peu le Graal. Et donc ça c'est vrai pour beaucoup de technologie ou on doit faire des compromis. Les batteries utilisées sur les véhicules électriques aujourd'hui, on a un très bon rendement, elles ont un nombre de cycle important mais elles ont une densité énergétique assez faible. Et donc, on a besoin de beaucoup de masse, et quand on voit les masses de batteries dans les véhicules, ce sont plusieurs centaines de kilo, ce n'est pas rien. Donc oui on va améliorer les batteries mais je ne pense pas qu'elles vont atteindre des performances qui vont être à ce point favorables qu'elles vont supplanter, dans un centre d'application, la facilité avec laquelle on peut charger de l'hydrogène dans un réservoir et le rôle d'une pile à combustible qui finalement n'est pas mauvais et permet d'assurer un bon service. On aurait effectivement l'énergie de quoi faire des milliers de kilomètres dans une boîte dans une canette, évidemment ce serait super mais on en est loin, on en est très loin on n'y arrivera pas. Donc, je ne suis pas d'accord de dire que les batteries vont supplanter l'hydrogène partout, c'est pas du tout ce qu'on entend de manière globale sur l'ensemble du système énergétique. Et la question qui se pose, ce n'est même pas ça c'est, est-ce que dans mon système énergétique j'aurai de l'hydrogène. La réponse est oui, il y aura dans la mobilité à l'hydrogène, parce que ce sera plus efficace à un certain moment. En fait, est-ce que toutes nos technologies sont uniquement basées sur la meilleure performance, parce qu'il y a une forme de résilience derrière tout ça aussi. On n'a pas toujours les choix qui dit, on va tous faire ça parce que c'est mieux, non il y a une diversité de choses parce qu'en fait ça permet d'être plus robuste. Et donc dire, on aura que des batteries, si un jour on a un problème de réseau électrique, on va quand même être un peu coincé. Je ne crois pas en cette vision toutes électriques 100% pour tout et il n'y aura plus que ça, je pense qu'il y aura un 2^e vecteur qui risque d'être l'hydrogène et ses dérivés qui va circuler dans le réseau et qui apportera la souplesse dont on a besoin sur les réseaux énergétiques. Et comme l'hydrogène sera là, et bien on a des applications énergétiques, on fera le lien et la mobilité étant un gros consommateur, il y aura un lien. C'est comme ça que je vois les choses, ce n'est pas que j'ai envie d'avoir des véhicules hydrogène sur la route ou que je n'ai même pas envie d'avoir des véhicules électriques, c'est juste que la réalité fait qu'il y en aura. Ce n'est pas un choix. Quand on fait son bilan, je n'ai pas le choix, je devrai en mettre.

Thomas : Ça rejoint un petit peu plus l'idée que de la personne de chez Air Liquide, qui était d'ailleurs aussi un ingénieur civil.

Pr. H. Jeanmart : On la même réflexion pour les centrales, ou les éoliennes. Est-ce que l'on a envie d'avoir des éoliennes, bah non mais si on veut de l'électricité, il faudra mettre des éoliennes. Moi j'aime bien les éoliennes mais je peux comprendre qu'on ne les aime pas. Est-ce que l'utilité de l'énergie électrique est supérieur ou désagréments de l'éolienne, je pense que oui, et si je pose la question à tout le monde, et qu'on leur coupe l'électricité pendant 2 jours, ils diront oui c'est super. On n'aperçoit pas ça mais c'est comme ça, une centrale nucléaire personne n'aime mais ça apporte de l'électricité. Il y a beaucoup de choses comme ça, ce n'est pas qu'on veut les avoir mais c'est une sorte de male nécessaire. Celui qui ne veut pas de véhicule électrique ou de véhicule pile à hydrogène, il peut prendre le train ou aller à pied, c'est un choix. Mais, je pense que l'hydrogène sera dans le système et elle sera utilisée parce qu'on a besoins d'énergie. Ce serait bien qui n'y est pas d'hôpitaux, si il n'y avait pas de gens malade, il n'y aurait pas d'hôpitaux. Donc, une série de services, ils sont là parce qu'on en a besoin, pas parce qu'on a trouvé que c'était une bonne idée enfin si on a trouvé que c'était une bonne idée mais ce n'est pas juste pour le plaisir qu'on a fait ça, c'est parce qu'il y a une utilité. Je pense que les véhicules à l'hydrogène, c'est pareil, il faut considérer ça comme ça. Ils seront nécessaires pour l'équilibre du système énergétique.

Thomas : Au niveau de l'entretien d'un moteur thermique, c'est vrai que ça demande un certain entretien, c'est un moteur complexe et cetera. On parle pour le moteur électrique et du coup, le moteur qui est embarqué dans un véhicule à pile à combustible aussi d'un entretien qui est beaucoup plus facile beaucoup moins contraignant, on a un moteur qui est beaucoup plus simple. Qu'est-ce que vous en pensez ? Est-ce que c'est si simple que ça et ça demande si peu d'entretien ou un coût d'entretien si faible ou ce n'est pas réel ?

Pr. H. Jeanmart : Il y a effectivement moins d'entretiens pour les piles à combustible et sur les moteurs électriques c'est certain, par rapport au moteur thermique. Maintenant, regardez l'entretien de tout ce qui est pneumatique, frein, plaquettes, suspension, air conditionné et cetera, quand vous allez à l'entretien de votre véhicule, la partie moteur n'est pas nécessairement celle qui est là plus, on doit changer l'huile, d'accord. C'est une opération qui n'existera plus. Mais c'est plus simple et au bout du compte ça reste un véhicule qui demande de l'entretien. Donc, dire je n'ai plus du tout d'entretien, ce n'est pas vrai, et comme ce sont des véhicules lourds, les freins sont sollicités et cetera. Globalement, il y a moins d'entretien, ça c'est vrai donc dans le bilan global c'est un élément à prendre en compte. Mais vous devez comparer au prix d'achat, je dois avouer que même le prix d'achat plus l'entretien, je ne suis pas certain que ça coûte plus cher, c'est une question du coût. Il faut savoir que dans le monde, c'est une réflexion de pays riches et de pays extrêmement riche, de se dire : est-ce que je mets des véhicules électriques ou des véhicules pile à combustible ou hydrogène et cetera. Dans la plupart des pays pauvres, ce seront des moteurs thermiques point. Parce qu'il n'y que ça qui marche et donc ça fera du CO₂, mais ils s'en foutent, ils n'ont pas le choix, ils ne vont pas arrêter la mobilité pour nous faire plaisir. Et donc à l'échelle mondiale, ce que vous allez écrire qui est propre à la Belgique ou à l'Europe ne sera pas valable à l'échelle mondiale. Et donc, il ne faut jamais perdre de vue, et la plupart des véhicules ne seront pas en Europe. Pour le moment, il y en a un certain nombre en Europe sur les 2 milliards de véhicules, il y a une grosse partie en Europe. Aux États-Unis, en Chine et au Japon, on peut imaginer que tout ça va changer. Mais là je ne suis pas sûr que l'Inde sera capable de suivre d'un point de vue technologique et développement de son réseau et cetera, pour alimenter ça. Et les pays d'Afrique, oublions et les pays d'Amérique du Sud oublions, ces gens sont des circonstances pas favorables. Et donc le moteur thermique ne disparaîtra pas, ou de sitôt en tout cas même si on décide dans nos villes, parce qu'on a les moyens de dire : je n'en peux plus. Quand, vous allez élargir le débat, vous allez voir que la réalité et les contraintes sont différentes de celle qu'on connaît.

Thomas : Le mémoire est focalisé sur l'Europe.

Pr. H. Jeanmart : Dans vos travaux, n'oubliez pas de mettre un peu en perspective en montrant que la réalité mondiale, parce que le CO₂ est mondial et si on change de technologie c'est juste pour le CO₂, enfin globalement. Ça n'est pas mauvais de montrer les limites aussi de la réflexion que vous menez mais ce n'est pas péjoratif, à l'échelle mondiale c'est plus complexe encore que ce que j'ai raconté ici. Parce qu'il y a cette dimension de coût et d'accès à la technologie.

Thomas : Un tout grand merci.

10) Appendix 10: Transcript of interview 4 (Mr. Nicolas Mullier)

Thomas : Que pensez-vous de diffuser l'hydrogène dans le secteur de l'automobile afin de l'utiliser comme carburant sachant qu'aujourd'hui l'optique est de décarboner tout ce qui est industrie automobile qui représente près de 20-30 % des émissions de gaz à effet de serre et qui est un des seuls secteurs dont l'émission de gaz à effet de serre augmente d'année en année alors que les autres secteurs ont tendance à diminuer d'une part parce qu'il y a beaucoup plus de personnes qui ont des véhicules et deuxièmement les gens bougent de plus en plus loin et de plus en plus rapidement.

