

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL  
Faculté des Sciences et de la Technologie/  
Département d'Electronique

N° :...../2023

## MEMOIRE DE MASTER

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE: Electronique**

**SPECIALITE: Electronique des Systèmes Embarqués**

### Thème

**Conception et Réalisation d'un Electrolyseur:  
Application au système de décalaminage par  
injection d'oxyhydrogène (HHO)**

**Encadré par :**

**Dr. Ammar SOUKKOU**

**Dr. Soufiane HADDAD**

**Présenté par :**

**Mr. Aymene YDROUDJ**

**Mr. Abd El Madjid MENHANE**

**Date de soutenance:25/06/2023**

#### Jury de Soutenance

<b>Président :</b>	<b>Dr. Morad GRIMES</b>	<b>Grade MCA</b>	<b>Univ MSBY jijel</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Dr. Zoubir SANTOUH</b>	<b>Grade MAA</b>	<b>Univ MSBY jijel</b>
<b>Encadreur :</b>	<b>Dr. Ammar SOUKKOU</b>	<b>Grade MCA</b>	<b>Univ MSBY jijel</b>
<b>Co-Encadreur:</b>	<b>Dr. Soufiane HADDAD</b>	<b>Grade MCA</b>	<b>Univ MSBY jijel</b>

**Promotion : 2022/2023**

# *Remerciements*

*Tout simplement et basant sur la traduction d'une parole du Prophète Mohammed (que la prière d'Allah et son salut soient sur lui) et qui a dit : « Celui qui ne remercie pas pour la petite chose, ne remercie pas pour la grande chose et celui qui ne remercie pas les gens, ne remercie pas Allah ». Alors et avec un immense plaisir, je trouve l'occasion sur cette page afin de rendre hommage et exprimer toute ma reconnaissance à chaque personne ayant participé à la réussite de ma très belle aventure.*

*Nous tenons à remercier très vivement nos profs de thèse SOUKKOU Ammar et HADDAD Soufiane, université Mohamed Seddiki ben Yahia, Jijel. C'est avec beaucoup de chance quand a eu l'honneur et le plaisir de travailler sous leur direction. Nos premiers, nos plus vifs et profonds remerciements sont adressés à eux pour leur encadrement et pour leur pédagogie à diriger notre thèse. On a beaucoup apprécié par : ses diverses compétences et expériences dans plusieurs domaines assez différents, sa méthode de travail, son enthousiasme et sa qualité de correction de documents scientifiques, Le travail sous leur direction, les réunions et les discussions avec elle nous ont fait apprendre beaucoup de choses sur le monde de la recherche et sur l'art de ce métier.*

*Nous trouvons également le plaisir de souligner : leurs modesties, leurs patiences, leurs bonnes humeurs, son esprit très ouvert sur l'autre, ses encouragements et son soutien permanent et qui a été toujours à l'écoute et prêt pour donner des conseils surtout pendant les derniers mois de la thèse. Enfin je lui dis que nous ne pourrions jamais vous remercier comme il le faut pour son volontariat en corrigeant mon manuscrit en premier et pour le relire une autre fois. Elle trouve ici et pour toujours tout mon respect et toute ma reconnaissance.*

*Nous avons une dernière pensée émue pour notre famille, en particulier nos parents qui nous vouant une confiance et un amour inconditionnels et qui nous ont toujours soutenu dans ce que nous entreprenons. Nous vous remercions et nous vous serrant éternellement reconnaissant.*

# *Dédicaces*

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie  
ce modeste travail de fin d'étude*

*À mes très chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour ma  
réussite et ils ont éclairé le chemin par leurs conseils  
judicieux.*

*Je dédie aussi ce travail à mon cher frère et mes chères  
sœurs.*

*Tous mes adorables amis.*

*Ainsi qu'à toute personne qui m'a soutenu.*

**YDROUDJ Aymene**

# *Dédicaces*

*Je remercie, tout d'abord, Dieu tout puissant de m'avoir donné la force et le courage pour accomplir ce modeste travail que je dédie :*

*À mes chers parents que j'aime tellement, sans lesquels je ne serai jamais arrivée là où j'en suis. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.*

*À mes frères et mes sœurs et toute ma famille.*

*À mes enseignants ainsi qu'à tous les étudiants de ma promotion et mes amies.*

*À tous ceux que j'aime.*

*MENHANE Abd El Madjid*

# Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **CHAPITRE I: GENERALITES SUR PRODUCTION D’HYDROGENE ET SES MODES**

<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2 Généralités sur l’hydrogène : .....</b>	<b>2</b>
I.2.1 Définition : .....	2
I.2.2 Propriétés de l'hydrogène : .....	3
I.2.3 Histoire de la production d’hydrogène : .....	4
<b>I.3 Méthodes de production d’hydrogène:.....</b>	<b>4</b>
I.3.1 Principaux types de production d'hydrogène et codes couleurs : .....	5
I.3.2 Production d'hydrogène par vapo-reformage: .....	6
I.3.3 Production d'hydrogène par oxydation partielle: .....	6
I.3.4 Production d'hydrogène par reformage thermique automatique: .....	6
I.3.5 Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau: .....	7
I.3.6 Production d'hydrogène par hydrocarbures: .....	7
<b>I.4 Stockage du dihydrogène :.....</b>	<b>8</b>
<b>I.5 Usages de l’hydrogène : .....</b>	<b>8</b>
<b>I.6 L’hydrogène dans l’industrie:.....</b>	<b>9</b>
<b>I.7 Conclusion.....</b>	<b>10</b>

## **CHAPITRE II: PRODUCTION D’HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L’EAU**

<b>II.1 Introduction sur l’électrolyse de l'eau .....</b>	<b>11</b>
<b>II.2 Histoire de l’électrolyse de l'eau.....</b>	<b>11</b>
<b>II.3 Principes de base de l’électrolyse de l'eau .....</b>	<b>12</b>
<b>II.4 Types d’électrolyseurs pour l’électrolyse de l'eau .....</b>	<b>12</b>

<b>II.5</b>	<b>Mécanisme de réaction de l'électrolyse:</b> .....	14
<b>II.6</b>	<b>Facteurs influençant l'efficacité de l'électrolyse de l'eau</b> .....	15
II.6.1	La qualité de l'eau.....	15
II.6.2	La tension électrique .....	15
II.6.3	La surface de l'électrode .....	15
II.6.4	La température.....	15
II.6.5	La concentration en électrolyte .....	15
II.6.6	La durée de l'électrolyse .....	16
<b>II.7</b>	<b>Applications de l'électrolyse de l'eau</b> .....	16
II.7.1	Production d'hydrogène.....	16
II.7.2	Stockage d'énergie.....	16
II.7.3	Production d'oxygène .....	16
II.7.4	Traitement de l'eau .....	16
II.7.5	Électrodéposition.....	17
<b>II.8</b>	<b>Cas de la production d'hydrogène dans la centrale thermique d'Achouet-Jijel</b>	
<b>II.9</b>	<b>Défis et limites de l'électrolyse de l'eau</b> .....	18
II.9.1	Coût .....	18
II.9.2	Efficacité .....	18
II.9.3	Stockage .....	18
II.9.4	Durabilité.....	18
II.9.5	Impact environnemental :.....	18
<b>II.10</b>	<b>Perspectives d'avenir de l'électrolyse de l'eau</b> .....	18
II.10.1	Le coût de l'hydrogène vert .....	19
II.10.2	Réduction des coûts.....	19
II.10.3	Amélioration de l'efficacité .....	19
II.10.4	Utilisation de sources d'énergie renouvelable .....	19
II.10.5	Applications de l'hydrogène .....	19
II.10.6	Réseau de distribution d'hydrogène.....	19

## **CHAPITRE III: CONCEPTION ET REALISATION DE L'ELECTROLYSEUR**

<b>III.1</b>	<b>Introduction</b> .....	20
--------------	---------------------------	----

<b>III.2 Composants mécaniques de l'électrolyseur :</b>	20
III.2.1 Plaque inox :	20
III.2.2 Joints de caoutchouc:	20
III.2.3 Vis de fixation :	21
III.2.4 Plaques de plastique :	21
<b>III.3 Logiciel SOLIDWORKS:</b>	22
<b>III.4 Conception des pièces :</b>	22
<b>III.5 Montage et assemblage de différentes pièces:</b>	23
<b>III.6 Principe de fonctionnement :</b>	29
<b>III.7 Conclusion :</b>	30

## **CHAPITRE IV:APPLICATION DE L'INJECTION D'HYDROGENE POUR LE DECALAMINAGE DES MOTEURS**

<b>IV.1 Définitions, problèmes et importance du décalaminage</b>	32
IV.1.1 Définition du décalaminage moteur	32
IV.1.2 Problèmes causés par l'accumulation de calamine	32
IV.1.3 Importance du décalaminage pour le bon fonctionnement du moteur	33
<b>IV.2 Principe du décalaminage moteur HHO</b>	34
IV.2.1 Présentation du système de décalaminage moteur HHO	34
IV.2.2 Fonctionnement du générateur d'hydrogène HHO	34
IV.2.3 Injection d'hydrogène dans l'admission d'air et expulsion par le système d'échappement	36
<b>IV.3 Avantages du décalaminage moteur HHO</b>	36
IV.3.1 Amélioration de l'efficacité du moteur	36
IV.3.2 Réduction des émissions polluantes	37
IV.3.3 Préservation des pièces sensibles du moteur (vanne EGR, FAP, turbo)	38
<b>IV.4 Application réelle</b>	38
IV.4.1 Préparation du véhicule avant le décalaminage :	38
IV.4.2 Méthodologie de décalaminage :	39
IV.4.3 Mesure du débit d'hydrogène (acquisition via Arduino)	42

IV.4.4	Interpréter les données dans le moniteur série de l'IDE Arduino.....	45
<b>IV.5</b>	<b>Limites du décalaminage moteur HHO.....</b>	<b>47</b>
IV.5.1	Limites du décalaminage moteur HHO.....	47
IV.5.2	Facteurs à prendre en compte lors de l'application du décalaminage HHO.....	47
IV.5.3	Recommandations et précautions supplémentaires.....	48
<b>IV.6</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>49</b>
	<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>50</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>



## Listes des Figures

Figure I.1 : Les différentes Méthodes de production .....	4
Figure I.2 : Les différentes Méthodes de production. ....	5
Figure I.3 : Principaux types de production d'hydrogène H <sub>2</sub> codes couleur. ....	6
Figure I.4 : Utilisation de l'hydrogène dans différents secteurs [15]. ....	10
Figure II.1 : Quelques paramètres de fonctionnement des électrolyseurs.....	14
Figure II.2 : Électrolyseur de type filter-presse.....	17
Figure III.1 : Le logo du logiciel SolidWorks.....	22
Figure III.2 : Plaque inox .....	23
Figure III.3 : Découpage de plaque inox .....	24
Figure III.4 : Mini plaque d'inox de 11*11 cm .....	24
Figure III.5 : Percage des plaque inox.....	25
Figure III.6 : Plaques inox percés.....	25
Figure III.7 : Plaques de plastique.....	26
Figure III.8 : Joints de caoutchouc.....	26
Figure III.9 : Les Vis et les écrous. ....	27
Figure III.10 : Plaque de plastique et les vis. ....	27
Figure III.11 : Plaque inox d'anode.....	27
Figure III.12 : Plaque inox neutre. ....	28
Figure III.13 : plaque inox qui joue le rôle de 2 <sup>ème</sup> anode.....	28
Figure III.14 : 2 <sup>ème</sup> plaque de plastique pour l'assemblage finale. ....	28
Figure III.15 : Fixage et serrage des plaques. ....	29
Figure III.16 : Assemblage final du l'électrolyseur. ....	29
Figure IV.1 : Insertion de l'électrolyseur dans le système de décalaminage.....	35
Figure IV.2 : Point d'injection d'hydrogène dans le système d'admission d'air du moteur .....	39
Figure IV.3 : Connexion de l'équipement de décalaminage à la conduite d'admission .....	40
Figure IV.4 : Réglage de l'appareil de décalaminage.....	40
Figure IV.5 : Démarrage du système de décalaminage en vue de lancer l'injection de l'HHO. .....	41
Figure IV.6 : Détecteur de gaz MQ-8.....	43
Figure IV.7 : Partie électronique final.....	43
Figure IV.8 : Connexion du l'Arduino à l'Ordinateur.....	43
Figure IV.9 : Programme arduino .....	44
Figure IV.10 : Connexion de l'électrolyseur avec l'Ordinateur et l'Arduino .....	44

Figure IV.11 circuit sur isis.....	44
Figure IV.12 représentation graphique de débit d'hydrogène en fonction de temps .....	45
Figure IV.13 La valeur de débit d'hydrogène en fonction de temps (ppm) par (s).....	46

## **Liste des Tableaux**

Tableau I.1 : Les propriétés de l'hydrogène [4]. .....	3
Tableau I.2 : Les types de stockage de l'hydrogène [12]. .....	8

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'hydrogène est considéré comme une source d'énergie propre et prometteuse pour l'avenir, en raison de son abondance, de sa polyvalence et de son potentiel à produire de l'énergie sans émissions de carbone. Dans le contexte actuel de la transition énergétique, de nombreux efforts de recherche et de développement sont déployés pour exploiter efficacement cette ressource. Ainsi, ce projet de fin d'études vise à contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la production et de l'utilisation de l'hydrogène en tant que source d'énergie propre, en se concentrant spécifiquement sur l'application du décalaminage par injection d'hydrogène.

Le décalaminage par injection d'hydrogène est une application intéressante de cette technologie. Il s'agit d'un processus visant à éliminer les dépôts de calamine présents dans les moteurs à combustion interne, améliorant ainsi leur efficacité et prolongeant leur durée de vie. Le générateur d'hydrogène, conçu, simulé et réalisé dans le cadre de ce projet de fin d'études, joue un rôle essentiel dans cette application.

Pour atteindre cet objectif, une organisation de travail précise sera mise en place. Le projet sera divisé en plusieurs chapitres pour aborder différents aspects de la production d'hydrogène et de son application au décalaminage des moteurs.

- Le chapitre 1 fournira des généralités sur la production d'hydrogène et ses différents modes, permettant ainsi de comprendre les principes fondamentaux de cette ressource énergétique.
- Le chapitre 2 se concentrera sur la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, en détaillant les processus et les technologies associés.
- Le chapitre 3 portera sur la conception et la réalisation de l'électrolyseur, qui est le cœur du générateur d'hydrogène. Les différentes composantes de l'électrolyseur seront sélectionnées et optimisées. Des simulations informatiques, en utilisant SolidWorks, seront effectuées pour concevoir l'électrolyseur et optimiser son rendement énergétique.
- Une fois la phase de conception et de simulation achevée, le chapitre 4 sera consacré à l'application de l'injection d'hydrogène pour le décalaminage des moteurs. Des tests et des essais seront réalisés pour vérifier la performance de l'électrolyseur et sa compatibilité avec le système de décalaminage par injection d'hydrogène. Les résultats obtenus permettront d'évaluer les avantages potentiels de cette technologie pour l'industrie automobile et les moteurs à combustion interne.

# **Chapitre I: Généralités sur la production d'hydrogène et ses modes**

## I.1 Introduction

L'hydrogène est un élément chimique qui présente de nombreux avantages pour les systèmes énergétiques : il ne produit pas de gaz à effet de serre lorsqu'il est brûlé et ne rejette que de l'eau, ce qui en fait une source d'énergie propre. Depuis des décennies, l'hydrogène est considéré comme une technologie énergétique propre qui pourrait potentiellement transformer le monde. Ce chapitre aborde les généralités sur l'hydrogène et les différentes méthodes de production de cette source d'énergie propre. Nous allons étudier les méthodes les plus fréquemment utilisées pour produire de l'hydrogène, notamment l'électrolyse de l'eau, la gazéification de la biomasse et des déchets, ainsi que la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles tels que le gaz naturel. Nous allons également examiner les avantages et les inconvénients associés à chacune de ces méthodes.

## I.2 Généralités sur l'hydrogène

### I.2.1 Définition

L'hydrogène (H) est l'élément le plus simple et le plus léger dans la table périodique des éléments. Dans cette section, nous ferons référence à la molécule d'hydrogène (H<sub>2</sub>) lors de l'examen de son rôle en tant que vecteur d'énergie. Chaque molécule d'hydrogène est composée de deux atomes d'hydrogène, d'où le "2" dans H<sub>2</sub>. L'hydrogène est un gaz non toxique, incolore, inodore et sans saveur à température et pression ambiante [1].

L'hydrogène est l'élément le plus répandu dans l'univers, le 9ème sur Terre et le 2ème dans les océans. Son nom, qui vient du grec, a été proposé en 1787 par des scientifiques, dont Lavoisier [1]. En termes de contenu énergétique, l'hydrogène a une valeur élevée par unité de poids. Cependant, sa densité énergétique par unité de volume est relativement faible. Lorsque deux molécules d'hydrogène (H<sub>2</sub>) et une molécule d'oxygène (O<sub>2</sub>) sont combinées dans les proportions appropriées, une réaction chimique se produit pour former deux molécules d'eau (H<sub>2</sub>O) :



L'hydrogène est très abondant à la surface de la terre mais n'existe pas à l'état pur. Il est toujours lié à d'autres éléments chimiques, dans des molécules comme l'eau, les hydrocarbures, Les organismes vivants (animal ou végétal) sont également composés d'hydrogène, La biomasse constitue donc une autre source potentielle d'hydrogène [1, 2].

Extraire l'hydrogène de ces ressources primaires que sont les hydrocarbures, la biomasse ou encore l'eau nécessite un apport en énergie. Comme pour l'électricité, on considère ainsi que l'hydrogène est un «vecteur» énergétique [2]. L'hydrogène pourrait être quasi-inépuisable, à condition de savoir le produire en quantité suffisante à un coût compétitif et, idéalement, à partir d'énergie as car one (nucléaire et renouvelables).

On appelle « technologies de l'hydrogène » l'ensemble des technologies étudiées pour produire l'hydrogène, le stocker et le convertir à des fins énergétiques [1].

### I.2.2 Propriétés de l'hydrogène

De nombreux rapports et données sont disponibles sur les propriétés de l'hydrogène. Les propriétés les plus pertinentes pour les applications de l'hydrogène en tant que source d'énergie sont présentées dans le tableau ci-dessous [3].

