

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE chimie

N° :



DOMAINE : SCINCES DE LA matière

FILIERE : CHIMIE

OPTION : CHIMIE D'ORGANIQUE

Mémoire de Mastre

Présenter Par :

- Lamouri Bouchra
- Kirouani Lalahoum

En vue de l'obtention Du diplôme de Master en chimie

Intitulé

L'application d'hydrogène vert sur les piles combustibles

Soutenu devant le jury composé de :

Dr.Laib Nouri	Université M'sila	président
Dr.Djerioui Ammar	Université M'sila	Rapporteur
Dr.Yousfi Samia	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2023 /2024

Remerciements

Tout d'abord, grâce au Dieu Tout-Puissant, qui

Il nous a donné la force, la Volonté et surtout le courage de pouvoir

Terminez cette tâche.

*Je tiens à remercier sincèrement mon encadreur **djriw** , pour le soutien et l'aide qu'il n'a pas manqué de nous apporter, ainsi que pour ses conseils et ses orientations lors de l'élaboration de ce travail . Et tout d'abord, merci pour les qualités scientifiques et humaines qui resteront à jamais un bon exemple pour nous.*

*Je tiens également à remercier **les membres du jury** qui ont aimablement accepté d'évaluer cette thèse à sa juste valeur, et de partager avec nous leurs retours certainement pertinents qui, avec un peu de recul, contribueront sans aucun doute à l'amélioration de ce travail .*

*Nous remercions vivement tous **les membres du détective**, Les Soldats secrets responsables du côté technique et technique .*

Nous exprimons notre profond respect et notre sympathie à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation toutes ces années grâce à tous ceux qui ont directement ou indirectement participé directement ou indirectement à la réalisation de ce travail .

Merci à tous .



Dédicace

À mes parents chers, qui ont toujours été ma source d'inspiration et de soutien, et qui n'ont jamais ménagé leurs efforts pour m'offrir tout ce qu'ils pouvaient afin que je réalise mes rêves. Les mots de remerciement ne suffiront jamais à exprimer ma gratitude, mais j'espère que ce mémoire sera le début de la réalisation de vos espérances et de votre fierté envers moi.

À mon époux bien-aimé, qui m'a soutenu avec amour et patience tout au long de ce voyage académique. Ta compréhension, ton encouragement constant et ta présence à mes côtés ont été inestimables.

À mes enfants adorés, qui ont apporté joie et motivation à ma vie quotidienne. Votre sourire et votre amour inconditionnel m'ont donné la force de persévérer.

À mes professeurs respectés, qui ont partagé leur savoir et leur temps, ouvrant devant moi les portes de la connaissance et m'offrant guidance et conseils tout au long de mes années d'études. Je vous adresse ma profonde gratitude et mon immense respect.

À mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi des moments de joie et de défis, et qui ont été un pilier de soutien dans les moments difficiles. Votre soutien et vos encouragements ont été déterminants pour que je puisse continuer et achever ce travail.

À tous ceux qui ont cru en moi, et qui m'ont apporté leur soutien par un mot gentil ou une prière sincère. Vous êtes les héros méconnus de mon parcours, et ma reconnaissance envers vous est infinie.

Je vous dédie à tous ce mémoire, en témoignage de ma gratitude et de mon appréciation pour tout ce que vous m'avez apporté, et j'espère que cela soit le fruit de nos efforts communs.



bouchra





Dédicace

À mes parents chers, qui ont toujours été ma source d'inspiration et de soutien, et qui n'ont jamais ménagé leurs efforts pour m'offrir tout ce qu'ils pouvaient afin que je réalise mes rêves. Les mots de remerciement ne suffiront jamais à exprimer ma gratitude, mais j'espère que ce mémoire sera le début de la réalisation de vos espérances et de votre fierté envers moi.

À mon époux bien-aimé, qui m'a soutenu avec amour et patience tout au long de ce voyage académique. Ta compréhension, ton encouragement constant et ta présence à mes côtés ont été inestimables.

À mes enfants adorés, qui ont apporté joie et motivation à ma vie quotidienne. Votre sourire et votre amour inconditionnel m'ont donné la force de persévérer.

À mes professeurs respectés, qui ont partagé leur savoir et leur temps, ouvrant devant moi les portes de la connaissance et m'offrant guidance et conseils tout au long de mes années d'études. Je vous adresse ma profonde gratitude et mon immense respect.

À mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi des moments de joie et de défis, et qui ont été un pilier de soutien dans les moments difficiles. Votre soutien et vos encouragements ont été déterminants pour que je puisse continuer et achever ce travail.

À tous ceux qui ont cru en moi, et qui m'ont apporté leur soutien par un mot gentil ou une prière sincère. Vous êtes les héros méconnus de mon parcours, et ma reconnaissance envers vous est infinie.

Je vous dédie à tous ce mémoire, en témoignage de ma gratitude et de mon appréciation pour tout ce que vous m'avez apporté, et j'espère que cela soit le fruit de nos efforts communs.



lalahoum



Liste des figures

Figure I. 1: Chronologie des événements les plus importants dans l’histoire de l’utilisation de l’hydrogène [1].	5
Figure. II. 2 : Principe du vapo-reformage.	14
Figure II. 3: Schéma des différents systèmes électrochimiques pour la production de l’hydrogène par électrolyse de l’eau [28].	20
Figure II. 4. Schéma d’un électrolyseur alcalin: Compartiment anodique (1), compartiment cathodique (2), diaphragme (3), électrodes (4), cadre de la cellule (5), alimentation en courant continu (6), endplates (7), séparateurs du gaz (8) [30].	22
Figure II. 5: Schéma de principe de l’électrolyse PEM.	23
Figure. II . 6 : Le principe d’électrolyse à haute température	24
Figure 7 : Energie requise pour la compression par rapport à la quantité d’énergie stockée (10% du PCI). [19].	26
Figure 8 : Diagramme de phase de l’hydrogène. [35]	27
Figure 9 : Schéma de structure d’un réservoir d’hydrogène liquide développé par Magna Steyr. [36]	28
Figure 10: Véhicule développé par BMW (« Hydrogen 7 series ») équipé d’un système de stockage d’hydrogène liquide. [37]	28
Figure 11: Classification des éléments de stockage solide d’hydrogène. [39]	30

Liste des tableaux

Le tableau I. 1 : , rapporte ses propriétés physiques [4].	6
Tableau II. 2 : Les avantages et les inconvénients des différentes technologies d'électrolyse de l'eau [29].	21
Tableau II. 3: Comparaison entre l'hydrogène gazeux à l'état libre et comprimé. [19]	25