Mr. N. Mullier : Je pense que, tout d'abord, il est nécessaire de décarboner les transports. De plus en plus depuis ces dernières années, on voit que les choses commencent à aller dans ce sens, d'une part par les constructeurs automobiles qui essaient de développer de nouveaux véhicules qui ne polluent plus ou en tout cas qui sont zéro émission, et aussi par les gouvernements qui commencent à vraiment mettre des contraintes sur les entreprises ou localement dans certaines régions pour limiter ou

rendre l'utilisation des carburants émetteurs de CO₂ plus chère et moins accessible. C'est donc clairement la tendance. Dans le transport, Air Liquide voit qu'il y a beaucoup de types de transport différents et donc Air Liquide se base beaucoup sur ce qui a été développé par le Hydrogen Council, il y a un groupe de plus de 100 sociétés qui sont réunies dans ce qu'ils appellent le Hydrogen Council, une sorte de groupe d'influence qui promeut l'hydrogène et qui comprend toutes les sociétés qui sont intéressées de près ou de loin par l'hydrogène et qui sont liées à l'hydrogène. Il s'agit d'une sorte de groupe d'étude et de pression qui publie de nombreux dossiers accessibles au public sur son site web, dans lesquels il analyse le marché et l'avenir de l'hydrogène. La mobilité est clairement l'un des grands segments qu'ils ciblent, mais il existe de nombreux types de mobilité différents, du chariot élévateur dans les entreprises au grand navire de transport maritime (mobilité globale) et, si l'on s'intéresse de plus près à l'automobile, cela peut aussi aller de la petite voiture de ville au grand camion de transport.

Thomas : Dans ce mémoire on parle de tout le panel automobile.

Mr. N. Mullier : Il y a clairement un besoin de décarboner mais il y a en fait plusieurs solutions qui existent du point de vue d'Air Liquide et la stratégie est que pour le moment tout ce que nous appelons les véhicules à haut rendement, donc les voitures traditionnelles, la technologie existe, elle fonctionne mais les deux problèmes qu'il y a est que la technologie est encore très chère, Il n'y a pas encore beaucoup de modèles disponibles, il y a Hyundai, Toyota et d'autres véhicules qui vont sortir mais pour le moment il y en a vraiment deux (Nexo, Mirai) donc ça limite l'offre mais le plus gros problème pour le moment c'est l'infrastructure des stations-services et c'est ce qui bloque le développement de l'hydrogène pour le moment et c'est sur ce problème qu'Air Liquide travaille maintenant. Mais je pense qu'il y a clairement un avenir pour l'hydrogène pour les véhicules personnels, qui sera probablement le marché où il sera le plus difficile de se positionner pour le moment parce que les voitures sont trop chères par rapport à ce qui existe ailleurs et pour l'infrastructure parce que la concurrence est la voiture électrique qui est très facile à mettre en place. Les constructeurs sont en train de tout basculer vers la voiture électrique avec quelques décennies d'avance sur la voiture à hydrogène et en plus l'infrastructure est facile à mettre en place pour le moment, vous avez un chargeur dans votre garage pour 7000 euros vous pouvez recharger votre voiture en quelques heures en rentrant et ensuite rouler mais il y a toujours des problèmes d'autonomie et de temps de recharge mais pour le moment pour les véhicules personnels en tout cas ça pose un peu moins de problème. Là où ça pourrait être plus compliqué c'est si l'ensemble du parc dans 5 ans commence à se convertir à l'électricité, on risque d'avoir des problèmes de surcharge du réseau, de manque de capacité de production d'électricité et d'équilibre du réseau, alors ça pourrait être beaucoup plus chaud, mais en tout cas l'électricité est quelque chose qui est faisable et qui devient intéressant et peu coûteux, en tout cas sur une base équivalente aux véhicules traditionnels. Par contre, pour tous les véhicules lourds ou le parc de bus, nous sommes convaincus que l'hydrogène aura un rôle à jouer dans la décarbonisation de ces véhicules parce que c'est faisable électriquement mais ça perd tout son sens de remplacer des centaines de kilos qui pourraient être transportés dans un camion par des batteries, Là où l'hydrogène permet d'avoir une autonomie qui est tout à fait correcte et surtout en évitant de passer des heures à la station pour recharger ses batteries là où on vise à recharger un camion en 10-15 minutes à la station hydrogène. Donc pour moi, l'hydrogène a un avenir, il pourrait sûrement percer dans tout ce qui est véhicule léger, à mon avis on aura une partie du marché électrique, une partie en hydrogène mais dans tout ce qui est bus, camion, camionnette de transport, trains.... il est clair que si cela doit être complètement décarboné l'hydrogène a clairement son rôle à jouer.

Thomas : Pour qu'une voiture à hydrogène n'ait aucune émission, il faudrait que l'hydrogène produit soit majoritairement vert, pourquoi pas aussi un peu bleu et jaune si l'objectif est de réduire le CO₂ et les gaz à effet de serre. Pensez-vous qu'il soit possible de passer à cet hydrogène vert d'ici 2020, 2030, dans un laps de temps assez court ?

Mr. N. Mullier : Oui, clairement je pense comme vous le dites que pour l'instant la majorité c'est l'hydrogène gris qui produit 10 tonnes de CO₂ pour une tonne d'hydrogène, donc en utilisant des reformeurs de méthane à vapeur, c'est ce qui est utilisé parce que c'est le plus intéressant en termes de coût, mais clairement tous les acteurs de la filière hydrogène savent très bien qu'il faudra soit capter le CO₂ dans un premier temps pour avoir de l'hydrogène bleu et enterrer ce CO₂ dans des puits qui sont vides, mais clairement tous les groupes industriels se concentrent maintenant sur l'électrolyse. Air Liquide a déjà le plus gros électrolyseur, installé au Canada, avec une capacité de 20 mégawatts, ce n'est pas gigantesque, mais c'est pour l'instant le plus gros électrolyseur en fonctionnement et d'ici 2025 il y a des projets de l'ordre de 100 à 200 mégawatts qui sont déjà en cours. Air Liquide vient de faire une annonce dans la presse sur un projet de mise en service d'un électrolyseur de 200 mégawatts d'ici 2024 ou 2025, donc 10 fois le maximum disponible aujourd'hui, aux Pays-Bas, qui sera pré-connecté au réseau de canalisations d'hydrogène d'Air Liquide et qui sera destiné à suivre la stratégie de transfert de l'hydrogène gris vers l'hydrogène vert, donc d'ici 2030, en tout cas, Air Liquide a annoncé ses ambitions climatiques il y a un mois, et d'ici 2050 ils visent la neutralité carbone et d'ici 2030 il y aura déjà un objectif de réduction des émissions de CO₂ de plus de 30% et cela passera principalement par la conversion de tout l'hydrogène gris en hydrogène vert en utilisant l'électrolyse dans une très large mesure, donc pour moi la question n'est pas de savoir si c'est faisable, c'est faisable, ça commence, les subventions européennes sont disponibles, il y a beaucoup d'argent qui est maintenant disponible via les systèmes de subventions et tous les fabricants d'hydrogène, même les nouveaux acteurs, utilisent cela pour développer l'électrolyse pour leur production d'hydrogène.

Thomas : Dans cet hydrogène vert visé par Air Liquide, qui consiste à utiliser l'électricité pour produire l'électrolyseur, quand on parle d'être neutre en carbone en 2050, l'électricité utilisée pour produire l'hydrogène proviendrait-elle exclusivement de ressources éoliennes, solaires, etc. ou y aurait-il aussi une source nucléaire ?

Mr. N. Mullier : Pour l'instant, l'objectif est d'utiliser uniquement de l'électricité verte, principalement de l'énergie éolienne. Les entreprises qui investissent dans les électrolyseurs font des systèmes de PPA (Purchase Power Agreement) où Air Liquide, par exemple, a un projet d'installation d'un électrolyseur et va travailler avec une des entreprises qui possède ou investit dans des parcs éoliens offshore afin de garantir que, par exemple, les 200 mégawatts nécessaires au fonctionnement de l'électrolyseur proviendront du parc éolien installé en mer du Nord, donc c'est une sorte de sécurisation de l'électricité verte même si les électrons sont pris sur le réseau. Il y a un contrat qui est fait de telle sorte qu'on s'assure qu'il y a une sorte de certificat qui passe entre ce parc éolien qui produit de l'électricité verte et Air Liquide qui paie plus pour s'assurer que l'électricité qui est prélevée provient de ces certificats qui garantissent que l'électricité est verte. Investir dans un électrolyseur en prenant l'électricité du réseau sans rien faire de plus n'a pas beaucoup de sens, il faut qu'elle soit verte, même toutes les subventions reçues exigent que l'électricité soit 100% verte sinon ça ne sert à rien de faire ce genre de projet. Vous achetez votre électricité verte, vos électrons peuvent avoir été produits par un système de turbine à gaz mais avec ce système de certificat vous êtes sûr que l'électricité verte produite est celle qui est consommée, afin de ne pas consommer quelque chose que vous pensez être vert mais qui ne l'est pas.