**Tableau I.1 : Les propriétés de l'hydrogène [4].**

Propriétés	Valeur numérique
Poids atomique	1.00782519 (on 12C escalader)
Densité (gaz) (à 0 °C , 1 atm)	0.08988 g/L
Densité (liquide) (à -253 °c)	70.8 g/L
Fusion indiquée	-259.35 °C
Ebullition indiquée	-252.88 °C
Chaleur spécifique (Cp)	14 266 J/Kg.K (293K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/Kg.K

Bien que la densité d'énergie d'une unité d'hydrogène soit considérablement inférieure à celle des combustibles conventionnels, elle possède la plus haute teneur en énergie par unité de poids.

A titre d'exemple, 1 Nm<sup>3</sup> d'hydrogène contient une quantité d'énergie équivalente à celle contenue dans 0,34 litre d'essence, tandis qu'un litre d'hydrogène liquide correspond à une teneur en énergie équivalente à 0,27 litre d'essence, et 1 kg d'hydrogène équivaut à 2,75 kg d'essence [Source RENAC].

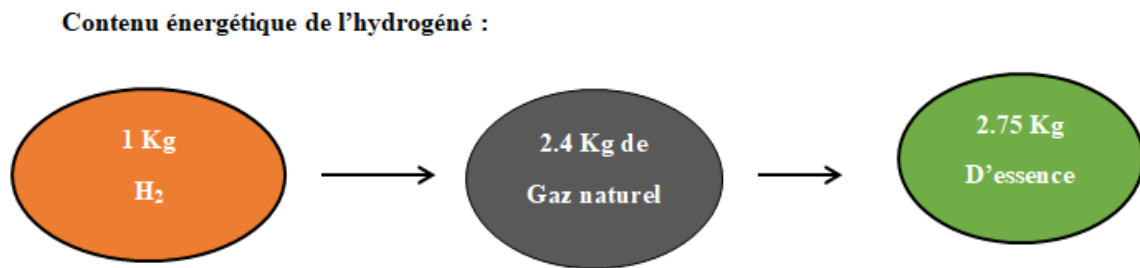


Figure I.1 : Les différentes Méthodes de production.

### I.2.3 Histoire de la production d'hydrogène

L'histoire de l'hydrogène remonte au début du XVI<sup>e</sup> siècle, lorsque l'alchimiste suisse Paracelse a étudié l'effet de l'acide sulfurique, ou vitriol, sur la limaille de fer et a remarqué un gaz inodore qui se dégageait de la réaction [5]. Ce n'est qu'au milieu du 18<sup>e</sup> siècle que le chimiste anglais Henry Cavendish a repris les travaux de Paracelse et a montré que ce gaz inflammable était également soluble dans l'eau. En 1703, le chimiste français Théodore Turquet de Mayerne avait également découvert que ce gaz était inflammable, ce qui est devenu connu sous le nom d'"hydrogène". Ces découvertes ont été suivies par de nombreux autres chimistes, dont le chimiste français Lavoisier (1778) [6]. En 1783, lors d'une communication à l'Académie des sciences de Paris, il a été appelé "hydrogène", ce qui signifie "produisant de l'eau" [5]. En 1800, William Nicholson et Sir Anthony Carlisle ont découvert que l'application d'un courant électrique à l'eau libérait du gaz d'hydrogène et d'oxygène, et ont appelé ce processus de destruction par l'électricité "électrolyse" [6].

## I.3 Méthodes de production d'hydrogène

On produit couramment de l'hydrogène à partir d'une source d'énergie primaire en utilisant l'une des trois méthodes suivantes : (1) conversion thermochimique de combustibles fossiles tels que le gaz naturel, l'essence, le diesel ou le propane, (2) électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité provenant de combustibles fossiles, nucléaires, solaires ou éoliens, ou (3) conversion biochimique. L'hydrogène est idéal pour être utilisé dans un système énergétique car il peut être stocké à très basse température, ce qui signifie qu'il peut être utilisé en cas de besoin. Cependant, la production d'hydrogène pose certains problèmes [7].



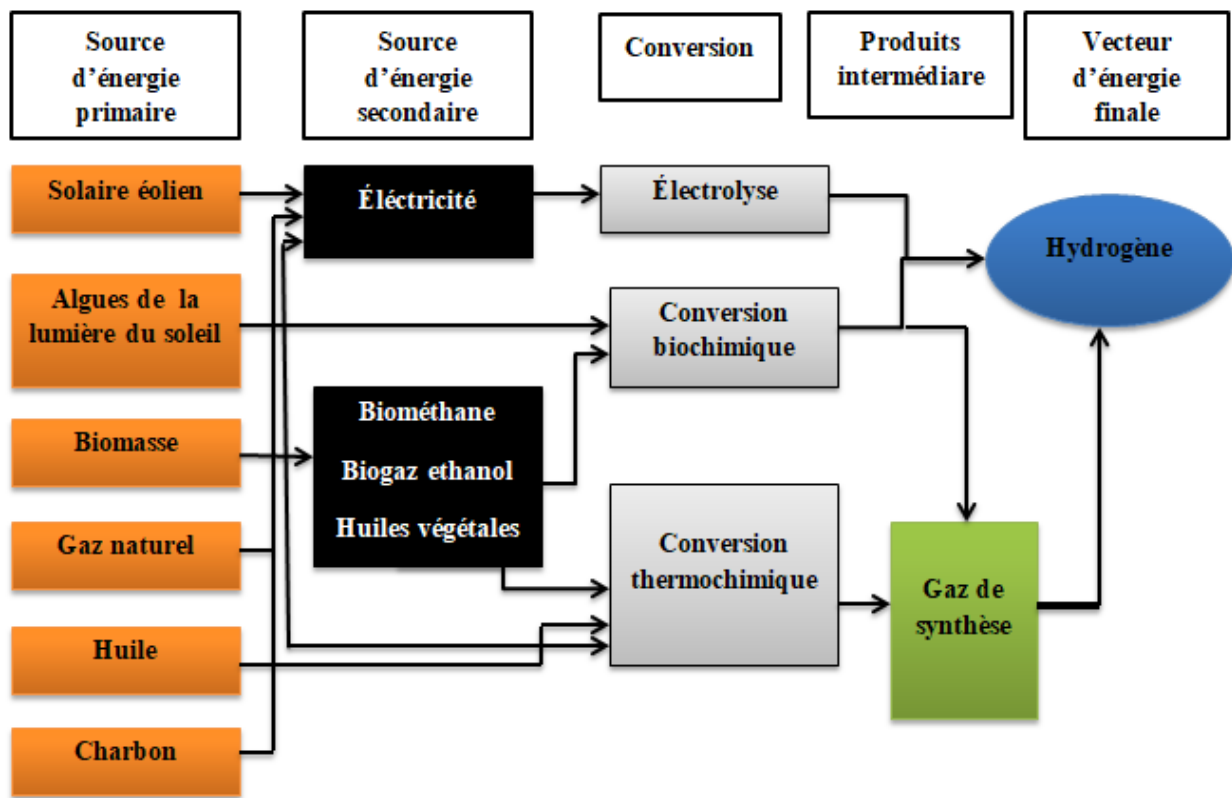


Figure I.2 : Les différentes Méthodes de production.

### I.3.1 Principaux types de production d'hydrogène et codes couleurs

Des codes couleurs ont été développés au cours des dernières années pour décrire les différentes méthodes de production d'hydrogène à partir de diverses sources d'énergie primaires ou secondaires.

Différents types d'hydrogène peuvent être produits selon les sources d'énergie utilisées et les méthodes de production. L'hydrogène vert est produit à partir d'énergies renouvelables telles que la biomasse, l'hydroélectricité, les panneaux solaires et l'énergie éolienne, tandis que l'hydrogène rouge est produit à partir de l'électricité nucléaire. L'hydrogène turquoise est produit à partir de gaz naturel, mais sans émettre de gaz à effet de serre, tandis que l'hydrogène gris est produit à partir du gaz naturel ou du pétrole minéral, avec des émissions de CO<sub>2</sub>. L'hydrogène bleu est similaire à l'hydrogène gris, mais avec la capture et le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. L'hydrogène brun et noir est produit par la gazéification de charbon, mais est très polluant. L'hydrogène blanc est produit en tant que sous-produit de processus industriels, et l'hydrogène jaune est produit par électrolyse à partir d'un mix énergétique électrique d'origine variable en carbone.

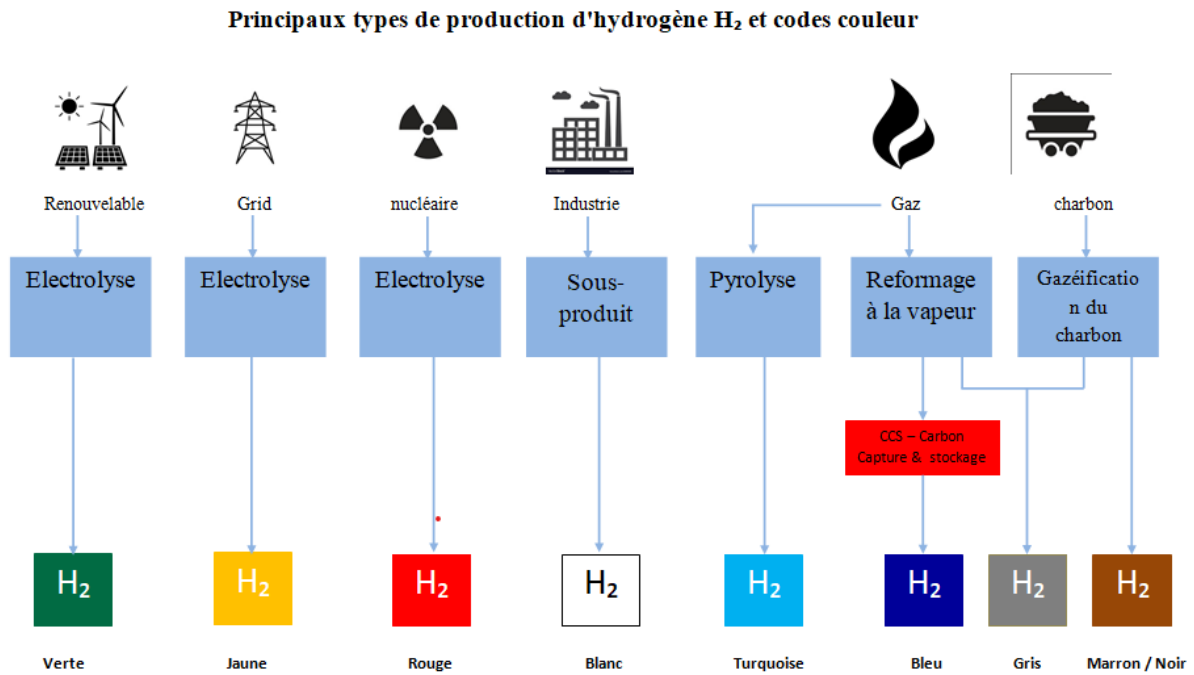
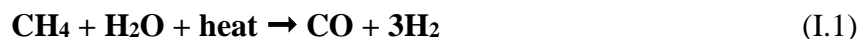


Figure I.3 : Principaux types de production d'hydrogène H<sub>2</sub> codes couleur.

### I.3.2 Production d'hydrogène par vapo-reformage

Le reformage à la vapeur est un procédé thermochimique dans lequel le méthane et la vapeur d'eau sont convertis en hydrogène et en monoxyde de carbone (1.1). La chaleur est souvent fournie par la combustion d'une partie du gaz d'alimentation en méthane. Le processus se déroule généralement à des températures de 700 à 850 °C et à des pressions de 3 à 25 bars. Le gaz produit contient environ 12 % de CO, qui peut encore être converti en CO<sub>2</sub> et en H<sub>2</sub> par la réaction de déplacement de gaz vers l'eau (1.2) [8] :



### I.3.3 Production d'hydrogène par oxydation partielle

L'oxydation partielle du gaz naturel est le processus par lequel de l'hydrogène est produit par la combustion partielle du méthane avec de l'oxygène. Dans ce processus, la chaleur est produite dans une réaction exothermique et, par conséquent, une conception plus compacte est possible car il n'est pas nécessaire de chauffer le réacteur de l'extérieur. Le CO produit est ensuite converti en H<sub>2</sub> comme décrit dans l'équation (1.3).



### I.3.4 Production d'hydrogène par reformage thermique automatique

Le reformage thermique automatique (RTA) est une combinaison du reformage à la vapeur (1.1) et de l'oxydation partielle (1.3). La réaction totale est exothermique et dégage

donc de la chaleur. La température de sortie du réacteur est de l'ordre de 950 à 1100°C, et la pression du gaz peut atteindre 100 bars. Là encore, le CO produit est converti en H<sub>2</sub> par la réaction de déplacement de gaz vers l'eau (1.2). La nécessité de purifier les gaz de sortie augmente considérablement les coûts de l'installation et réduit l'efficacité totale de ce procédé par rapport aux autres méthodes de production d'hydrogène [8].

### I.3.5 Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Bien que les énergies renouvelables telles que l'énergie cinétique du vent, de l'eau et des vagues, l'énergie solaire et les piles à combustible soient toutes fondamentalement différentes, elles ont un point commun : elles sont toutes utilisées pour produire de l'électricité. Malgré cela, l'électrolyse reste pratiquement le seul dénominateur commun entre les énergies renouvelables et les piles à combustible pour le transport.

L'électrolyse de l'eau est le processus par lequel l'eau est divisée en hydrogène et en oxygène par l'application d'énergie électrique (1.4). Cette méthode fournit de l'hydrogène propre, sans contamination par le carbone et le soufre. Cependant, l'électrolyse présente certains inconvénients tels que son coût plus élevé et ses besoins en énergie [9].



La production d'hydrogène par électrolyse est l'une des méthodes les plus gourmandes en énergie. L'électrolyse est la réaction d'oxydation inverse de l'hydrogène dans une pile à combustible. Alors que dans des conditions normales de température et de pression (NTP) thermiquement neutres, la thermodynamique prévoit le fonctionnement d'un électrolyseur impliquant les couples H<sup>+</sup> /H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O à un potentiel de Gibbs de 1,23 V, les aspects cinétiques nécessitent une surtension qui fixe le potentiel de coupure de l'eau en hydrogène et oxygène à une valeur de 1,48 V [10]. Cependant, dans les conditions de fonctionnement, une tension plus élevée est nécessaire pour compenser les pertes de polarisation et les pertes ohmiques. En réalité, c'est un potentiel de 1,83 V qui doit être fourni pour générer de l'hydrogène dans des conditions pratiques. Pour une quantité donnée d'hydrogène, les effets de surtension conduisent à un rendement maximal de 1,48/1,83 [9, 10].

### I.3.6 Production d'hydrogène par hydrocarbures

Les hydrocarbures sont avantageux dans la synthèse de l'hydrogène en raison de leur disponibilité, de leur prix et de leur intégration dans diverses industries de raffinage et de pétrochimie. Les hydrocarbures sont utilisés comme matière première dans divers procédés de raffinage. Ils constituent également une matière première pour les produits pétrochimiques tels que l'essence, le diesel, le carburéacteur et les plastiques.

Aujourd'hui les technologies existantes pour ce filière sont :

- Production par reformage autotherme.
- Le vapo-reformage d'hydrocarbures légers.
- L'oxydation partielle d'hydrocarbures [11].

#### I.4 Stockage du dihydrogène

Le dispositif de stockage est un élément important du système énergétique de l'hydrogène. L'un des grands défis de l'utilisation à grande échelle de l'hydrogène est le stockage. L'hydrogène est assez difficile à stocker ou à transporter avec la technologie actuelle. L'hydrogène a une bonne densité énergétique en poids, mais une faible densité énergétique par volume par rapport aux hydrocarbures. Pour tout type de système de carburant pour véhicule, il est souhaitable d'avoir au moins une autonomie de 500 km (300 miles). Une autonomie d'au moins 500 km (300 miles). La mise au point d'un système de stockage de l'hydrogène viable devient de plus en plus important pour promouvoir une "économie de l'hydrogène" [12].

Le stockage gravimétrique et volumétrique doit être élevé pour ces dispositifs de stockage de l'H<sub>2</sub>. Les propriétés des bons matériaux de stockage de l'H<sub>2</sub> sont les suivantes : légèreté, faible coût, une excellente cinétique d'adsorption et de désorption, et la recyclabilité [12]. Le tableau 2 présente quelques types de stockage de l'hydrogène.

**Tableau I.2 : Les types de stockage de l'hydrogène [12].**

Catégories	Types
Stockage de gaz	Hydrogène comprimé
Stockage liquide	Hydrogène liquide
Stockage de produits chimiques (hydrure métallique)	Hydrure de magnésium (MgH <sub>2</sub> ), hydrure de calcium (CaH <sub>2</sub> ), hydrure de sodium (NaH)
Stockage physique (métal cadre organique)	PCN-6 PCN, réseau poreux de coordination

#### I.5 Usages de l'hydrogène

L'hydrogène pourrait décarboner de nombreux secteurs en remplaçant les énergies fossiles (chaleur critique, carburant) et en permettant des réactions chimiques moins émettrices de

CO<sub>2</sub> (réduction du fer). Néanmoins, il ne faut pas croire que c'est « magique »: nous consommons en déjà 70 millions de tonnes pour des procédés dont l'économie ne peut pas se passer. La question des nouveaux usages se pose ensemble avec la question de la production d'hydrogène [13].

L'hydrogène a une propriété extraordinaire lorsqu'on l'utilise pour produire de l'énergie, il ne produit que de l'eau et peut être produit à partir d'électricité et d'eau. On rêve depuis les années 70 d'une économie hydrogène, où ce gaz remplacerait le pétrole. Cela revient à la mode, mais la technologie et les enjeux ont évolué et, au-delà des discours de consultants et d'économistes, l'hydrogène a un vrai rôle à jouer dans la transition écologique [13].

Il pourrait crédiblement être utilisé pour décarboner les procédés industriels, soit en créant de la chaleur (ciment), soit comme réactif (réduction du fer) et le transport lourd, pour lequel le stockage par batterie n'est pas viable. Il pourrait également être utilisé comme moyen de stockage d'énergie durable (ce que ne sont pas les batteries) à grande échelle, notamment pour absorber les variations des énergies renouvelables intermittentes [13].

