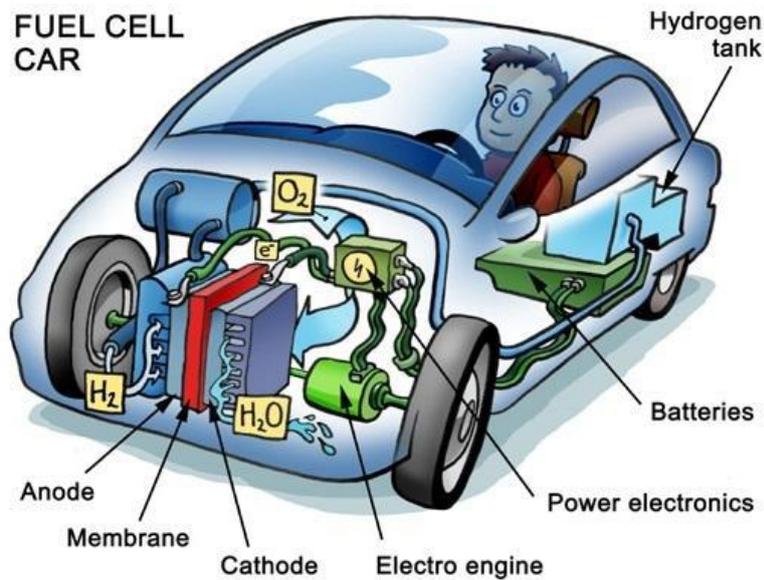


# VEHICULE AUTONOME : MOTORISATION HYDROGENE



**Etudiants :**

Sarah CLEMENT

Julia DAMAMME

Clément DELONNOY

Théo GALLOU

Laëtitia GENECHESI

Louis JADOT

Enseignant-responsable du projet :

Monaem IDOUDI



Date de remise du rapport : 12/06/2021

Référence du projet : STPI/P6/2021 – 31

Intitulé du projet : ***Véhicule autonome : motorisation hydrogène***

Type de projet : ***Recherche documentaire, état de l'art, veille technologique, bibliographie***

Objectifs du projet :

***Remettre un rapport présentant différentes technologies telles que la motorisation hydrogène et le véhicule autonome. Étudier et comprendre leurs fonctionnements ainsi que les comparer à des technologies déjà existantes. Déterminer le lien pouvant être fait entre ces deux procédés.***

Mots-clefs du projet : ***Véhicule autonome, hydrogène, moteur, avenir***

## TABLE DES MATIERES

<b>TABLE DES MATIERES</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
<b>METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL</b>	<b>7</b>
<b>1. VEHICULE AUTONOME</b>	<b>8</b>
1.1. PRESENTATION ET CHRONOLOGIE DES TECHNOLOGIES	8
1.2. FONCTIONNEMENT GENERAL (SYSTEMES DE PERCEPTION, IA)	8
1.3. ENJEUX / AVANTAGES ET INCONVENIENTS	11
1.3.1. ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX	11
1.3.2. ENJEUX TECHNOLOGIQUES	12
1.3.3. CYBERSECURITE	12
1.3.4. ENJEU SOCIÉTAL	12
1.4. APPLICATION DU VA : CAS D'ÉTUDE : V2X	13
<b>2. MOTEUR HYDROGENE</b>	<b>15</b>
2.1. LES PRINCIPAUX TYPES DE MOTORISATION HYDROGENE	15
2.1.1. MOTEUR ELECTRIQUE ALIMENTÉ PAR UNE PILE A COMBUSTIBLE	15
2.1.2. MOTEUR A COMBUSTION INTERNE (MCI) A HYDROGENE	16
2.2. PRODUCTION ET STOCKAGE DE L'HYDROGENE	16
2.2.1. INTRODUCTION SUR LA PRODUCTION (UTILISATION DES ENERGIES POUR PRODUIRE, DIFFERENTES SOLUTIONS ET SOLUTIONS NON VIABLES)	17
2.2.2. ÉLECTROLYSE : UNE SOLUTION DURABLE	17
2.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS	18
2.3.1. TABLEAU COMPARATIF DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE MOTORISATION	18
2.3.2. EXPLOITATION DE DONNEES	18
2.4. LA MOTORISATION HYDROGENE : UNE SOLUTION D'AVENIR AU PROBLEME ECOLOGIQUE ?	19
2.4.1. LES ENJEUX DE LA MOTORISATION HYDROGENE	19
2.4.2. UN VERITABLE AVENIR ?	20
2.4.3. LES AXES DE RECHERCHE ACTUELS	21
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	<b>22</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>23</b>
<b>CREDITS D'ILLUSTRATION</b>	<b>25</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>26</b>

## NOTATIONS, ACRONYMES

**ABS** : AntiBlockierSystem (système d'antibloquage des roues)

**IA** : Intelligence Artificielle

**LIDAR** : LIght Detection And Ranging

**PàC** : Pile à Combustible

**STI** : Système de Transport Intelligent

**V2D** : Vehicle to Device

**V2I** : Vehicle to Infrastructure

**V2N** : Vehicle to Network

**V2P** : Vehicle to Pedestrian

**V2X** : Vehicle to Everything

**VA** : Véhicule Autonome

**VAC** : Véhicule Autonome Connecté

**MCI** : Moteur à combustion interne

## INTRODUCTION

Dans le cadre de notre deuxième année de cycle ingénieur à l'INSA Rouen Normandie, nous sommes amenés à réaliser un projet de physique, appelé EC P6. Ainsi, nous avons réalisé un « état de l'art » sur le sujet suivant, Véhicule Autonome : Motorisation hydrogène.

Dans un monde en constante évolution, où la course effrénée au développement est une priorité, la mobilité est le cœur de la dynamique. Les transports, qu'ils soient autour du monde ou simplement dans les villes, sont un véritable enjeu du XXIème. Cependant, l'essor des moyens de transport polluants a entraîné au cours de ces dernières décennies de graves problèmes environnementaux et de santé publique.

C'est pourquoi aujourd'hui, suite à une prise de conscience collective du danger, nous assistons à l'émergence d'innovations techniques et technologiques pour rendre les transports urbains plus respectueux de l'environnement. C'est dans ce contexte que les véhicules autonomes et la motorisation hydrogène font leur apparition.

La finalité de notre rapport sera de déterminer les liens qui existent entre ces deux technologies, en passant par une présentation générale du véhicule autonome et de la motorisation hydrogène.

Nous nous concentrerons donc, dans un premier temps, sur le Véhicule Autonome où nous expliciterons les différents composants lui servant à assurer le système de perception général. Ensuite, nous tenterons de comprendre les enjeux que ce type de véhicule représente. Enfin nous verrons comment ces derniers communiquent en réalisant le cas d'étude du V2X.

Puis, dans un second temps, nous porterons notre attention sur le moteur hydrogène. Nous décrirons d'abord les principaux types de motorisation hydrogène. Nous aborderons ensuite les problématiques que sont la production et le stockage de l'hydrogène. Puis, nous débattrons sur les avantages et les inconvénients de cette technologie par rapport à celles déjà existantes. Enfin, nous verrons si la motorisation hydrogène est une solution d'avenir.

## METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Nous nous réunissions avec M.IDOUDI en moyenne une fois toutes les deux semaines le lundi matin. Nous avons eu quelques séances à l'INSA, mais la plupart ont été faites en distanciel via le logiciel Discord. En plus de cela, notre groupe s'est réuni plusieurs fois des jeudi après-midi. Les deux premières séances ont permis au professeur de nous expliquer le sujet du projet mais aussi de ce qu'il attendait comme rendu. Les autres séances étaient tout simplement des suivis sur l'avancement de notre projet et de la rédaction de notre rapport.

Afin de réaliser au mieux notre projet, nous avons divisé le groupe en deux sous-groupes selon les affinités avec les deux parties. Trois élèves se sont concentrés sur le VA tandis que les trois autres ont porté leur attention sur la motorisation hydrogène. Cela nous a permis d'être plus efficace sur chaque thème car chacun travaillait sur une partie qui l'intéressait. Nous avons tous des tâches distinctes et prédéfinies. Grâce à cela, personne ne se "marchait dessus".

Nous avons créé un drive où l'on mettait tous nos documents afin que tout le monde puisse y avoir accès facilement à tout moment et que tout soit réuni en un même endroit. Nous avons d'abord créé deux Google doc : un sur les VA et un sur la motorisation hydrogène. Ainsi, nous pouvions tous écrire sur ces documents et en même temps. Ensuite, nous avons assemblé ces deux parties afin de créer la première version de notre rapport. Pour finaliser et améliorer celui-ci, nous faisons des versions Word que l'on ajoutait sur notre serveur Discord à chaque fois qu'une modification était apportée.

Comme dit précédemment, chaque sous-groupe a réalisé ses parties, mais nous avons fait les communes telles que l'introduction, la conclusion ensemble.

ORGANISATION DU TRAVAIL		VÉHICULE AUTONOME			MOTEUR HYDROGÈNE			
		LAETITIA G.	SARAH C.	THEO G.	LOUIS J.	CLEMENT D.	JULIA D.	
Conception structure du rapport		GROUPE ENTIER						
Application structure du rapport								
Introduction		GROUPE ENTIER						
Méthodologie / Organisation		GROUPE ENTIER						
1	.1							
	.2							
	.3	.3.1						
		.3.2						
		.3.3						
.3.4								
.4								
2	.1	.1.1						
		.1.2						
	.2	.2.1						
		.2.2						
	.3	.3.1						
		.3.2						
	.4	.4.1						
		.4.2						
		.4.3						
	Conclusion		GROUPE ENTIER					
Annexes		GROUPE ENTIER						

## 1. VEHICULE AUTONOME

### 1.1. Présentation et chronologie des technologies

Le terme « véhicule autonome » (VA) désigne un véhicule (le plus souvent une voiture ou un bus) capable de circuler en autonomie sur le réseau routier, grâce à une conduite tout ou en partie automatisée

Il existe 6 niveaux d'autonomie, classés de 0 (conduite entièrement assurée par l'Homme, dite conduite manuelle) à 5 (conduite automatisée sur tous types de routes). Actuellement, la plupart des voitures utilisées ont une autonomie de niveau 1 ou 2.

Le niveau 1 d'autonomie, nommé "conduite assistée" correspond à un véhicule équipé de l'ABS (système d'anti-blocage de roues en cas de freinage brusque), ou de régulateur de vitesse par exemple.

Au niveau 2, "conduite partiellement automatisée", la gestion de la trajectoire du véhicule est en partie donnée par la machine, puisque le véhicule peut effectuer des mouvements longitudinaux et transversaux sans l'aide du conducteur, par exemple pour effectuer un centrage dans la voie ou un rabattement en cas de dépassement de voie sans les clignotants.[\[1\]](#)

En ce qui concerne l'historique, l'automatisation des véhicules a débuté dès 1939 avec la transmission automatique, suivie en 1958 d'une voiture équipée d'un régulateur de vitesse. En 1966 apparaît la première voiture équipée du système d'ABS.

Plus tard, en 1977, un laboratoire japonais met au point la première voiture pouvant suivre une voie routière grâce à des capteurs optiques.