Thomas : L'hydrogène bleu sera donc abandonné d'ici 2050 ?

Mr. N. Mullier : Je pense que l'hydrogène bleu a plutôt une vocation transitoire pour pouvoir encore utiliser les vaporeformers tout en ne polluant plus, mais à long terme je pense qu'en fonction de l'évolution des coûts des électrolyseurs et du coût de l'électricité verte, si elle suit une réduction comme c'est en cours et comme on l'imagine, l'électrolyse remplacera probablement le vapométhane conforme pour la production d'hydrogène.

Thomas : Le grand défi, c'est qu'au niveau des infrastructures, pour l'essence et le diesel à l'époque, quand la voiture est arrivée, il y avait déjà des pompes, donc c'était facile d'avoir de l'essence ou du diesel et pour l'électricité, il y a un moyen de se brancher sur une prise, donc ça prend plus de temps pour recharger la voiture. Mais en ce qui concerne l'hydrogène, je crois qu'il y a 40 stations en France et quelques-unes en Belgique. Ils ont prévu d'en lancer 8 nouvelles en Belgique.

Mr. N. Mullier : En Belgique, il y a maintenant 3 pompes fonctionnelles : Zaventem, Anvers, aux Pays-Bas il y en a 3 aussi, donc l'infrastructure est très limitée pour le moment. En France, il y en a 2 ou 3 à Paris et on commence à en développer d'autres, mais oui, c'est limité.

Thomas : A l'échelle de combien de temps est-il possible de créer toutes ces pompes à essence et à qui revient-il de payer cette infrastructure ?

Mr. N. Mullier : Celui qui paie, c'est celui qui investit dans la station, c'est ce qui se passe aujourd'hui dans le diesel, par exemple, si Total veut installer une station le long de l'autoroute, c'est Total qui achète le terrain, fait tous les travaux, achète le matériel et paie la station pour qu'ensuite les automobilistes viennent recharger leur voiture à la station et leur fasse un revenu pour amortir leur investissement et faire un bénéfice. Pour DAC 24, qui est en train de développer un certain nombre de stations, c'est donc eux qui vont investir et payer les stations. Maintenant, pour stimuler cela, il y a beaucoup de subventions qui sont mises en place pour financer cela. Pour installer une station voiture, l'équipement coûte plus de 2 millions d'euros, et si on parle d'une station camion, ça va être autour de 6 millions d'euros, donc ce sont des budgets importants pour une station hydrogène. Si Air Liquide installe une station, il en paiera une bonne partie, mais l'Europe la subventionne pour le moment, précisément pour avoir cette impulsion et pour qu'un réseau soit créé, car sans cela, il serait difficile de se lancer. C'est toujours la question de l'œuf et de la poule : S'il n'y a pas beaucoup de camions, les gens ne voudront pas installer de stations parce qu'il n'y a pas assez de camions pour répondre à la demande et vice versa, les gens qui ont des camions ne voudront pas les acheter avec de l'hydrogène parce qu'il n'y a pas assez de stations pour les recharger. Donc avec ces incitations qui existent d'une part pour les gens qui installent des stations et d'autre part pour ceux qui veulent acheter des camions, l'achat de camions à hydrogène est également subventionné via certains mécanismes de subvention européens. Cela permet de stimuler et de lancer un peu le marché et cela fonctionne bien pour l'instant par consortium. Air Liquide travaille sur un projet avec d'autres acteurs, appelé High Trucks, qui se fait souvent, c'est-à-dire que des groupes d'entreprises qui construisent des stations-service, qui construisent des camions et aussi des entreprises qui doivent utiliser les camions et les stations-service, se réunissent pour dire "OK, nous voulons travailler ensemble et développer quelque chose". Ainsi, les constructeurs de camions diront : "Je vais développer un camion à hydrogène, pour avoir une offre de camions", les fabricants de stations-service diront : "OK, si vous fabriquez des camions, nous construirons des stations-service aux bons endroits" et enfin, les utilisateurs diront : "OK, si vous faites cela, j'accepte d'acheter des camions à hydrogène pour ma logistique et je devrai les recharger à tel ou tel endroit". Cela met tout le

monde autour de la table pour voir s'il y a un moyen de faire quelque chose, mais il faut le faire ensemble pour que vous n'achetiez pas un camion qui ne correspond pas à vos besoins et que la station-service ne soit pas là où vous voulez faire le plein quand vous avez votre camion. En Allemagne, il y a un consortium qui a été créé et ça décolle, ils font une tonne de stations plus des voitures et des bus et ils commencent aussi à s'intéresser aux camions donc voilà, l'infrastructure est clairement un des gros problèmes mais ça bouge et l'Europe l'a compris et met les fonds à disposition pour que les opérateurs de stations fassent des business cases, des projets et commencent à installer toute une infrastructure de stations d'hydrogène.

Thomas : Les 30 pompes à essence dont vous parliez sont principalement des camions ou seraient des camions et en même temps des voitures parce que je suppose qu'il y a des économies d'échelle ?

Mr. N. Mullier : Il s'agirait surtout de camions, ce qui est l'objectif actuel. Dans chaque station, il y aura un distributeur pour les voitures, ce qui est de toute façon une demande de l'Europe pour avoir accès à certaines subventions. Ce qui coûte cher dans une station d'hydrogène, c'est le compresseur d'hydrogène, c'est toute la capacité de refroidissement dont vous avez besoin pour refroidir l'hydrogène avant qu'il n'aille dans les voitures et donc l'investissement de l'équipement, vous devez avoir des réservoirs d'hydrogène qui peuvent résister à 500 et 900 bars donc c'est aussi très cher. Les véhicules ont une pression de 350 et 700 bars, généralement tout ce qui est plus bus et camion peut stocker 350 bars parce que là vous pouvez vous permettre d'avoir des réservoirs plus grands parce que vous avez de la place, mais les voitures standards ont 700 bars parce que vous n'avez pas beaucoup de place dans la voiture pour mettre des réservoirs, donc vous devez avoir une pression plus élevée pour stocker plus d'hydrogène. Le problème est que l'hydrogène n'est pas comme l'essence avec une pompe à liquide où vous savez comment transférer votre liquide très rapidement dans votre voiture et c'est pourquoi en deux minutes votre réservoir est plein. Avec l'hydrogène il faut faire passer un gaz d'un endroit à un autre et pour cela il faut une différence, c'est pour cela qu'il faut avoir des pressions entre 800 et 900 bars dans votre station pour pouvoir arriver à 700 bars dans votre voiture et avoir un équilibre et une différence suffisamment grande pour que le gaz passe de la haute pression à la basse pression et tout cela coûte très cher.

Thomas : Pourquoi faut-il refroidir l'hydrogène pour le mettre dans le réservoir de votre voiture ?

Mr. N. Mullier : Ici on ne parle pas d'hydrogène liquide, tout est gazeux, l'hydrogène liquide a un avenir dans les stations mais les pompes n'existent pas encore pour les hautes pressions donc il faut savoir que l'hydrogène liquide doit être refroidi à -253 degrés ou moins donc c'est technologiquement très compliqué et les pompes qui permettent de déplacer du liquide à -253 degrés sont complexes donc pour l'instant les stations sont gazeuses, votre hydrogène est gazeux du début à la fin car là il faut le comprimer, augmenter la pression et vous le transférez. Le refroidissement est dû au fait que quand vous comprenez un gaz il va chauffer, si vous passez un gaz de 100 à 700 bars dans un compresseur le fait de le comprimer va le faire chauffer et les réservoirs dans les voitures vous pouvez les faire en acier, le problème c'est qu'il faudra une épaisseur gigantesque pour résister à la pression donc ça pèsera lourd donc ce n'est pas ce qui est choisi dans les voitures où on essaie d'optimiser son poids pour consommer moins. Avoir des réservoirs en acier de 700 bars dans une voiture est irréalisable, il n'y a pas de place, ce serait beaucoup trop lourd. Vous avez différents types de réservoirs en fonction des matériaux utilisés et plus votre type est grand, plus vous serez capable de résister à des pressions élevées avec un réservoir très léger et cela se fait en utilisant des fibres de carbone, une sorte de plastique très résistant qui sera très léger et qui résistera à des pressions de 800-850 bars, donc c'est très résistant, très léger. Le seul problème est que lorsque vous utilisez ce type de réservoir de type 4, vous ne pouvez pas dépasser 85 degrés, sinon le plastique commence à ramollir et perd son intégrité physique. C'est pourquoi vous devez refroidir votre hydrogène, car si vous ne le refroidissez pas lorsque vous le comprenez, il va s'échauffer à des températures supérieures à 85 degrés et lorsque cela se produit dans votre réservoir, vous avez donc des normes et des protocoles qui existent pour vous assurer que dans mon réservoir, nous ne dépassons pas la température maximale avant qu'il ne casse.

Thomas : La voiture a-t-elle un système de refroidissement ?