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Introduction générale..... 1

chapitre I:Recherche Bibliographique

I.1.introduction :..... 4

I.2. Recherche bibliographique sur l'Hydrogène :..... 4

I.2.1.Historique..... 4

I.2.2.Définition de hydrogène 5

I.2.3. Caractéristique de l'hydrogène :..... 6

I. 2.3.1. Propriétés physiques : 6

I.2.3.2.Propriétés énergétiques de l'hydrogène 7

I.2.4.Hydrogène et énergie 7

I.2.4.1. définition d'énergie..... 8

I.2.5.L'hydrogène : une matière première pour l'industrie et un vecteur
énergétique pour les mobilités..... 9

I.2.6.L'hydrogène dans les mobilités terrestres, aériennes et spatiales 10

I.2.7.L'hydrogène et ses usages 10

chapitre II: Production et stockage d'hydrogène

II.1. Production d'hydrogène : 13

II.1.1. Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures) : 13

II.1.1.1. Le vapo-reformage de gaz naturel : 13

II. 1.1.2. Oxydation partielle :	14
II.1.1.3. Reformage autotherme:	15
II.1.1.4.Pyrolyse:	15
II.1.2.Production à partir du charbon :	16
II.1.3.Production à partir du nucléaire :	16
II.1.4.Procédés biologiques :	16
II.1.5. Production d'hydrogène par dissociation de l'eau :	17
II.1.5.1. Décomposition thermochimique :	17
II.1.5.2.Procédés photo-électrochimiques :	17
II.1.5.3.Electrolyse de l'eau :	18
II.1.5.4. Différents types d'électrolyseurs de l'eau :	20
II.2. Stockage de l'hydrogène :	25
II.2.1.Stockage d'hydrogène à l'état gazeux.....	25
II.2.2.Stockage d'hydrogène Sous forme liquide :	26

chapitre III: Utiliser l'énergie hydrogène pour les batteries

III.Utiliser l'énergie hydrogène pour les batteries:.....	32
III.1.Les piles à combustible à hydrogène (Fuel cells) :	32
III.2.Les batteries à hydrogène métallique :	33
III.3. Les piles combustibles à hydrogène solide (Solid oxide fuel cells - SOFC) :	34
III.4.Les systèmes de stockage hybrides :	35
Conclusion :	38

Liste des abréviations:

KJ/kg : kilojoules par kilogramme

MJ/kg: mégajoules par kilogramme

kg/m³: kilogrammes par mètre cube

K: kilogramme

MWj: mégawatts-jour

NTP : Température et pression normales

CO₂ : dioxyde de carbone

PEM : Proton Exchange Membrane

PCFC : Proton Conducting Fuel Cell

SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

Introduction générale

Introduction générale

Dans le contexte des défis environnementaux mondiaux actuels, la nécessité de trouver des solutions énergétiques propres et durables est plus pressante que jamais. L'hydrogène vert représente l'une de ces solutions prometteuses, capable de contribuer significativement à la réduction des émissions de carbone et de fournir une source d'énergie propre et sécurisée. L'hydrogène vert est produit par électrolyse de l'eau en utilisant des sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire ou éolienne. Ce type d'hydrogène est caractérisé par l'absence d'émissions de carbone lors de sa production, ce qui en fait une option idéale pour atteindre les objectifs de durabilité environnementale.

L'hydrogène vert possède un potentiel immense pour transformer le paysage énergétique mondial. Il peut être utilisé dans une large gamme d'applications, y compris l'industrie, le transport et la production d'électricité. Dans le secteur des transports, en particulier, l'hydrogène vert représente une alternative propre aux combustibles fossiles, pouvant être utilisé dans des piles à combustible pour alimenter des voitures électriques, des bus et des camions, contribuant ainsi à réduire la pollution et à améliorer la qualité de l'air dans les villes [5].

L'une des utilisations les plus intéressantes de l'hydrogène vert se trouve dans le domaine des batteries à hydrogène. Ces batteries reposent sur la technologie des piles à combustible pour convertir l'hydrogène en énergie électrique. Les batteries à hydrogène se distinguent par leur légèreté et leur densité énergétique élevée, ce qui les rend appropriées pour les applications nécessitant une énergie élevée et une longue autonomie, comme les voitures électriques et les avions. De plus, les batteries à hydrogène offrent l'avantage de se recharger rapidement par rapport aux batteries traditionnelles, en faisant une solution attrayante pour un usage quotidien.

Cependant, l'hydrogène vert fait face à plusieurs défis qui entravent sa large adoption. Parmi ces défis figurent le coût élevé de production de l'hydrogène vert et la nécessité de développer une infrastructure sophistiquée pour stocker et transporter l'hydrogène de manière sûre et efficace. Il est également crucial de développer des technologies plus efficaces et innovantes pour améliorer les processus d'électrolyse et de stockage de l'hydrogène.

Malgré ces défis, l'avenir de l'hydrogène vert semble prometteur. Avec l'augmentation des investissements en recherche et développement et les progrès technologiques continus, il est possible de surmonter ces obstacles et de faire de l'hydrogène vert une composante essentielle du mix énergétique mondial.

Dans cette thèse, nous explorerons en profondeur le sujet de l'hydrogène vert à travers trois chapitres principaux. Dans le premier chapitre, nous aborderons les bases théoriques de l'hydrogène vert et son importance environnementale et économique, ainsi que les diverses applications de ce type d'hydrogène. Le deuxième chapitre sera consacré aux techniques de production et de stockage de l'hydrogène vert, et nous discuterons des défis et des opportunités associés à ces technologies. Enfin, le troisième chapitre sera dédié à l'étude de l'utilisation de l'hydrogène dans les batteries à hydrogène. Nous examinerons les possibilités futures de cette utilisation, ainsi qu'une analyse du marché et des politiques nécessaires pour soutenir la diffusion de l'hydrogène vert.

CHAPITRE I : Recherche

Bibliographique

I.1.introduction :

L'hydrogène, l'élément chimique le plus simple, se compose d'un proton unique dans son noyau et d'un seul électron. La molécule de dihydrogène (H₂) est constituée de deux atomes d'hydrogène et c'est sous cette forme qu'on la désigne généralement par "hydrogène". Bien que l'hydrogène soit abondant sur Terre, il n'existe pas à l'état pur et est toujours associé à d'autres éléments chimiques dans des molécules telles que l'eau et les hydrocarbures. Les organismes vivants, qu'ils soient animaux ou végétaux, contiennent également de l'hydrogène, faisant de la biomasse une autre source potentielle d'hydrogène.

Pour extraire l'hydrogène de ces sources primaires, comme les hydrocarbures, la biomasse ou l'eau, un apport d'énergie est nécessaire. Tout comme l'électricité, l'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique. L'hydrogène pourrait devenir pratiquement inépuisable, à condition qu'il puisse être produit en quantités suffisantes, à un coût compétitif et idéalement à partir d'énergies nucléaires et renouvelables.

L'ensemble des technologies développées pour produire, stocker et convertir l'hydrogène à des fins énergétiques est connu sous le nom de technologie de l'hydrogène.