Ensuite en Allemagne est mis au point le camion VaMoRs, en 1986, qui se déplace pratiquement sans intervention humaine, à l'aide de capteurs, de caméras et d'un ordinateur de bord.

Ce n'est qu'au début des années 1960 que le GPS, système de navigation renommé, fait son arrivée sur les routes et révolutionne le monde des transports.

En réalité, on remarque que les premiers programmes informatiques de système de transport intelligent (STI) datent des années 60. L'écriture de ces programmes a été permise par les avancées technologiques réalisées dans le domaine informatique, et ils avaient pour but principal d'aider à la conduite.

Cependant, les infrastructures informatiques n'étant toujours pas assez développées, le service n'était pas assez fluide et stable. Il faudra donc attendre 20 ans pour voir ce genre de projets refaire surface.

Notons deux de ces projets partageant un objectif d'optimisation de la sécurité des utilisateurs, de diminution de la pollution et d'usage rationalisé de l'énergie, qui sont les projets PROMETHEUS (1986) et IVHS America (1988).

Ce sont toutes ces innovations qui ont mené aux VA tels qu'on les connaît aujourd'hui et dont deux exemples d'application sont les navettes autonomes, à Lyon ([Annexe 1](#)) et les voitures Renault Zoé autonomes, à Rouen ([Annexe 2](#)).

### 1.2. Fonctionnement général (systèmes de perception, IA)

Un véhicule autonome est équipé de divers outils (capteurs, caméras) et logiciels qui communiquent entre eux grâce à une Intelligence Artificielle (IA).

Tous ces capteurs permettent de collecter les informations extérieures nécessaires à la conduite, qui sont acheminées jusqu'aux logiciels formant l'IA qui les analysent et traitent. Afin d'assurer une autonomie sans faille au véhicule, les différents capteurs sont redondants,

et prennent des mesures de nature différente, pour que l'IA puisse recouper les différentes informations dans le but d'avoir une "vision" la plus exacte possible du milieu extérieur. L'IA est au préalable entraînée à reconnaître et identifier les différents facteurs extérieurs, tels que les piétons, les 2 roues, les camions,... ou encore des scénarios comme le freinage brutal du véhicule face à un obstacle. Elle est de plus capable de traiter du texte (celui des panneaux de signalisation) et est au fait du code de la route.

La prise de décision est donc assurée par l'IA grâce aux informations qu'elle reçoit, et aboutit à une action pour activer/ désactiver une commande (freiner, tourner, accélérer,...). Par exemple, si les capteurs détectent une forme humaine en mouvement sur la voie, l'IA va l'interpréter comme un piéton traversant la route, et donc anticiper et décider d'actionner les freins de la voiture.

Si le nombre et le genre de capteurs embarqués dépendent du constructeur et de la taille du véhicule, un point reste invariant : la fusion multicapteurs.

En effet, chaque capteur a ses propres limites, qui le rendent inexploitable dans certaines conditions (masquages, imprécisions, problème de portée,...), voire carrément inopérant en cas de défaillance.

La fusion multicapteurs permet donc de s'appuyer sur différentes informations fournies par des capteurs variés, afin d'obtenir une donnée globale pertinente et détaillée.

Cette perception complète est nécessaire à un VA pour remédier aux problèmes qu'il peut rencontrer durant un trajet. Par exemple, pour la détection d'un obstacle, l'IA combinera les informations envoyées par une caméra et un capteur laser ou un radar. [\[1\]](#)



Figure 1 : Perception d'un VA sur la route

En ce qui concerne les détecteurs et autres appareils nécessaires au fonctionnement du VA, les invariables sont les radars, les caméras et les capteurs ultrason.

Un radar est un système composé d'un émetteur et d'un récepteur. Il utilise les ondes électromagnétiques (ondes radio) pour déterminer la présence, la position et la vitesse d'objets, en envoyant les ondes via l'émetteur, qui sont réfléchies sur l'objet en question et captées ensuite par le récepteur.

Installé sur un VA, un radar sert à mesurer la distance avec les véhicules précédents et visualiser la route au travers neige, brouillard,...

Les constructeurs automobiles installent de plus des radars d'angles afin de surveiller les mouvements dans l'environnement proche autour du véhicule.

Une caméra est un dispositif de prise de vues. Elle est utilisée pour enregistrer ou transmettre des images successives d'une scène ou d'un environnement, dans le but de restituer l'impression de mouvement.

Leur mise en fonction sur un VA est utile pour identifier l'environnement, les éléments extérieurs (piétons, obstacles sur la route, ...).



Figure 2 : Modélisation de la perception dans une Tesla autonome

Un capteur ultrason fonctionne à peu près de la même manière qu'un radar. En effet, il émet des impulsions sonores à haute fréquence de manière régulière dans le temps. Ces impulsions se propageant dans l'air à la vitesse du son sont ensuite réfléchies (même sur des objets transparents ou très minces) par les cibles. Elles reviennent donc au capteur, qui calcule la distance le séparant de l'obstacle grâce au temps mis par le signal à lui revenir. Ce genre de capteurs permet donc de détecter les obstacles à proximité d'un VA ou encore d'aider au stationnement.



Figure 3 : Perception des capteurs ultrasons lors d'un stationnement

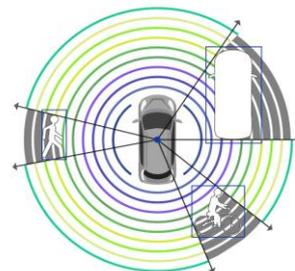


Figure 4 : Visualisation de l'environnement grâce au LIDAR

Un LIDAR (Laser Imaging (ou Light) Detection And Ranging) est un scanner laser longue portée avec un rendu 3D grâce à son système de lumière infrarouge pulsée qui rend la distance entre un objet et l'objectif. Il a pour avantage principal la collecte très rapide de données (~10 000 points dans l'espace/s), donc il retranscrit avec un temps de latence très faible l'environnement dynamique autour du VA et a une grande précision (grand échantillon de points et incertitude sur le laser faible : 6mm à 50m).

Ce dispositif fonctionne de jour comme de nuit. De plus, grâce à son installation sur le toit du VA, il n'a pas d'angle mort et a donc un rendu à 360°.

Voici un tableau comparatif des équipements embarqués dans les véhicules en cours de mise au point par les constructeurs automobiles Renault [2] et Tesla [3] :

Équipement embarqué	Renault	Tesla
Lidar	3 (2avant, 1arrière)	/
Caméra frontale	1 trifocale (courte, moyenne et longue portée)	3 (1 principale portée 150m, 1 longue portée (250m), 1 grand angle portée 60m)
Radar	1 frontal longue portée	1 frontal portée 160m
Radar d'angle	4 (angles)	
Capteurs ultrasons	22 (ceinture)	12 (6 avant, 6 arrière portée 8m)
Caméras	4 180° (rétroviseurs + plaques)	5 (2 latérales orientées arrière portée 100m, 2 latérales orientées arrière (80m), 1 arrière portée 50 m)

Figure 5 : Tableau comparatif des équipements embarqués - VA Tesla et Renault

Les constructeurs automobiles s'assurent toujours de la redondance des systèmes embarqués, afin de diminuer au maximum le risque d'accidents.

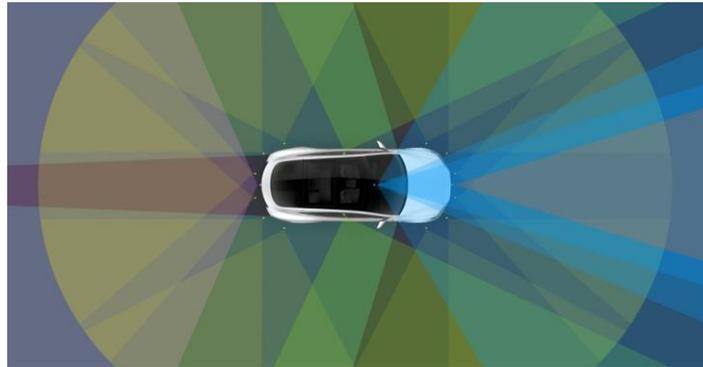


Figure 6 : Illustration de la redondance des capteurs : modélisation des champs d'action

Pour communiquer avec les passagers, le VA utilise ce que l'on appelle le V2D (Vehicle to Device). Il est donc équipé d'un certain nombre d'appareils capables de transmettre des informations aux personnes à bord.

En effet, l'utilisateur peut régler l'éclairage intérieur, assurer son confort (chauffage des sièges, climatisation, ...), mettre de la musique, vérifier l'aspect maintenance du véhicule (gonflage des pneus, ...) ou encore programmer sa navigation depuis l'intérieur du véhicule, par le biais de l'écran central de contrôle.

De plus, en passant par des actions ou des sons tels que des bips ou des changements d'angle du volant en cas de dépassement de ligne, un véhicule disposant d'une certaine autonomie fait passer un message au conducteur.

Enfin, des projets se consacrent à la communication d'un VA via le smartphone d'une personne embarquée, pour expliciter l'état du véhicule, le chargement de la batterie... (par exemple, le projet « Toyota Friend » initié en 2012). Les VA seraient donc équipés d'un modem afin de remplir cette fonctionnalité.

### **1.3. Enjeux / avantages et inconvénients**

Le véhicule autonome, en grande expansion depuis quelques années, présente de nombreux enjeux. Avant de pouvoir révolutionner complètement le monde automobile, il va devoir répondre à un grand nombre d'attentes, et faire face à une multitude de défis et d'interrogations.

#### **1.3.1. Enjeux environnementaux**

Dans un premier temps, le monde des transports est, depuis toujours, critiqué par rapport à son impact sur l'environnement. En effet, il est l'auteur d'environ un quart des émissions de CO<sub>2</sub> et de la consommation d'énergie mondiale [4]. Les modes de transports individuels tels que les voitures en sont en grande partie responsables.

Dans un monde aussi pollué que le nôtre, avec une population toujours croissante, il est donc nécessaire de mettre en place des moyens de transport respectueux de l'environnement et améliorant la mobilité notamment dans les villes. C'est dans cette optique que les véhicules autonomes sont conçus. En effet, grâce à leurs systèmes de communication véhicule à véhicule (ou encore véhicule à infrastructure), et leur pilotage contrôlé par une intelligence

artificielle, les véhicules autonomes et connectés devraient améliorer la fluidité des déplacements et donc éviter toutes sortes d'embouteillages ou de conduite imprudente, polluant énormément. De plus, cela pourra aussi privilégier des moyens de transports autant individuels que collectifs, ce qui devrait minimiser le nombre de véhicules sur les routes, toujours dans le but d'optimiser la mobilité en respectant l'environnement.

### **1.3.2. Enjeux technologiques**

Les véhicules autonomes et connectés, malgré leur rapide développement, se heurtent à quelques défis technologiques et scientifiques. Outre le problème d'accessibilité au réseau – le véhicule autonome a besoin d'un réseau performant pour fonctionner, ce qui n'est pas encore disponible partout – le VAC doit être capable de distinguer ses alentours, d'extraire et interpréter les informations recueillies, et de se baser sur ces dernières pour prendre des décisions. Pour ce faire, il nécessite donc un bon nombre d'outils et d'équipements, apportant chacun leurs défis.