Mr. N. Mullier : Non, parce que dans la voiture, quand votre hydrogène est dans le réservoir, il est dans le réservoir. Il ne va pas bouger. Ce qui le fait chauffer, c'est le fait qu'on le comprime, mais toute la partie compression est dans la station, mais par contre quand il est dans la voiture, il est dans la voiture et puis il va être utilisé petit à petit dans la pile à combustible, mais il ne va plus chauffer. Il va se réchauffer s'il fait un peu chaud dehors mais ça va tourner autour de 40 degrés mais c'est vraiment la station-service qui va le faire chauffer et juste avant d'entrer dans la voiture on le refroidit très fortement pour qu'il arrive à une température froide dans le réservoir et qu'il reste à cette température après.

Thomas : On parle souvent de l'hydrogène mais dans le cas d'un moteur à hydrogène il y a une énorme perte d'énergie, dans la voiture électrique la perte de l'énergie produite vers l'énergie qui est réellement utilisée pour la voiture est de 70% de l'énergie produite à la base alors que quand on parle d'un moteur à hydrogène avec une pile à combustible c'est environ 40-50% et si c'est un moteur thermique 25%.

Mr. N. Mullier : Un moteur électrique est beaucoup plus efficace qu'une pile à combustible. Il faut voir quel est l'intérêt, une batterie et un moteur électrique seront plus efficaces, il y a beaucoup de choses à prendre en compte. Dans un véhicule à hydrogène, vous avez un poids très limité et un temps de recharge très limité, et c'est l'énorme avantage pour tout ce qui est commercial : vous avez un camion qui peut transporter beaucoup de marchandises et vous vous rechargez à votre station en 10-15 minutes. Vous pourriez donc obtenir une plus grande efficacité et quelque chose de mieux en utilisant un véhicule électrique, mais vous perdez alors tout l'aspect économique du temps et de l'optimisation du temps. Dans les véhicules personnels, c'est plus ou moins la même chose parce qu'il n'y a pas une énorme différence de taille et dans une voiture comme la Mirai ou le Nexa, vous avez une petite batterie parce que vous avez besoin d'une petite batterie pour avoir assez de puissance lorsque vous accélérez. Votre pile à combustible produit de l'électricité de manière assez constante, si vous avez besoin d'un gros coup d'accélérateur, vous avez une petite batterie qui est toujours là pour fournir suffisamment d'électricité.

Thomas : Y a-t-il un moyen de compenser cette perte d'énergie dans l'hydrogène ? L'hydrogène peut-il suivre le rythme ?

Mr. N. Mullier : Il s'améliorera, il n'atteindra jamais le même rendement qu'un moteur électrique, la technologie de la pile à combustible ne permet en aucun cas en l'état actuel d'atteindre un rendement similaire à celui du moteur électrique et c'est principalement dû à la génération de chaleur que la réaction produit parce que dans la pile à combustible, vous générez de la chaleur en combinant l'oxygène et l'hydrogène pour faire de l'eau et c'est de l'énergie que vous perdez donc vous avez cette perte de chaleur. Tout d'abord c'est de la chaleur qui peut être réutilisée pour beaucoup de choses dans les véhicules, vous pouvez penser à chauffer votre habitacle, dans une voiture électrique je pense que c'est fait avec une résistance électrique qui consomme une partie de votre énergie où vous pouvez réutiliser cette énergie produite dans votre pile à combustible pour les voitures à hydrogène. C'est d'autant plus vrai pour les cas stationnaires où vous avez une pile à combustible pour générer de l'électricité, vous allez pouvoir réutiliser la chaleur fournie par la pile à combustible pour chauffer et l'autre chose c'est de dire en fait ok vous avez une perte d'efficacité dans votre pile à combustible mais l'hypothèse de base c'est aussi que nous allons avoir de plus en plus d'énergie verte abordable disponible et dans cette perspective là l'efficacité sera probablement moins importante qu'elle ne l'est actuellement avec les moteurs thermiques où vous êtes à 30%. Si vous pouvez avoir accès à une énergie renouvelable très accessible à un coût limité ou abordable, être à 60% par exemple pour une pile à combustible ou à 80% pour un moteur diesel sera probablement moins important. Pour une voiture électrique, ça reste significatif. Quand tu prends les différents avantages/inconvénients des autres véhicules, ça ne sera peut-être plus le point le plus important. Mais c'est sûr qu'une fuel cell n'arrivera pas avec les technologies aujourd'hui au même rendement qu'un moteur électrique. Ce que j'appelle moteur thermique c'est toujours moteur thermique essence diesel, il y a effectivement des moteurs thermiques hydrogène qui sont en développement mais là clairement ton rendement n'est pas hyper intéressant donc ça pourrait avoir ses applications mais je pense que l'avenir est vraiment du côté des fuel Cell pour avoir une motorisation électrique au final et non pas thermique.

Thomas : On parle très peu du moteur à combustion à hydrogène, même s'il me semble que la technologie n'est pas compliquée à changer, je pense que c'est un changement de carburateur qu'il faut faire dans le moteur et qu'il n'y a pas de technologie supplémentaire à développer, non ?

Mr. N. Mullier : C'est quand même compliqué, vous ne pourrez pas mettre de l'hydrogène dans un moteur existant parce que vous devez changer beaucoup de matériaux et vous devez utiliser certains types de métaux avec l'hydrogène pour éviter que votre hydrogène ne craque le métal et risque des fuites. Pour revenir au moteur à combustion interne à hydrogène, il y a des applications, à mon avis cela arrivera et ce sera probablement une des solutions intermédiaires pour utiliser l'hydrogène dans un moteur et ne plus polluer. Mais le rendement ne sera pas bon et cela aura du sens dans un premier temps, mais nous sommes convaincus qu'à long terme tout s'électrifiera. De plus, les moteurs à combustion interne restent des machines compliquées à entretenir, vous avez beaucoup de pièces mobiles, de joints... qui s'usent et chauffent, donc au final les moteurs électriques sont beaucoup plus fiables et cassent moins vite. Donc à long terme je pense que tout ce qui devra être électrifié le sera, ça peut être une bonne solution intermédiaire mais je pense que les moteurs à combustion interne ne sont pas l'avenir de l'hydrogène.

Thomas : Il y a beaucoup de craintes sur l'hydrogène, c'est un gaz donc ça fait plus peur que l'essence et s'il y a une fuite avec l'hydrogène, c'est instable et très inflammable, donc c'est vrai qu'il y a une sorte de crainte. Les industriels, qui ont l'habitude de prendre des risques, sont plus informés, alors que les consommateurs manquent d'informations sur l'hydrogène et sont donc plus compliqués à convaincre, donc est-ce que ça ne joue pas un rôle ou est-ce que vous pensez qu'il n'y a pas tellement de risque à ce niveau-là ?

Mr. N. Mullier : C'est clairement une des craintes parce que l'hydrogène est un gaz explosif mais, finalement, si vous avez une flaque d'essence, au-dessus vous aurez un nuage, un mélange d'air et d'essence qui est tout aussi explosif que l'hydrogène. Il est clair qu'il y a des craintes mais je pense que l'hydrogène est aussi bon, c'est un gaz explosif, il est combustible comme tout ce que nous devons utiliser pour nous chauffer et nous déplacer. Le méthane est également un gaz explosif et nous l'utilisons pour cuisiner et nous chauffer dans nos chaudières, c'est juste que nous devons avoir des mesures de gestion des risques

suffisantes par la suite lorsque nous comparons par exemple l'hydrogène et l'essence ou le diesel, imaginez que vous avez de l'essence qui fuit et commence à brûler, elle va se répandre partout, c'est un liquide, donc vous allez avoir une flaque qui va continuer à se répandre sur le sol et brûler aussi longtemps qu'elle le fera. Alors que l'hydrogène est 13 fois plus léger que l'air, la moindre fuite d'hydrogène va monter très vite et très haut, vous aurez peut-être une flamme, mais votre flamme sera dirigée vers le haut. Elle ne risque pas de se répandre et de brûler tout ce qui se trouve autour d'elle. Une station d'hydrogène, par exemple, va être installée à l'air libre, vous ne devez pas avoir de toit dessus pour que la moindre fuite que vous ayez aille directement dans l'atmosphère, vous n'avez aucun risque d'avoir un nuage qui va stagner et finir au-dessus de votre station, la moindre fuite si vous n'avez rien pour la bloquer va partir et votre station va se vider. L'hydrogène est clairement dangereux mais comme tout ce qui a un moteur à combustion interne, il doit brûler, il doit exploser pour fonctionner donc c'est nécessaire mais je pense qu'il y a beaucoup de craintes mais il y a aussi beaucoup d'avantages à utiliser l'hydrogène par rapport à l'essence qui est finalement tout aussi dangereuse.

Thomas : En ce qui concerne les piles à combustible, nous parlons de matériaux assez chers, comme le platine, qui sont pour l'instant assez difficiles à remplacer ou à trouver des substituts, alors est-il possible d'éliminer rapidement ces éléments très coûteux ?