## **I.6 L'hydrogène dans l'industrie**

En tant qu'énergie la plus prometteuse du 21<sup>e</sup> siècle, l'hydrogène est largement utilisé par l'industrie métallurgique et d'autres secteurs. Compte tenu de la pression croissante exercée par les économies d'énergie et la réduction des émissions et de la volonté de rechercher des technologies de pointe pour améliorer la compétitivité des entreprises sidérurgiques, l'augmentation de la part de l'hydrogène dans la réduction des émissions de CO sidérurgie, l'augmentation de la proportion d'hydrogène dans les gaz de réduction pour obtenir une production métallurgique à base d'hydrogène [14].

Métallurgie de l'hydrogène est largement étudiée, ce qui permet non seulement de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi de soutenir le développement durable des usines sidérurgiques. Actuellement, les applications de l'hydrogène dans l'industrie sidérurgique peuvent être grossièrement divisées en deux aspects :

- En tant qu'agent réducteur pour réduire l'oxyde de fer, principalement impliqué dans le processus de production de BF et le procédé de réduction directe du fer (DRI) à base de gaz ;
- Comme combustible pour le chauffage, y compris la production de frittage d'assistant, le processus de palettisation, le processus de réduction directe du fer (DRI) à base de gaz. de frittage, le processus de palettisation, le chauffage du four à poche, etc [14].

La figure 1 décrit les différentes applications de l'hydrogène dans différents secteurs. Deux secteurs principaux, les raffineries et l'industrie chimique, définissent le marché de l'hydrogène, l'ammoniac étant le produit dominant. Étant donné que l'ammoniac domine la consommation globale d'hydrogène, il peut être utilisé comme indication de la production mondiale d'hydrogène à l'avenir. L'ammoniac est à son tour utilisé pour produire des engrais à base d'azote, qui sont liés à la croissance démographique ainsi qu'à l'utilisation et à l'intensification des terres agricoles [15].

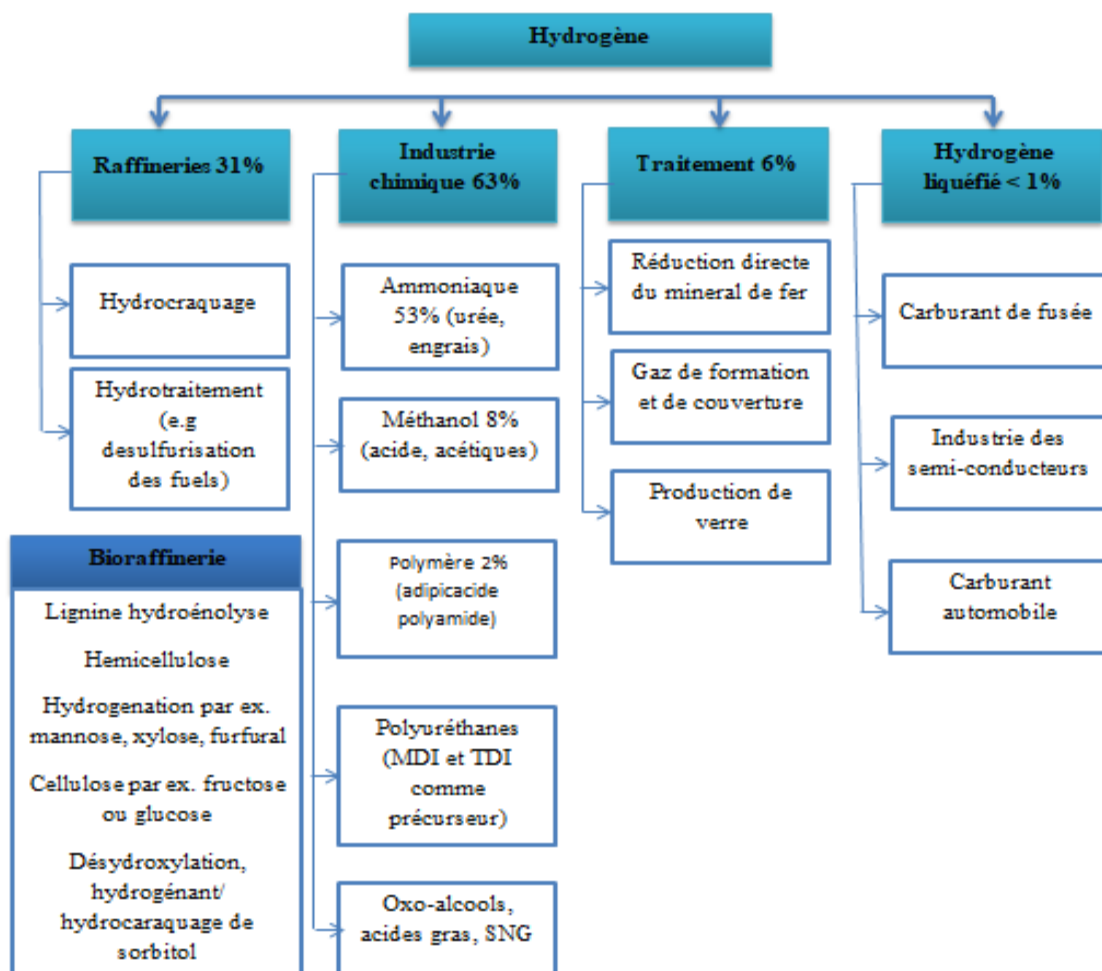


Figure I.4 : Utilisation de l'hydrogène dans différents secteurs [15].

## I.7 Conclusion

L'hydrogène est un élément qui peut transporter de l'énergie et suscite actuellement beaucoup d'attention en raison de son potentiel d'applications.

Dans l'ensemble, la production d'hydrogène à partir de sources renouvelables est considérée comme la voie à suivre pour une production d'hydrogène durable et respectueuse de l'environnement. Les avancées technologiques récentes ont permis une réduction des coûts de production d'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau, ce qui rend cette méthode de plus en plus compétitive par rapport à la production à partir de combustibles fossiles.

## **Chapitre II: Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau**



## **II.1 Introduction sur l'électrolyse de l'eau**

L'électrolyse de l'eau est un procédé chimique qui utilise un courant électrique pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Cette réaction se produit dans une cellule électrolytique contenant une anode et une cathode plongées dans l'eau. Sous l'effet de la tension électrique appliquée, l'eau se sépare en ses deux composants, l'hydrogène et l'oxygène, qui se dégagent respectivement à la cathode et à l'anode [16]. Cette technologie est prometteuse pour la production d'hydrogène, un gaz propre et renouvelable utilisé comme carburant pour les véhicules, le stockage d'énergie et de nombreuses applications industrielles. L'électrolyse de l'eau peut être alimentée par des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne, la rendant particulièrement intéressante pour produire de l'hydrogène sans émissions de gaz à effet de serre [17]. Malgré les défis liés à son efficacité énergétique et à ses coûts, l'électrolyse de l'eau est de plus en plus étudiée et développée en raison de l'avancement technologique et de la demande croissante pour des sources d'énergie propre [18].

## **II.2 Histoire de l'électrolyse de l'eau**

L'électrolyse de l'eau est une technologie ancienne qui remonte à l'époque de la découverte de l'électricité. En 1800, William Nicholson a réalisé la première électrolyse de l'eau en utilisant une pile Volta pour décomposer l'eau en ses deux composants, l'hydrogène et l'oxygène. Cependant, à l'époque, la technologie n'était pas suffisamment avancée pour une utilisation pratique de l'électrolyse de l'eau [19].

Au fil des décennies, des scientifiques ont continué à étudier l'électrolyse de l'eau et à améliorer sa technologie. En 1839, Christian Friedrich Schönbein a découvert que l'eau pouvait être électrolysée plus efficacement en ajoutant un électrolyte, tel que l'acide sulfurique, pour augmenter la conductivité électrique de l'eau. Cette découverte a ouvert la voie à une utilisation plus pratique de l'électrolyse de l'eau [20].

Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, l'électrolyse de l'eau est devenue une technologie importante pour la production d'hydrogène. Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'Allemagne a utilisé l'électrolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène pour les dirigeables, les torpilles et les missiles. Après la guerre, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau a continué à se développer pour des applications industrielles, telles que la production d'ammoniac et la raffinerie du pétrole [21].

Au cours des dernières décennies, l'électrolyse de l'eau a suscité un intérêt croissant en tant que technologie propre et renouvelable pour la production d'hydrogène. Les progrès dans les matériaux des électrodes, la conception de la cellule électrolytique et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables ont amélioré l'efficacité et la durabilité de l'électrolyse de l'eau, en faisant une technologie prometteuse pour la transition vers une économie à faible émission de carbone [19].

### II.3 Principes de base de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est basée sur les principes de l'électrochimie et du transfert d'électrons [22]. Le processus utilise une source de courant électrique pour séparer les molécules d'eau en ions, qui sont ensuite attirés vers des électrodes opposées.

Lorsqu'un courant électrique est appliqué à travers une cellule électrolytique remplie d'eau, la cathode (l'électrode négative) attire les ions hydrogène ( $H^+$ ) et les réduit en atomes d'hydrogène ( $H$ ). De l'autre côté de la cellule, l'anode (l'électrode positive) attire les ions oxygène ( $O_2^-$ ) et les oxyde en molécules d'oxygène ( $O_2$ ) [23].

L'équation chimique de la réaction d'électrolyse de l'eau est :



L'électrolyse de l'eau peut se produire dans une solution d'acide sulfurique ou de soude caustique pour améliorer la conductivité électrique de l'eau, mais elle peut également se produire dans de l'eau pure. Dans ce cas, l'électrolyse est plus difficile en raison de la faible conductivité électrique de l'eau pure, ce qui nécessite une tension plus élevée pour produire le courant électrique nécessaire [23].

L'efficacité de l'électrolyse de l'eau dépend de nombreux facteurs, tels que la conception de la cellule électrolytique, les matériaux des électrodes, la qualité de l'eau utilisée et la source d'énergie électrique utilisée pour alimenter le processus [25]. Les progrès technologiques continuent d'améliorer l'efficacité et la rentabilité de l'électrolyse de l'eau, en faisant une technologie prometteuse pour la production d'hydrogène propre et renouvelable [26].

### II.4 Types d'électrolyseurs pour l'électrolyse de l'eau

Il existe différents types d'électrolyseurs, classés en "familles" distinctes. Selon la température de fonctionnement et l'électrolyte utilisé, on peut distinguer les électrolyseurs basse température, tels que l'électrolyse alcaline (AE), les électrolyseurs à membrane d'échange de protons (PEM) et les électrolyseurs à membrane d'échange d'anions (AEM). Les

électrolyseurs haute température, tels que les cellules d'électrolyse à oxyde solide (SOEC), constituent une autre catégorie. De plus, les électrolyseurs diffèrent en fonction des matériaux utilisés pour les électrodes, de la géométrie de la cellule électrolytique [27].

Dans la transition vers des méthodes de production d'hydrogène vert, les électrolyseurs alcalins sont prometteurs car ils ont une longue histoire de performance optimale. Ils sont efficaces en termes de matériaux utilisés, de durée de vie, de coûts d'investissement et de scalabilité, avec des gammes de puissance allant jusqu'à plusieurs mégawatts. Les cellules d'électrolyse à membrane d'échange de protons (PEMEC) sont différentes de leurs homologues alcalins car elles ont une membrane revêtue d'un catalyseur généralement composé d'un métal précieux (par exemple, le platine). Cela augmente les dépenses en capital associées à la production d'électrolyseurs PEMEC.

Les PEMEC sont utilisées commercialement depuis 1987. Bien qu'elles fonctionnent à une température plus élevée que les AEC, les PEMEC occupent moins d'espace et produisent de l'hydrogène hautement comprimé et pur. Les électrolyseurs à membrane d'échange d'anions (AEM) ont l'avantage d'utiliser des catalyseurs à base de métaux de transition à faible coût plutôt que des catalyseurs en métaux précieux trouvés dans les PEMEC. En Allemagne, des électrolyseurs modulaires sont actuellement en développement, qui peuvent être adaptés pour répondre à la demande d'énergie pour le stockage d'énergie privé, les stations de ravitaillement et les micro-réseaux.

Cela permet aux consommateurs de combiner autant d'unités modulaires que nécessaire pour répondre à leurs besoins. Les cellules d'électrolyse à oxyde solide (SOEC) sont la technologie la plus moderne disponible, mais elle n'est pas largement commercialisée pour l'instant. Jusqu'à présent, son utilisation a été limitée aux laboratoires. Comme les PEMEC, les SOEC utilisent un électrolyte solide (céramiques conductrices d'ions au lieu des métaux précieux utilisés dans les PEMEC) qui permet un fonctionnement à des températures très élevées.

Cela se traduit par une efficacité électrique élevée et des coûts inférieurs aux PEMEC. Fondamentalement, les SOEC fonctionnent comme des piles à combustible inverses, fonctionnant à des températures de 700 à 1000°C. Le bon fonctionnement des électrolyseurs dépend de nombreux facteurs qui doivent être parfaitement équilibrés pour atteindre l'efficacité maximale du système. Ceux-ci sont connus sous le nom de paramètres de fonctionnement et vont de la concentration de l'électrolyte à sa taille et son alignement.

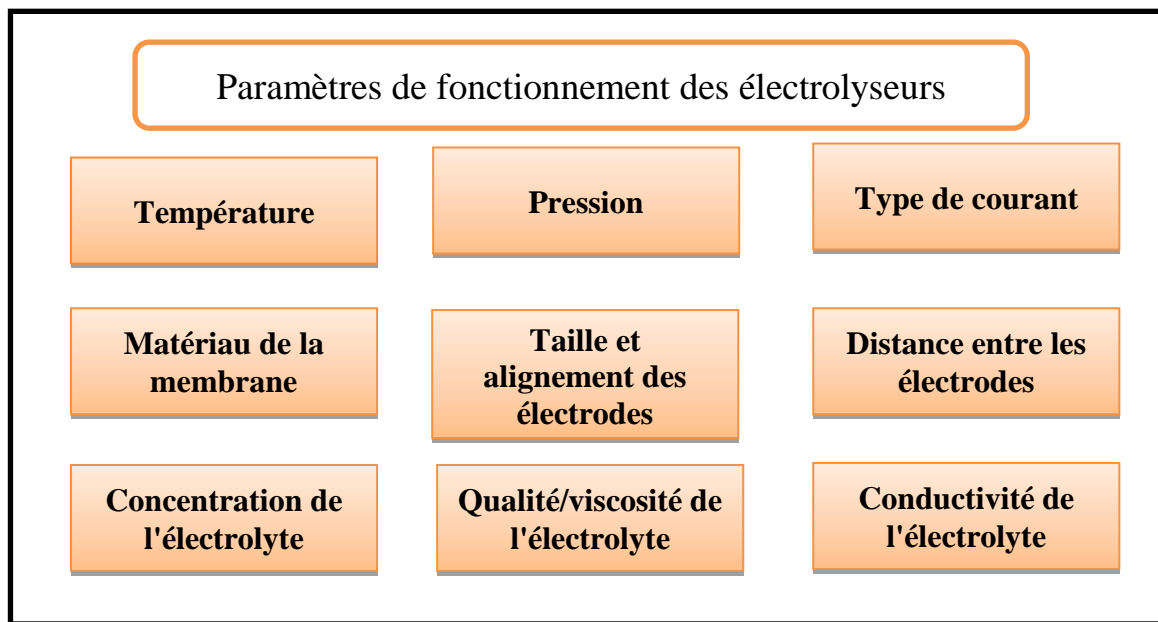
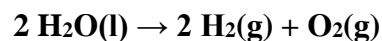


Figure II.1 : Quelques paramètres de fonctionnement des électrolyseurs.

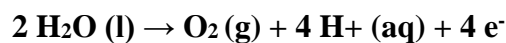
## II.5 Mécanisme de réaction de l'électrolyse

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique qui se produit dans une cellule électrolytique contenant de l'eau et des électrodes. Lorsque l'on applique une tension électrique à la cellule, les électrodes agissent comme des catalyseurs pour provoquer une réaction d'oxydoréduction [28]. La réaction globale peut être représentée comme suit :

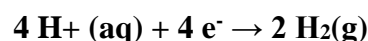


La réaction se produit en deux étapes :

1. À l'anode : l'oxydation de l'eau produit des ions hydrogène ( $\text{H}^+$ ) [29] et libère des électrons [30] :



2. À la cathode : les électrons libérés à l'anode réduisent les ions hydrogène en molécules de dihydrogène ( $\text{H}_2$ ) [31]:



Ainsi, l'oxydation de l'eau à l'anode produit de l'oxygène gazeux, tandis que la réduction des ions hydrogène à la cathode produit de l'hydrogène gazeux [32].

Le mécanisme précis de la réaction dépend du type d'électrolyseur utilisé et des conditions de fonctionnement, tels que la nature des électrodes, la concentration et la nature de l'électrolyte, la température et la pression. Par exemple, dans un électrolyseur alcalin, l'eau est ionisée en présence d'une solution d'hydroxyde de potassium ou de sodium, produisant des

ions hydroxyles ( $\text{OH}^-$ ) et des ions hydronium ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) [33]. Les électrodes en nickel ou en acier inoxydable sont utilisées, avec un électrolyte concentré pour augmenter la conductivité. Les ions hydroxyles migrent vers l'anode et sont oxydés, tandis que les ions hydronium migrent vers la cathode et sont réduits [34].

Dans un électrolyseur à membrane échangeuse de protons (PEM), une membrane polymère conductrice d'ions sépare les électrodes pour empêcher le mélange des gaz produits [35]. Les électrodes sont souvent en platine et le courant électrique est fourni par une source d'énergie renouvelable, telle qu'un panneau solaire ou une éolienne. La membrane permet uniquement le passage des ions hydrogène, ce qui permet une production d'hydrogène pur [36].

## II.6 Facteurs influençant l'efficacité de l'électrolyse de l'eau

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'efficacité de ce processus [37], notamment : La qualité de l'eau, la tension électrique, la surface de l'électrode et la température.

### II.6.1 La qualité de l'eau

La pureté de l'eau utilisée pour l'électrolyse peut avoir un impact sur son efficacité [38]. L'eau distillée est souvent préférable car elle contient moins d'impuretés qui pourraient perturber le processus électrochimique [39].

### II.6.2 La tension électrique

Une tension électrique plus élevée peut augmenter l'efficacité de l'électrolyse, car elle permet aux réactions électrochimiques de se produire plus rapidement [40].