-Les différents types de capteurs (LIDARs, caméras, etc) nécessitent de pouvoir collecter et stocker des informations rapidement, dans toutes sortes de conditions, ainsi que de partager et associer les données reçues entre elles.

Le développement de la communication V2V ainsi que V2I, notamment dans une SmartCity, pourra aussi s'avérer utile dans la collecte d'informations.

-Les intelligences artificielles requièrent un « deep learning » pour pouvoir être opérationnelles lors de la conduite/du pilotage d'un VAC. L'IA pose aussi un problème de miniaturisation concernant les unités informatiques grâce auxquelles elle fonctionne

-L'autonomie décisionnelle de l'IA, qui priorise la sécurité des passagers, en accord avec les différentes règles apprises et le code de la route, représente encore un enjeu. Cela pose d'ailleurs un problème plus complexe, celui de l'éthique (voir [Annexe 3](#))

### **1.3.3. Cybersécurité**

Un des plus gros défis et interrogations concernant les véhicules autonomes connectés porte sur la cybersécurité et l'utilisation des données récoltées. En effet, la possibilité pour l'IA de perdre le contrôle de son véhicule représente un grand risque. Les systèmes informatiques ainsi que de télécommunications embarqués doivent donc être protégés de toute intrusion, ce qui soulève plusieurs interrogations.

- L'accessibilité aux données recueillies ainsi que leurs applications dans des domaines autres que la conduite représente un réel problème.

- Les canaux de communication se retrouvent aujourd'hui surchargés, ce qui diminue la sécurité et la réactivité des VAC. [\[1\]](#)

Le développement d'un système de cybersécurité sans faille est donc nécessaire pour que la mise en place de véhicules autonomes connectés soit possible et sans risque. Pour plus de détails, voir [Annexe 4](#).

### **1.3.4. Enjeu sociétal**

Le véhicule autonome représente un grand avantage vis-à-vis de la sécurité routière. En effet, un véhicule contrôlé par une intelligence artificielle risque moins l'accident, et pourrait même éviter jusqu'à 90 % des accidents causés par l'erreur humaine [\[5\]](#), sauvant donc des millions de vies chaque année. Néanmoins, il lui reste à gagner la confiance du grand public, qui est

encore sceptique à l'idée de voyager dans des véhicules complètement pilotés par une intelligence artificielle. Malgré cela, le véhicule autonome se révèle être l'avenir de la mobilité pour tous. En effet, il permettra à chacun, peu importe l'âge ou les handicaps, de se déplacer sans dépendre d'autrui.

Cependant, il se heurte à un problème de législation et de cadre juridique. En effet, la question de la responsabilité en cas d'accident revient souvent, puisque certains véhicules ne sont plus du tout conduits par des humains. De la même façon, les VAC rencontrent aussi des problèmes avec le code de la route qui n'est pas forcément adapté à ce type de transport.

Avant l'adoption et la mise en place de véhicules autonomes dans les villes, il faudra donc faire face à de nombreux défis et interrogations. Malgré les multiples avantages de ces nouveaux moyens de transport, il reste effectivement quelques problèmes à résoudre pour pouvoir enfin implémenter ces véhicules sur le globe, et révolutionner le monde des transports.

#### **1.4. Application du VA : Cas d'étude : V2X**

Bonjour Monsieur le Maire, et nous vous remercions vous et votre conseil municipal de nous recevoir mon équipe et moi. Comme vous le savez, nous venons ici vous présenter le futur de la circulation dans la ville du Havre.

La sécurité de nos concitoyens est l'objectif que votre équipe et notre entreprise partageons. Mais, malgré toutes les précautions que vous avez mises en place en matière de sécurité routière, nous pouvons observer qu'il y a encore trop d'accidents (170 en 2019 [\[6\]](#)) dans la ville du Havre. (Notre argumentaire se porte sur les chiffres de 2019 car ceux de 2020, à cause de la crise sanitaire liée au COVID-19 et du confinement qui en a découlé, ne sont pas représentatifs). C'est pour cela que vous avez fait appel à nous. Avec nos agents, nous avons étudié minutieusement chaque rapport d'accident auquel vous nous avez donné accès et nous sommes parvenus à la conclusion suivante : la communication entre les conducteurs est ce qui fait défaut. En effet, celle-ci est à l'origine des accidents dans plus de 80% des cas.

Afin de pallier ce problème, nous pensons qu'il faut supprimer ce facteur humain pour plus de sécurité et donc utiliser des voitures autonomes et leur puissante technologie de communication. Cela modernisera énormément votre ville, d'autant plus que d'autres villes, comme celle de Rouen, commencent déjà à faire des tests afin d'introduire des VA à la circulation. Nous allons donc vous présenter la technologie qui garantira plus de sécurité sur vos routes : la technologie V2X (Vehicle To Everything).

Afin d'éviter le maximum d'accidents possible, il est nécessaire que le véhicule ait une excellente notion de son environnement pour s'y intégrer le mieux possible en assurant une sécurité et une fiabilité maximales. La technologie V2X est à ce jour la meilleure réponse à cette problématique. Celle-ci est donc le moyen de communication centré sur le véhicule qui lui permet d'échanger des informations avec d'autres véhicules, avec les infrastructures environnantes ou encore les piétons.

Nous pouvons séparer la communication en deux actions : celle d'émettre une information et celle de la recevoir. Les véhicules étant des machines, ces actions sont effectuées à l'aide d'outils informatiques. Ces derniers sont soumis à des normes définies par l'ITS (Intelligent Transport System). Nous vous présentons ce qu'est l'ITS et son utilisation dans le cadre de la V2X en [Annexe 5](#).

On distingue deux technologies principales parmi ce système de communication :

- la V2X basée sur le Wi-Fi (IEEE 802.11p), aussi appelée "communications dédiées à courte portée", prend en charge la communication directe entre véhicules (V2V) et entre les véhicules et les infrastructures (V2I).

- la V2X basée sur le réseau de téléphonie mobile C-V2X, aussi appelée "V2X cellulaire", prend en charge les communications étendues sur un réseau cellulaire (V2N) en plus de la communication directe (V2V, V2I).

Vous l'aurez compris, l'objectif de la V2X est donc d'améliorer au maximum la prise d'information de la voiture en donnant à ses entités la possibilité d'obtenir des informations sur la route, la signalisation et les autres véhicules circulants. Afin d'atteindre cet objectif, celle-ci est divisée en différentes catégories.

V2V = Communication entre les VA	V2P = Communication entre les VA et les piétons
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Communication directe entre deux véhicules mais aussi par le biais d'une infrastructure reliée à un serveur (qui possède les informations partagées par les autres VA) qui comprend un ensemble de véhicules</li> <li>- Pour être plus clair sur ce deuxième point, il est nécessaire de définir ce qu'est le VANET (Vehicular Ad-Hoc Network = réseau véhiculaire formé par l'ensemble des VA) dont le fonctionnement est détaillé en <a href="#">Annexe 6</a>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet d'alerter le véhicule, mais aussi les piétons et les cyclistes, des potentiels dangers d'accidents possibles</li> <li>- Systèmes V2P sont organisés en fonction des différents types de piétons (caractéristiques distinctes) que l'on peut croiser sur la route: enfants, adultes, personnes âgées ou à mobilité réduite <a href="#">[7]</a></li> <li>- Fonctionnement détaillé en <a href="#">Annexe 7</a>.</li> </ul>

V2I = Communication entre les VA et les infrastructures	V2N = Communication entre les VA et un serveur
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Communication avec tout type de signalisation (panneaux, feux tricolores, marquages au sol avancés...) et informations sur la circulation (présence de travaux...)</li> <li>- Sécurité renforcée, car à cause des conditions climatiques (brouillard, pluie très intense), nous avons souvent du mal à distinguer la signalisation, ce qu'un VA n'aura aucun problème à faire</li> <li>→ Lien important avec la Smart City <a href="#">[8]</a></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Serveur va compiler et regrouper toutes les informations qu'il reçoit depuis les différents VA</li> <li>- Redistribution des informations aux VA afin qu'ils aient toutes les informations en leur possession</li> <li>→ VA prendra de meilleures décisions</li> <li>→ Sécurité renforcée et fluidification du trafic <a href="#">[9]</a></li> </ul>

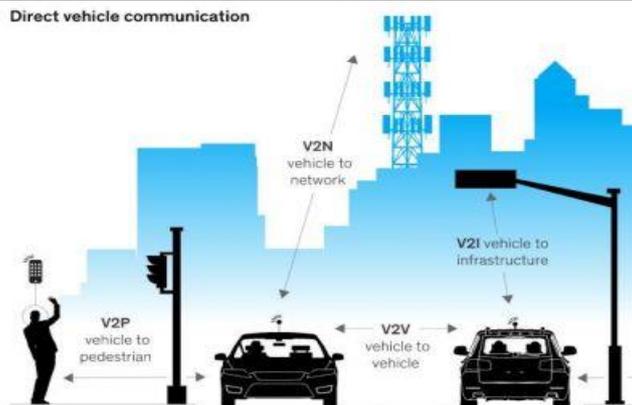


Figure 7: Illustration récapitulative de tous les modes de communication décrits précédemment

Nous vous avons donc montré qu'afin de grandement diminuer, grâce à plus de sécurité sur les routes, le nombre d'accident dans votre ville, il est nécessaire d'accueillir à bras ouverts les VA et leur puissante technologie de communication qu'est la V2X. De plus, cette technologie d'avenir permet de réduire les embouteillages et donc, de fluidifier le trafic. Cela ne peut que vous apporter du positif et vos concitoyens n'en seront que plus satisfaits.

## 2. MOTEUR HYDROGENE

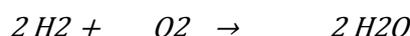
Dans des villes qui se modernisent, avec de plus en plus d'interactions entre les machines, les mobilités sont la façade des avancées technologiques. La **SmartCity** révolutionne notre vision des déplacements en milieu urbain, toujours plus précis, toujours plus connectés, tendant vers l'autonomie complète des véhicules et la sécurité accentuée des citoyens. Cependant, cette noble quête à la sécurité maximale, à la pointe de la technologie, est confrontée à un problème de véhicule propulsé par une motorisation d'un autre temps, vestige d'un passé où les problèmes environnementaux n'inquiétaient personne. C'est pourquoi, dans un contexte de pollution urbaine intense provoqué par les véhicules motorisés, il faut aussi repenser les systèmes propulsifs. Nous allons désormais voir qu'une technologie de motorisation déjà connue peut changer l'aspect des villes et répondre aux problématiques de pollution : c'est le **moteur hydrogène**.

### 2.1. Les principaux types de motorisation hydrogène

#### 2.1.1. Moteur électrique alimenté par une pile à combustible

##### La pile à combustible

Le principe de la pile à combustible est de convertir l'énergie d'un combustible, ici l'hydrogène, en énergie. Elle repose sur l'équation chimique suivante :



Dans la pile, une réaction d'oxydoréduction se forme permettant de créer l'électricité et la chaleur. Au niveau de l'anode, la molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur, se décompose et libère des électrons qui vont créer le courant électrique. C'est l'oxydation.



D'autre part, au niveau de la cathode, l'oxygène, au contact avec les électrons libérés par la précédente réaction réagit. C'est la réduction.



Enfin, les ions d'hydrogène, lorsqu'ils arrivent à la cathode, se lient avec les ions d'oxygène et forment de l'eau.