Mr. N. Mullier : Ce qu'il faut savoir même quand on parle de batteries, c'est que même des batteries de 20 ans, de giga-capacité, qui se rechargent en 10 minutes et qui ne contiennent pas de métaux rares, pour l'instant il y a encore du nickel, du lithium, du cobalt et plein d'autres cochonneries et ça ne va pas changer d'ici demain. Ce qui est cher dans les piles à combustible, ce sont les catalyseurs, c'est ce qui va vous permettre de lancer votre réaction et de combiner l'oxygène et l'hydrogène pour faire de l'eau. Pour l'instant, dans les piles à combustible qui fonctionnent avec la technologie Pen (protone exchange membrane), le catalyseur est en platine car il permet d'avoir des piles à combustible très compactes. Il existe d'autres technologies qui utilisent des catalyseurs moins chers mais qui ne peuvent pas être facilement stockés dans les voitures. Il y a beaucoup de recherche et développement en cours aujourd'hui, et c'est clairement la partie la plus coûteuse d'un véhicule à hydrogène, la pile à combustible. Elle suit une logique de réduction des coûts similaire à celle de la technologie électrique pour les voitures électriques. Parviendront-ils à remplacer ce platine par du cobalt ou un métal moins cher ou à réduire son utilisation ? Il y a une chance, c'est clairement ce qu'ils recherchent maintenant, ce sera l'un des grands défis des voitures à hydrogène et de la mobilité de réduire le coût des piles à combustible pour rendre les véhicules plus abordables et je pense que tous les acteurs de ce marché sont très bien conscients et savent que c'est ce sur quoi ils doivent travailler en premier pour réussir.

Thomas : J'ai vu sur le site d'Air Liquide que des recherches ont été menées sur l'utilisation d'algues qui produisent naturellement de l'hydrogène.

Mr. N. Mullier : Cette technologie est basée sur le laboratoire, donc c'est faisable en laboratoire, mais il n'y a encore rien pour le faire à grande échelle, donc dans les 10-15 prochaines années il n'y aura rien de spécial. Elle produit de l'hydrogène mais en quantités tellement infimes que pour l'avoir à un niveau industriel, il faudra un peu plus de patience.

Thomas : D'après ce que vous me dites, je comprends que l'hydrogène a plus d'avenir dans le transport de marchandises, etc. que dans les voitures particulières.

Mr. N. Mullier : Je pense qu'il est clair que dans les petits véhicules, l'électricité se développe énormément en ce moment et aura la plus grande part de marché dans les années à venir. Si l'on dispose d'une solide infrastructure de stations-service en 2030 ou 2040, si l'on a réussi à réduire considérablement le coût des piles à combustible et si l'hydrogène est abordable, il est possible que l'hydrogène prenne le relais des voitures électriques, mais je pense que, dans tous les cas, les petits véhicules comporteront une partie électrique et une partie hydrogène en fonction des besoins. Une flotte de taxis fonctionnera plus facilement à l'hydrogène parce qu'un chauffeur de taxi n'a pas envie de recharger toute la journée, s'il doit recharger son taxi, il n'a pas envie d'y passer 3 heures, il va préférer recharger son taxi en 5 minutes à la station et repartir. Alors que quelqu'un qui utilise sa voiture en ville pendant 3 heures par jour veut la recharger dans son garage et ne pas aller à la station-service mais utiliser sa petite prise dans son garage. Donc clairement sur les petits véhicules je pense qu'il n'y aura pas l'un ou l'autre, ce sera l'un et l'autre et ça dépendra de l'utilisation, des subventions, des états, par contre clairement dans ce qui commence à être du transport lourd ou des camionnettes on l'a vu ça peut clairement être encore les deux, quand on parle de camion, de train, d'avion, de bateau, à moins qu'il y ait un développement gigantesque des batteries, des temps de recharge, des capacités de stockage d'énergie. ... mais pour l'instant l'hydrogène a clairement l'avantage sur ces technologies, donc je pense que dans la mobilité il y aura les deux et selon l'application et l'utilisation, l'un aura plus de part de marché que l'autre.

Thomas : Nous avons besoin d'électricité pour produire de l'hydrogène et souvent avec cette électricité il y a une perte dans la production d'hydrogène, donc en termes de coût, ne voyez-vous pas un coût de l'hydrogène qui est beaucoup plus élevé que celui de l'électricité ?

Mr. N. Mullier : Oui et je pense clairement que si vous avez une voiture électrique que vous chargez à la maison ou une voiture à hydrogène, votre hydrogène coûtera plus cher parce que vous avez plus de pertes et vous avez besoin d'électricité pour produire et comprimer l'hydrogène. Encore une fois, cela dépend de l'utilisation : si vous pouvez recharger votre voiture chez vous la nuit et que vous en avez besoin pour 2 ou 3 heures dans la journée, vous accepterez de payer moins cher parce que vous ne vous souciez pas de l'heure, mais si vous êtes chauffeur de taxi, vous préférerez payer un peu plus cher votre carburant parce que cela vous permettra d'éviter de perdre 3 heures de votre journée et de manquer des clients. Donc si vous regardez le carburant, l'hydrogène sera probablement plus cher que l'électricité que vous mettez dans votre voiture, mais si vous considérez le temps d'attente ou la capacité de transport que vous pouvez avoir en plus, il est logique de payer un peu plus pour votre carburant si cela vous permet d'éviter de passer 3 ou 4 heures à la station pour recharger vos batteries.

11) Appendix 11: Transcript of interview 5 (Product Manager BMW/Mini Belux)

Thomas : L'électricité commence à être diffusée, il est donc à peu près admis par tous qu'elle a un avenir dans l'automobile en général (voitures, camions...). À votre avis, l'hydrogène a-t-il un avenir dans l'industrie automobile ou n'a-t-il pas d'avenir du tout ou peut-être seulement dans des marchés de niche ?

X : L'approche du groupe que nous avons en tout cas de ce point de vue est de dire que l'hydrogène fait clairement partie d'une des solutions du futur, ce ne sera pas la solution qui sera utilisée pour la production de masse pour toutes les ventes, elle restera plutôt à la marge, tout en ayant des volumes importants. Pour les prochaines années, la motorisation que nous allons mettre en avant est clairement électrique parce que pour différentes raisons le fait que tout ce qui est véhicule à hydrogène en production coûte plus cher, pour sortir la voiture de la chaîne. Alors que la technologie électrique est une décision de l'industrie et est conduite par toute l'industrie en même temps, donc vous pouvez voir que c'est la technologie électrique qui prend la tête pour le moment et que tout le monde l'a développé récemment. Nous avons sorti le premier X3 électrique en 2013 et vous voyez l'évolution de la technologie et surtout les coûts de production qui ont baissé drastiquement depuis 2013. Maintenant on voit assez rapidement les économies d'échelle qui sont faites et je pense que l'électrique commence doucement à mûrir et est prêt à être lancé, même si on commence seulement avec la nouvelle génération de batteries qui sera utilisée dans les 2-3 prochaines années et qui va déjà nous permettre de réduire beaucoup l'impact du CO₂, mais l'hydrogène c'est la prochaine vague et par exemple je ne sais pas si vous avez vu que nous avons annoncé que nous allions produire une première série de X5 à la fin de cette année ou à la fin du mois d'août 2022. C'est ce que nous lançons à la fin de 2022 et pour le moment il n'y a pas d'annonce de lancement de production de masse en hydrogène, je pense qu'ils attendent toujours de voir comment le marché va évoluer dans les années à venir, nous serons prêts, c'est un peu le message que nous voulons envoyer maintenant, que nous serons là quand la technologie sera nécessaire mais pour le moment je pense qu'il y aura un début à la fin des années 2020, mais ça ne va pas être un boom d'ici 2030. Peut-être davantage du côté des camions et du transport routier, où les besoins en hydrogène sont manifestement plus importants, ou à moins de mettre 40 tonnes de batteries sur votre camion, vous n'irez pas très loin avec un camion purement électrique. Les gros conducteurs, ceux qui ont vraiment besoin de faire de longues distances, vont opter pour l'hydrogène et 90 % des autres clients pour l'électrique, sachant que nous n'abandonnons pas directement les plus récents non plus. Peut-être qu'à un moment donné, l'hydrogène deviendra de plus en plus important parce que la transition se fait lentement pour l'installation de stations de recharge pour les véhicules électriques, mais pour l'hydrogène, nous avons encore besoin de beaucoup d'installations pour les stations.

Thomas : Par exemple, étant donné que vous lancez un nouveau X5, y a-t-il une volonté de créer des partenariats avec certaines entreprises qui créent des stations de recharge par exemple ? Je ne sais pas si IBM a ce projet, mais j'imagine que non, puisqu'il s'agit surtout de voitures.