I.2. Recherche bibliographique sur l'Hydrogène :

I.2.1.Historique

L'hydrogène s'est avéré être un élément extrêmement utile dans un large éventail de disciplines. Le rôle de l'hydrogène évolue constamment depuis ses modestes débuts dans le domaine de la chimie en tant que mystérieux gaz inflammable, jusqu'à ses applications aéronautiques et son rôle émergent en tant que vecteur énergétique. La figure I.1 résume quelques-uns des principaux événements dans l'histoire de l'hydrogène : depuis sa découverte jusqu'à son utilisation en tant que vecteur d'énergie.

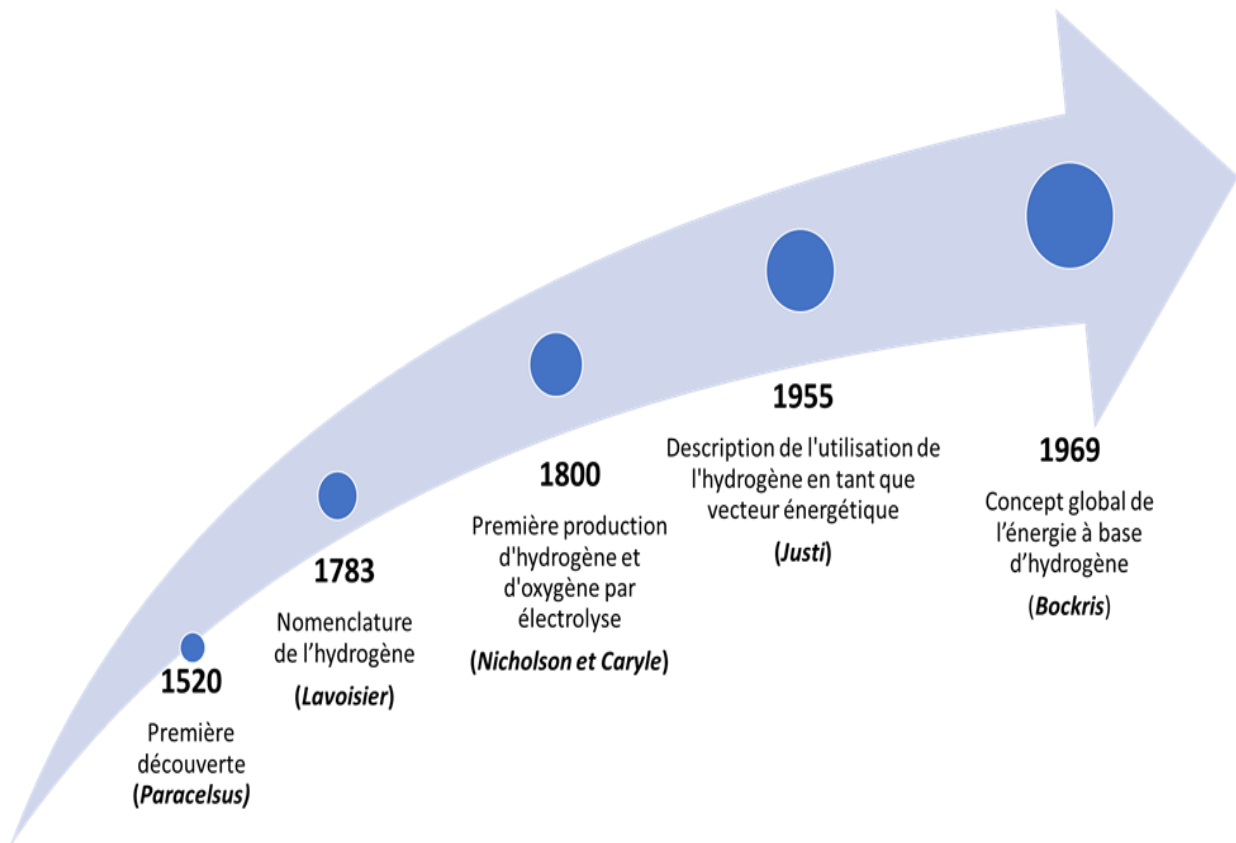


Figure I. 1: Chronologie des événements les plus importants dans l'histoire de l'utilisation de l'hydrogène [1].

Actuellement, l'hydrogène sert de réactif principal pour l'industrie chimique et pétrochimique

(e.g. traitement du pétrole brut, production du méthanol, ...), le transport (e.g. voitures à

hydrogène, carburant à faible teneur en carbone pour le transport maritime et aérien, ...), le

stockage d'énergie renouvelable et la production d'électricité (e.g. par l'intermédiaire des piles

à combustibles, des turbines à gaz, ...) [2]

I.2.2. Définition de hydrogène

L'élément hydrogène H porte le numéro 1 dans la classification périodique des éléments et l'atome d'hydrogène est le plus petit des atomes. Il est présent dans la nature en quantité abondante dans l'eau, les hydrocarbures fossiles, la biomasse... On observe également la présence d'hydrogène H² à l'état naturel ; sa recherche fait l'objet de travaux pour son exploitation éventuelle. La méthode actuelle de production industrielle de l'hydrogène H² est le

vaporéformage du méthane et le procédé émet du dioxyde de carbone. L'électrolyse de l'eau est une technique qui permet l'obtention d'hydrogène décarboné avec la transition écologique et énergétique. [3]

L'hydrogène est un gaz incolore, inodore... Cependant, la littérature évoque, dans un raccourci sémantique, différentes couleurs de l'hydrogène¹⁰. Cette palette de couleur vise à qualifier le mode de fabrication et porte une attention particulière aux conséquences environnementales de cette préparation. Quatre couleurs sont attribuées à l'hydrogène produit par électrolyse selon l'origine de l'électricité mise en œuvre : vert pour les énergies renouvelables, rose pour le nucléaire, jaune pour le mix énergétique et violet pour la combinaison électricité / chaleur issues du nucléaire.

I.2.3. Caractéristique de l'hydrogène :

I. 2.3.1. Propriétés physiques :

L'hydrogène est un gaz incolore et inodore. C'est l'élément le plus léger. Il représente 75 (%) de la masse de l'univers. Cependant, il se trouve pratiquement en combinaison avec d'autres éléments tels que l'oxygène, le carbone et l'azote. Sur terre, on le trouve principalement dans l'eau et les hydrocarbures.

Le tableau I. 1 : propriétés physiques d'hydrogène [4].