### II.6.3 La surface de l'électrode

La surface de l'électrode utilisée dans l'électrolyse peut influencer l'efficacité du processus. Des électrodes de plus grande surface peuvent permettre une plus grande surface de contact avec l'eau, ce qui augmente la quantité d'hydrogène et d'oxygène produits [41].

### II.6.4 La température

La température peut également avoir un effet sur l'efficacité de l'électrolyse. Des températures plus élevées peuvent accélérer les réactions électrochimiques, mais des températures trop élevées peuvent également réduire l'efficacité du processus en raison de la dégradation des électrodes [42].

### II.6.5 La concentration en électrolyte

L'ajout d'un électrolyte, tel que du sel ou de l'acide sulfurique, peut augmenter la conductivité de l'eau et donc l'efficacité de l'électrolyse. Cependant, une concentration

d'électrolyte trop élevée peut entraîner la corrosion des électrodes et réduire leur durée de vie [43].

### **II.6.6 La durée de l'électrolyse**

La durée de l'électrolyse peut influencer la quantité d'hydrogène et d'oxygène produits. Une durée d'électrolyse plus longue peut augmenter la quantité de gaz produite, mais peut également entraîner une usure plus rapide des électrodes [44].

En général, une combinaison optimale de ces facteurs dépendra du type d'électrolyseur utilisé et des conditions spécifiques dans lesquelles l'électrolyse est effectuée [45].

## **II.7 Applications de l'électrolyse de l'eau**

L'électrolyse de l'eau est une technologie polyvalente avec de nombreuses applications dans les domaines de l'énergie, de l'environnement et de l'industrie<sup>1</sup>. Voici quelques exemples d'applications de l'électrolyse de l'eau [46] :

### **II.7.1 Production d'hydrogène**

Cette technique est utilisée pour produire de l'hydrogène, qui est un combustible propre et efficace pour les véhicules et les systèmes de stockage d'énergie. L'hydrogène peut être produit à grande échelle à partir d'énergie renouvelable telle que l'énergie solaire ou éolienne [47].

### **II.7.2 Stockage d'énergie**

Elle peut être utilisée pour stocker l'énergie produite à partir de sources renouvelables [48], telles que l'énergie solaire ou éolienne, sous forme d'hydrogène. L'hydrogène peut ensuite être stocké et utilisé pour produire de l'électricité lorsque l'énergie renouvelable n'est pas disponible [49].

### **II.7.3 Production d'oxygène**

Elle peut également être utilisée pour produire de l'oxygène. Cette application est particulièrement utile pour les industries qui nécessitent de grandes quantités d'oxygène pour les processus de fabrication [50].

### **II.7.4 Traitement de l'eau**

L'électrolyse de l'eau peut être utilisée pour traiter les eaux usées en éliminant les polluants tels que les métaux lourds et les produits chimiques organiques. Cette application est particulièrement utile pour les industries qui produisent des eaux usées contenant des contaminants toxiques [51].

### II.7.5 Électrodéposition

Ce processus peut également être utilisé pour déposer des métaux sur des surfaces pour les revêtir. Cette application est couramment utilisée dans l'industrie automobile pour protéger les pièces métalliques de la corrosion [52].

## II.8 Cas de la production d'hydrogène dans la centrale thermique d'Achouet-Jijel

En raison de la nécessité d'hydrogène pour la centrale, il est recommandé d'installer une installation de production d'hydrogène. La méthode la plus simple pour cela dans une centrale électrique est l'électrolyse de l'eau par voie électrique, qui consiste en la décomposition électrolytique de l'eau sous pression.

Cette installation comprend deux électrolyseurs alcalins, des équipements pour l'épuration, le séchage, le refroidissement et le réglage de la pression des gaz produits, des dispositifs électrotechniques, des instruments de contrôle et des réservoirs de stockage pour l'hydrogène produit. L'installation fonctionne de manière discontinue, en fonction des besoins en hydrogène de la centrale.

L'électrolyseur de type filtre-presse (Figure 5) est un appareil horizontal composé de 25 cadres à diaphragme. Il peut produire une quantité d'hydrogène allant jusqu'à 10 m<sup>3</sup>/h et une quantité d'oxygène allant jusqu'à 5 m<sup>3</sup>/h. L'intensité de courant amené à l'électrolyseur est de 1000 A, la tension est de 55 volts et la température de fonctionnement est de 85 ± 5 °C. La pression du régime peut atteindre 10 bars.

Le taux de pureté de l'hydrogène produit est d'au moins 99 % et le taux de pureté de l'oxygène produit est d'au moins 98 %.



Figure II.2 : Électrolyseur de type filtre-presse.

## II.9 Défis et limites de l'électrolyse de l'eau

Bien que l'électrolyse de l'eau soit une technologie prometteuse avec de nombreuses applications, elle présente également des défis et des limites [53]. Voici quelques-uns d'entre eux :

### II.9.1 Coût

Le coût de l'électrolyse de l'eau est actuellement assez élevé par rapport à d'autres technologies de production d'énergie. Cela est principalement dû au coût élevé des électrodes et de l'énergie nécessaire pour produire l'hydrogène [54].

### II.9.2 Efficacité

L'efficacité de l'électrolyse de l'eau est également un défi, car il faut souvent plus d'énergie pour produire de l'hydrogène que l'énergie qui sera finalement produite par l'hydrogène. Cela est principalement dû à la perte d'énergie sous forme de chaleur lors de la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique [17].

### II.9.3 Stockage

Le stockage de l'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau est également un défi, car l'hydrogène est un gaz très léger et nécessite un stockage sous haute pression ou à très basse température [55].

### II.9.4 Durabilité

Les électrodes utilisées dans l'électrolyse de l'eau ont une durée de vie limitée en raison de la corrosion et de la dégradation. Cela augmente les coûts de maintenance et de remplacement des électrodes [56].

### II.9.5 Impact environnemental :

Bien que l'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau soit un combustible propre, la production d'hydrogène à grande échelle nécessite encore de grandes quantités d'énergie, qui sont souvent produites à partir de combustibles fossiles, ce qui contribue aux émissions de gaz à effet de serre [57].

## II.10 Perspectives d'avenir de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau présente de nombreuses perspectives d'avenir passionnantes en tant que technologie propre et durable pour la production d'énergie [24]. Voici quelques-unes des perspectives les plus prometteuses pour l'avenir de l'électrolyse de l'eau :



**II.10.1 Le coût de l'hydrogène vert**

Plusieurs facteurs ont une influence notable sur le coût de production de l'hydrogène vert, notamment :

- Les dépenses en capital pour l'achat de l'électrolyseur (CAPital EXpenditure : CAPEX),
- Le coût de l'énergie renouvelable utilisée pendant le processus, et
- Le nombre d'heures de fonctionnement par an, exprimé en heures à pleine charge (h/a) ou en facteur de capacité (%).

**II.10.2 Réduction des coûts**

Des recherches sont actuellement en cours pour réduire les coûts de l'électrolyse de l'eau en utilisant des matériaux moins chers et en développant des technologies plus efficaces [58].

**II.10.3 Amélioration de l'efficacité**

Des améliorations sont également en cours pour augmenter l'efficacité de l'électrolyse de l'eau, en réduisant les pertes d'énergie sous forme de chaleur et en améliorant la durabilité des électrodes [16].

**II.10.4 Utilisation de sources d'énergie renouvelable**

L'électrolyse de l'eau peut être utilisée pour stocker l'énergie produite à partir de sources renouvelables, telles que l'énergie solaire ou éolienne, ce qui pourrait contribuer à la transition vers une économie énergétique plus durable [56].

**II.10.5 Applications de l'hydrogène**

L'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau peut être utilisé pour alimenter des véhicules à hydrogène et pour fournir de l'énergie aux bâtiments et aux industries. La demande d'hydrogène est en constante augmentation, ce qui pourrait stimuler la demande d'électrolyseurs d'eau [57].

**II.10.6 Réseau de distribution d'hydrogène**

Des initiatives sont en cours pour développer un réseau de distribution d'hydrogène à grande échelle, ce qui pourrait contribuer à une adoption plus large de l'hydrogène en tant que source d'énergie [59].

# **Chapitre III: Conception et réalisation de l'électrolyseur**

### **III.1 Introduction**

Ce chapitre se focalise sur la conception mécanique de l'électrolyseur, en détaillant les composants clés tels que les électrodes, les plaques, les séparateurs et les conduites de gaz. Nous expliquons en détail le processus de conception des modèles des pièces, en mettant l'accent sur la précision, les tolérances et les contraintes mécaniques. Nous présentons ensuite les procédures d'assemblage, soulignant l'importance de l'ajustement précis des pièces pour assurer le bon fonctionnement de l'électrolyseur. Nous mettons en avant l'utilisation du logiciel SolidWorks comme outil principal, permettant la création de modèles 3D précis et facilitant l'assemblage virtuel. Ce chapitre fournit des informations essentielles pour une conception efficace de l'électrolyseur, garantissant sa performance globale.

### **III.2 Composants mécaniques de l'électrolyseur**

Dans cette section, nous examinons en détail les divers éléments essentiels de notre électrolyseur qui garantissent son bon fonctionnement.

#### **III.2.1 Plaque inox**

Une plaque en acier inoxydable, communément appelée plaque inox, est une plaque plate en acier résistant à la corrosion. Elle peut avoir une forme rectangulaire ou carrée et est utilisée à diverses fins. Les plaques inox peuvent être gravées à l'acide ou imprimées avec du texte, des images ou des œuvres d'art. Elles sont couramment utilisées dans la signalisation, les plaques commémoratives, les plaques nominatives, les éléments décoratifs ou comme alternative aux plaques traditionnelles fabriquées dans d'autres matériaux tels que le laiton, le bronze ou le bois.

L'acier inoxydable est largement utilisé dans de nombreuses industries et applications en raison de ses propriétés avantageuses. Il offre une grande durabilité, une résistance aux taches et à la corrosion, ainsi qu'un attrait esthétique. C'est pourquoi il est préféré dans de nombreux environnements où la robustesse et l'aspect visuel sont importants. Que ce soit pour des applications pratiques ou décoratives, les plaques en acier inoxydable offrent une solution polyvalente et fiable.

#### **III.2.2 Joints de caoutchouc**

Les joints en caoutchouc, également appelés joints d'étanchéité en caoutchouc, sont des éléments en caoutchouc spécialement conçus pour garantir une étanchéité entre deux

surfaces ou composants. Leur fonction principale est d'empêcher les fuites de liquides, de gaz ou de particules solides à travers les espaces existants entre les pièces en contact.

Ces joints sont fabriqués à partir de divers types de caoutchouc, tels que le caoutchouc naturel, les caoutchoucs synthétiques (comme le néoprène, le nitrile ou le silicone) ou des mélanges spécifiques en fonction des exigences. Ils sont disponibles dans une large gamme de formes, de tailles et de configurations pour s'adapter aux différentes applications.

Les joints en caoutchouc sont largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'électronique, l'industrie pétrolière et gazière, ainsi que l'industrie alimentaire, pour n'en citer que quelques-uns. Leur polyvalence et leur capacité à assurer une étanchéité fiable en font des composants essentiels dans de nombreux systèmes où l'étanchéité est primordiale.

### **III.2.3 Vis de fixation**

Les vis de fixation sont des éléments couramment employés pour relier et maintenir ensemble des pièces ou des composants. Elles sont composées d'une tige filetée, généralement en métal, et d'une tête à une extrémité qui facilite leur insertion et leur serrage à l'aide d'un outil approprié, tel qu'un tournevis ou une clé.

Ces vis sont utilisées dans de nombreux domaines tels que la construction, l'assemblage mécanique, l'électronique, l'automobile et d'autres secteurs industriels. Leur fonction principale est de maintenir solidement des pièces ensemble en appliquant une force de serrage, ce qui évite tout mouvement indésirable ou désassemblage.

### **III.2.4 Plaques de plastique**

Les plaques de plastique sont des panneaux plats fabriqués à partir de divers types de plastiques. Leur utilisation est répandue dans différentes industries et applications en raison de leur légèreté, de leur flexibilité et de leur résistance aux chocs. Les matériaux couramment utilisés pour la fabrication de ces plaques sont le polycarbonate, l'acrylique, le PVC, le polypropylène, le polyéthylène, et d'autres encore.

Ces plaques de plastique sont disponibles dans une variété de tailles, d'épaisseurs et de couleurs, ce qui les rend polyvalentes et adaptables à de nombreux besoins. Elles peuvent être découpées, façonnées, pliées, collées ou imprimées selon les spécifications requises.

Elles offrent plusieurs avantages tels que la résistance aux intempéries, la facilité de nettoyage, la durabilité et la possibilité d'être recyclées. Grâce à leur polyvalence et à leur adaptabilité à différentes applications, les plaques de plastique sont largement utilisées dans de nombreux secteurs

### III.3 Logiciel SOLIDWORKS

Le logiciel SOLIDWORKS est un puissant logiciel de modélisation volumique qui permet de créer des pièces complexes en trois dimensions. Ces pièces peuvent ensuite être utilisées pour générer des plans en deux dimensions et des assemblages de plusieurs pièces.

Le modèle SOLIDWORKS se compose de pièces, d'assemblages et de plans. Ces éléments représentent le même modèle mais dans des documents distincts. Ainsi, les modifications apportées au modèle dans l'un des documents se répercutent sur les autres documents qui contiennent ce modèle.

Ce logiciel comprend trois modules principaux : Pièce, Assemblage et Plan. En fonction du type de licence, d'autres modules complémentaires peuvent être disponibles. Dans la version SOLIDWORKS Premium, les modules complémentaires suivants sont inclus : SOLIDWORKS Simulation, SOLIDWORKS Flow Simulation, PhotoView 360 et SOLIDWORKS Motion [60].



Figure III.1 : Le logo du logiciel SolidWorks.

### III.4 Conception des pièces

Le logiciel SolidWorks a été utilisé pour concevoir les différentes pièces de l'électrolyseur. Cela a permis de réaliser une modélisation précise en trois dimensions, facilitant ainsi le processus de conception. Grâce à SolidWorks, il a été possible de créer et visualiser les pièces de l'électrolyseur avant leur réalisation, ce qui a contribué à optimiser leur fonctionnalité et leur intégration dans le système global. Dans ce qui suit les étapes de l'assemblage de l'électrolyseur :

- Commencez par la plaque en acier inoxydable percée de dimensions 11x11 cm.
- Placez les joints en caoutchouc sur la plaque inox.
- Utilisez les vis de fixation et les écrous pour fixer les joints en caoutchouc et assurer une étanchéité.
- Ajoutez les plaques de plastique à l'avant et à l'arrière de l'ensemble.

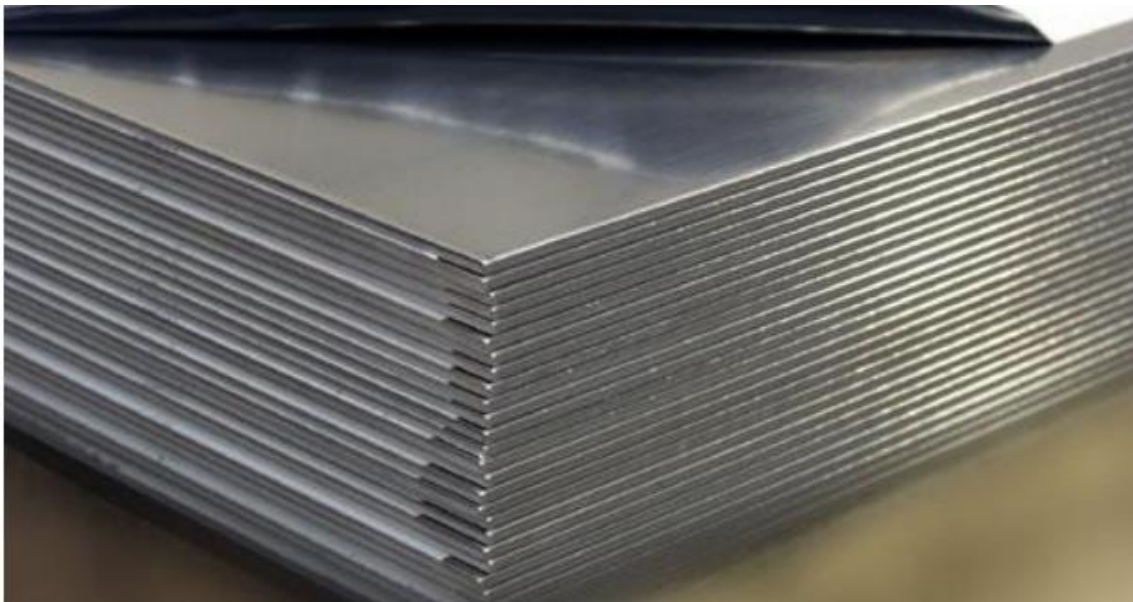
- Procédez à l'assemblage en fixant le joint de caoutchouc et la plaque en plastique arrière ensemble.
- Intégrez toutes les plaques en acier inoxydable et les joints en caoutchouc.
- Ajoutez la deuxième plaque de plastique pour compléter l'assemblage.
- Fixez les vis de fixation pour obtenir un assemblage final solide.
- Réalisez l'assemblage final de l'électrolyseur en suivant toutes les étapes précédentes.

Ces étapes d'assemblage permettent de créer un électrolyseur fonctionnel en utilisant les différentes pièces mentionnées. L'utilisation des plaques en plastique, des joints en caoutchouc et des vis de fixation contribue à assurer une étanchéité et une solidité optimales de l'électrolyseur.

### **III.5 Montage et assemblage de différentes pièces**

Nous allons présenter le processus de montage et d'assemblage de l'électrolyseur à l'aide de photographies accompagnées de commentaires explicatifs. Dans un premier temps, nous aurons besoin de plaques en acier inoxydable pour réaliser cette étape.

Nous aurons besoin de plaques similaires à celle-ci pour poursuivre le processus de montage et d'assemblage de l'électrolyseur.



**Figure III.2 : Plaque inox.**



**Figure III.3 : Découpage de plaque inox.**

La quantité d'énergie produite par notre générateur est directement liée à la surface de contact avec l'eau. Ainsi, plus cette surface est grande, plus la production d'énergie sera élevée. Dans notre générateur, il est recommandé de respecter une taille approximative des plaques d'environ 11 cm sur 11 cm. Cette dimension est utilisée pour maximiser l'efficacité et les performances de notre générateur.