Ainsi, cette énergie électrique est utilisée pour alimenter un moteur électrique grâce à un inverseur chargé de convertir le flux continu haute tension de la pile hydrogène en courant alternatif exploitable par le moteur. [10]

##### Le moteur électrique

Pour fonctionner, le moteur exploite la **force électromagnétique** afin de générer du mouvement. En effet un **aimant rotatif** est situé au milieu d'une bobine de cuivre.

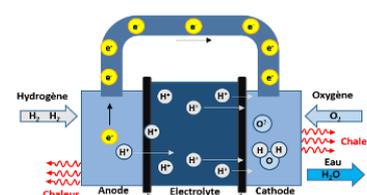


Figure 8 : Schéma d'une pile à combustible

L'inverse est également réalisable, le cuivre au milieu et les aimants en périphérie. Cette dernière solution est d'ailleurs appliquée dans les moteurs électriques. Cela produit donc de l'électricité en continu quand l'aimant entraîné par le rotor est en rotation. Dans le cas du moteur électrique de voiture, on réalise donc l'inverse : on fournit de l'électricité aux bobines et cela entraîne la rotation de l'aimant et donc du rotor. Or, c'est là tout l'intérêt du moteur électrique, il crée du mouvement quand il reçoit de l'électricité et lorsqu'il est en mouvement il crée de l'électricité. Le plus souvent, le rotor est à induction asynchrone, c'est-à-dire qu'il est constitué (au lieu d'un aimant comme sur le schéma) de petites bobines dans lesquelles le champ magnétique du stator induit de l'électricité. Ainsi, le mouvement et la transmission d'énergie **se fait sans contact entre le stator et le rotor** : c'est la force magnétique qui entraîne en rotation l'ensemble. Il n'y a donc **pas de frottement**, et par conséquent **peu d'usure**. Pour inverser le sens de fonctionnement du moteur (pour la marche arrière) le courant est alors envoyé dans l'autre sens. [11]

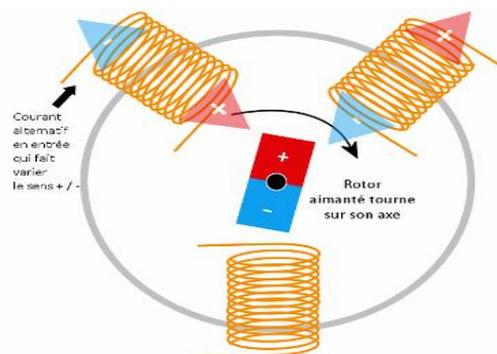


Figure 9 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un moteur électrique

### 2.1.2. Moteur à combustion interne (MCI) à hydrogène

L'hydrogène peut également être utilisé dans un moteur à combustion interne (MCI), dont le principe est le même qu'un MCI à essence/Diesel. Ce dernier, en étant conçu pour fonctionner à l'hydrogène, peut atteindre des **performances** (puissance de sortie, rendement) **élevées**, le tout combiné avec des **émissions minimales**. Les propriétés de l'hydrogène, très différentes des hydrocarbures utilisés actuellement, se reflètent dans la conception et le fonctionnement d'un MCI alimenté à l'hydrogène. Ces caractéristiques offrent également une plus grande flexibilité dans les stratégies de contrôle du moteur ouvrant la voie à de nombreuses possibilités pour l'optimisation du moteur. [12]

#### L'hydrogène comme carburant d'un MCI

Les propriétés de l'hydrogène sont donc radicalement différentes des carburants usuels comme le diesel ou l'essence. En effet, l'hydrogène ne contient pas de carbone et sa combustion ne rejette donc pas d'émission tel que le dioxyde et le monoxyde de carbone. Cependant, les moteurs à combustion interne à hydrogène émettent des oxydes d'azote, mais ces derniers peuvent être largement réduits à des taux négligeables.

De plus, de nombreuses propriétés de l'hydrogène sont exploitables (voir [Annexe 9](#)) pour le perfectionnement de ce moteur.

Néanmoins, ces propriétés peuvent également aboutir à des phénomènes de combustion indésirables, généralement appelés anomalies de combustion. Ainsi, dans un premier temps les travaux sur ce type de moteur visaient à éviter ces anomalies. Aujourd'hui, de nombreuses solutions ont été trouvées pour les éviter et des recherches sont encore en cours. [12]

## 2.2. Production et stockage de l'hydrogène

L'hydrogène est très intéressant pour l'utilisation dans un moteur. En effet, celui-ci est très énergétique et peut être utilisé simplement par combustion directe ou dans une pile à combustible avec principalement de l'eau comme rejet. Cependant, contrairement aux combustibles utilisés dans les précédents systèmes de motorisation (essence, eau...), l'hydrogène ne se trouve que difficilement à l'état naturel sur Terre. Il est donc nécessaire de produire ce carburant à partir de molécules plus complexes présentes en grandes quantités que sont l'eau (H<sub>2</sub>O) et les hydrocarbures.

### 2.2.1. Introduction sur la production (utilisation des énergies pour produire, différentes solutions et solutions non viables)

Dans l'optique de construire un monde futur plus propre et débarrassé de ses polluants, il est essentiel de pouvoir produire l'hydrogène de façon propre. On comprend facilement que par rapport aux autres carburants, déplacer la pollution lors de la production du carburant plutôt que lors de sa combustion (comme c'est le cas pour les hydrocarbures) n'est pas une solution viable. De nos jours, l'hydrogène peut être produit par l'intermédiaire de plusieurs procédés, chacun comportant des avantages et des inconvénients. [13]

- **Vaporeformage des hydrocarbures** : méthode la plus répandue dans l'industrie et la plus économique, elle consiste à produire de l'hydrogène à partir du vaporeformage du méthane ; cependant elle produit du CO<sub>2</sub> et nécessite donc son élimination ou son rejet.

- **L'oxydation partielle des hydrocarbures** : méthode présentant de nombreuses similitudes avec la précédente. Le coût de l'installation est plus important que la précédente mais peut être compensé par le coût des matières premières utilisées (charbon, coke de pétrole). Au même titre que le vaporeformage, cette technique implique une production de CO<sub>2</sub>.

D'autres solutions existent comme le **reformage autothermique**, le **reformage du méthanol** et la **pyrolyse à la vapeur d'eau** (voir [Annexe 10](#)).

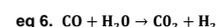
Enfin, il existe une solution impliquant de l'électricité et de l'eau, qui est l'**électrolyse de l'eau**. Cette méthode est plus intéressante pour notre application et à condition d'une bonne utilisation peut être une solution décarbonée à la production d'hydrogène.

Les deux réactions principales du vaporeformage sont :

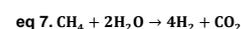
-La production de gaz de synthèse :



-La conversion de CO :



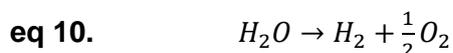
Soit un bilan global pouvant s'écrire :



### 2.2.2. Électrolyse : une solution durable

Et si la solution pour produire proprement dans le futur notre hydrogène résidait dans la **technique de l'électrolyse** ? La première mention de ce procédé remonte au début du XIX<sup>ème</sup> siècle à la suite de la création de la première pile électrique, où déjà les scientifiques observent un dégagement gazeux résultant du passage d'un courant dans l'eau. Pourtant, aujourd'hui la production d'hydrogène par électrolyse ne représente que quelques pourcents de la production totale mondiale mais tend à se développer. [14]

L'électrolyse de l'eau correspond à la **dissociation des molécules d'eau** lors du passage d'un courant électrique. L'expression générale de la réaction est :



ce qui met en évidence le principal avantage de l'électrolyse, cette technique utilise de l'eau et rejette uniquement du dioxygène et du dihydrogène, ce qui en fait une solution totalement **décarbonée**.

Le principe général de cette technique consiste à plonger deux électrodes (en nickel ou fer), une cathode et une anode reliées à un générateur continu de courant dans une solution aqueuse composé d'un électrolyte et d'eau. On observe alors un dégagement d'O<sub>2</sub> au niveau des anodes et un dégagement de H<sub>2</sub> au niveau des cathodes qui peuvent alors être captés. Pour plus de détails voir [Annexe 11](#).

Cependant, ce modèle de production n'est viable dans notre cas uniquement si celui-ci est couplé à une source d'électricité décarbonée. On parlera alors de production d'un "**hydrogène vert**" qui présentera un bilan carbone de production et d'utilisation très faible.

Des projets naissent désormais avec pour objectif de créer des chaînes de production de cet "hydrogène vert", comme le Projet Masshylvia dans le sud de la France. Ce genre de projet, utilise alors la combinaison **hydrogène-énergie renouvelable** et met en lumière le potentiel de l'hydrogène dans la transition écologique (voir [Annexe 12](#)).

### 2.3. Avantages et inconvénients

Dans cette partie concernant la comparaison des types de moteurs, nous nous sommes concentrés sur les principales technologies concurrentes que sont les moteurs thermiques, les moteurs électriques et les moteurs à hydrogène, d'un côté couplé à une pile à combustible, d'un autre côté les moteurs à combustions internes.

Afin de pouvoir comparer les différentes technologies de motorisation hydrogène avec celles déjà existantes, nous avons choisi 4 points de comparaison autour des axes de 1- **la production du carburant et la conception du moteur** ; 2- **l'autonomie** ; 3- **les rendements du moteur** ; 4- **les rejets du moteur**

#### 2.3.1. Tableau comparatif des différentes technologies de motorisation

Type de motorisation		MCI		ELECTRIQUE	
		Classique	Alimenté par hydrogène	Classique	Alimenté par pile à combustible hydrogène
Production	Véhicule <a href="#">[15]</a>	Alliages de métaux	Réservoir / Matériaux rares	Batteries / Matériaux rares	Batteries / PàC / Réservoir / Matériaux rares
	Carburant (1)	Pétrochimie / Transport	« Hydrogène vert »	« Électricité verte »	« Hydrogène vert »
Autonomie (En km)		600-1200	200	500	290
Rendements (Brut)		36-40%	+45%	60 à >90%	50-70%
Rejets		CO2 / Particules Fines (NOx).	NOx	/	Eau / Oxygène

#### 2.3.2. Exploitation de données

Si on compare les véhicules alimentés par hydrogène aux motorisations répandues de nos jours (MCI à énergie fossile et moteur électrique) on se rend compte que l'hydrogène présente de nombreux avantages malgré quelques inconvénients. [\[15\]](#)

Comparé aux MCI classiques, les 3 autres types de motorisation ont l'énorme avantage de présenter un carburant potentiellement « vert », c'est-à-dire potentiellement produit de manière renouvelable et décarbonée. D'un côté « l'hydrogène vert » et de l'autre « l'électricité verte » qui évite la pollution occasionnée par la pétrochimie et les transports.

De plus, comme pour le moteur électrique, utiliser de l'hydrogène comme carburant préserve l'environnement et la santé publique des rejets de CO<sub>2</sub>, de particules fines et de la pollution sonore, particulièrement dans les villes déjà gravement touchées par ces nuisances.