X : Pour le moment, non, clairement pas encore, on a des accords pour tout ce qui est électrique, vous savez, pour le développement du réseau électrique et tout ça, on a des accords-cadres dans chaque pays avec un ou deux fournisseurs maintenant. Pour l'hydrogène, je ne pense pas que ce soit déjà le cas, c'était des accords qui ne sont pas spécialement annoncés officiellement et derrière les tests que nous allons faire avec le X5 pour l'instant ça va être un test basé à Munich dans un certain rayon et peut-être après ils iront un peu plus loin. Mais dans un premier temps, je pense que l'objectif n'est pas particulièrement de faire des tests dans toute l'Europe. Pour les voitures électriques, vous avez vraiment Tesla comme un acteur qui est arrivé sur le marché et qui a dit il y a un problème de bornes de recharge, il n'y en a pas du tout, je vais installer mon propre super

chargeur dans toute l'Europe et dans le monde entier et ensuite je vais vendre ma Tesla avec la possibilité de se recharger gratuitement là-bas. Je pense que c'est un geste marketing très fort qu'ils ont fait au début et qui leur a permis de mettre en place leur marque. Je pense que du point de vue de l'hydrogène, c'est une technologie qui est plus proche de la technologie actuelle que nous connaissons du point de vue de la recharge que de la technologie électrique, et il doit y avoir des synergies possibles ou des possibilités d'adaptation du réseau existant. Vous enlevez un réservoir d'essence, vous faites quelques adaptations et vous mettez un réservoir d'hydrogène à sa place et je pense qu'il y a une attente, en tout cas que les fournisseurs d'énergie actuels s'adaptent et offrent ces choses à l'avenir. Je ne sais pas en quelle année les poids lourds prévoient de passer à ce type de système. Peut-être l'hydrogène sera-t-il plus intéressant pour eux avant d'attirer le marché des voitures.

Thomas : J'ai parlé avec quelqu'un qui m'a dit que les nouvelles technologies arrivent assez souvent par le biais de sociétés de leasing, par exemple Deloitte qui commence à offrir des Mini électriques à ses employés au lieu d'utiliser la Mini.

X : L'hydrogène sera la solution qui sera proposée aux gros rouleurs et peut-être aussi aux États-Unis, à l'Allemagne, à la France... des marchés avec de très grands pays où vous faites beaucoup de kilomètres et parfois peu d'endroits pour recharger, l'électrique vous lasse plus vite et l'hydrogène dans ces cas-là je pense qu'il a plus de sens, sur un petit territoire plutôt comme la Belgique, le Luxembourg ou les Pays-Bas vous faites plutôt des petites distances, il y a déjà des superchargeurs un peu partout. Je pense que dans un premier temps on va rester très fort sur l'électrique et il y aura une arrivée de l'hydrogène, mais je pense que ce sera vraiment à la marge dans un premier temps, en tout cas tant qu'il y aura encore des voitures diesel.... Si elles entrent sur le marché, elles entreront par la vente aux entreprises parce qu'effectivement c'est toujours par ce biais parce que vous avez un renouvellement du parc qui est beaucoup plus récent, une adoption... c'est comme toute nouvelle technologie, les hybrides, les électriques... ce sont des technologies que l'on vend aux early adopters et à certaines personnes qui veulent absolument en tant que particulier avoir une voiture à la pointe de la technologie et pouvoir parler autour d'eux du fait qu'ils sont déjà avec la nouvelle technologie parce que ça fait partie de leur style de vie. Mais pour le reste, la majorité des gens qui vont vers ça, ce sera via des contrats de leasing parce qu'il y a toujours cette incertitude : j'achète un produit maintenant, je l'ai pendant 3-5 ans et puis qu'est-ce que j'en fais après pour le vendre, je n'ai aucune garantie du prix de rachat. Quand on vendait une voiture électrique en 2013, on n'avait aucune idée de sa valeur en 2018. Tout cela est beaucoup plus simple via les sociétés de leasing qui sont prêtes à vendre et à racheter des voitures tout le temps pour les revendre d'occasion et qui ont de gros contrats avec les revendeurs d'occasion. Ils savent, ils sont beaucoup plus solides pour dire au client : voilà on va mettre en place une valeur résiduelle sur votre voiture avec de l'hydrogène de 30% ou 40% de la valeur de la voiture nette et on prend le risque quand la voiture revient dans 5 ans pour la revendre.

Thomas : Pensez-vous que d'ici 2030, si j'ai le choix entre une voiture électrique A et une voiture à hydrogène B et que sur 10 ans d'utilisation de cette voiture, la voiture à hydrogène me revient moins chère pour le même nombre de kilomètres, toutes choses égales par ailleurs ?

X : Je pense qu'il est un peu difficile d'affirmer cela maintenant, cela peut dépendre de la croissance du parc automobile, de la vitesse à laquelle la technologie décolle, de la vitesse à laquelle les stations de recharge d'hydrogène sont installées. C'est possible, mais pour l'instant, quand on voit la direction prise par le gouvernement, on se rend compte qu'il s'agit d'une décision politique. L'année dernière, nous avons eu des statistiques assez fortes indiquant que toutes les voitures de société devraient être électriques d'ici 2026 et qu'il y aura plus de déductibilité pour les voitures non électriques à partir de 2026. Tout cela signifie que, pour l'instant du moins, ils vont clairement faire pression pour que ce soit le premier. Je pense que si nous voulions que ce soit déjà le cas en 2030, nous aurions déjà dû faire des annonces pour le développement du réseau d'hydrogène, mais ce n'est pas le cas. Il en faut un peu moins dans une voiture à hydrogène que dans une voiture électrique, mais je ne sais pas exactement si le moteur à hydrogène est cher à produire ou non.

Thomas : La pile à combustible est encore assez chère, c'est surtout le platine qui est cher dans cette pile à combustible.

X : Je pense que d'ici 2023, si je ne me trompe pas, nous n'aurons plus de métaux rares dans les piles. L'efficacité augmente toujours, il y a toujours une garantie je pense si je ne me trompe pas d'une conservation d'environ 70% sur un cycle de vie de 8 ans de la capacité initiale vous voyez au moins 55% pour garantir la batterie. Vous me disiez que la façon de penser à la mobilité des consommateurs doit absolument changer dans le sens où maintenant on se dit en fait avec ma voiture à essence je peux aller où je veux parce que de toute façon j'ai trouvé une pompe à essence et si je dois remettre de l'essence ça me prend littéralement moins de 5 minutes et je suis de retour sur la route, alors que si j'achète une voiture électrique, dans l'esprit des gens je suis complètement contraint, je ne peux pas bouger et donc là l'hydrogène aurait un avantage énorme par rapport à l'électricité. Mais vous me disiez qu'en fait vous pensiez qu'il fallait changer complètement la mentalité de la mobilité dans l'esprit des gens parce que la plupart des gens qui conduisent des voitures font surtout des petits trajets, 95% des gens qui conduisent en Belgique font des trajets de moins de 40 kilomètres par jour en moyenne, donc c'est ridiculement bas. Les familles ont tendance à faire des trajets plus longs le week-end et vous allez un peu plus loin et ainsi de suite, mais le nombre de personnes qui font 500 kilomètres par jour est rare, il y en a très peu et même pour ces clients, si vous faites cela, c'est

généralement pour une raison professionnelle, donc votre journée prévue sur la route est théoriquement de 500 kilomètres et vous allez quand même faire quelques arrêts, ce n'est pas 500 kilomètres d'un coup tous les jours. Avec l'augmentation du nombre de stations de recharge rapide, vous voyez de plus en plus de superchargeurs qui sont maintenant également capables de charger à 150 kilowatts à 200 kilomètres à 300 kilomètres, parfois même des voitures qui ont déjà de très grandes batteries comme la Tesla Model x ou Model S ou l'Audi 3, certaines grandes voitures avec de grandes batteries peuvent être chargées très rapidement. Parce que si vous avez un super chargeur qui vous permet de recharger 150 kilowatts en 1 heure et que vous avez une batterie de 300 kilomètres, en 2 heures vous aurez presque tout rechargé mais rappelez-vous que vous ne tombez jamais vraiment à 0 non plus, vous rechargez toujours un peu avant, vous n'avez pas besoin de recharger en permanence et vous conduisez toujours avec un niveau de recharge qui vous permet juste de faire le prochain trajet que vous avez à faire. Je pense que le changement est que vous devez être un peu plus conscient de votre autonomie à tout moment mais qu'avec l'essence vous pouvez conduire inconsciemment et puis quand vous arrivez à la borne d'autonomie de 30 kilomètres vous vous dites : Je vais trouver une pompe et tu vas trouver une pompe et tu vas faire le plein. Là ça va prendre un peu plus de temps, mais au quotidien, les 3/4 des gens qui vont travailler et qui rentrent chez eux le soir, mettent la voiture dans la prise et la voiture va se charger tranquillement toute la nuit sur la borne du domicile, ce qui va leur permettre de faire tous leurs trajets.