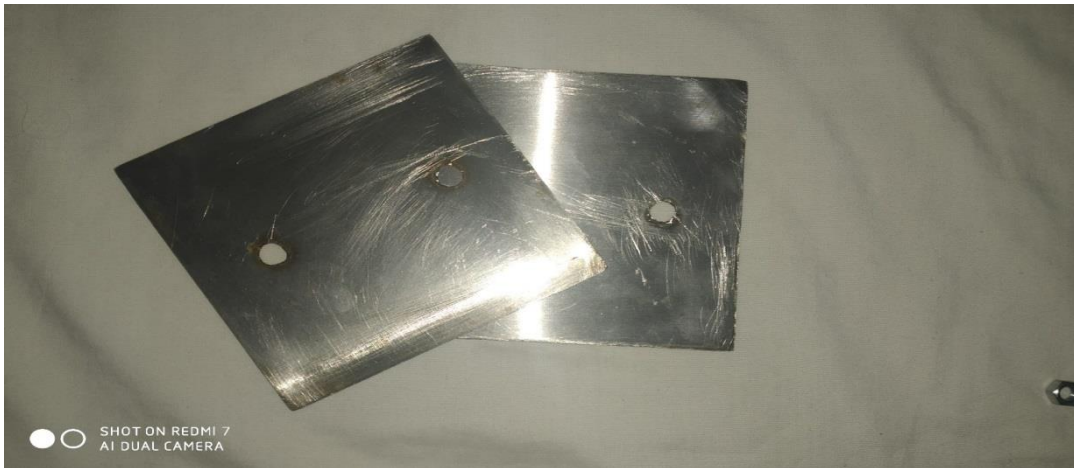


**Figure III.4 : mini plaque d'inox de 11\*11 cm.**



**Figure III.5 : perçage des plaques inox.**

Sur la figure, nous pouvons observer les trous percés dans la plaque. Un trou est situé en bas pour permettre l'arrivée de l'eau avec l'électrolyte, tandis qu'un autre trou se trouve en haut pour assurer la sortie du H<sub>2</sub> et de l'O<sub>2</sub>. Afin de réaliser notre générateur, nous aurons besoin de 11 plaques en acier inoxydable préalablement percées.



**Figure III.6 : Plaques inox percés.**

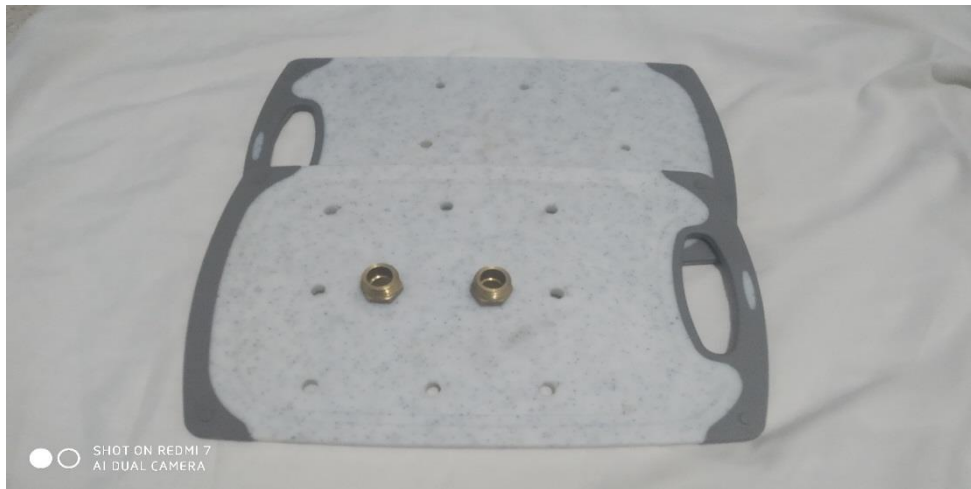
Pour assurer l'alimentation électrique, nous aurons besoin de deux plaques supplémentaires pour chaque extrémité afin de recouvrir les plaques en acier inoxydable et prévenir tout risque électrique. Nous avons choisi d'utiliser des planches en plastique lisse et rigide, car elles nécessiteront un serrage solide. Bien que pratiquement n'importe quel



matériau solide aurait pu être utilisé, le plastique est préférable car il ne sera pas affecté par l'électrolyte.

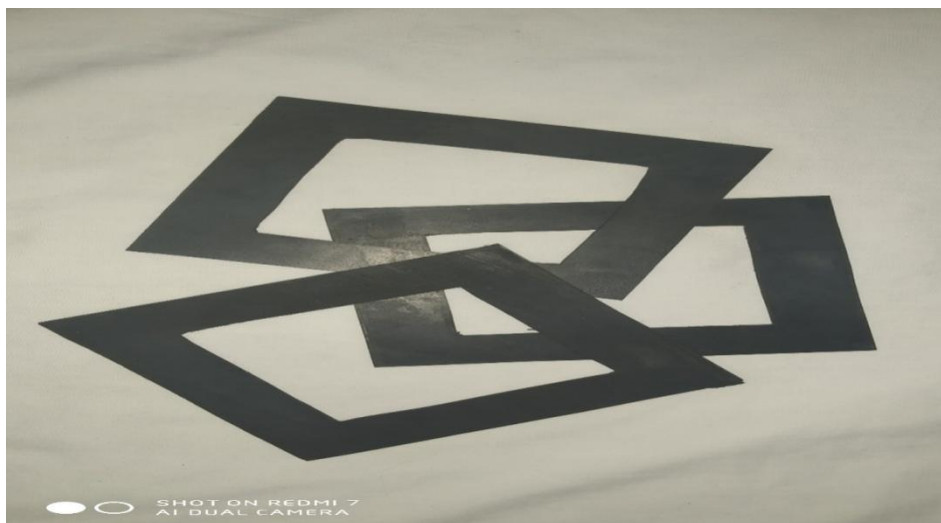
Une fois les plaques en plastique en main, nous devons percer des trous d'au moins 2 cm de chaque côté pour permettre l'emplacement des vis qui seront utilisées pour sceller hermétiquement le générateur.

Maintenant que nous disposons de nos plaques, nous devons effectuer des perforations d'au moins 2 cm de chaque côté. Cela permettra de créer des emplacements pour les vis qui seront utilisées pour assurer l'étanchéité du générateur.



**Figure III.7 : Plaques de plastique.**

À présent, il est nécessaire de se procurer des joints pour les placer entre chaque plaque afin d'éviter les fuites d'eau et de gaz produits. Ces joints devront être découpés selon les dimensions des plaques, qui ont une épaisseur comprise entre 5 et 10 mm, comme le montrent les photos illustratives.



**Figure III.8 : Joints de caoutchouc.**



**Figure III.9 : Les Vis et les écrous.**



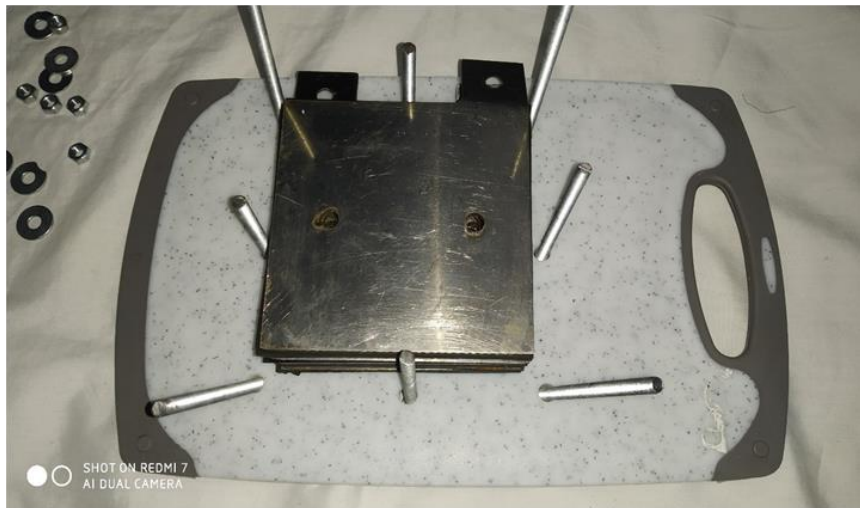
**Figure III.10 : Plaque de plastique et les vis.**



**Figure III.11 : Plaque inox d'anode.**



**Figure III.12 : Plaque inox neutre.**



**Figure III.13 : plaque inox qui joue le rôle de 2<sup>ème</sup> anode.**



**Figure III.14 : 2<sup>ème</sup> plaque de plastique pour l'assemblage finale.**



**Figure III.15 : Fixage et serrage des plaques .**



**Figure III.16 : Assemblage final du l'électrolyseur.**

### **III.6 Principe de fonctionnement**

Pour réaliser l'électrolyse de l'eau et créer un générateur d'hydrogène ( $H_2$ ), le processus est relativement simple, mais nécessite certaines étapes clés. Tout d'abord, un courant électrique est passé entre deux électrodes immergées dans l'eau. Cependant, l'eau elle-même n'étant pas un bon conducteur électrique, il est essentiel d'ajouter un électrolyte, comme un sel, pour améliorer sa conductivité.

L'électrolyseur utilisé pour le système de décalaminage des véhicules fonctionne selon le principe de l'électrolyse de l'eau, générant simultanément de l'hydrogène ( $H_2$ ) et de

l'oxygène (O<sub>2</sub>) en faisant passer un courant électrique à travers une solution d'eau électrolytique.

Lorsque le courant est appliqué, l'eau se sépare en ses composants fondamentaux, produisant de l'hydrogène à l'électrode négative (cathode) et de l'oxygène à l'électrode positive (anode). Ces deux gaz sont ensuite collectés et acheminés ensemble vers la sortie du système.

Le principal avantage de la sortie combinée de l'hydrogène et de l'oxygène pour le nettoyage des moteurs réside dans la synergie créée par ce mélange gazeux, appelé gaz oxyhydrogène. Ce gaz présente des propriétés chimiques et physiques qui favorisent l'élimination des dépôts de carbone et des résidus accumulés dans les composants du moteur, tels que les soupapes, les injecteurs et les chambres de combustion.

Lorsque le gaz oxyhydrogène est introduit dans le moteur, il réagit avec les dépôts de carbone et les oxydes, les transformant en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et en eau (H<sub>2</sub>O), qui sont des substances non nocives. Cette réaction chimique permet de décalaminer le moteur en éliminant les dépôts indésirables, offrant ainsi divers avantages, tels qu'une amélioration des performances du moteur, une réduction de la consommation de carburant, une diminution des émissions polluantes et une prolongation de la durée de vie du moteur.

En résumé, l'utilisation d'un électrolyseur qui produit de l'hydrogène et de l'oxygène ensemble pour le nettoyage des moteurs automobiles permet de créer un gaz oxyhydrogène synergique qui facilite l'élimination des dépôts de carbone et des résidus dans les composants du moteur. Cela se traduit par des avantages significatifs en termes de performances, d'efficacité énergétique et de réduction des émissions.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes consacrés à la phase de conception de notre électrolyseur en utilisant le logiciel SolidWorks. Nous avons consciencieusement étudié l'importance de chaque pièce et veillé à la cohérence de la structure globale de l'électrolyseur. Par la suite, nous avons procédé à l'assemblage minutieux de ces pièces, donnant ainsi naissance à la forme finale de notre électrolyseur. Grâce à notre approche méthodique et à l'utilisation précise de SolidWorks, nous avons réussi à créer un modèle complet et fonctionnel de notre électrolyseur. Ce processus de conception et d'assemblage nous a permis de mieux appréhender le fonctionnement de l'électrolyseur tout en garantissant sa qualité et sa fiabilité. Dans le prochain chapitre, nous explorerons les tests approfondis ainsi que la mise en

œuvre pratique de l'électrolyseur, afin d'évaluer avec précision ses performances et son efficacité. Ce sera l'occasion de valider notre conception et d'ouvrir la voie à une utilisation concrète de notre électrolyseur dans diverses applications.

**Chapitre IV: Application de l'injection  
d'hydrogène pour le décalaminage des  
moteurs**

## IV.1 Définitions, problèmes et importance du décalaminage

### IV.1.1 Définition du décalaminage moteur

Dans ce chapitre, nous abordons le décalaminage moteur HHO, une méthode visant à nettoyer l'intérieur du moteur en éliminant les dépôts accumulés, appelés calamine, qui se forment lors de la combustion. Ces dépôts peuvent obstruer des pièces vitales du moteur, telles que la vanne EGR, le filtre à particules (FAP) et le turbo, entraînant des problèmes de fonctionnement. Cette situation est fréquente dans les véhicules effectuant principalement de courts trajets en ville. Afin de prévenir ces problèmes et les coûts associés, il est recommandé d'effectuer un décalaminage moteur une à deux fois par an, ou tous les 15 000 km. Le décalaminage moteur HHO repose sur l'utilisation d'un générateur d'hydrogène adaptable à tous les moteurs à combustion interne. Ce système envoie des molécules d'hydrogène issues d'eau déminéralisée dans l'admission d'air du moteur, puis les évacue par le système d'échappement. Ce processus permet de nettoyer les dépôts de calamine accumulés, améliorant ainsi l'efficacité du moteur et réduisant considérablement les émissions en seulement 60 minutes. Le générateur utilise l'électrolyse de l'eau pour séparer l'oxygène de l'hydrogène, transformant ainsi l'eau en un gaz appelé oxyhydrogène (HHO). Ce générateur, fabriqué en acier inoxydable, offre à la fois puissance et efficacité. Dans cette étude, nous procéderons à des tests sur le terrain en utilisant notre électrolyseur développé pour le décalaminage réel, tout en mesurant le débit du gaz HHO à l'aide de l'acquisition sur PC et des outils nécessaires, tels que l'Arduino.

### IV.1.2 Problèmes causés par l'accumulation de calamine

Les conséquences de l'accumulation de calamine dans un moteur sont multiples, notamment :

- a) Réduction des performances : La calamine peut obstruer les soupapes, les pistons et les chambres de combustion, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité de la combustion. Cela se traduit par une perte de puissance, une accélération plus lente et une réponse moteur réduite.
- b) Augmentation de la consommation de carburant : L'accumulation de calamine peut perturber la pulvérisation correcte du carburant, entraînant une combustion incomplète et une augmentation de la consommation de carburant.



- c) Altération de la combustion : La calamine peut perturber le processus de combustion en créant des points chauds dans la chambre de combustion, ce qui peut entraîner des pré-allumages, des cliquetis moteur et une détérioration des performances globales.
- d) Augmentation des émissions polluantes : L'accumulation de calamine peut entraîner une augmentation des émissions polluantes, notamment les gaz d'échappement nocifs tels que les oxydes d'azote (NOx) et les particules fines.
- e) Problèmes de lubrification : Si la calamine se dépose sur les parois des cylindres, elle peut perturber la lubrification normale du moteur, entraînant une usure accrue des composants internes tels que les pistons, les segments de piston et les cylindres.
- f) Risque de dommages plus graves : Si l'accumulation de calamine n'est pas traitée, elle peut progresser et causer des dommages plus importants au moteur, tels que des soupapes collées, des segments de piston endommagés ou même une surchauffe du moteur.

#### **IV.1.3 Importance du décalaminage pour le bon fonctionnement du moteur**

Le décalaminage est essentiel pour garantir le bon fonctionnement de votre véhicule. Voici quelques raisons qui soulignent son importance :

- a) Optimisation des performances : L'accumulation de calamine peut réduire les performances du moteur, entraînant une perte de puissance, une accélération plus lente et une réponse moteur affaiblie. Le décalaminage permet d'éliminer la calamine, rétablissant ainsi les performances optimales du moteur et améliorant la conduite globale.
- b) Réduction de la consommation de carburant : La calamine peut perturber le processus de combustion en obstruant les soupapes et les chambres de combustion, ce qui entraîne une combustion moins efficace et une augmentation de la consommation de carburant. Le décalaminage permet d'éliminer ces obstructions, contribuant ainsi à une meilleure économie de carburant.
- c) Diminution des émissions polluantes : Une combustion inefficace due à l'accumulation de calamine peut augmenter les émissions polluantes, notamment les gaz d'échappement nocifs tels que les oxydes d'azote (NOx) et les particules fines. Le décalaminage permet de réduire les émissions polluantes de votre véhicule en éliminant la calamine.
- d) Prévention des dommages : Une accumulation excessive de calamine peut endommager les composants internes du moteur, tels que les soupapes, les pistons et les cylindres, ce qui peut entraîner des problèmes plus graves et coûteux à réparer. Le décalaminage régulier permet de prévenir ces dommages potentiels et de prolonger la durée de vie du moteur.

- e) Amélioration de la fiabilité : Un moteur propre et sans calamine est moins susceptible de rencontrer des problèmes tels que des ratés d'allumage, des cliquetis moteur ou des problèmes de lubrification. Le décalaminage contribue à maintenir la fiabilité du moteur en éliminant les dépôts indésirables et en optimisant son fonctionnement.

## **IV.2 Principe du décalaminage moteur HHO**

### **IV.2.1 Présentation du système de décalaminage moteur HHO**

Le système de décalaminage moteur HHO est une méthode qui utilise la production d'hydrogène et d'oxygène (HHO) à partir de l'eau pour éliminer les dépôts de calamine à l'intérieur du moteur. Cette technique, également appelée "HHO gas", "Brown's gas" ou "oxyhydrogène", permet un nettoyage efficace des dépôts de calamine.

Voici un aperçu général du système de décalaminage moteur HHO :

- a) Fonctionnement du système : Le système de décalaminage HHO utilise un dispositif électrolytique pour séparer l'eau en ses composants, l'hydrogène et l'oxygène. Ces gaz HHO sont ensuite introduits dans l'admission d'air du moteur, où ils se mélangent avec le carburant lors de la combustion.
- b) Nettoyage par oxyhydrogène : Lorsque le mélange d'oxyhydrogène est introduit dans le moteur et brûlé, il génère une flamme chaude qui possède des propriétés de nettoyage. Cette flamme à haute température est capable de décomposer et d'éliminer les dépôts de calamine accumulés sur les soupapes, les pistons et d'autres surfaces internes du moteur.
- c) Avantages potentiels : Les partisans du système de décalaminage HHO soutiennent qu'il peut offrir plusieurs avantages, tels qu'une augmentation de la puissance du moteur, une réduction de la consommation de carburant, une diminution des émissions polluantes, une amélioration de la réactivité du moteur et une prolongation de la durée de vie du moteur.
- d) Installation et utilisation : Le système de décalaminage moteur HHO nécessite une installation spécifique comprenant un générateur HHO, des tuyaux et des dispositifs de sécurité appropriés. Une fois installé, le système est activé pendant une durée spécifiée pour effectuer le nettoyage du moteur.