Comparé au moteur électrique, les véhicules à hydrogène ont l'avantage de pouvoir faire le plein de carburant beaucoup plus rapidement. Aussi, la motorisation permet de réduire la taille des batteries voire de s'en passer avec le MCI. Ce sont en effet ces batteries qui sont le point faible de la solution électrique avec sa conception en matériaux rares et sa difficulté à recycler.

Cependant, au niveau de l'autonomie actuelle de ces technologies, on remarque une différence importante avec les technologies existantes, passant de 600 à 1200km pour un MCI classique à seulement 200km d'autonomie pour un MCI à hydrogène. Cette différence se retrouve aussi entre le moteur électrique et le moteur à PàC mais dans une moindre mesure.

Enfin, le point faible des véhicules à hydrogène est leur complexité technique de fabrication, qui entraîne une plus grande demande énergétique à la production. Comparé au MCI classique, l'utilisation d'alliage de platine ou de fibre de carbone entraîne un déplacement de la pollution et une difficulté élevée de recyclage.

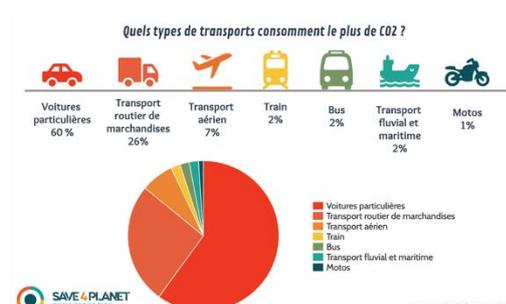
## 2.4. La motorisation hydrogène : une solution d'avenir au problème écologique ?

Dans cette partie, nous allons analyser en quoi le véhicule hydrogène serait une solution à de nombreux problèmes de société. Puis nous verrons s'il existe véritablement un avenir pour cette motorisation. Finalement, nous présenterons divers véhicules hydrogène existants et autres mobilités hydrogène.

### 2.4.1. Les enjeux de la motorisation hydrogène

La motorisation hydrogène est un véritable enjeu d'avenir. Elle apporte majoritairement des bienfaits environnementaux mais aussi de santé publique et socio-économiques que nous aborderons en [Annexe 13](#).

Dans notre société, l'ère est au renouvellement et à l'écologie. En effet, un bilan sur l'état de notre planète indique qu'il est grand temps de se tourner vers des activités propres et des énergies plus vertes. Le secteur de l'automobile doit également se renouveler. Il faut repenser notre manière de consommer et de se déplacer. En effet, on remarque sur ces dernières années une forte diminution des ressources des sols (métaux rares). Ainsi, les ingénieurs automobiles cherchent une solution d'avenir pour un détachement des énergies fossiles.



De plus, l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie) recense en 2016 que le secteur des transports représente 24,4% des émissions de gaz à effets de serre de la planète. Sur le diagramme ci-contre, on remarque que ce sont les voitures particulières qui en sont le principal acteur. En effet, la majorité des véhicules de nos jours sont à moteurs thermiques. Et ceux-ci sont en grande partie responsable de ces émissions de CO<sub>2</sub> dans l'air, ce qui participe activement au réchauffement climatique. Ainsi les véhicules hydrogène auraient pour objectif une diminution des émissions de CO<sub>2</sub>.

L'objectif pour l'industrie automobile est donc une transition vers les motorisations utilisant les énergies propres afin de minimiser les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'air et endurer le mieux possible le manque de métaux rares des sols pour les énergies fossiles.

En Europe, certaines mesures s'apprêtent à être prises par la Commission Européenne avec la norme Euro 7. Celle-ci mettrait fin à la vente de moteurs thermiques essence et Diesel. Avec un idéal qui serait une baisse de -55% des émissions de CO<sub>2</sub> en 2030 et une neutralité carbone pour 2050 afin de respecter le Green Deal.

Le développement de la motorisation hydrogène dans l'optique d'une société plus durable est donc souhaitable pour diverses raisons. Nous pourrions en citer 3 principales. Avec l'hydrogène un cycle réversible peut être établi, l'hydrogène étant fabriqué à partir d'eau et se transformant en eau lorsqu'il est utilisé. De plus, diverses sources renouvelables peuvent être utilisées pour fabriquer de l'hydrogène. Enfin, la conversion de l'hydrogène en d'autres formes d'énergie entraîne des émissions très faibles, dans le cas du moteur électrique ces émissions sont mêmes 100% propres. De plus, l'hydrogène associé à un MCI, présente comme nous l'avons vu, des nombreux avantages tant par la maturité de la technologie que par leur capacité de production à partir de matières recyclables qui réduisent les coûts. En outre, le moteur à combustion interne ouvre la voie à de nombreuses possibilités et innovations notamment au point de vue de l'efficacité.

Derrière la production de véhicules à motorisation hydrogène se trouvent des enjeux sociétaux majeurs, environnementaux, sanitaires et même socio-économiques. Nous devons poursuivre les innovations afin de permettre un futur durable pour nous mais également pour les générations à venir.

#### **2.4.2. Un véritable avenir ?**

Sur le papier le véhicule hydrogène paraît être une solution viable pour répondre à de réels enjeux sociétaux cependant a-t-il une véritable chance ?

Divers pays ont déjà montré un certain intérêt pour la technologie hydrogène, notamment pour la motorisation hydrogène. C'est le cas de la France. Cependant, c'est au tour des populations d'accepter et d'investir dans cette innovation. C'est pourquoi des aides à l'achat de véhicule hydrogène ont été mises en place (voir [Annexe 14](#)), tels que le bonus écologique, la prime à la conversion ou encore des aides locales.

A l'heure d'aujourd'hui la voiture hydrogène se développe un peu partout dans le monde notamment en Europe et en Asie avec différents constructeurs comme Honda, Hyundai, Mercedes-benz ou encore Toyota. Au Japon, on recense l'envie de transition vers l'hydrogène avec un objectif de véhicules fonctionnant 100% à l'hydrogène. De l'autre côté du globe, en France, Jean Castex, Premier ministre, annonce en septembre 2020 l'objectif d'un pays de pointe grâce à l'hydrogène vert pour 2030, pour cela il accorde un budget de 2 milliards d'euros.

Parmi les différents véhicules proposés par ces divers constructeurs automobiles certains se démarquent comme la Toyota Mirai ([Annexe 15](#)) ou la Hyundai Nexo ([Annexe 16](#)).

Depuis 2019, des initiatives sont entreprises en France et dans le monde pour démocratiser la motorisation hydrogène, cependant 4 défis sont toujours à relever : la décarbonation de l'énergie, une infrastructure efficace d'avitaillement, le développement de l'offre des constructeurs et la baisse des coûts. Cela ne stoppe pas pour autant l'intérêt apporté à la motorisation hydrogène que nous retrouvons dans d'autres mobilités comme les vélos, les bus, les camions ou même les avions à hydrogène et un peu partout en France, notamment

en Ile-de-France, avec la flotte de taxis Hype, et même ici dans la métropole rouennaise, avec un projet de bus à hydrogène [Annexe 17](#).

### **2.4.3. Les axes de recherche actuels**

Les distances parcourues par les véhicules à hydrogène actuels sont encore assez limitées. Cela est en partie dû aux méthodes actuelles de stockage de l'hydrogène, mais aussi à l'utilisation (principalement) de l'injection de carburant dans l'orifice (ambient) d'hydrogène, qui ne se prête pas à l'exploitation des propriétés de l'hydrogène pour maximiser le rendement du moteur. Aujourd'hui, les recherches concernant ce type de moteur s'orientent sur l'augmentation de son efficacité, notamment autour de l'injection d'hydrogène cryogénique et l'injection directe d'hydrogène. Ces dernières, ont donné des résultats prometteurs. Cependant, leur application dans les véhicules de démonstration a jusqu'à présent été limitée par le manque d'équipement d'injection adapté et prêt à la production. L'injection directe d'hydrogène, quant à elle, pose des défis en raison des fuites et de la durabilité de l'injecteur. Des recherches récentes sur l'injection directe d'hydrogène suggèrent que le rendement maximal des moteurs d'environ 45% est réalisable. [\[12\]](#)

Pour rendre plus intéressant écologiquement la production de véhicules à hydrogène, les industriels se trouvent dans l'obligation de repenser ou d'améliorer l'impact énergétique de la production de tels véhicules. De plus, la grande diversité de matériaux mis en œuvre pour fabriquer les différents composants de ces véhicules entraîne des problèmes similaires à ceux du moteur électrique, d'où la recherche de matériaux nouveaux, mieux recyclables et dans le même temps la recherche de nouveaux moyens de recyclage pour les matériaux existants.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Jusqu'à présent, les constructeurs automobiles se sont concentrés sur le fait d'améliorer les technologies existantes. Mais, ce n'est plus leur seul objectif car ceux-ci souhaitent innover afin de se calquer sur les problématiques de notre société actuelle.

Le VA équipé d'une motorisation hydrogène offre de nombreuses perspectives d'avenir, notamment au sein d'une SmartCity, où les inconvénients de la motorisation hydrogène sont réduits. En effet au regard de la faible autonomie actuelle des moteurs ainsi que du manque d'infrastructures pour faire le plein d'hydrogène dans les territoires extra-urbains, on comprend mieux pourquoi la ville est l'aire idéale de fonctionnement pour des véhicules équipés d'une telle motorisation. Allié aux instruments du VA, particulièrement à l'aise dans les environnements urbains au travers de la SmartCity, ces nouveaux véhicules peuvent apporter une solution durable et viable aux problématiques de circulation urbaine.

Sur le plan personnel, ce projet nous a posé quelques difficultés. En effet, nous étions au départ 6 personnes ne se connaissant pas forcément, et devant réaliser un travail conséquent. Afin de pallier cela, nous avons mis en place des outils de collaboration en ligne, tels que ceux proposés par Google Drive, et avons également créé un serveur discord pour pouvoir nous retrouver en distanciel. Le contexte sanitaire a également fait que nous ne nous voyions pas toutes les semaines, mais nous essayions de nous retrouver régulièrement sur Discord. De plus, la désignation d'un porte-parole dans l'équipe a permis d'être efficaces lors des séances avec le professeur. Il synthétisait donc le travail pour que M. Idoudi nous guide au mieux.

Une autre difficulté à laquelle nous nous sommes confrontés a été le tri et la sélection des informations. Effectivement, la quantité initiale de données recueillies concernant les véhicules autonomes ainsi que les moteurs hydrogènes était faramineuse. Nous avons donc dû faire des choix et synthétiser au maximum nos propos.

Ce travail a ouvert pour nous de nouvelles perspectives sur ce que signifient le travail d'ingénieur et la gestion de projet qui y est associée.

Enfin, nous avons énormément appris au sujet des VA et des moteurs hydrogène, ainsi que des défis techniques et autres qu'il faut affronter pour les mettre en fonctionnement. Cela nous a donc permis de nous forger, en toute connaissance de cause, une opinion sur des sujets d'actualité.

Si nous avons eu l'opportunité de continuer ce projet, nous aurions certainement orienté nos recherches vers les difficultés éthiques de la mise en place d'un VA dans une SmartCity. Nous aurions également pu développer, plus dans le détail, les aspects techniques des technologies innovantes visant à améliorer la motorisation hydrogène et la fiabilité du VA.