Masse moléculaire	2.016
Electronégativité	2.1
Densité de masse (phase gazeuse)	0.0838 (kg/m ³)
Masse volumique (phase liquide)	70.8 (kg/m ³)
Température d'ébullition	20 (k)
Température de fusion	13.8 (K)
Chaleur latente de fusion	58.23 (KJ/kg)
Chaleur latente de vaporisation	449.59 (KJ/kg)

Chaleur latente de sublimation	507.39 (KJ/kg)
Capacité calorifique (phase gazeuse)	14.9 (KJ/kg K)
Capacité calorifique (phase liquide)	9.69 (KJ/kg K)
Valeur de chauffage supérieur	140 (MJ/kg)
Valeur de chauffage inférieur	120 (MJ/kg)

I.2.3.2. Propriétés énergétiques de l'hydrogène

L'hydrogène est très énergétique.

À masse égale, il libère environ 3 fois plus d'énergie que l'essence :

- 1 kg de pétrole = 12 kWh ;
- 1 kg d'hydrogène = 33 kWh. Remarquons que cette énergie est dégagée dans des réactions chimiques, c'est-à-dire des réactions des atomes entre eux

Malheureusement, à cause de sa faible masse volumique, H₂ occupe un volume très important.

Par rapport au pétrole, pour une même énergie dégagée, l'hydrogène occupe un volume :

- 3 000 fois plus grand à 1 bar (sous forme gazeuse);
- 6,7 fois plus grand à 700 bars (sous forme gazeuse) ;
- 4 fois plus grand sous forme liquide (température de – 253 °C et pression de 1 bar).

I.2.4. Hydrogène et énergie

L'un des principaux défis auxquels la société moderne doit faire face concerne le développement des sources d'énergie renouvelables qui minimisent la pollution en produisant et/ou fournissant de l'énergie sans émission de gaz à effet de serre. Afin de mieux comprendre le vecteur énergétique hydrogène, un historique met la lumière sur l'évolution de notre connaissance sur cet élément. Ensuite, les propriétés de l'hydrogène seront exposées en montrant les manières dont nous en tirons parti pour la production d'énergie. Cette partie comportera également une revue sur les enjeux techniques et environnementaux liés au développement de cette technologie [6].

I.2.4.1. définition de l'énergie

L'énergie est une notion fondamentale en physique et en sciences naturelles, décrivant la capacité d'un système à effectuer un travail ou à produire un changement. Cette grandeur abstraite est omniprésente dans l'univers et est essentielle à tous les aspects de la vie et des processus naturels. Sa définition s'étend au-delà de sa simple manifestation dans le mouvement des objets ou la génération de chaleur ; elle englobe un spectre complexe de formes et de manifestations.

À un niveau élémentaire, l'énergie peut être divisée en plusieurs catégories principales, chacune représentant une forme distincte de cette grandeur fondamentale. L'énergie cinétique, par exemple, est associée au mouvement des objets, tandis que l'énergie potentielle découle de la position ou de la configuration d'un système. L'énergie thermique est la manifestation de l'agitation des particules dans un objet, produisant de la chaleur, tandis que l'énergie électrique est associée au mouvement des charges électriques. L'énergie chimique réside dans les liaisons entre les atomes et les molécules, tandis que l'énergie nucléaire provient des réactions nucléaires au sein des atomes.

Au-delà de ces formes conventionnelles, l'énergie peut également être perçue à travers d'autres prismes, tels que l'énergie lumineuse, sonore, éolienne, hydraulique et magnétique, entre autres. Chacune de ces formes d'énergie possède ses propres caractéristiques et applications, mais elles sont toutes interconnectées par les lois de la thermodynamique, qui régissent la conversion et la conservation de l'énergie [7].

Une des propriétés les plus remarquables de l'énergie est sa capacité à être convertie d'une forme à une autre. Par exemple, l'énergie électrique peut être transformée en énergie lumineuse dans une ampoule, en énergie cinétique dans un moteur électrique, ou en énergie thermique dans un radiateur. Cette capacité de conversion est au cœur de nombreuses technologies modernes, de la production d'électricité aux transports en passant par l'industrie et les communications.

Sur le plan conceptuel, l'énergie est également une composante essentielle de nombreux phénomènes naturels et processus biologiques. Dans le monde naturel, l'énergie solaire alimente la photosynthèse des plantes, tandis que l'énergie géothermique est responsable de l'activité volcanique et sismique. Dans le domaine biologique, l'énergie est le moteur des processus métaboliques qui maintiennent la vie, fournissant aux organismes les ressources nécessaires à leur croissance, leur développement et leur reproduction.

Au-delà de ses aspects physiques et naturels, l'énergie revêt également une importance sociale, économique et politique considérable. La disponibilité et l'accès à l'énergie jouent un rôle crucial dans le développement économique et le bien-être des sociétés modernes. Les ressources énergétiques, telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, sont des moteurs de l'économie mondiale, mais leur utilisation entraîne également des défis environnementaux, tels que le changement climatique et la pollution.

Dans un contexte plus large, la transition vers des sources d'énergie plus durables et renouvelables est devenue une priorité mondiale, en raison des préoccupations croissantes concernant le changement climatique et la sécurité énergétique. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et biomasse, offrent des alternatives plus durables et respectueuses de l'environnement aux combustibles fossiles traditionnels.

En résumé, l'énergie est une notion complexe et polyvalente qui transcende les frontières disciplinaires et les échelles d'observation. De la physique fondamentale à l'ingénierie appliquée, de l'écologie à l'économie mondiale, l'énergie est au cœur des défis et des opportunités qui façonnent notre monde moderne. Sa compréhension et sa gestion efficaces sont essentielles pour assurer un avenir durable et prospère pour les générations à venir.

I.2.5.L'hydrogène : une matière première pour l'industrie et un vecteur énergétique pour les mobilités

L'hydrogène dans l'industrie

Aujourd'hui, l'hydrogène est principalement utilisé pour la synthèse de l'ammoniac qui est l'élément central dans la production d'engrais azotés. En effet, près de la moitié de l'hydrogène produit sert à la synthèse de l'ammoniac. L'ammoniac est liquide à la température de -33 °C .

Le stockage sous cette forme peut s'avérer dangereux, car lorsque la pression augmente, son mélange gazeux avec l'air peut devenir explosif. C'est la raison pour laquelle, dans l'industrie agricole, on utilise le nitrate d'ammonium pour apporter de l'azote au sol.

Il s'agit principalement de :

- La synthèse des hydrocarbures, grâce aux procédés Sabatier et Fischer-Tropsch connus depuis le début du xx^e siècle.

Dans la période actuelle où nous entrons dans une ère de pénurie en gaz et en pétrole, à la fois pour des raisons structurelles (approche du peak oil et lutte contre le réchauffement climatique) et conjoncturelle.

(guerre en Ukraine), la solution qui consiste à synthétiser des hydrocarbures permet d'une part d'assurer la transition vers des carburants décarbonés, d'autre part de recycler le CO₂ séquestré dans des procédures qui respectent la neutralité carbone.