### **IV.2.2 Fonctionnement du générateur d'hydrogène HHO**

Le générateur d'hydrogène HHO, également connu sous le nom de générateur d'oxyhydrogène ou électrolyseur, est un dispositif utilisé pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau par électrolyse. Voici un aperçu du fonctionnement général d'un générateur d'hydrogène HHO :

- a) **Électrolyse de l'eau** : Le générateur d'hydrogène HHO utilise le processus d'électrolyse pour décomposer l'eau ( $H_2O$ ) en ses composants de base, à savoir l'hydrogène ( $H_2$ ) et l'oxygène ( $O_2$ ). L'électrolyse est réalisée en faisant passer un courant électrique à travers l'eau, ce qui provoque une réaction chimique.
- b) **Électrodes** : Le générateur est équipé de deux électrodes : une anode et une cathode. La cathode est généralement en acier inoxydable, tandis que l'anode peut être en acier inoxydable ou en un matériau revêtu de catalyseur. Les électrodes sont placées dans l'eau et sont séparées l'une de l'autre.
- c) **Électrolyte** : Un électrolyte, généralement une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) ou d'hydroxyde de sodium (NaOH), est ajouté à l'eau pour faciliter la conductivité électrique et accélérer la réaction d'électrolyse.
- d) **Réaction chimique** : Lorsque le courant électrique passe à travers l'eau et les électrodes, l'hydrogène est produit à l'électrode négative (cathode), tandis que l'oxygène est produit à l'électrode positive (anode). Ces gaz HHO sont collectés séparément pour une utilisation ultérieure.
- e) **Mélange avec le carburant** : Les gaz HHO, c'est-à-dire le mélange d'hydrogène et d'oxygène, peuvent être acheminés vers l'admission d'air du moteur et mélangés avec le carburant lors de la combustion. Cela vise à améliorer l'efficacité de la combustion et à nettoyer les dépôts de calamine dans le moteur.



**Figure IV.1 : Insertion de l'électrolyseur dans le système de décalaminage**

### **IV.2.3 Injection d'hydrogène dans l'admission d'air et expulsion par le système d'échappement**

L'injection d'hydrogène dans l'admission d'air et son expulsion par le système d'échappement sont des techniques utilisées dans certaines applications pour améliorer l'efficacité de combustion et réduire les émissions. Dans cette méthode, de l'hydrogène est introduit dans le flux d'air entrant dans le moteur, généralement juste avant les soupapes d'admission. Cela peut se faire à l'aide d'un générateur d'hydrogène HHO ou d'un autre système de production d'hydrogène. L'hydrogène injecté se mélange avec le carburant lorsqu'ils entrent dans les chambres de combustion. L'hydrogène a une vitesse de combustion plus élevée que les carburants conventionnels, facilitant ainsi une combustion plus complète et plus rapide dans les chambres de combustion. Cela contribue à brûler plus efficacement le carburant principal et à réduire les dépôts de carbone et les émissions polluantes. L'injection d'hydrogène dans l'admission d'air peut offrir plusieurs avantages, tels qu'une meilleure efficacité énergétique, une augmentation de la puissance du moteur, une réduction de la consommation de carburant et une diminution des émissions polluantes, y compris les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les particules fines. Après la combustion, les gaz d'échappement contenant de l'hydrogène sont expulsés par le système d'échappement du véhicule, sans présenter généralement de risques significatifs pour le système d'échappement.

## **IV.3 Avantages du décalaminage moteur HHO**

### **IV.3.1 Amélioration de l'efficacité du moteur**

L'amélioration de l'efficacité du moteur est une préoccupation essentielle pour de nombreux propriétaires de véhicules. Plusieurs méthodes couramment utilisées peuvent contribuer à cette amélioration. L'injection directe de carburant dans les chambres de combustion permet un contrôle précis de la quantité de carburant et de son timing, améliorant ainsi l'efficacité de la combustion et réduisant la consommation de carburant. Les turbocompresseurs et les surcompresseurs augmentent la quantité d'air admise dans le moteur, favorisant une meilleure combustion du carburant et une augmentation de la puissance avec une consommation de carburant réduite. Le système de recirculation des gaz d'échappement (EGR) recycle une partie des gaz d'échappement dans l'admission d'air, abaissant la température de combustion et réduisant la formation d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), ce qui améliore l'efficacité et réduit les émissions. Les véhicules dotés d'un système Start-Stop coupent automatiquement le moteur lors des arrêts prolongés, réduisant ainsi la consommation de carburant pendant les périodes d'inactivité. L'amélioration de l'aérodynamique du véhicule,

grâce à des conceptions de carrosserie plus aérodynamiques, réduit la résistance à l'air, entraînant ainsi une consommation de carburant réduite à des vitesses élevées. L'utilisation de pneus à faible résistance au roulement diminue les frottements entre les pneus et la route, ce qui permet de réduire la consommation de carburant. Enfin, un entretien régulier du moteur, y compris le remplacement des filtres à air encrassés, des bougies d'allumage défectueuses et des fluides de moteur de mauvaise qualité, contribue à maintenir l'efficacité du moteur à son niveau optimal.

### **IV.3.2 Réduction des émissions polluantes**

La réduction des émissions polluantes est un enjeu crucial pour la préservation de l'environnement et l'amélioration de la qualité de l'air. Plusieurs méthodes couramment utilisées contribuent à réduire les émissions polluantes d'un moteur.

Les catalyseurs, installés dans le système d'échappement, favorisent la conversion des gaz polluants tels que les oxydes d'azote (NOx), les hydrocarbures non brûlés (HC) et le dioxyde de carbone (CO) en substances moins nocives, réduisant ainsi les émissions polluantes. Les systèmes de recirculation des gaz d'échappement (EGR) recyclent une partie des gaz d'échappement en les réinjectant dans l'admission d'air du moteur, ce qui abaisse la température de combustion et diminue la formation de NOx, contribuant à la réduction des émissions. Certains véhicules sont équipés de systèmes de post-traitement des gaz d'échappement tels que les filtres à particules diesel (DPF) et les systèmes de réduction catalytique sélective (SCR), qui réduisent respectivement les émissions de particules fines et de NOx. L'utilisation de carburants plus propres, tels que ceux à faible teneur en soufre ou les biocarburants, peut également contribuer à la réduction des émissions polluantes en diminuant la quantité de substances nocives libérées lors de la combustion.

L'optimisation de la combustion dans le moteur, grâce à l'injection précise de carburant, au contrôle de l'allumage et à l'ajustement des paramètres du moteur, permet de réduire les émissions polluantes en améliorant l'efficacité de la combustion.

L'électrification des véhicules joue également un rôle majeur, car les véhicules électriques produisent zéro émission à l'échappement, contribuant ainsi significativement à la réduction des émissions polluantes. Enfin, la sensibilisation à la conduite écoénergétique, qui inclut des pratiques telles que la conduite douce, l'accélération progressive et le freinage régulier, permet de réduire la consommation de carburant et, par conséquent, les émissions polluantes.

### **IV.3.3 Préservation des pièces sensibles du moteur (vanne EGR, FAP, turbo)**

La préservation des pièces sensibles du moteur, telles que la vanne EGR (Exhaust Gas Recirculation), le FAP (Filtre à Particules) et le turbo, revêt une importance primordiale pour garantir le bon fonctionnement et la durabilité du moteur. Voici quelques conseils pour préserver ces pièces essentielles : Tout d'abord, un entretien régulier du moteur est essentiel, en respectant les recommandations du fabricant concernant la vidange d'huile, le remplacement des filtres à air et à carburant, ainsi que l'entretien du système de refroidissement. Cela permet de maintenir ces pièces en excellent état de fonctionnement.

Ensuite, il est crucial d'utiliser des carburants de qualité provenant de sources fiables, car les carburants de mauvaise qualité peuvent contenir des impuretés susceptibles d'endommager les pièces sensibles du moteur. Il est donc préférable de se rendre dans des stations-service réputées et d'éviter les carburants contrefaits ou de qualité douteuse. De plus, il est important de respecter les intervalles de vidange d'huile recommandés par le fabricant, car une huile moteur propre et de qualité contribue à réduire l'accumulation de dépôts nocifs et à préserver les pièces sensibles. Par ailleurs, adopter une conduite douce et éviter les accélérations et les décélérations brutales permet de réduire les contraintes supplémentaires exercées sur les pièces sensibles du moteur, notamment le turbo. Il convient également d'éviter de solliciter excessivement le moteur à froid en le laissant se réchauffer quelques instants avant de conduire de manière vigoureuse, ce qui permet aux pièces sensibles de s'adapter progressivement aux conditions de fonctionnement. Si votre véhicule diesel est équipé d'un FAP, il est primordial de respecter les recommandations du fabricant concernant l'utilisation de carburant diesel de qualité, d'éviter les mélanges inappropriés et de réaliser régulièrement des trajets sur autoroute pour régénérer le FAP. Enfin, il est essentiel de suivre les recommandations du fabricant en ce qui concerne les intervalles de maintenance spécifiés, notamment le nettoyage ou le remplacement de la vanne EGR et du FAP, si nécessaire.

## **IV.4 Application réelle**

### **IV.4.1 Préparation du véhicule avant le décalaminage**

Avant de procéder au décalaminage de notre véhicule, il est important de suivre ces étapes pour une préparation adéquate. Tout d'abord, on consulte le manuel du propriétaire afin d'obtenir des informations spécifiques sur le décalaminage et les recommandations du fabricant. Ensuite, on vérifie si notre véhicule remplit les critères requis, tels qu'un certain kilométrage ou des symptômes spécifiques. On s'assure également que notre moteur est

compatible avec les méthodes de décalaminage envisagées. Si possible, on effectue un diagnostic préalable du moteur pour détecter d'éventuels problèmes existants et évaluer si le décalaminage est la solution appropriée. Avant le décalaminage, on nettoie l'extérieur du véhicule pour éviter l'accumulation de poussière ou de saleté pendant le processus. On vérifie le niveau de carburant dans le réservoir, car certaines méthodes de décalaminage peuvent exiger un niveau spécifique. On désactive tous les dispositifs électroniques du véhicule, comme les systèmes de démarrage automatique ou les alarmes, car certains processus de décalaminage nécessitent leur déconnexion temporaire pour éviter tout dysfonctionnement. Enfin, on lit attentivement les instructions fournies avec le produit ou la méthode de décalaminage que l'on utilise, et on suit les étapes recommandées par le fabricant pour préparer le véhicule avant le décalaminage.

#### IV.4.2 Méthodologie de décalaminage

- **Étape 1** : Préparation du véhicule Avant de commencer le décalaminage, on s'assure que le moteur est éteint et que le véhicule est correctement garé dans un endroit bien ventilé. On vérifie également qu'on dispose de tous les équipements nécessaires pour effectuer le processus.
- **Étape 2** : Identification du point d'injection On localise le point d'injection d'hydrogène dans le système d'admission d'air du moteur. Ce point peut varier en fonction du modèle du véhicule, mais il est généralement situé avant le collecteur d'admission ou dans la conduite d'admission.



Figure IV.2 : Point d'injection d'hydrogène dans le système d'admission d'air du moteur.

- **Étape 3** : Connexion de l'équipement On connecte l'équipement de décalaminage à la conduite d'admission d'air du moteur. On s'assure de suivre les instructions spécifiques du fabricant de l'équipement pour une connexion correcte.



**Figure IV.3 : Connexion de l'équipement de décalaminage à la conduite d'admission.**

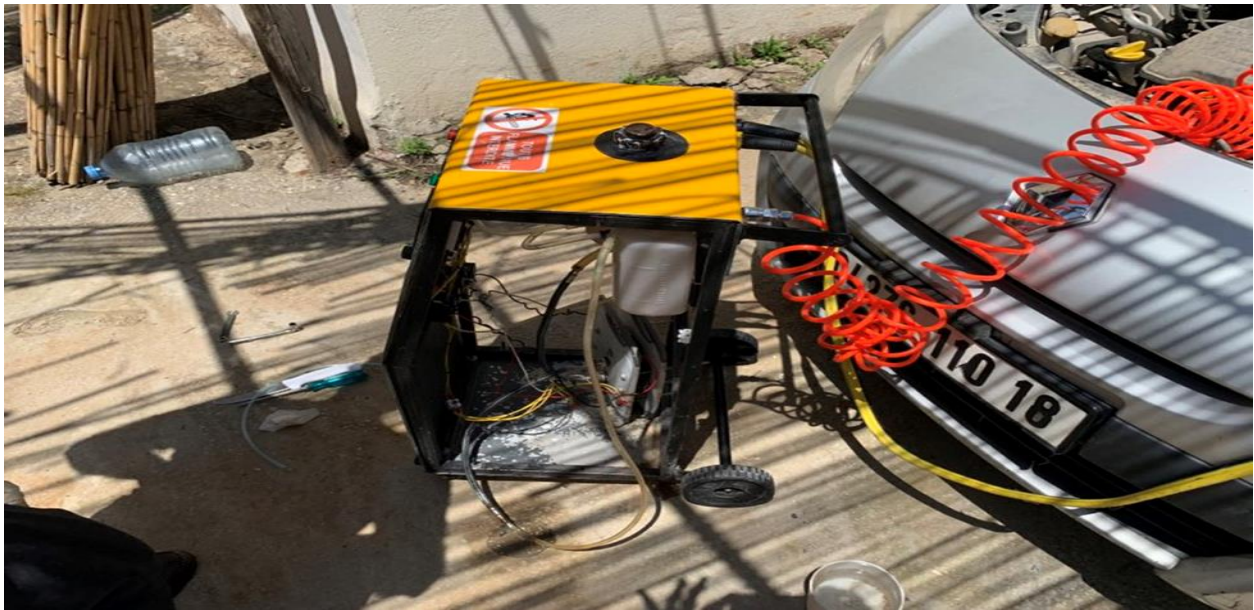
- **Étape 4** : Réglage de l'appareil On configure l'appareil de décalaminage selon les spécifications du fabricant. Cela peut inclure le réglage de la pression d'injection d'hydrogène et d'autres paramètres pertinents.



**Figure IV.4 : Réglage de l'appareil de décalaminage.**

- **Étape 5** : Injection d'hydrogène On démarre l'appareil de décalaminage pour commencer l'injection d'hydrogène dans le système d'admission d'air. L'hydrogène aide à dissoudre et à éliminer les dépôts de calamine présents dans le moteur.





**Figure IV.5 : Démarrage du système de décalaminage en vue de lancer l'injection de l'HHO.**

- **Étape 6 :** Durée d'injection On laisse l'appareil injecter de l'hydrogène pendant une période spécifiée par le fabricant. Cela peut varier, mais généralement, le processus dure entre 20 et 30 minutes.
- **Étape 7 :** Arrêt de l'injection et retrait de l'équipement Une fois le temps d'injection écoulé, on arrête l'appareil de décalaminage et on le déconnecte de la conduite d'admission d'air. On s'assure de suivre les procédures de sécurité appropriées lors de la manipulation de l'équipement.
- **Étape 8 :** Démarrage du moteur On démarre le moteur du véhicule et on le laisse tourner pendant quelques minutes. Cela aide à éliminer les résidus restants et à rétablir le fonctionnement normal du moteur.

**Durée et fréquence recommandées pour le décalaminage :** La durée typique d'une séance de décalaminage par injection d'hydrogène se situe généralement entre 20 et 30 minutes. Cependant, cela peut varier en fonction de l'état du moteur et des recommandations du fabricant de l'équipement. On suit toujours les instructions spécifiques fournies avec l'équipement de décalaminage.

La fréquence recommandée pour le décalaminage par injection d'hydrogène peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment l'âge et l'état du moteur, l'utilisation du véhicule et les recommandations du fabricant. En général, un décalaminage annuel ou tous les 15 000 à 20 000 kilomètres peut être recommandé pour maintenir les performances optimales du moteur. Cependant, il est préférable de consulter le manuel du propriétaire du véhicule ou

de contacter un professionnel de l'entretien automobile pour des recommandations spécifiques à notre moteur.

#### **IV.4.3 Mesure du débit d'hydrogène (acquisition via Arduino)**

Le système de mesure du débit de gaz HHO, utilisant un capteur MQ-8 et un Arduino, implique plusieurs étapes. Voici les composants nécessaires pour réaliser cette configuration :

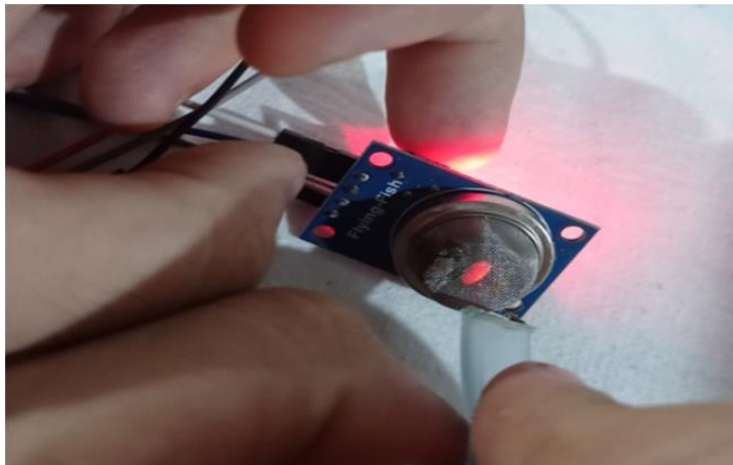
- **ARDUINO** : Il s'agit de la carte de développement programmable qui joue le rôle central dans le système de mesure.
- **Câble USB A mâle/B mâle** : Ce câble est utilisé pour connecter l'Arduino à l'ordinateur, assurant ainsi la communication et l'alimentation de l'Arduino.
- **Un lot de fils pour le branchement** : Ces fils servent à connecter le capteur MQ-8 à l'Arduino, établissant ainsi une interface entre le capteur et la carte de développement.
- **Ordinateur pour afficher les résultats et alimenter l'Arduino** : L'ordinateur est utilisé pour visualiser les résultats de mesure du débit de gaz HHO. Il fournit également l'alimentation nécessaire à l'Arduino via le câble USB.