**BIBLIOGRAPHIE****PARTIE 1 : LE VÉHICULE AUTONOME**

[1] lien internet : <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/essentiel-sur-voiture-autonome.aspx> (valide à la date du 22/05/2021)

[2] lien internet : <https://group.renault.com/innovation/vehicule-autonome/> (valide à la date du 22/03/2021)

[3] lien internet : [https://www.tesla.com/fr\\_FR/autopilot](https://www.tesla.com/fr_FR/autopilot) (valide à la date du 22/04/2021)

[4] lien internet : <https://www.inria.fr/sites/default/files/2019-10/inrialivreblancvac-180529073843.pdf> (valide à la date du 05/05/2021)

[5] Fabio Arena et Dario Ticali, "The Development of Autonomous Driving Vehicles in Tomorrow's Smart Cities Mobility", 2018 (<https://doi-org.ezproxy.normandie-univ.fr/10.1063/1.5079196>) (valide à la date du 05/05/2021)

[6] lien internet : <https://www.linternaute.com/auto/accident/le-havre/ville-76351> (valide à la date du 25/04/2021)

[7] lien internet : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6359035/#B3-sensors-19-00358> (valide à la date du 22/05/2021)

[8] lien internet : <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01691909/document> (valide à la date du 22/05/2021)

[9] lien internet : <https://blog.rgbsi.com/7-types-of-vehicle-connectivity> (valide à la date du 22/05/2021)

**PARTIE 2 : LA MOTORISATION HYDROGÈNE**

[10] lien internet : <https://www.h2sys.fr/fr/technologies/pile-a-combustible/> (valide à la date du 15/05/2021)

[11] lien internet : <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1946-fonctionnement-d-une-voiture-electrique.php> (valide à la date du 15/05/2021)

[12] Electricity Powering Combustion: Hydrogen Engines, par Sebastian Verhelst, Thomas Wallner, Helmut Eichlseder, Kaname Naganuma, Falk Gerbig, Brad Boyer, and Shiro Tanno issue de Proceedings of the IEEE le 02/02/2012

[13] Combustible hydrogène - Production, par Moussa DICKO, Farida DARKRIM-LAMARI, Pierre MALBRUNOT issu de Procédés chimie - bio - agro | Chimie verte le 10/10/2013.

[14] Hydrogène par électrolyse de l'eau - Production, par Alain Damien issu de Archives le 10/12/1992

[15] Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars – Production, par Daniele Candelaresi, Antonio Valente, Diego Iribarren, Javier Dufour, Giuseppe Spazzafumo issue de International Journal of Hydrogen Energy, ScienceDirect le 06/01/2021

ANNEXES:

- Annexe 10 :

lien internet : <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/Report-European-Power-Sector-in-2020.pdf> (valide à la date du 25/05/2021)

lien internet : <https://www.connaissancedesenergies.org/le-secteur-electrique-de-lunion-europeenne-en-2020-210126> (valide à la date du 25/05/2021)

lien internet : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement/stockage-denergie-accompagner-deploiement-des-energies-renouvelables> (valide à la date du 25/05/2021)

lien internet : <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/l-imposture-de-l-hydrogene-renouvelable-857818.html> (valide à la date du 25/05/2021)

lien internet : <https://www.lemondedelenergie.com/stockage-renouvelables-perspectives-defis/2017/08/28/> (valide à la date du 25/05/2021)

lien internet : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/7-repartition-sectorielle-des-emissions-de> (valide à la date du 25/05/2021)

lien internet : [https://www.capenergies.fr/portfolio\\_page/masshylvia/](https://www.capenergies.fr/portfolio_page/masshylvia/) (valide à la date du 25/05/2021)

- Annexe 11 :

lien internet : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-03/datalab-66-chiffres-cles-transport-edition-2020-mars2020.pdf> (valide à la date du 27/05/2021)

lien internet : <https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transport/chiffres-cles-observations/chiffres-cles> (valide à la date du 27/05/2021)

- Annexe 12 :

lien internet : <https://www.h2-mobile.fr/dossiers/aides-achat-voiture-hydrogene/> (valide à la date du 27/05/2021)

- Annexe 13 :

lien internet : <https://www.h2-mobile.fr/vehicules/voiture-hydrogene/toyota-mirai/> (valide à la date du 27/05/2021)

lien internet : <https://www.h2-mobile.fr/vehicules/voiture-hydrogene/nouvelle-toyota-mirai/> (valide à la date du 27/05/2021)

- Annexe 14 :

lien internet : <https://www.h2-mobile.fr/vehicules/voiture-hydrogene/hyundai-nexo/> (valide à la date du 27/05/2021)

- Annexe 15 :

lien internet : <https://www.h2-mobile.fr/actus/rouen-premiers-bus-hydrogene-arriveront-2022/> (valide à la date du 27/05/2021)

## CREDITS D'ILLUSTRATION

Figure 1 : <https://www.altenrecrute.fr/actualites/ingenieurs/ingenieur-adas-vehicule-autonome>

Figure 2 : <https://www.journaldugeek.com/2016/11/21/tesla-une-demonstration-impressionnante-de-son-systeme-de-conduite-autonome/>

Figure 3 : [https://fr.123rf.com/photo\\_88525418\\_illustration-vectorielle-de-stationnement-automatique-assistent-le-syst%C3%A8me-technologie-de-voiture-avec.html](https://fr.123rf.com/photo_88525418_illustration-vectorielle-de-stationnement-automatique-assistent-le-syst%C3%A8me-technologie-de-voiture-avec.html)

Figure 4 : [How Autonomous Vehicles Perceive and Navigate Their Surroundings | Velodyne Lidar](#)

Figure 6 : [https://www.tesla.com/fr\\_FR/autopilot](https://www.tesla.com/fr_FR/autopilot)

Figure 7 : [https://www.challenges.fr/automobile/dossiers/dans-l-auto-la-5g-servira-a-autre-chose-qu-a-regarder-des-films\\_727234](https://www.challenges.fr/automobile/dossiers/dans-l-auto-la-5g-servira-a-autre-chose-qu-a-regarder-des-films_727234)

Figure 8 : <https://www.save4planet.com/ecologie/17/qu'est-ce-qui-consomme-dans-transport-p.21>

Figure 10 : [chine-pollution-automobile.jpg](#)

Figure 11 : [ue-le-secteur-automobile-met-en-garde-contre-un-brexit-sans-accord.jpg](#)

Figure 12 : <https://www.h2-mobile.fr/img/images/toyota-mirai-schema.jpg>

Figure 13 : [https://www.h2-mobile.fr/img/catalogue-h2/toyota-mirai-2\\_021120.jpg](https://www.h2-mobile.fr/img/catalogue-h2/toyota-mirai-2_021120.jpg)

Figure 14 : [https://www.h2-mobile.fr/img/catalogue-h2/hyundai-nexo\\_060219\\_230820.jpg](https://www.h2-mobile.fr/img/catalogue-h2/hyundai-nexo_060219_230820.jpg)

Figure 15 : [https://www.h2-mobile.fr/img/post-h2/rouen-bus-hydrogene\\_100321.jpg](https://www.h2-mobile.fr/img/post-h2/rouen-bus-hydrogene_100321.jpg)

Annexe 1 : <https://www.deplacementspros.com/transport/des-navettes-autonomes-pour-les-transports-en-commun-lyonnais>

Annexe 2 : <https://group.renault.com/news-onair/actualites/comment-developper-un-systeme-global-integrant-des-vehicules-autonomes-et-une-plate-forme-de-mobilite/>

Annexe 7 : [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b9/Toyota\\_Mirai\\_fuel\\_cell\\_stack\\_and\\_hydrogen\\_tank\\_SAO\\_2016\\_9028.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b9/Toyota_Mirai_fuel_cell_stack_and_hydrogen_tank_SAO_2016_9028.jpg)

Annexe 9 : <http://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/4446/1/030300496.pdf> ; page13.

Annexe 10 : <https://www.connaissancedesenergies.org/le-secteur-electrique-de-lunion-europeenne-en-2020-210126>

**ANNEXES**



[Annexe 1](#) : Navette autonome à Lyon



[Annexe 2](#) : Renault Zoé Autonome dans les environs de Rouen

### Annexe 3 : Enjeux technologiques VA

Pour pouvoir percevoir pleinement chaque panneau, feux de signalisation, marquages au sol ou même piétons, le VAC doit être équipé de plusieurs types de capteurs tels que des LIDARs, des radars, des caméras, des capteurs ultrasons, etc. Chacun de ces outils collecte de nombreuses informations qu'il faudra pouvoir stocker directement, pour ensuite les réutiliser. De plus, il faut pouvoir continuer à les utiliser même si les conditions ne sont pas optimales (mauvaise visibilité, imprécisions...). Il est donc nécessaire de coupler et associer les informations de chaque capteur pour obtenir des données précises et exactes.

Une fois toutes ces données récoltées, le VAC doit être capable de les analyser pour ensuite prendre une décision. Pour cela, il doit pouvoir identifier les objets et obstacles en temps réel, ce qui requiert un apprentissage profond – « deep learning » – de la part de l'intelligence artificielle ainsi qu'une bonne base de données au préalable, et des capteurs performants et rigoureux. Cela pose d'ailleurs un autre problème, celui de la miniaturisation. En effet, l'IA fonctionne grâce à des unités informatiques, qui se révèlent être trop lourdes et encombrantes pour rentrer dans une voiture. La miniaturisation et l'optimisation de l'espace que prend chaque élément, sans influencer sur l'efficacité des algorithmes de l'IA représentent donc un réel défi. En outre, la localisation du véhicule dans une zone ouverte présente encore quelques imperfections.

Après avoir collecté et analysé les informations, le véhicule autonome peut enfin prendre une décision. L'intelligence artificielle, qui se charge de cela, est donc en mesure de choisir le trajet ou encore les différentes manœuvres et commandes que le véhicule se devra d'exécuter. L'IA doit être capable de prendre des décisions de manière impromptue, qui ne mettent pas en danger les passagers et qui soit en accord avec le code de la route et autres règles retenues lors de son apprentissage. Cette autonomie décisionnelle représente encore un enjeu important dans le développement des véhicules autonomes et connectés dans le monde.

Problème éthique : Les algorithmes de l'IA seront-ils capable de choisir entre deux situations dangereuses (renverser 3 piétons ou tuer un motard par exemple). Cela demandera peut-être un algorithme plus poussé, capable de peser le pour et le contre de chaque situation.

### Annexe 4 : Cybersécurité VA

De la même façon, l'accessibilité aux données recueillies ainsi que leurs applications dans des domaines autres que la conduite soulève de nombreuses interrogations. En effet, les cartes 3D et informations de localisation récoltées par la voiture comprennent parfois des données privées, qu'il est donc impératif de protéger.

De plus, avec l'essor des agents communicant (véhicules, serveurs informatiques, etc), les canaux de communication seront bien trop surchargés. Cela représente un problème quant à la sécurité et la réactivité des véhicules autonomes. Faire en sorte que les systèmes autonomes puissent communiquer librement (sans fil), peu importe leurs situations, représente donc un défi important. (Une solution serait de dédier une certaine bande de fréquence uniquement pour les véhicules autonomes et leurs communications.)

Annexe 5 : Qu'est-ce que l'ITS ?