- La désulfuration des hydrocarbures dans les raffineries, pour satisfaire aux réglementations en vigueur dans de nombreux pays [8]
- La production de chaleur et d'électricité pour l'industrie et les bâtiments.
- La production d'électricité à l'aide de piles à combustible pour réguler et stabiliser le réseau de distribution électrique.

I.2.6.L'hydrogène dans les mobilités terrestres, aériennes et spatiales

Dans les mobilités terrestres ou aériennes, on utilisera des piles à combustible dont l'électricité produite à partir de l'hydrogène pourra actionner, par l'intermédiaire d'un moteur électrique, les roues d'un véhicule ou l'arbre d'une hélice.

L'hydrogène pourra être utilisé directement comme carburant à la place du kérosène dans la chambre de combustion d'un turboréacteur (3e loi de Newton d'égalité de l'action et de la réaction) ou d'un turbopropulseur (rotation de l'arbre de la turbine pour actionner une hélice).

Enfin, du point de vue spatial, l'hydrogène liquide, par réaction avec l'oxygène liquide, est utilisé depuis longtemps dans la propulsion des fusées envoyées dans le voisinage de la Terre.

Pour des voyages plus lointains vers la planète Mars, il semblerait que la propulsion nucléaire thermique (NTP), utilisant l'hydrogène comme gaz propulsif, soit aujourd'hui la meilleure solution [9]

I.2.7.L'hydrogène et ses usages

L'hydrogène est qualifié de "vecteur énergétique" car une fois produit, il peut être stocké, transporté et utilisé. L'énergie contenue dans l'hydrogène peut être récupérée de deux manières : soit en le brûlant, soit en utilisant une pile à combustible. Par ailleurs, il est utilisé comme intrant dans certains processus industriels.

Grâce aux avancées technologiques qui ont amélioré les performances et la fiabilité des processus, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, à partir d'une électricité à faible teneur en carbone, est désormais possible. Lorsque sa production et son utilisation permettent d'éviter au moins 70 % des émissions de CO₂ générées par une production à partir de sources fossiles, on parle alors d'hydrogène "décarboné". La promotion de l'hydrogène décarboné contribuera à la réalisation des objectifs fixés par la France en matière de développement des énergies renouvelables et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et de polluants, ainsi que pour diminuer la consommation d'énergie fossile.

L'hydrogène décarboné représente une solution essentielle pour parvenir à la neutralité carbone, et ce, à plusieurs égards :

Dans le remplacement de l'hydrogène fossile utilisé dans l'industrie : l'hydrogène joue un rôle vital dans divers secteurs industriels tels que le raffinage, la chimie et la production d'engrais. En France, ces secteurs consomment environ 430 kilotonnes d'hydrogène provenant de sources fossiles chaque année, générant ainsi cinq millions de tonnes de CO₂ annuellement. La transition vers l'hydrogène décarboné permettrait de réduire drastiquement les émissions de notre industrie lourde tout en nous affranchissant de la dépendance aux énergies fossiles.

Pour explorer de nouvelles applications dans le cadre de la décarbonation de l'industrie, des transports et de l'agriculture, il est nécessaire de répondre à un besoin croissant en hydrogène décarboné en France. Dans le contexte des technologies actuelles, l'hydrogène peut se révéler être un vecteur énergétique plus adapté que l'électricité dans certaines situations, notamment pour les besoins énergétiques intensifs liés aux transports ou aux procédés industriels exigeant des températures élevées, tels que la calcination ou les traitements de surface. De plus, il constitue un réactif chimique essentiel pour divers procédés industriels, comme certaines réactions de réduction, notamment dans l'industrie sidérurgique. En outre, l'hydrogène permet la production d'e-carburants, qui joueront un rôle crucial dans la décarbonation du secteur des transports, ainsi que la fabrication d'engrais azotés décarbonés pour le secteur agricole [10]

Chapitre II : Production et stockage d'hydrogène vert

II.1. Production d'hydrogène :

La production d'hydrogène consiste à extraire et isoler la molécule d'hydrogène à partir de matières premières telles que l'eau, la biomasse ou les hydrocarbures (pétrole, gaz naturel ou charbon) [11].

Différentes techniques de production sont utilisées, certaines étant déjà à un stade de production commerciale, tandis que d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. Parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation, on trouve la décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau. Ces techniques permettent d'obtenir de l'hydrogène à grande échelle et sont utilisées dans divers secteurs industriels.

II.1.1. Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures) :

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles. La complexité des processus se présente dans l'apparition de CO₂ comme sous-produit ce qui peut présenter des avantages économiques mais pas très écologiques.

II.1.1.1. Le vapo-reformage de gaz naturel :

Le reformage à la vapeur, également connu sous le nom de reformage avec vapeur, est une méthode largement utilisée pour la production d'hydrogène. Cette technique repose sur la réaction du méthane pur avec de la vapeur d'eau dans un réacteur catalytique, généralement composé de nickel ou d'alliages de nickel-fer. Le processus se déroule à des températures (700-850 (°C)) et des pressions (15-30 (atm)) spécifiques. Lors de cette réaction, un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone est formé. Par la suite, après refroidissement, une autre réaction se produit, au cours de laquelle le monoxyde de carbone précédemment formé réagit avec la vapeur d'eau pour produire de l'hydrogène et du dioxyde de carbone



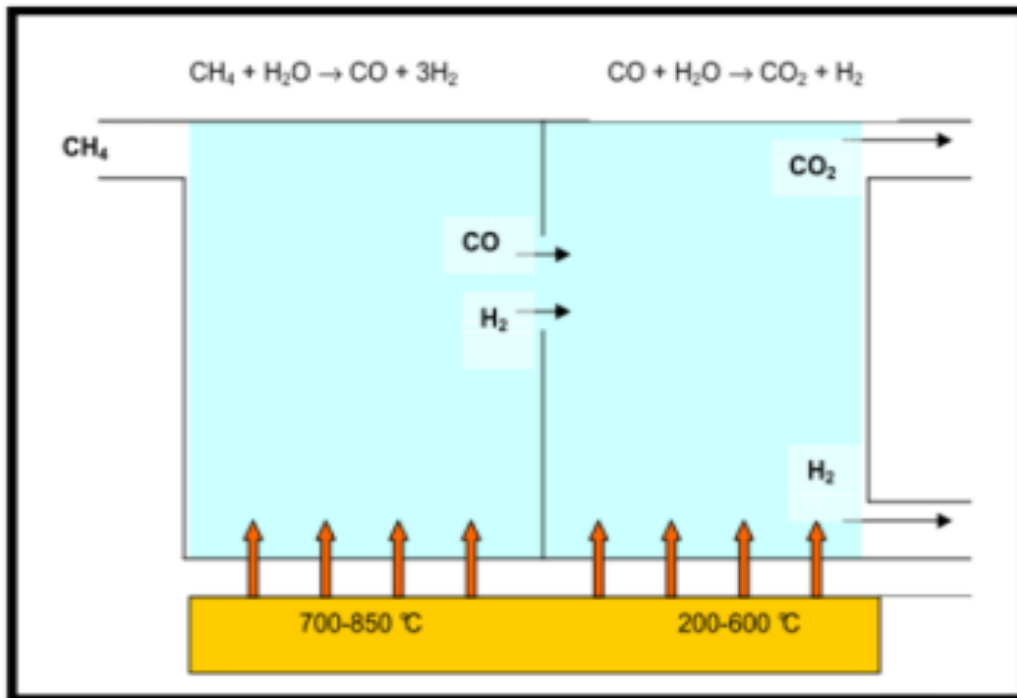


Figure. II. 2 : Principe du vapo-reformage.