Pour réaliser le système de mesure du débit de gaz HHO, on suit les étapes suivantes : On connecte l'Arduino à l'ordinateur à l'aide du câble USB A mâle/B mâle. On branche le capteur MQ-8 à l'Arduino en utilisant les fils de connexion, en veillant à respecter les connexions appropriées entre les broches du capteur et les broches d'entrée/sortie de l'Arduino. Une fois les connexions physiques établies, on programme l'Arduino pour lire les données du capteur MQ-8.

On utilise le langage de programmation Arduino pour écrire le code nécessaire à la lecture du débit de gaz HHO à partir du capteur.

Ensuite, on téléverse le code sur l'Arduino via l'ordinateur, en vérifiant que l'Arduino est correctement détecté par l'IDE Arduino sur l'ordinateur. Une fois le code téléversé avec succès, on exécute le programme sur l'Arduino. Les données du capteur MQ-8 sont lues par l'Arduino et les résultats peuvent être visualisés sur l'ordinateur connecté.

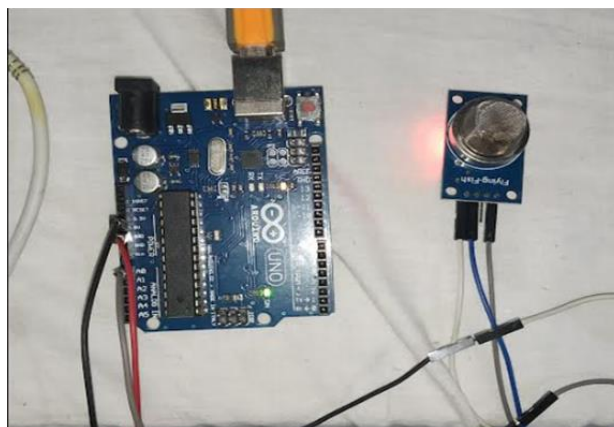
- **Détecteur de gaz hydrogène MQ-8**



**Figure IV.6 : Détecteur de gaz MQ-8.**

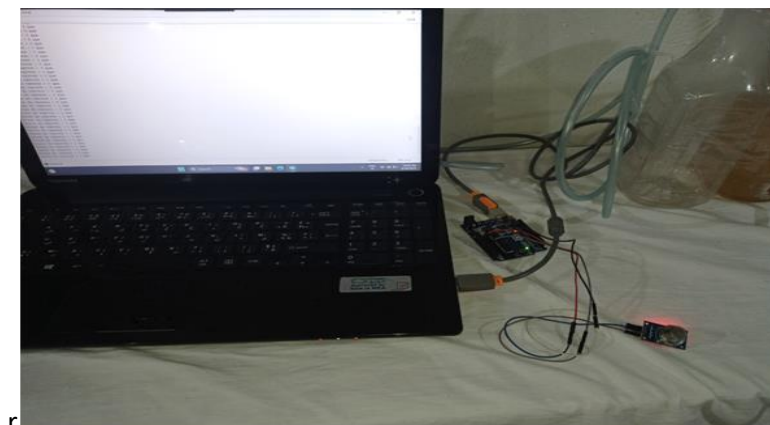
**Etapes de base :**

- **Connexion du capteur MQ-8 à l'Arduino :**



**Figure IV.7 : Partie électronique final.**

- **Connexion du l'Arduino à l'Ordinateur**



**Figure IV.8 : Connexion du l'Arduino à l'Ordinateur.**

- **Télé versez le code sur l'Arduino :**

```

sketch_jd18a$
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal LCD (12,11,5,4,3,2) ;
int pin6 =6;
int pin7 = 7;
int pin8 = 8;
int trigPin=13;
int echoPin=10;
float pingTime;
float targetDistance;
float speedOfSound =776.5;
int sensor = A0;
int sensorValue = 0;
void setup () {
  Serial.begin(9600) ;
  pinMode (trigPin, OUTPUT) ;
  pinMode (pin6, OUTPUT) ;
  pinMode (pin7, OUTPUT) ;
  pinMode (pin8, OUTPUT) ;
  LCD.begin(16,2) ;
}
void loop() {
  digitalWrite (trigPin, LOW) ;
  delayMicroseconds (2000) ;
  digitalWrite(trigPin,HIGH);
  delayMicroseconds(15);
  digitalWrite (trigPin, LOW) ;
  delayMicroseconds (10) ;
  pingTime = pulseIn(echoPin, HIGH) ;
  pingTime = pingTime/1000000.;
  pingTime = pingTime/3600.;
  targetDistance= speedOfSound * pingTime;
  targetDistance = targetDistance/2;
  targetDistance = targetDistance*160934.4;
  targetDistance = (16.5-targetDistance) *5;
  targetDistance = targetDistance/2;
  targetDistance = targetDistance*160934.4;
  targetDistance = (16.5-targetDistance) *5;
  sensorValue = analogRead (sensor) ;
  Serial.println(sensorValue, DEC);
  if (sensorValue<50){
    LCD.setCursor (0,0) ;
    LCD.print ("NIV. RESERVOIR: ");
    LCD.setCursor (0,1) ;
    LCD.print ("NIV. RESERVOIR: ");
    LCD.setCursor (0,1) ;
    LCD.print (" ");
    LCD.setCursor (0,1) ;
    LCD.print (targetDistance);
    LCD.print (" %");
    delay (250) ;
    if (targetDistance<100 && targetDistance>60)
    {digitalWrite (pin8 , HIGH) ;}
    else {digitalWrite (pin8, LOW) ;}
    if (targetDistance<60 && targetDistance>25)
    {digitalWrite (pin7 , HIGH) ;}
    else { digitalWrite (pin7 , LOW) ;}
    if (targetDistance<25)
    {digitalWrite (pin6 , HIGH) ;}
    delay (400) ;
    digitalWrite (pin6 , LOW) ;
    delay (400) ;}
    else {digitalWrite (pin6 , LOW) ;}
    else {
      LCD.setCursor (0,0) ;
      LCD.print ("RESERVE 88 ");
      LCD.setCursor (0,1) ;
      LCD.print ("RESERVE CN/TROL");
      digitalWrite (pin6 , HIGH);
    }
  }
}

```

Figure IV.9 : Programme Arduino.

- **Connexion de l'électrolyseur avec l'Ordinateur et l'Arduino**



Figure IV.10 : Connexion de l'électrolyseur avec l'Ordinateur et l'Arduino.

- **Logiciel ISIS : pour la simulation de montage**

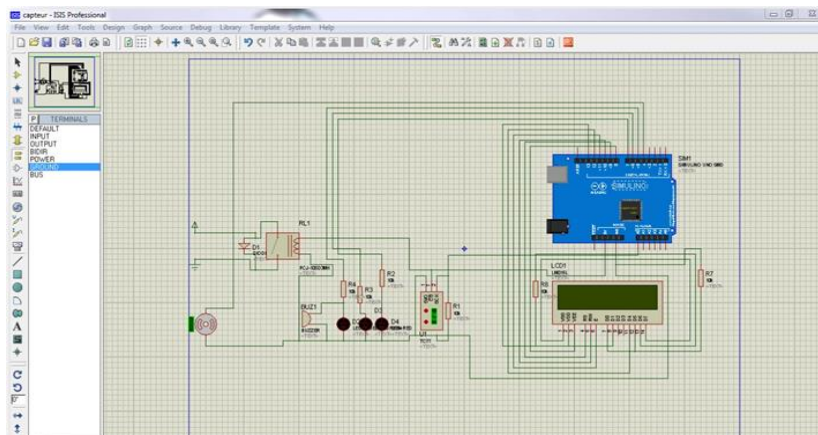
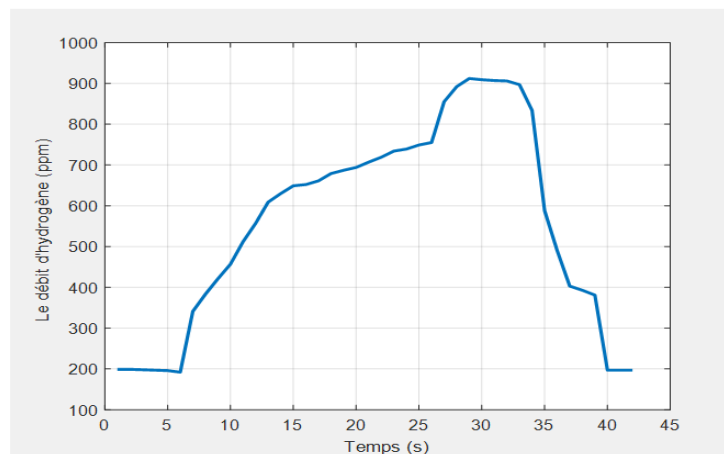


Figure IV.11 : Circuit sur ISIS.

#### IV.4.4 Interpréter les données dans le moniteur série de l'IDE Arduino

Les données recueillies (figure 13) présentent le débit d'hydrogène en unités ppm en fonction du temps en secondes. En analysant ces valeurs, plusieurs observations peuvent être faites. Tout d'abord, les valeurs du débit d'hydrogène semblent initialement stables autour de 196-199 ppm pendant les 5 premières secondes. Ensuite, ces valeurs augmentent progressivement pour atteindre un pic à 855 ppm au bout de 27 secondes, avant de diminuer à nouveau. À partir de la 37e seconde, une augmentation significative se produit, avec une hausse rapide des valeurs qui atteignent 909 ppm à la 30e seconde. Par la suite, les valeurs semblent fluctuer entre environ 900 et 700 ppm pendant un certain temps, avec de légères variations. À partir de la 34e seconde, on observe une diminution significative des valeurs, qui deviennent assez basses à partir de la 40e seconde et se stabilisent autour de 197 ppm jusqu'à la fin de l'expérience. Ces résultats indiquent une variation du débit d'hydrogène au fil du temps, avec des périodes de stabilité suivies de pics et de baisses. Ils constituent un test supplémentaire pour notre travail qui vise à développer un électrolyseur pour le décalaminage des véhicules. Cette étude ouvre également la voie à d'autres domaines de recherche, tels que l'évaluation du dimensionnement d'un électrolyseur et de la quantité d'hydrogène qu'il peut produire, afin de sélectionner le type d'application approprié, que ce soit pour des véhicules légers, lourds ou d'autres machines utilisées dans les travaux publics. Il est important de noter que ces résultats peuvent être influencés par plusieurs facteurs tels que les conditions environnementales, la configuration de l'électrolyseur, la qualité des matériaux utilisés et les fluctuations du processus d'électrolyse. Une analyse plus approfondie dans le futur pourrait être nécessaire pour comprendre ces variations et en tirer des conclusions précises. De plus, il convient de souligner que cette interprétation repose uniquement sur les données recueillies et ne prend pas en compte les détails techniques et le contexte complet de l'expérience.



**Figure IV.12 : Représentation graphique de débit d'hydrogène en fonction de temps (ppm) par (s).**

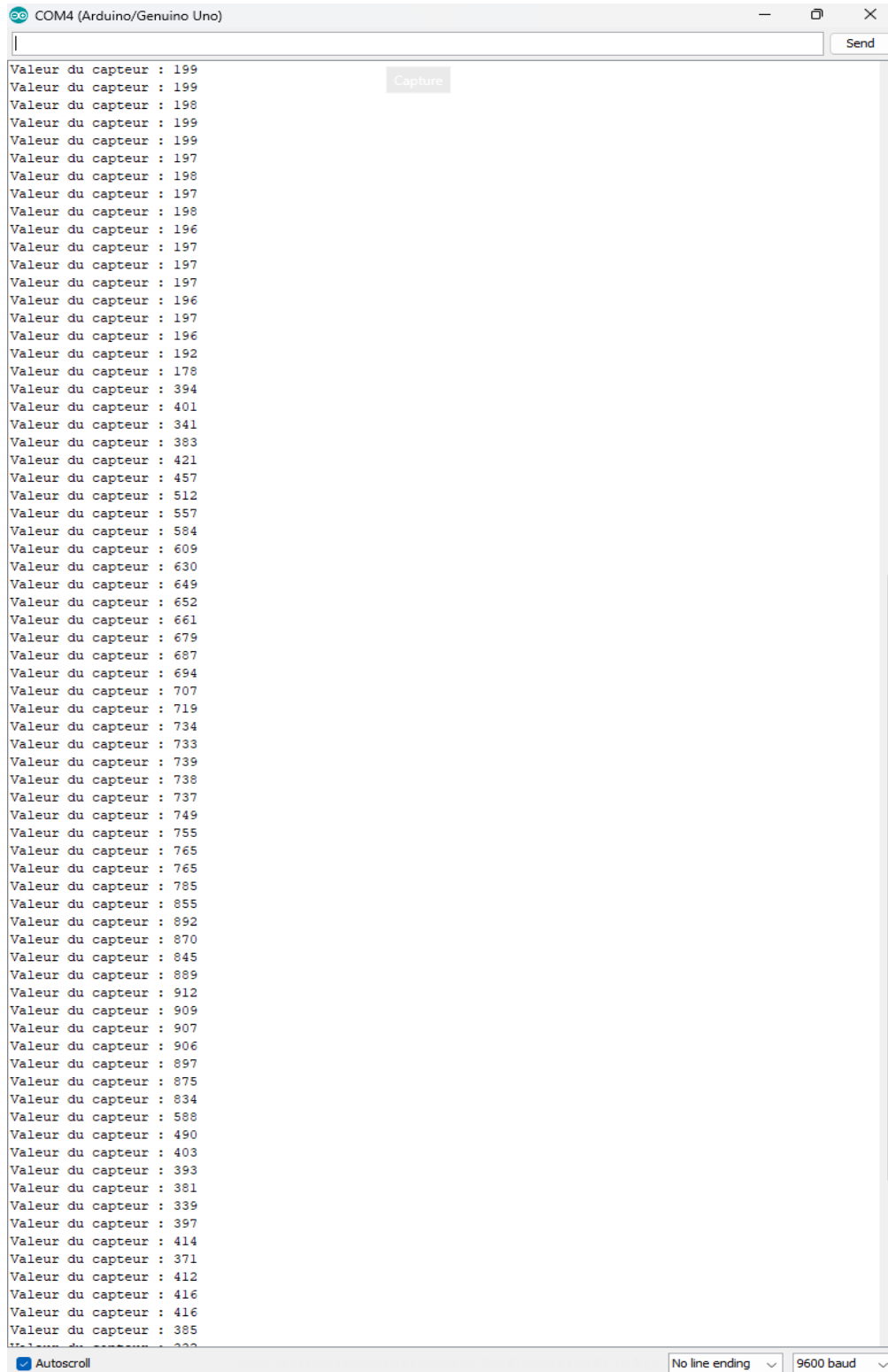


Figure IV.13 : La valeur de débit d'hydrogène en fonction de temps (ppm) par (s).

- La concentration en parties par million (ppm) : Est une mesure utilisée en science pour décrire la quantité d'une substance particulière mélangée à une autre. Une

concentration de 1 ppm signifie qu'il y a une unité de la substance en question pour un million d'unités de l'ensemble.

## **IV.5 Limites du décalaminage moteur HHO**

### **IV.5.1 Limites du décalaminage moteur HHO**

Le décalaminage moteur HHO, qui utilise l'injection d'hydrogène par électrolyse pour nettoyer les dépôts de carbone, présente certaines limites. Voici un résumé de ces limites : L'efficacité du décalaminage moteur HHO peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que la conception du système, la qualité de l'électrolyseur et les conditions spécifiques du moteur, ce qui entraîne des résultats mitigés en termes de nettoyage des dépôts de carbone. De plus, les systèmes de décalaminage HHO nécessitent un entretien régulier, incluant le remplacement des électrodes, la purification de l'eau utilisée et la maintenance de l'électrolyseur, faute de quoi l'efficacité du système peut diminuer. Par ailleurs, l'installation d'un système de décalaminage moteur HHO peut être complexe et exige des connaissances techniques, avec des modifications nécessaires au niveau du moteur, de l'alimentation électrique et du système d'admission d'air. Une installation incorrecte peut entraîner des problèmes de sécurité et des dommages au moteur. De plus, il est important de noter que l'utilisation d'un système de décalaminage moteur HHO peut annuler la garantie du véhicule, car il s'agit d'une modification non autorisée par le fabricant. Enfin, il convient de se conformer aux réglementations et restrictions légales en vigueur, car l'utilisation de systèmes de décalaminage moteur HHO peut être soumise à des réglementations spécifiques dans certaines régions.

### **IV.5.2 Facteurs à prendre en compte lors de l'application du décalaminage HHO**

Lors de l'application du décalaminage HHO, il est important de prendre en compte plusieurs facteurs pour assurer une utilisation efficace et sécuritaire. Voici quelques-uns des principaux facteurs à considérer : Le type de moteur est un élément crucial, que ce soit un moteur essence, diesel ou à gaz, il est essentiel de comprendre les spécificités de chaque type et d'adapter le système de décalaminage en conséquence. La conception correcte du système HHO est également primordiale, en suivant les instructions du fabricant, en respectant les spécifications techniques et en choisissant des composants de qualité pour garantir l'efficacité du système. La taille du moteur est un facteur déterminant dans le choix du système de décalaminage HHO, car différentes tailles de moteurs nécessitent des débits d'hydrogène adaptés pour un nettoyage efficace. Les conditions de fonctionnement du véhicule, telles que

la charge du moteur, la vitesse de rotation et la température, peuvent également influencer l'efficacité du décalaminage HHO. Il est conseillé de suivre les recommandations du fabricant concernant les conditions de fonctionnement optimales. Un entretien régulier du système de décalaminage HHO est indispensable pour maintenir son bon fonctionnement à long terme, incluant le remplacement des électrodes, la purification de l'eau utilisée et la vérification des composants pour détecter d'éventuels problèmes. Enfin, il est important de noter que l'utilisation d'un système de décalaminage HHO peut avoir un impact sur la garantie du véhicule, il est donc essentiel de vérifier les termes de la garantie et de comprendre les éventuelles conséquences avant d'installer un tel système.