Tout d'abord, l'organisme responsable de la mise en place des standards informatiques est l'ISO (International Standards Organization). Elle est à l'origine de la création de l'OSI (Open Systems Interconnection) qui régit la communication entre les différents systèmes informatiques. Elle décrit les fonctionnalités nécessaires à la communication et l'organisation de ces fonctions. C'est l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) qui définit les standards de communication dans le cas des véhicules. Ils sont inspirés du modèle OSI : il s'agit de l'architecture appelée l'ETSI ITS. Cette-dernière définit cette communication sous forme de couches.

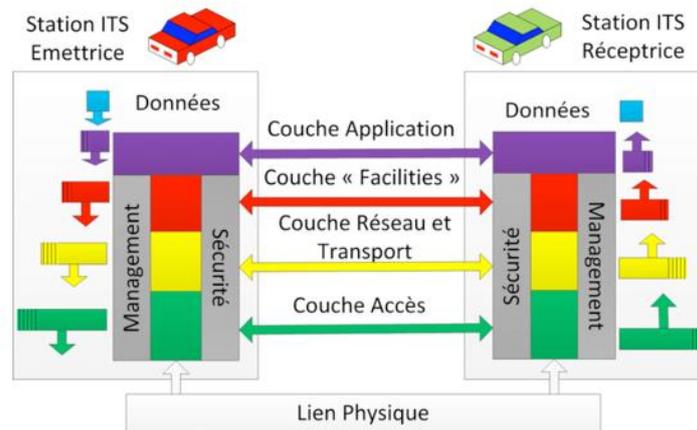


Figure 11 : Schéma de l'architecture ITS

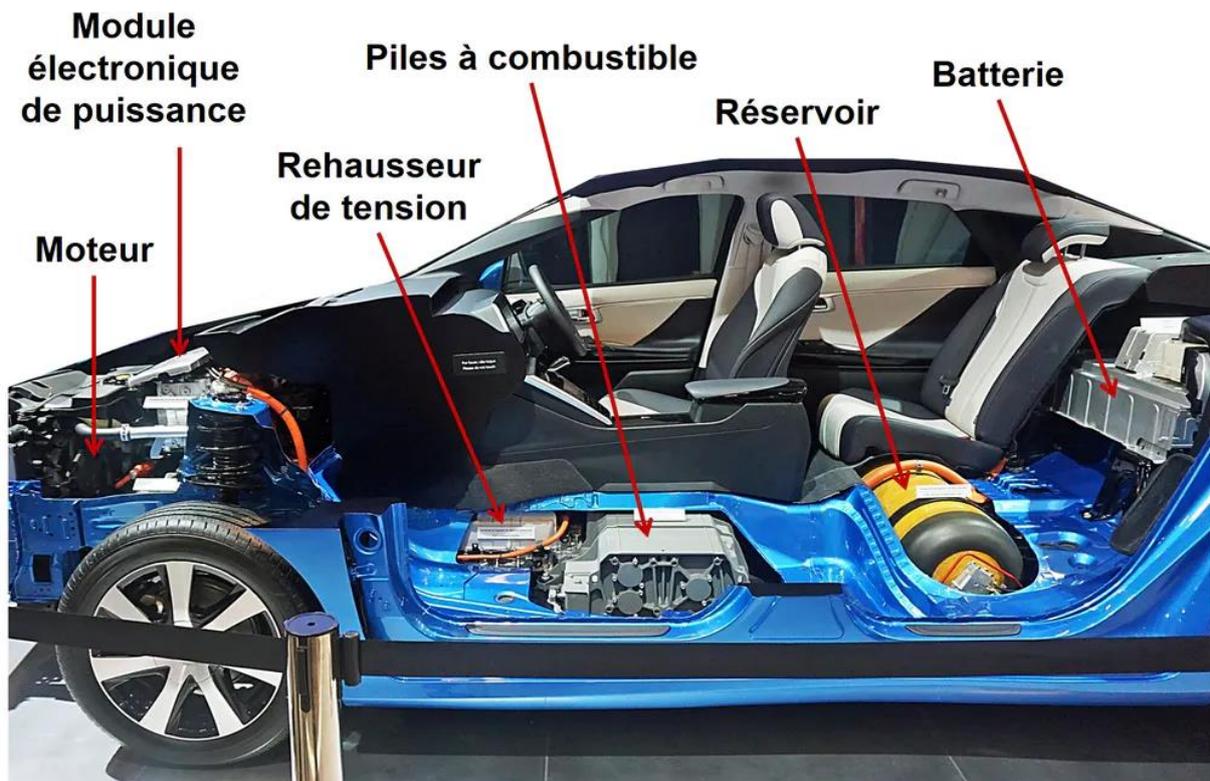
On remarque que ces différentes couches ont toutes une utilité spécifique. L'émetteur est en possession du message qui est un ensemble de données. Il peut ajouter, ou non, des informations afin que le message soit plus précis. Le but de l'émetteur est d'envoyer des informations claires et concises afin que le récepteur comprenne le message dans son entièreté. Cela se fait selon la procédure suivante. La couche "application" permet l'accès au réseau : l'information peut être ajoutée au message total. Ensuite, la couche "facilities" permet quant à elle de gérer la syntaxe des informations et la manière d'organiser les données du message. L'envoi de l'information est assuré par la couche "réseau et transport". Enfin, c'est la couche "accès", en liaison avec le réseau physique, qui s'occupe d'envoyer le message à travers les différents VA en liaison. Une fois le message envoyé, l'émetteur le reçoit. Les quatre étapes s'appliquent de nouveau au message afin que la station ITS réceptrice comprenne le message.

Annexe 6 : Fonctionnement plus détaillé du VANET

Chaque VA correspond à un nœud et est susceptible d'émettre, de recevoir et de retransmettre des messages qui contiennent les informations partagées par les autres nœuds. Les informations transmises dans les messages sont découpées en paquets. L'adressage de ces paquets échangés dans un VANET peut s'appuyer sur le protocole IP. C'est un protocole de communication pour le réseau internet. Plus précisément, il définit le schéma d'adressage et le format des paquets utilisés afin d'acheminer les données dans internet. L'émission des paquets dans le réseau internet se fait selon différents modes :

- Unicast = méthode de diffusion depuis une source vers un nœud,
- Multicast = méthode de diffusion depuis une source jusqu'à un groupe de nœuds prédéfini,
- Broadcast = la diffusion se fait depuis une source jusqu'à tous les autres nœuds,
- Anycast = méthode de diffusion depuis une source vers un nœud choisi parmi plusieurs destinations possibles.

Annexe 7 : En cas de danger quasi-immédiat, l'écran du VA affiche une alerte sous forme de signaux visuels. De plus, il y a une alerte sonore dans la voiture mais aussi sur le téléphone du piéton. La position de ce dernier ainsi que son activité, c'est-à-dire s'il envoie un message, est en appel ou écoute de la musique par exemple, sont transmises par le téléphone au VA. Il peut donc savoir quel est le degré de vigilance du piéton et prendre les meilleures décisions possibles. Vous l'aurez compris, en raison de son omniprésence dans notre société aujourd'hui, l'outil majoritairement utilisé afin de communiquer avec le VA est le téléphone portable. C'est un atout car il est important que cette communication se fasse très rapidement, ce que la 4G et maintenant la 5G permettent de faire.



*Annexe 8 : L'intérieur d'une Toyota Mirai, présenté en 2016 à São Paulo, Brésil. Les différentes parties du système de propulsion sont indiquées.*

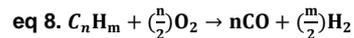
Annexe 9 :

**Le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène** spécifique à la masse est presque trois fois plus élevé que celui de l'essence ou du diesel. Néanmoins, l'hydrogène est gazeux dans les conditions ambiantes et a donc une densité très inférieure à celle des carburants liquides. L'augmentation de la **densité de stockage d'énergie** est aujourd'hui un véritable sujet de recherche, actuellement l'hydrogène est soit pressurisé soit liquéfié.

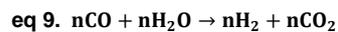
En outre, **les limites d'inflammabilité** de l'hydrogène sont extrêmement larges, ainsi que la **vitesse de la flamme laminaire**, propriété de mélange physico-chimique affectant la vitesse de combustion du carburant, d'un mélange hydrogène-air aux conditions ambiantes et stœchiométriques est d'un facteur 4 à 6 plus élevée que celle de l'essence. Tout cela, offre donc de nombreuses perspectives et possibilités pour le développement et l'optimisation d'un MCI à hydrogène.

[Annexe 10](#) : Concernant le **reformage autothermique**, celui-ci est similaire au vaporeformage et présente donc les mêmes inconvénients. Le **reformage du méthanol** est une solution plus simple que le vaporeformage, cependant, le méthanol est un produit très toxique et miscible dans l'eau, créant un risque environnemental élevé en cas de fuite, de plus cette méthode rejette aussi du CO<sub>2</sub>. La **pyrolyse à la vapeur d'eau** est à première vue une solution envisageable car elle dissocie l'hydrogène et le noir de carbone (utilisé dans les pneumatiques) des hydrocarbures. Cependant, ici la production du noir de carbone en quantité trop importante ne pourrait être valorisé, on est donc confronté à un problème de marché en cas de production importante d'hydrogène par ce procédé.

La production de gaz de synthèse :



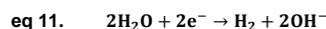
La conversion du monoxyde de carbone :



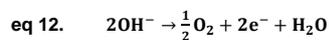
[Annexe 11](#) : Les deux électrodes sont séparées par une membrane échangeuse de protons. L'électrolyte est une solution aqueuse acide ou basique qui généralement de l'hydroxyde de potassium et qui permet une plus grande conductivité de la solution. Lors du passage du courant il se passe alors **deux réactions possibles** en fonction de l'électrolyte :

-En solution alcaline :

-à la cathode :

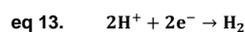


-à l'anode :

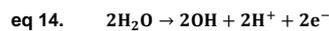


-En solution acide :

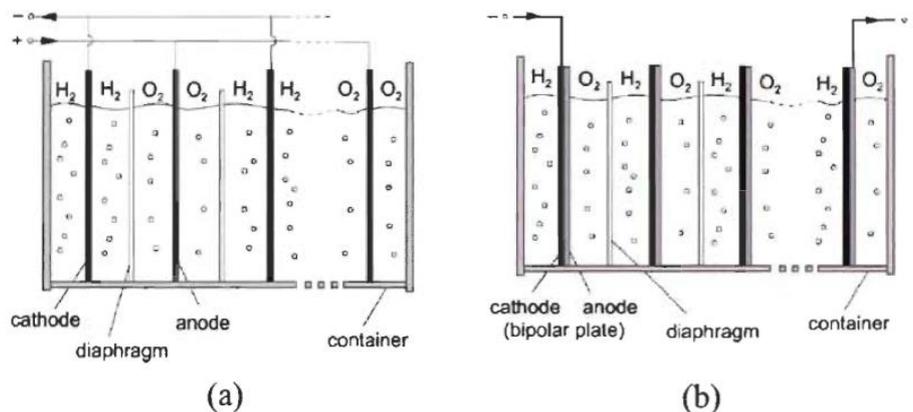
-à la cathode :



-à l'anode :



Cependant, ce montage est aujourd'hui dépassé, de nos jours les montages à électrolyse sont constitués d'électrodes dites **bipolaires** (contrairement aux **monopolaires** vues précédemment), permettant une plus grande densité de courant et une meilleure compacité de l'électrolyseur.