Thomas : On remarque que les ventes de voitures diminuent selon les estimations faites et certains pensaient qu'en 2021-2022 les ventes reviendraient à un état normal mais en fait ils se rendent compte dans leurs prévisions qu'il faut peut-être voir la mobilité d'une autre manière, que nous devrions nous déplacer de plus en plus autrement qu'en voiture et même que nous reviendrions à une sorte de consommation locale plutôt que globale et qu'à ce niveau, l'électricité avait beaucoup plus d'avantages car elle est plus efficace sur les courtes distances et que l'hydrogène avait moins de sens car nous consommons localement. Qu'en pensez-vous ?

X : Nous nous attendons tous à ce qu'à un moment donné, il y ait un peu plus de taxes sur les voyages aériens et que les voyages aériens deviennent un peu plus chers qu'avant et que vous deviez utiliser d'autres systèmes pour partir en vacances. Ce sera probablement l'une des répercussions et avec les mesures plus écologiques qui vont arriver, ce sera l'un des secteurs qui sera touché dans les prochaines années aussi. Donc je pense à une autre façon de consommer le tourisme, qu'il soit plus local ou plus lointain, avec peut-être plus de transport en train ou en voiture, mais c'est juste une autre façon de voir les choses. Il est tout à fait possible d'aller dans le sud de la France ou en Espagne avec une voiture électrique, cela prend juste un peu plus de temps, mais c'est possible et ce sera encore plus possible à l'avenir, et c'est pour cette raison que vous pourriez dire : Je pourrais prendre de l'hydrogène. Mais je pense que certaines personnes achètent effectivement une voiture pour le nombre de fois où je descends dans l'année et où j'ai besoin d'une telle autonomie, mais ce n'est pas la majorité. La majorité des gens vont regarder leur utilisation quotidienne et dans ce cas je pense que les voitures électriques ont plus de sens et seront plus présentes mais je pense que dans notre pays l'hydrogène ne fera pas un énorme boom, je pense que dans d'autres pays avec des distances plus grandes à parcourir il aura clairement sa place et la consommation locale est clairement une tendance mais après pour revenir à tout ce que le marché par exemple clairement le marché a déjà beaucoup diminué l'année dernière mais ça dépend pour qui. Nous, chez BMW et chez Mini, nous sommes restés égaux en 2020 par rapport à 2019 où nous avons eu une légère baisse mais très minime car nous avons su proposer les bons produits. Ce que le client recherche maintenant c'est surtout de l'électrique mais surtout de l'hybride et nous avons la gamme d'hybrides la plus large du marché. Cela permet donc aux entreprises d'avoir continué à bien se vendre et maintenant, par exemple, le début de l'année 2021 est un début d'année exceptionnel.

Thomas : Lorsque vous parlez des ventes de BMW, s'agit-il d'une baisse des ventes en usine ou d'une baisse des ventes aux particuliers ?

X : L'année dernière je pense que c'était plus les clients privés, qui attendaient pour commander.

Thomas : Vous me disiez que les hybrides et les électriques étaient principalement vendus à des entreprises plutôt qu'à des particuliers. Quand vous dites principalement, c'est environ 90% ou 60% ?

X : Peut-être pas 90% mais il faut être au moins à 80% oui, un particulier va peut-être prendre une voiture électrique plus rapidement qu'une hybride parce qu'il n'y a pas d'incitation en tant que particulier à prendre ça sauf si ça rentre vraiment dans votre usage quotidien mais ça reste une voiture qui est beaucoup plus chère qu'une voiture à essence si vous devez l'acheter vous-même.

Thomas : J'ai discuté avec quelqu'un qui disait que c'était juste une sorte de construction fiscale qui avait été créée et qui allait automatiquement disparaître parce qu'il y avait 2 technologies qui étaient embarquées dans la même voiture et que du coup c'est très cher et que de toute façon ça émettait des polluants donc ça n'avait pas d'avenir.

X : Je pense qu'il n'a pas tout à fait tort, c'est une transition vers l'électrique puisque vous avez toujours des batteries dans ces véhicules, ce qui permet à l'industrie des batteries de progresser et de réduire les coûts. Parce que même dans l'hybride que vous voyez entre les premières hybrides et les dernières hybrides qui sortent maintenant, la différence de technologie entre les batteries est assez énorme et l'autonomie que vous pouvez faire en 100% électrique a vraiment beaucoup progressé donc les prochaines générations de batteries atteindront facilement 500-600 kilomètres pour des prix abordables. À partir de là, l'utilisation des hybrides devient minime, car dans un hybride, on perd clairement en autonomie par rapport à une voiture à essence classique.

Thomas : C'était un projet de Volkswagen, c'était aussi un projet chez IBM entre 2003 et 2008, il y a eu pas mal de projets pour créer des voitures à hydrogène et des voitures à combustion d'hydrogène. Je sais que vous aviez la BMW Série 7 avec un moteur à combustion. Ce moteur à combustion à hydrogène a été complètement abandonné et quand vous regardez les nouvelles voitures qui sortent avec de l'hydrogène, il n'y en a pas beaucoup qui sont destinées au grand public (environ 3 : Nixio, Mirai, Lexus). Pourquoi cette technologie de combustion de l'hydrogène a été complètement abandonnée par tous les acteurs alors qu'au niveau de la création de la voiture, le coût de la voiture était quand même moins élevé car la technologie est plus simple ou plutôt déjà maîtrisée par rapport au moteur électrique alimenté par une pile à combustible.

X : Pourquoi ça a été complètement abandonné, j'avoue que je ne pourrais pas vous le dire directement, je sais qu'à l'époque, ces 7 séries qui couraient étaient loin d'être complètement au point apparemment, elles ne couraient pas vraiment très bien. Maintenant je ne sais pas pourquoi, je suppose que c'est aussi une question d'économie d'échelle et de développement électrique. Ce n'est pas du tout une technologie dont on parle vraiment. Mais j'ai trouvé les chiffres entre-temps et en fait quand je les regarde c'est une baisse assez similaire, le marché a fait -21,5% l'année dernière (marché complet en Belgique) et le marché purement corporate a fait -23,9% mais le marché privé a fait presque la même baisse, celui qui a été le moins impacté c'est le marché des indépendants et des PME qui a baissé un peu moins. Si jamais on sépare les deux, on a les professions libérales et les indépendants qu'on regroupe et puis on a notre propre définition de ce qu'on appelle le B2B, les entreprises qui ont déjà plus de 5 ou 10 voitures dans un parc de la même marque. Les 3 secteurs ont diminué de la même manière, plus ou moins -20%, donc pas une tendance. En 2021, on voit que ça augmente beaucoup plus fortement qu'en 2020, on voit que toutes les ventes aux sociétés et aux indépendants et aux PME augmentent fortement et les ventes aux particuliers augmentent légèrement.

Thomas : On a déjà parlé de l'infrastructure qui est en fait un des gros problèmes, un des gros obstacles à la diffusion de l'hydrogène. Il y a un autre élément qui est un peu une barrière à l'adoption de l'électricité, c'est la production d'hydrogène, qui aujourd'hui est à 95% de l'hydrogène gris et donc qui émet des polluants, qui émet des gaz à effet de serre, il y a je crois 3% qui est de l'hydrogène bleu qui émet des polluants mais qui est récupéré et qui est enfoui dans le sol ou utilisé à d'autres fins et puis 2% d'hydrogène qui est de l'hydrogène vert qui est produit par électrolyseur et dont l'électricité qui est utilisée dans l'électrolyseur est fournie par ce qu'on appelle l'électricité verte et enfin l'hydrogène jaune qui est électrolysé à nouveau mais avec de l'électricité qui vient des centrales nucléaires. C'est un gros défi pour la production d'hydrogène parce que ça n'a pas de sens de faire rouler des voitures à hydrogène si on consomme 80 grammes de CO₂ pour la production, donc ça n'a pas de sens, il y a plus ou moins la même chose pour l'électricité donc c'est un peu différent. Que pensez-vous de l'hydrogène, pensez-vous que c'est faisable, y a-t-il des inquiétudes chez BMW à ce sujet ou pensez-vous que des entreprises comme Air Liquide et Total vont s'adapter à la production d'hydrogène ?

X : Honnêtement, nous n'avons pas de vision claire à ce sujet, peut-être y a-t-il des discussions qui ont lieu en interne à un niveau plus élevé entre des partenaires potentiels et des entreprises comme Air Liquide. Mais personnellement, il me semble logique que si nous allons dans cette direction, les producteurs d'hydrogène devront s'adapter et devront faire de l'hydrogène vert car ce sera la norme. Surtout, je ne vois pas ce produit être commercialisé en masse avant quelques années encore et déjà maintenant c'est effectivement, comme vous l'avez dit pour l'électricité, un point qui est très important et qui est toujours sous les projecteurs quand on parle d'électricité, c'est la production d'électricité qui sera utilisée. Je ne vois pas pourquoi, quand on déploie l'hydrogène, on déploie l'hydrogène avec des procédés qui consomment plus de CO₂ que pour l'électricité.