#### **IV.5.3 Recommandations et précautions supplémentaires**

Lors de l'application du décalaminage HHO, il est essentiel de prendre en compte les recommandations et les précautions suivantes : Tout d'abord, si vous n'avez pas d'expérience dans l'installation et l'utilisation du système de décalaminage HHO, il est recommandé de faire appel à des professionnels qualifiés qui pourront vous conseiller sur le choix du système adapté à votre véhicule, effectuer une installation correcte et vous fournir des instructions d'utilisation. Veillez à respecter les normes de sécurité lors de l'installation et de l'utilisation du système, en évitant toute installation susceptible de compromettre l'intégrité du moteur ou de causer des risques d'incendie ou d'explosion. Assurez-vous que tous les composants du système sont de qualité et conformes aux normes de sécurité. Soyez attentif aux signes de dysfonctionnement tels que des fuites d'eau, des étincelles ou des surchauffes, et arrêtez immédiatement l'utilisation du système si vous observez des problèmes. Faites inspecter et réparer le système par un professionnel qualifié. Suivez scrupuleusement les recommandations d'utilisation fournies par le fabricant, notamment en ce qui concerne la durée et la fréquence d'utilisation, les conditions de fonctionnement optimales et les procédures d'entretien régulier. Le non-respect de ces recommandations peut réduire l'efficacité du système et endommager le moteur. Surveillez attentivement les performances de votre véhicule après l'application du décalaminage HHO, en portant une attention particulière à tout changement significatif de puissance, de consommation de carburant ou d'émissions. Si vous remarquez des problèmes ou des effets indésirables, consultez un professionnel pour évaluation. Enfin, informez-vous sur la législation locale concernant l'utilisation des systèmes de décalaminage HHO, car certaines régions peuvent avoir des réglementations spécifiques ou des restrictions. Assurez-vous de vous conformer à toutes les exigences légales en vigueur.



## **IV.6 Conclusion**

En conclusion, le décalaminage moteur HHO représente une avancée prometteuse pour l'industrie automobile. Son efficacité démontrée dans le nettoyage des dépôts de calamine et l'amélioration des performances des moteurs en fait une solution attrayante. Cependant, il est nécessaire de poursuivre les efforts de recherche et d'optimisation afin d'exploiter pleinement le potentiel de cette méthode. En parallèle, une sensibilisation accrue auprès des professionnels de l'industrie et des propriétaires de véhicules est primordiale pour favoriser son adoption généralisée et contribuer ainsi à une mobilité plus propre et durable. Avec ces développements futurs et une collaboration continue, le décalaminage moteur HHO pourrait jouer un rôle essentiel dans la transition vers des solutions de transport plus respectueuses de l'environnement.

## **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

En conclusion, ce projet de fin d'études consacré à la conception, à la simulation et à la réalisation d'un générateur d'hydrogène pour l'application du décalaminage par injection d'hydrogène revêt une importance primordiale dans le contexte actuel de la transition énergétique. L'hydrogène est considéré comme une solution prometteuse pour réduire les émissions de carbone et améliorer l'efficacité des moteurs à combustion interne.

Ce projet a mis en évidence l'importance capitale d'un générateur d'hydrogène efficace et sûr pour le processus de décalaminage, qui permet d'éliminer les dépôts de calamine pouvant altérer les performances et la durée de vie des moteurs. La conception, la simulation et la réalisation du générateur ont exigé une attention particulière quant à la sélection et à l'optimisation des composants, ainsi qu'au respect des normes de sécurité.

Les simulations informatiques se sont révélées précieuses pour évaluer les performances du générateur dans différentes conditions de fonctionnement et optimiser son rendement énergétique. Les résultats obtenus ont permis de mieux appréhender le comportement du générateur et d'identifier des possibilités d'amélioration afin d'accroître son efficacité.

La fabrication du générateur d'hydrogène a nécessité le recours à des techniques appropriées, garantissant sa fiabilité et sa compatibilité avec le système de décalaminage par injection d'hydrogène. Les tests et les essais réalisés ont permis de vérifier la performance du générateur et de s'assurer de son fonctionnement optimal.

Ce projet de fin d'études a apporté une contribution significative à l'avancement des connaissances dans le domaine de la production et de l'utilisation de l'hydrogène en tant que source d'énergie propre.

Il a démontré les avantages potentiels de l'application du décalaminage par injection d'hydrogène dans l'industrie automobile et les moteurs à combustion interne, tant en termes d'efficacité que de durée de vie.

Les perspectives pour des travaux futurs dans ce domaine :

- Amélioration de l'efficacité énergétique
- Optimisation de la sécurité
- Adaptation à d'autres moteurs
- Viabilité économique



**Références bibliographiques**

- [1]. Armaroli, N., & Balzani, V. (2011). The hydrogen issue. *ChemSusChem*, 4(1), 21-36.
- [2]. Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., & David, W. I. (2007). Hydrogen energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1853), 1043-1056.
- [3]. McMahon, J. M., Morales, M. A., Pierleoni, C., & Ceperley, D. M. (2012). The properties of hydrogen and helium under extreme conditions. *Reviews of modern physics*, 84(4), 1607.
- [4]. Dudek, S. P., Pouderoijen, M., Abbel, R., Schenning, A. P., & Meijer, E. W. (2005). Synthesis and energy-transfer properties of hydrogen-bonded oligofluorenes. *Journal of the American Chemical Society*, 127(33), 11763-11768.
- [5]. Bockris, J. O. M. (2013). The hydrogen economy: Its history. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(6), 2579-2588.
- [6]. Züttel, A., Schlapbach, L., & Borgschulte, A. (2008). History of hydrogen. *Hydrogen as a Future Energy Carrier*, 7-21.
- [7]. Aasadnia, M., & Mehrpooya, M. (2018). Large-scale liquid hydrogen production methods and approaches: A review. *Applied Energy*, 212, 57-83.
- [8]. Riis, T., Hagen, E. F., Sandrock, G., Vie, P. J. S., & Ulleberg, O. Hydrogen Production and Storage, International Energy Agency, Paris, 2006.
- [9]. Dresselhaus, M., Crabtree, G., Buchanan, M., Mallouk, T., Mets, L., Taylor, K., ... & Talamini, K. (2004). *Basic Research Needs for the Hydrogen Economy. Report of the Basic Energy Sciences Workshop on Hydrogen Production, Storage and Use, May 13-15, 2003*. DOESC (USDOE Office of Science (SC)); Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- [10]. Hnát, J., Paidar, M., & Bouzek, K. (2020). Hydrogen production by electrolysis. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (pp. 91-117). Elsevier.
- [11]. Docekal, J. (1986). Hydrogen production from hydrocarbons. *International journal of hydrogen energy*, 11(11), 709-714.
- [12]. Dutta, S. (2014). A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1148-1156.
- [13]. Verhelst, S. (2014). Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *international journal of hydrogen energy*, 39(2), 1071-1085.
- [14]. Liu, W., Zuo, H., Wang, J., Xue, Q., Ren, B., & Yang, F. (2021). The production and application of hydrogen in steel industry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(17), 10548-10569.

- [15]. Ausfelder, F., & Bazzanella, A. (2016). Hydrogen in the chemical industry. *Hydrogen science and engineering: materials, processes, systems and technology*, 19-40.
- [16]. Chi, J., et Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390-394.
- [17]. Grigoriev, S. A., Fateev, V. N., Bessarabov, D. G., et Millet, P. (2020). Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26036-26058.
- [18]. Sandeep, K. C., Kamath, S., Mistry, K., Kumar, A., Bhattacharya, S. K., Bhanja, K., et al. (2017). Experimental studies and modeling of advanced alkaline water electrolyser with porous nickel electrodes for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(17), 12094-12103.
- [19]. Smolinka, T., Bergmann, H., Garche, J., et Kusnezoff, M. (2022). The history of water electrolysis from its beginnings to the present. In *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*, 83-164.
- [20]. Anantharaj, S., Karthik, K., Amarnath, T. S., Chatterjee, S., Subhashini, E., Swaathini, K. C., et al. (2019). Membrane free water electrolysis under 1.23 V with Ni<sub>3</sub>Se<sub>4</sub>/Ni anode in alkali and Pt cathode in acid. *Applied Surface Science*, 478, 784-792.
- [21]. Paidar, M., Fateev, V., et Bouzek, K. (2016). Membrane electrolysis—History, current status and perspective. *Electrochimica Acta*, 209, 737-756.
- [22]. Chatenet, M., Pollet, B. G., Dekel, D. R., Dionigi, F., Deseure, J., Millet, P., et al. (2022). Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*, 51, 4583-4762.
- [23]. Chisholm, G., Zhao, T., et Cronin, L. (2022). Hydrogen from water electrolysis. In *Storing Energy*, 559-591.
- [24]. Hu, K., Fang, J., Ai, X., Huang, D., Zhong, Z., Yang, X., et al. (2022). Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling. *Applied Energy*, 312, 118788.
- [25]. Djafour, A., Matoug, M., Bouras, H., Bouchekima, B., Aida, M. S., et Azoui, B. (2011). Photovoltaic-assisted alkaline water electrolysis: Basic principles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(6), 4117-4124.
- [26]. Lamy, C., et Millet, P. (2020). A critical review on the definitions used to calculate the energy efficiency coefficients of water electrolysis cells working under near ambient temperature conditions. *Journal of Power Sources*, 447, 227350.
- [27]. Hernández-Gómez, Á., Ramirez, V., Guilbert, D., and Saldivar, B. (202). Development of an Adaptive static-dynamic electrical model based on input electrical energy for PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(38), 18817-18830.

- [28]. Fabbri, E., et Schmidt, T. J. (2018). Oxygen evolution reaction—the enigma in water electrolysis. *Acs Catalysis*, 8(10), 9765-9774.
- [29]. Chandrasekar, A., Flynn, D., et Syron, E. (2021). Operational challenges for low and high temperature electrolyzers exploiting curtailed wind energy for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 28900-28911.
- [30]. Song, H., Yan, L., Jiang, J., Ma, J., Zhang, Z., Zhang, J., et al. (2018). Electrochemical activation of persulfates at BDD anode: radical or nonradical oxidation?. *Water Research*, 128, 393-401.
- [31]. Chen, C., Bai, Q., Liu, J., Wang, Z., et Cen, K. (2020). Characteristics and anode reaction of organic wastewater-assisted coal electrolysis for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 20894-20903.
- [32]. Zhang, X., Song, Y., Wang, G., et Bao, X. (2017). Co-electrolysis of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in high-temperature solid oxide electrolysis cells: Recent advance in cathodes. *Journal of Energy Chemistry*, 26(5), 839-853.
- [33]. Yan, C., Cheng, X. B., Zhao, C. Z., Huang, J. Q., Yang, S. T., et Zhang, Q. (2016). Lithium metal protection through in-situ formed solid electrolyte interphase in lithium-sulfur batteries: The role of polysulfides on lithium anode. *Journal of Power Sources*, 327, 212-220.
- [34]. Liu, S., Govindarajan, N., Prats, H., et Chan, K. (2022). Understanding the reaction mechanism of Kolbe electrolysis on Pt anodes. *Chem Catalysis*, 2(5), 1100-1113.
- [35]. Herraiz-Cardona, I., Ortega, E., Vázquez-Gómez, L., et Pérez-Herranz, V. (2012). Double-template fabrication of three-dimensional porous nickel electrodes for hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(3), 2147-2156.
- [36]. Abdin, Z., Webb, C. J., et Gray, E. M. (2015). Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39), 13243-13257.
- [37]. Borni, A., et Chenni, R. (2017). Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique.
- [38]. Sbai, G., et Loukili, M. (2015). La décoloration des rejets liquides de textile (noir de soufre) par voie électrochimique. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 11(1), 102-111.
- [39]. Benchrif, R., Bennouna, A., et Zejli, D. (2007). Rôle de l'hydrogène dans le stockage de l'électricité à base des énergies renouvelables. *Revue des Energies Renouvelables CER*, 7, 103-108.
- [40]. Souaad, B., et Dalila, G. (2022). *Etude de l'effet des paramètres du traitement de l'eau polluée par méthode électrochimique* (Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univbba).

- [41]. Andrianjatovo, F., Rakotoarimanana, L. G., Andrianaivoarivelo, J. A., et Randriamanantany, Z. A. (2019). Rendement énergétique d'un électrolyseur appliqué dans les piles à combustibles. *Afrique SCIENCE*, 15(4), 29-50.
- [42]. Diouf, G., Dime, A. K. D., Boye, M. B., Balde, I., Kane, C., et Fall, M. (2022). Optimisation des paramètres influençant le rendement de la dénitrification électrochimique de l'eau par l'électrode de Ti/RuO<sub>2</sub>+ IrO<sub>2</sub>. *Afrique SCIENCE*, 20(4), 1-10.
- [43]. Pierre, M. L., Abdelwahed, T., et Rabbah, N. (2010). Étude d'une technique de réduction du coût pour système de stockage hydrogène par une méthode de cogénération appliquée aux résidences.
- [44]. Flotron, S. (2013). *Simulations numériques de phénomènes MHD-thermiques avec interface libre dans l'électrolyse de l'aluminium* (No. THESIS). EPFL.
- [45]. Henry, M., et Chambron, J. (2014). Les risques d'une libre consommation d'eau réductrice alcaline produite par électrolyse. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 198(4-5), 867-879.
- [46]. De Fátima Palhares, D. D. A., Vieira, L. G. M., et Damasceno, J. J. R. (2018). Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4265-4275.
- [47]. Yu, F., Yu, L., Mishra, I. K., Yu, Y., Ren, Z. F., et Zhou, H. Q. (2018). Recent developments in earth-abundant and non-noble electrocatalysts for water electrolysis. *Materials Today Physics*, 7, 121-138.
- [48]. Burton, N. A., Padilla, R. V., Rose, A., et Habibullah, H. (2021). Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110255.
- [49]. Widera, B. (2020). Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 16, 100460.
- [50]. Walker, S. B., Mukherjee, U., Fowler, M., et Elkamel, A. (2016). Benchmarking and selection of Power-to-Gas utilizing electrolytic hydrogen as an energy storage alternative. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(19), 7717-7731.
- [51]. Kumar, S. S., et Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442-454.
- [52]. Chen, L., Xue, Y., Luo, T., Wu, F., et Alshawabkeh, A. N. (2021). Electrolysis-assisted UV/sulfite oxidation for water treatment with automatic adjustments of solution pH and dissolved oxygen. *Chemical Engineering Journal*, 403, 126278.



- [53]. Shetty, S., Sadiq, M. M. J., Bhat, D. K., et Hegde, A. C. (2017). Electrodeposition and characterization of Ni-Mo alloy as an electrocatalyst for alkaline water electrolysis. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 796, 57-65.
- [54]. Brauns, J., et Turek, T. (2020). Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. *Processes*, 8(2), 248.
- [55]. Grim, R. G., Huang, Z., Guarnieri, M. T., Ferrell, J. R., Tao, L., et Schaidle, J. A. (2020). Transforming the carbon economy: challenges and opportunities in the convergence of low-cost electricity and reductive CO<sub>2</sub> utilization. *Energy & Environmental Science*, 13(2), 472-494.
- [56]. Grigoriev, S. A., Fateev, V. N., Bessarabov, D. G., et Millet, P. (2020). Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26036-26058.
- [57]. Pickard, W. F., Shen, A. Q., et Hansing, N. J. (2009). Parking the power: Strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply–demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1934-1945.
- [58]. Sharma, S., et Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151-1158.
- [59]. Lee, J., Jung, H., Park, Y. S., Woo, S., Kwon, N., Xing, Y., et al. (2021). Corrosion-engineered bimetallic oxide electrode as anode for high-efficiency anion exchange membrane water electrolyzer. *Chemical Engineering Journal*, 420, 127670.
- [60]. Gondal, I. A. (2019). Hydrogen integration in power-to-gas networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(3), 1803-1815.
- [61]. BTS AMCR, Présentation du logiciel SOLIDWORKS, Lycée Bel Air, 2019.

## Résumé :

Ce projet souligne l'importance cruciale d'un électrolyseur efficace et sûr pour le décalaminage par injection d'hydrogène, afin d'éliminer les dépôts de calamine préjudiciables aux moteurs à combustion interne. Les simulations informatiques ont joué un rôle essentiel en optimisant la conception de l'électrolyseur et en améliorant la compréhension de son fonctionnement. La réalisation de l'électrolyseur a exigé l'utilisation de techniques de fabrication appropriées, garantissant sa fiabilité et sa compatibilité avec le système de décalaminage. Ce projet contribue significativement à l'avancement des connaissances sur l'hydrogène en tant que source d'énergie propre, en démontrant les avantages potentiels de l'application du décalaminage par injection d'hydrogène dans l'industrie automobile et les moteurs à combustion interne.

**Mots clés:** Transition énergétique, électrolyseur, décalaminage par injection d'hydrogène, dépôts de calamine, énergie propre, industrie automobile, moteurs à combustion interne.

## Abstract :

This project highlights the crucial importance of an efficient and safe electrolyzer for hydrogen injection decarbonization, in order to eliminate harmful carbon deposits in internal combustion engines. Computer simulations have played a vital role in optimizing the electrolyzer's design and improving understanding of its operation. The realization of the electrolyzer required the use of appropriate manufacturing techniques, ensuring its reliability and compatibility with the decarbonization system. This project significantly contributes to advancing knowledge about hydrogen as a clean energy source, demonstrating the potential benefits of hydrogen injection decarbonization in the automotive industry and internal combustion engines.

**Keywords:** Energy transition, electrolyzer, hydrogen injection decarbonization, carbon deposits, clean energy, automotive industry, internal combustion engines.

## ملخص

يسلط هذا المشروع الضوء على أهمية حاسمة لجهاز تحليل الكهرباء الفعال والأمن لتحويل الهيدروجين بحيث يتم القضاء على ترسبات الكربون الضارة في محركات الاحتراق الداخلي. لعبت المحاكاة الحاسوبية دورًا حيويًا في تحسين تصميم جهاز تحليل الكهرباء وتعزيز فهم عمله. استلزم تنفيذ جهاز تحليل الكهرباء استخدام تقنيات تصنيع مناسبة لضمان موثوقيته وتوافقه مع نظام التحويل. يسهم هذا المشروع بشكل كبير في تعزيز المعرفة حول الهيدروجين كمصدر للطاقة النظيفة، مما يوضح الفوائد المحتملة لتحويل الهيدروجين بحرق الكربون في صناعة السيارات ومحركات الاحتراق الداخلي.

**الكلمات الرئيسية:** انتقال الطاقة، جهاز تحليل الكهرباء، تحويل الهيدروجين بحرق الكربون، ترسبات الكربون، الطاقة النظيفة، صناعة السيارات، محركات الاحتراق الداخلي.