La configuration des cellules alcalines. (a) Configuration mono-polaire et (b) Configuration bipolaire.

*Schéma de cellules d'électrolyseurs dans une configuration mono-polaire et bipolaire.*

Annexe 12 : L'Hydrogène un allié de choix dans la transition écologique :

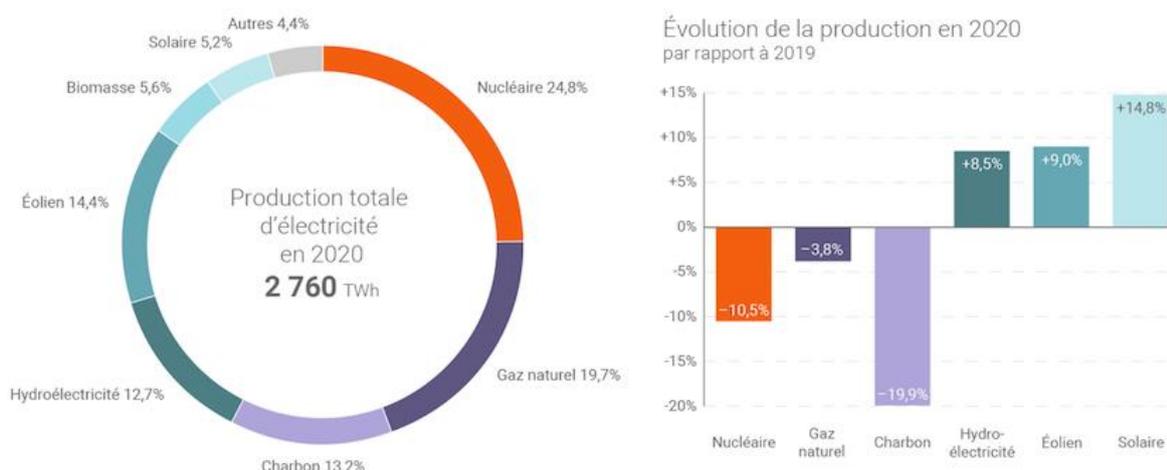
Suite aux accords de Paris de 2015, les états du monde entier se sont donnés pour objectif de réduire leurs **émissions carbonées** afin d'empêcher une élévation trop importante des températures d'ici 2100. Aujourd'hui dans le monde, 41% des émissions de CO<sub>2</sub> proviennent de la production d'électricité, ce qui impose le développement de moyens de production **d'énergie renouvelable** (ex : photovoltaïque, hydraulique, éolien, ...).

Cependant on évalue que dans les dispositions actuelles, le **mix énergétique** ne peut comporter une production d'énergie renouvelable non régulable (éolien, photovoltaïque) supérieur à 25% dû à la variabilité de la production en fonction des conditions de l'environnement. L'hydrogène se présente alors comme un moyen de résoudre le problème des difficultés de **stockage de l'électricité**. En effet, couplé à ces moyens de production, l'hydrogène produit par électrolyse représente une solution.

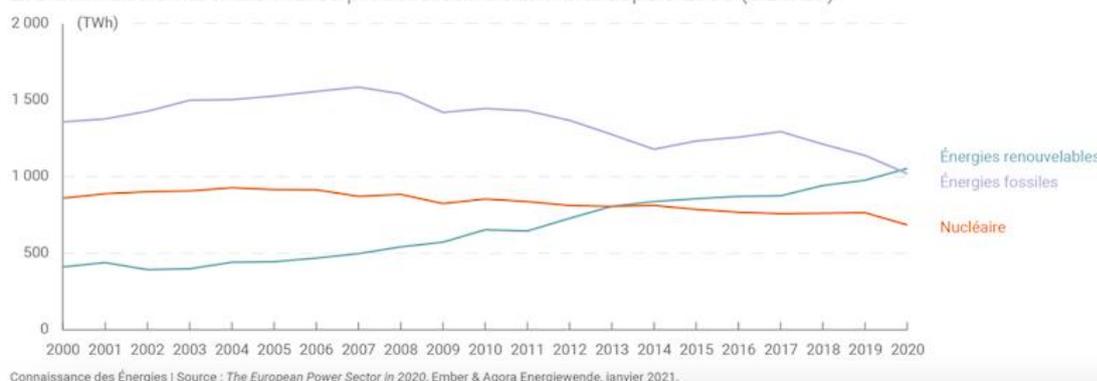
Celui-ci pourrait compenser la variabilité de la production par une utilisation comme carburant à un générateur mais aussi servir à alimenter nos véhicules. On parlera alors de l'association **hydrogène-énergie renouvelable**, avec des projets partout dans le monde comme le **Projet Masshyla** dans le sud de la France.

Enfin, ce système ne peut fonctionner que si la production d'électricité est essentiellement décarbonée. En effet, 'prendre' du réseau électrique de l'énergie verte pour produire de l'hydrogène nécessite de compenser la perte par une autre source d'électricité. Or le moyen consiste régulièrement en des centrales consommant des énergies fossiles productrices de gaz à effets de serre, ce qui n'est pas envisageable dans notre société.

## Union européenne à 27 Évolution de la production d'électricité



### Évolution des différentes filières productrices d'électricité depuis 2000 (UE à 27)



Titre : Évolution de la production d'électricité dans l'Union Européenne.

### Annexe 13 : Enjeux sanitaires et socio-économiques.

#### -Des enjeux de santé publique

Mais les gaz à effets de serre ne sont pas qu'un problème environnemental, ils ont un impact sanitaire à prendre en compte. En France, en 2018, 31% des émissions globales des GES (gaz à effets de serre) est faite par le secteur des transports dans contre 26% en 2008, d'après l'INSEE. Des chercheurs de l'université d'Harvard ont aussi mené une étude comptabilisant 8,7 millions de morts prématurées en 2018 dû à la pollution atmosphérique liée aux énergies fossiles. Il s'agit donc de trouver une alternative aux véhicules thermiques pour lutter contre la pollution de nos villes.



Figure 12 : pollution en ville

#### -Des enjeux socio-économiques

A cela s'ajoute le fait que les réserves de matériaux rares ne sont pas infinies. Il est donc nécessaire de trouver une alternative dans l'optique d'un épuisement complet de celles-ci. Le secteur de l'automobile étant déjà en crise, développer et investir dans la technologie hydrogène permettrait de donner un coup de neuf au secteur afin de dynamiser l'économie du pays. L'essor de véhicules hydrogène permettrait non seulement la lutte contre le réchauffement climatique mais également le maintien voire la création d'emploi dans l'industrie automobile. D'après une étude de l'association de l'industrie du génie mécanique allemande VDMA, les voitures à pile à combustible permettrait de créer, d'ici 2040, 68000 emplois en Europe.



Figure 13 : secteur automobile

#### Annexe 14 : Exemples d'aide à l'achat de véhicule hydrogène.

- Le bonus écologique :

Le bonus est une mesure qui permet de récompenser les véhicules les plus propres à travers une aide financière aux clients. Ce mécanisme a été mis en place en 2007 suite au Grenelle de l'Environnement, il se base sur le taux d'émissions de CO<sub>2</sub> à l'usage. Ainsi, le véhicule à motorisation hydrogène bénéficie de l'aide maximale, qui peut s'étendre jusqu'à un montant de 7000€ pour les particuliers.

- La prime à la conversion :

Cette aide existe en cas de mise à la casse d'une voiture essence antérieure à 1997 ou d'une voiture diesel mis en circulation avant 2001. Elle est complémentaire à d'autres aides et peut aller jusqu'à 5000€ pour des ménages non-imposables.

- Les aides locales :

Il existe également un soutien des territoires en complément des aides nationales. Par exemple en Ile de France, les taxis peuvent recevoir une prime de 6000€ pour l'acquisition d'un véhicule hydrogène. En Auvergne Rhône Alpes et à Grenoble une compensation allant jusqu'à 12000€ et 5000€ respectivement est possible.

#### Annexe 15 : Toyota Mirai



Figure 15 : Caractéristiques Toyota Mirai

La Toyota Mirai est la première voiture à hydrogène de la marque nipponne. Elle fait son apparition en France dès fin 2015 et cible principalement les professionnels dont en Ile de France où les taxis Hype constituent une flotte de véhicules 100% hydrogène. La Mirai suit la ligne directrice de la gamme hybride de Toyota, elle convertit les 5 kg d'hydrogène à une pression de 700 bars de ses réservoirs en électricité, ainsi la pile à combustible produit jusqu'à 114 kW de puissance (155 chevaux). Le véhicule est aussi composé d'une batterie Ni-Mh qui développe 1,6 kWh de capacité énergétique, celle-ci permet d'apporter de l'aide dans les



Figure 14 : Toyota Mirai

phases de démarrage ou d'accélération. Son autonomie atteint les 550 km, la Mirai revendique jusqu'à 178 km/h en vitesse de pointe et un 0 à 100 km/h en 9,6 secondes. En 2019, lors du salon de l'automobile à Tokyo, Toyota présente une nouvelle version de la Mirai plus performante, 134kW de puissance soit 182 chevaux et un 0 à 100 km/h en 9 secondes. Depuis 2021, cette grande berline à hydrogène est commercialisée en France à un prix de 67900€ hors bonus écologique.

### Annexe 16 : Hyundai Nexo



Figure 16 : Hyundai Nexo

Le Hyundai Nexo est une voiture hydrogène du constructeur coréen qui prend la relève de l'iX35 Fuel-Cell. Cet SUV incorporé des dernières technologies hydrogène se place dans la catégorie haut de gamme et se vend à partir de 79900€ en France. Son autonomie d'environ 700km lui permet de rivaliser avec les moteurs thermiques classiques. Cependant ce n'est pas le seul point fort du véhicule, en effet le Hyundai Nexo est équipé d'un moteur allant jusqu'à 120kW de puissance soit 163 chevaux. A cela s'ajoutent une pile à combustible de 135kW et une batterie de 1,56kW ayant le rôle de

tampon. Ces trois réservoirs d'hydrogène stockés à 700 bars de pression lui permet une charge de 6,33 kg d'hydrogène. En termes de performances, le SUV indique une vitesse maximale de 179 km/h et un 0 à 100 km/h en 9,54 secondes.

### Annexe 17 : Projet Métropole rouennaise

Il existe d'autres mobilités utilisant l'hydrogène comme les vélos, les bus, les camions ou même les avions à hydrogène.



Figure 17 : Projet de bus hydrogène

Cette technologie hydrogène est même plus proche de nous que nous pouvons le penser. En effet, la métropole de Rouen Normandie est présélectionnée pour faire partie des 7 territoires du projet « Écosystèmes territoriaux Hydrogène » de l'ADEME. Une flotte de 11 bus à pile à combustible devrait apparaître sur le Réseau Astuce, notamment le ligne 6, d'ici l'été 2022. Cet investissement de 9,5 millions d'euros ne représente pas la première fois que la métropole montre

un intérêt pour les véhicules hydrogène, depuis 2017 il existe une station à hydrogène dédiée à alimenter une dizaine de Renault Kangoo ZE H2.