Effectivement, malgré le processus de reformage à la vapeur, une certaine quantité de monoxyde de carbone (CO) peut subsister à la sortie du réacteur. Pour éliminer ce CO résiduel, un réacteur d'oxydation préférentielle est utilisé. Ce réacteur permet d'oxyder sélectivement le CO restant en dioxyde de carbone (CO₂).

Après passage par le réacteur d'oxydation préférentielle, les gaz à la sortie peuvent être composés principalement d'hydrogène (H₂) à hauteur d'environ 70 (%), de dioxyde de carbone (CO₂) représentant environ 28 (%), ainsi que de traces d'azote (N₂), de méthane (CH₄) et de CO. Ces différents composants gazeux peuvent ensuite être séparés pour obtenir une source d'hydrogène pur [12].

II. 1.1.2. Oxydation partielle :

En effet, le procédé de vapo-reformage est plus simple que le reformage à la vapeur. Il consiste à oxyder les hydrocarbures en présence d'oxygène pur à des températures élevées (1200 à 1500 (°C)) et à une pression élevée (20 à 90 (bars)). Contrairement au reformage à la vapeur, ce procédé n'a pas besoin d'un catalyseur pour fonctionner. Le vapo-reformage présente l'avantage d'être exothermique, ce qui signifie qu'il génère de la chaleur. Cette chaleur peut être récupérée pour une utilisation ultérieure. Après la réaction d'oxydation, une réaction de shift peut être effectuée pour ajuster le rapport entre le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone

(CO₂), suivie d'une séparation gazeuse pour obtenir de l'hydrogène pur. Cependant, le principal inconvénient de ce procédé est la nécessité d'utiliser de l'oxygène pur, ce qui peut être coûteux et pose des défis en termes de sécurité et de gestion des stocks d'oxygène [13].

II.1.1.3. Reformage autotherme:

Effectivement, le vapo-reformage est un processus qui combine deux réactions principales. La première est la réaction présentée par l'équation (II.1), qui est la réaction d'oxydation partielle des hydrocarbures. La seconde réaction est la combustion du méthane, qui est également exothermique.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de récupérer l'énergie générée par les réactions exothermiques de l'oxydation partielle. Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés avec de la vapeur d'eau. Ensuite, le mélange est préchauffé avant d'être introduit dans le réacteur pour la production de gaz de synthèse, qui est principalement composé de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂).

Les conditions opératoires typiques pour le vapo-reformage sont une température comprise entre 900 et 1100 (°C) et une pression entre 20 et 60 (bars). Ces conditions favorisent la réaction et permettent d'obtenir un gaz de synthèse riche en hydrogène, qui peut ensuite être utilisé dans diverses applications industrielles.

II.1.1.4. Pyrolyse:

Ce procédé est basé sur la déshydrogénation des hydrocarbures ou les déchets domestiques organiques en donnant de l'hydrogène et du charbon à des températures très élevées. La pyrolyse, appelée carbonisation, consiste en un craquage thermique réalisé en l'absence de produits oxydants. Cette réaction endothermique conduit à une décomposition du solide en trois fractions :

- Une fraction gazeuse non condensable (CO, H₂, CH₄, C_nH_m, N₂, H₂O),
- Une fraction gazeuse condensable (huile aromatique, goudrons, H₂O),
- Un résidu solide : le char, composé majoritairement de carbone (matières minérales).

La pyrolyse est généralement réalisée pour des températures d'environ 500 (°C). Elle peut être suivie d'une réaction de gazéification: la production de gaz de synthèse est réalisée par reformage des fractions gazeuses et gazéification du résidu carboné [14].

II.1.2. Production à partir du charbon :

La réaction pour ce procédé est donnée comme suite:



L'inconvénient primordial de ces procédés préalablement cités est l'émission du gaz carbonique dans l'atmosphère (environ 7 tonnes de CO₂ par tonne de H₂ produit), ce qui nécessite un traitement spécifique [15].

II.1.3. Production à partir du nucléaire :

Des réacteurs dits de 4^{ème} génération sont développés dans ces dernières années pour être plus sûrs que les réacteurs classiques, qui servent à la production de l'électricité et de l'hydrogène gazeux. Les rendements devraient être de l'ordre de 50 (%). Une partie de la chaleur dégagée dans des nouveaux réacteurs nucléaires destinés à produire de l'électricité est récupérée pour être réutilisée dans la production de l'hydrogène via la décomposition thermo-chimique de l'eau [16].

II.1.4. Procédés biologiques :

Le phénomène de production d'hydrogène a été découvert en 1940 par Gaffron. Il n'a été observé que certains organismes photosynthétiques, tels que certaines algues vertes ou cyanobactéries, sont capables de produire de l'hydrogène lors de la photosynthèse dans des conditions anaérobiques, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène [17]. La production d'hydrogène peut être réalisée soit en utilisant des organismes vivants tels que des algues ou des bactéries, soit par des procédés biochimiques impliquant des levures ou des enzymes. Grâce aux avancées technologiques, il est désormais possible de développer des souches d'algues commercialement viables, ce qui ouvre la voie à une production industrielle d'hydrogène à partir de ces organismes [18].

Ces techniques offrent des perspectives prometteuses pour la production d'hydrogène, en exploitant les capacités naturelles des organismes photosynthétiques. Cela pourrait contribuer à développer des méthodes de production d'hydrogène plus durables et respectueuses de l'environnement.

Aujourd'hui des recherches sont menées afin d'étudier les phénomènes métaboliques pour trouver les conditions appropriées et par suite avoir une conception correcte d'un réacteur de biohydrogène. On peut distinguer les procédés biologiques comme suit:

- ✓ La bio-photolyse de l'eau par des algues ou par des cyanobactéries.
- ✓ La fermentation par la dégradation des substances organiques en présence de bactéries et en absence d'oxygène.
- ✓ La décomposition des composés organiques par des bactéries photosynthétiques [19].

II.1.5. Production d'hydrogène par dissociation de l'eau :

II.1.5.1. Décomposition thermochimique :

À des températures élevées (1500 (°C)) et selon la pression utilisée, l'eau peut se décomposer en hydrogène et en oxygène gazeux. Cependant, ce procédé présente l'inconvénient d'un risque d'explosion en raison des conditions extrêmes requises.