Thomas : Un professeur d'université me disait que l'utilisation de la voiture électrique à grande échelle plus l'utilisation de techniques pour ne créer que de l'électricité verte, on allait vers un problème qui était la disponibilité de l'électricité à tout moment, c'est-à-dire que l'électricité elle-même est difficile à stocker dans des batteries. Pour vous, est-ce que les fournisseurs d'électricité vont s'adapter ou est-ce qu'il faut absolument avoir un parking partagé entre l'hydrogène et l'électricité pour éviter tout risque de pénurie.

X : Je pense que d'une part, il y a une certaine attente du secteur automobile envers le secteur de l'énergie, pour qu'ils prennent des mesures d'adaptation et d'autre part, il y a aussi toute la technologie qui est en train d'être développée, je ne me souviens plus du nom, mais en gros, vous chargez votre voiture, votre voiture devrait vraiment pouvoir être utilisée comme une batterie, comme une pile, donc vous la chargez et ensuite vous rentrez à la maison et quand vous rentrez avec une voiture électrique complètement chargée et que vous voulez faire fonctionner votre machine à laver etc. votre voiture est capable de renvoyer

l'électricité dans le réseau domestique pour fournir également de l'énergie. Je pense que c'est aussi potentiellement l'une des solutions à ce problème. Si on arrive à développer des batteries de plus grande capacité, ce qui va devenir la norme dans les années à venir, que ce soit de l'hydrogène ou purement électrique, vous savez comment créer une sorte de générateur pour que typiquement vous rechargez votre voiture si elle est branchée sur une prise continue, et puis vous la rechargez pendant la journée avec des panneaux solaires sur le toit, et le soir c'est l'énergie de votre voiture qui est puisée pour alimenter la maison quand vous n'en avez pas besoin. Ce sont des technologies qui sont testées actuellement, j'avoue que je n'ai pas une vision précise de l'efficacité de ce système et je ne suis pas sûr qu'il résoudra tout, mais c'est une des visions de l'avenir.

Thomas : La direction que prend l'industrie automobile belge dépend fortement des décisions européennes, mais aussi de pays comme la France et l'Allemagne, auxquels la Belgique est fortement liée, tant pour la production d'hydrogène que pour la production d'électricité. Pour l'instant, la Belgique n'a pas assez de ressources pour produire de l'électricité, donc nous pompons dans les autres pays.

X : Donc je pense qu'il n'y a pas de solution miracle, on va continuer à pomper dans les autres pays, donc il me semble clair que l'Europe et les pays voisins vont nous influencer dans un sens ou dans l'autre et vous pouvez voir que certains marchés ont déjà pris plus, par exemple les Pays-Bas sont beaucoup plus développés que nous en termes de réseaux de recharge, etc. et la mise en œuvre des voitures électriques, ils vendent beaucoup plus de voitures électriques là-bas parce qu'ils ont fait des choix politiques plus forts il y a longtemps, maintenant vous voyez que la transition va commencer et je pense que vous avez également vu qu'à partir de septembre il y a aussi des stations de recharge qui deviennent 200% déductibles d'impôt pour les entreprises si vous mettez votre station dans l'accès public et privé et pour un particulier vous allez avoir 45% de déductibilité si vous mettez une station à la maison.

Thomas : Y a-t-il une différence de coût entre un kilowatt pour la voiture et un kilowatt pour l'électricité de la maison ?

X : Pour l'instant, non, sauf si votre voiture est en leasing, si vous choisissez de vous recharger sur un réseau, c'est-à-dire ailleurs que chez vous. Chez vous, vous faites ce que vous voulez, vous payez le prix que vous payez quand vous souscrivez votre contrat d'électricité classique chez vous, mais si vous voulez recharger sur une borne publique, vous payez le coût qui est décidé par l'exploitant de la borne. C'est lui qui détermine le prix du kilowattheure et souvent, quelle que soit la station de recharge, ce prix est un peu plus élevé que le kilowattheure que vous payeriez chez vous.

12) Appendix 12: The Adopters Category:

In order to distinguish people, Rogers created different categories of adopters based on their innovativeness. He defined those adopters' categories as “the classification of members of a social system on the basis of innovativeness” (Rogers 2003 p22). Rogers defined also the innovativeness as “the degree to which an individual or other unit of adoption is relatively earlier in adopting new ideas than other member of a system” (Rogers 2003 p22). They are 5 different categories. We can assume that each individual in the same category has the same degree of innovativeness.

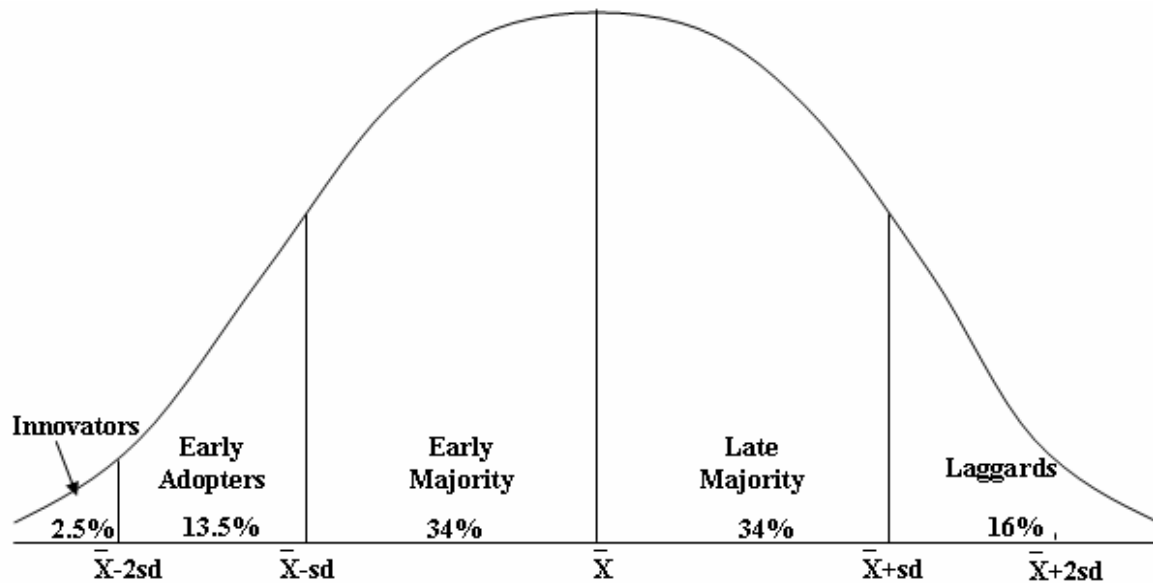


Figure 12: Adopter categorization on the basis of innovativeness, based on the average time to adopt ($\bar{X}$) and the standard deviation (sd) (Rogers, 1995))

- Innovators:** The individuals of this categories have a complex technical knowledge which allows them to have an important venturesomeness. They are willing to experience new ideas. So, they need to accept a certain amount of risk to adopt unprofitable or unsuccessful innovations. They also could be marginalized. They are the gatekeepers of an innovation. They play a key role in the diffusion of innovation because they signal to other users and in particular early adopters that the product has potential. If they don't adopt it, the innovation will not enter in the social system. This category represents 2.5% of the people who adopt a new technology.
- Early adopters:** Rogers (2003) say that early adopters have more boundaries with the social System than the innovators. They also have a predisposition to take a leadership role. So, people listen to their subjective opinions and information about the innovation. Following Light (1998 p.19) we also can see that leaders have an important role to play at every stage of the innovation process. With their influences on others, by adopting the innovation, they reduce uncertainty about it in the diffusion process. As Rogers say, "early adopters put their stamp of approval on a new idea by adopting it" (Rogers, 2003 p,283). It is important to note that in moving from "early adopters" to "early majority" there is a very risky gap for companies called the "Chasm". Indeed, at this point, manufacturers must be aware that in

order to pass this Chasm they will have to meet the expectations of consumers and not simply propose something new that appeals to the first two categories. Indeed, to cross the chasm, companies must get good feedback by the early adopters in order to appeal to the early majority. This category represents 13,5% of the people who adopt a new technology.

- **Early majority:** This part represents 34% of the people who adopt a new technology. They will not adopt an innovation until they can see that if the technology has proven to bring a real advantage. They only embrace innovation when it has been proven itself. They also wait the moment when the price is decreasing. The early majority is a key segment if you want to make profits.
- **Late majority:** This category is quite similar to the early majority; they have common characteristics, but the late majority are not very comfortable with technological products. . They acquired innovation after the majority of the population, and mainly under the pressure of others. The Early majority they represent 34% of the people who adopt a new technology.
- **Laggards:** They are the most risk-averse and their financial constraint is very important to them. In order to catch the innovation at the lowest price they wait a lot before adopting it. They represent 16% of the potential adopters.