Un scientifique japonais nommé Nakamura [20] a réalisé des expériences en utilisant une source solaire pour chauffer de la magnétite (Fe_3O_4) dans un concentrateur solaire situé dans une région très ensoleillée. La magnétite se transforme en oxyde ferreux (FeO) appelé la wustite. Ensuite, Nakamura a fait réagir la wustite avec de l'eau, ce qui produit de l'hydrogène et régénère la magnétite. Cependant, il convient de noter que ces procédés peuvent également générer des déchets polluants qui nécessitent des traitements appropriés pour préserver l'environnement.

Il est important de développer des méthodes de production d'hydrogène qui soient à la fois efficaces et respectueuses de l'environnement. La gestion adéquate des déchets générés par ces procédés est un aspect essentiel à considérer pour minimiser leur impact écologique

II.1.5.2. Procédés photo-électrochimiques :

Des recherches récentes se concentrent sur la production d'hydrogène en utilisant la décomposition de l'eau sous l'effet de l'énergie solaire, sans nécessiter d'apport d'énergie externe. Cette approche utilise des photo-catalyseurs tels que le dioxyde de titane (TiO_2) [21]. Cependant, le rendement de ce procédé est actuellement faible et coûteux par rapport au reformage catalytique du gaz naturel à la vapeur d'eau.

Des efforts de recherche sont en cours pour développer de nouveaux semi-conducteurs plus rentables [22]. L'objectif est d'améliorer l'efficacité et la rentabilité de la production d'hydrogène par photo-catalyse, afin de rendre cette méthode plus compétitive par rapport aux procédés traditionnels. Ces avancées technologiques pourraient permettre d'exploiter de manière

plus efficace l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène, contribuant ainsi à des solutions énergétiques plus durables et respectueuses de l'environnement.

II.1.5.3. Electrolyse de l'eau :

L'électrolyse de l'eau est un processus électrochimique dans lequel un courant électrique continu est appliqué à travers un électrolyte liquide ou solide, en utilisant deux électrodes séparées par une membrane. Ce processus conduit à la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène [23].

Lorsque le courant électrique passe à travers l'électrolyte, une réaction chimique se produit à chaque électrode. À l'électrode positive, appelée l'anode, l'oxygène est produit par oxydation de l'eau. À l'électrode négative, appelée la cathode, l'hydrogène est produit par réduction de l'eau. La membrane séparant les deux électrodes permet le passage des ions nécessaires pour la réaction, tout en empêchant le mélange des gaz produits.

L'électrolyse de l'eau est une méthode couramment utilisée pour produire de l'hydrogène à partir d'une source d'électricité. Elle offre la possibilité de produire de l'hydrogène de manière propre et durable, en utilisant de l'eau comme matière première et en évitant les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, l'efficacité et le coût de ce processus sont des aspects importants qui nécessitent encore des améliorations pour rendre l'électrolyse de l'eau plus compétitive à grande échelle.

✓ Dans une solution alcaline, les réactions suivantes s'effectuent:



Dans une solution acide :



La tension de dissociation de l'eau s'exprime par la formule selon Nernst:

$$E_{rev} = E_0 + (RT/2) \ln P_{H_2} P_{O_2}^{1/2} / a_{H_2O} \quad (II. 7)$$

Où: R constante molaire des gaz (8,314 (J. mol⁻¹ ·K⁻¹)).

$T(K)$ température thermodynamique.

F constante de Faraday ($96487 \text{ (C} \cdot \text{mol}^{-1} \text{)}$).

E_0 (V) tension de décomposition réversible dans les conditions normales.

$P_{H_2} = P_{O_2} = P$ (Pa) pression de service de l'électrolyseur.

a_{H_2O} représente l'activité de l'eau. Par conséquent, la tension de décomposition réversible dans les conditions normales est égale à 1.229 (V) [24].

La tension pratique d'électrolyse est supérieure à la tension réversible à cause de l'ensemble des irréversibilités présentes dans l'électrolyse [25]:

$$U = E_{rev} + \eta_a + \eta_c + R_0 I \quad (II. 8)$$

E_{rev} : Tension réversible (V),

η_c : Surtension cathodique (V),

η_a : Surtension anodique (V),

I : Intensité de cellules (A). R_0 : Résistance électronique et ionique de l'ensemble électrodes membranes électrolyte (Ω).

On peut distinguer l'ensemble des résistances dans la cellule d'électrolyse en:

- Résistances des réactions électrochimiques: dues à surtensions nécessaires pour satisfaire les énergies d'activation à produire l'hydrogène sur la cathode et l'oxygène sur la surface de l'anode
- Transport- résistances relatives : incluant des résistances de transport ionique, résistances physiques dans le procès d'électrolyse tels que les bulles des gaz d' O_2 et l' H_2 sur les surfaces d'électrode, résistances de la membrane et les résistances électriques du bain.
- Résistance électrique: La résistance des conducteurs donnée par loi d'Ohm $R = L/K.S$ où L , K et S sont la longueur, la conductivité spécifique et la section de conducteur respectivement [26].

Actuellement l'électrolyse représente seulement 4 (%) de la capacité totale de la production d'hydrogène [27]. Pour produire de l'hydrogène très pur, l'électrolyse de l'eau est un procédé de choix. L'inconvénient majeur de son utilisation à cette fin réside dans le prix de revient dû à la consommation d'énergie relativement élevé. Des recherches intensives ayant pour le but à développer de nouveau procédé plus économique.

II.1.5.4. Différents types d'électrolyseurs de l'eau :

Les technologies d'électrolyseurs de l'eau modernes en voie de développement se distinguent, d'une côté par le type de structure (mono-polaire ou bi-polaire) et d'autre côté par le type d'électrolyte (alcalin, PEM et PCFC ou SOFC). L'électrolyse s'effectue dans un système électrochimique appelé cellule d'électrolyse, constituée de deux électrodes, une anode et une cathode, placées de part et d'autre d'un conducteur ionique (électrolyte). Les deux électrodes sont connectées à un générateur de courant, comme montrée dans figure II.4, la réaction globale d'électrolyse de l'eau peut avoir lieu dans différents systèmes. Le milieu électrolytique peut être acide ou alcalin et la réaction peut également avoir lieu à haute température. En fonction des conditions opératoires, les réactions d'oxydation et de réduction ayant lieu aux électrodes se distinguent, mais elles mènent aux mêmes produits. Toutefois, pour que ces réactions aient lieu, les matériaux composant ces systèmes électrochimiques doivent être adéquats.

Ces trois types de technologie d'électrolyse ont chacun ses privilèges et ses inconvénients

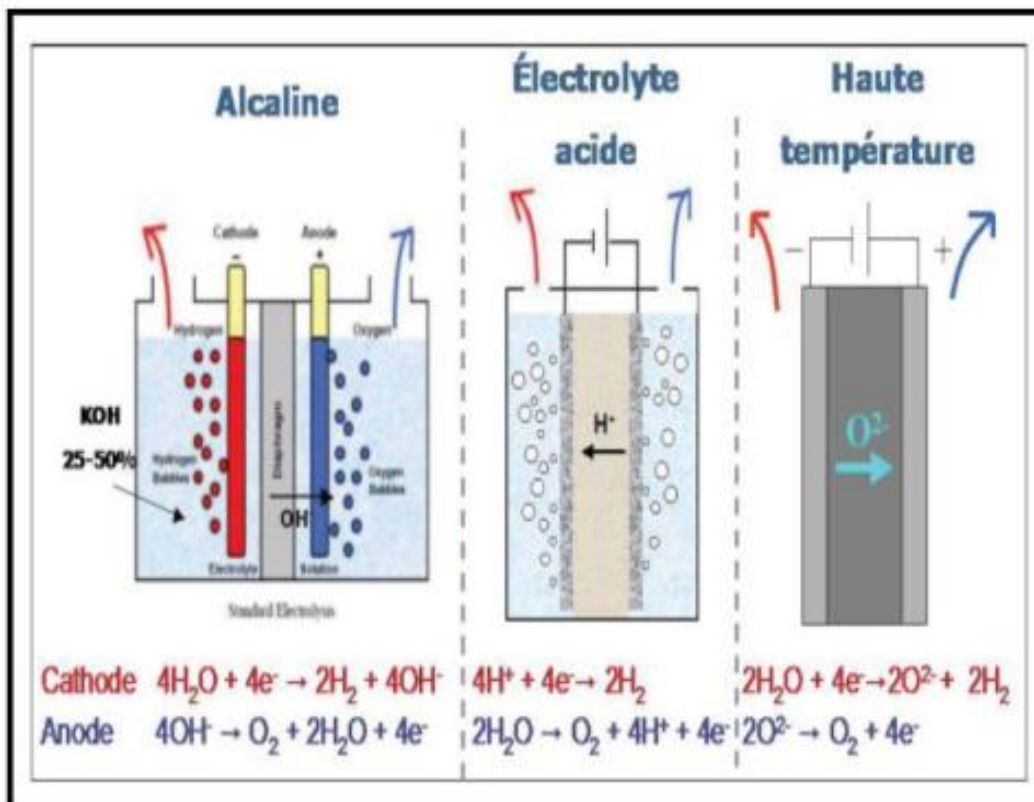


Figure II. 3: Schéma des différents systèmes électrochimiques pour la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau [28].

Tableau II. 2 : Les avantages et les inconvénients des différentes technologies d'électrolyse de l'eau [29].

Électrolyse en milieu basique.	Électrolyse à haute température.	Électrolyse en milieu acide PEM.
Avantages		
<ul style="list-style-type: none"> - Catalyseurs non nobles. - Technique opérationnelle aisée. - Stabilité à long terme. - Procédés relativement moins coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'énergie bas. - Catalyseurs moins chers. - Mise en marche à haute pression. - Grande efficacité 	<ul style="list-style-type: none"> Densité de courant élevée. - Grande efficacité - Des gaz très purs. - Système compacte.
Inconvénients		
<ul style="list-style-type: none"> - Des densités de courant faibles. - Utilisation d'un diaphragme. - Liquide d'électrolyse corrosif. 	<ul style="list-style-type: none"> - Moins durable. - Ses matériaux sont fragiles. - Source de chaleur. - Phase d'essai. 	<ul style="list-style-type: none"> - Des catalyseurs nobles. - Coût élevé de l'électrolyse solide. - Milieu corrosif.

II.1.5.4.1. Electrolyseurs alcalins :

Les bains d'électrolyse alcaline de l'eau sont préférés aux bains acides en raison des problèmes de corrosion. Les électrodes en nickel présentent une bonne stabilité dans les bains alcalins, ce qui fait de l'électrolyse alcaline la technologie la plus répandue dans l'industrie. Les systèmes d'électrolyse alcaline se présentent sous forme de modules de petite à moyenne capacité (0,5-800 (Nm³ /h) d'hydrogène). Ces modules comprennent des cellules d'électrolyse, une unité de traitement de l'eau, une unité de séchage, une unité de purification de l'hydrogène et un compresseur [25].

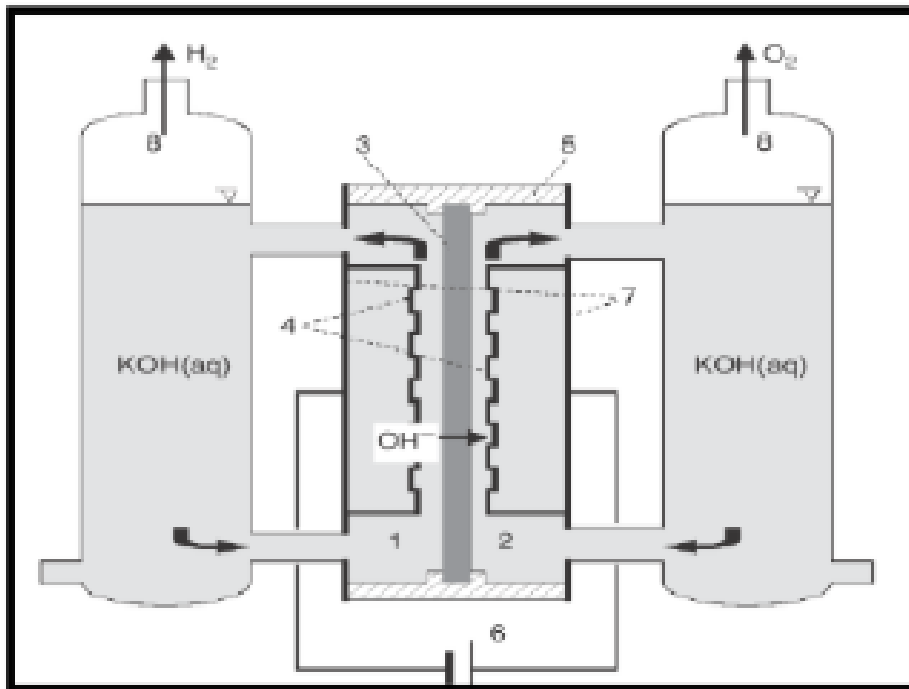


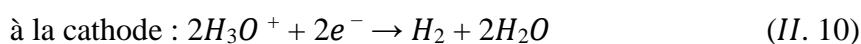
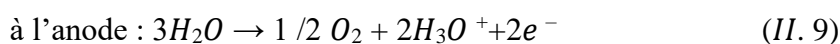
Figure II. 4. Schéma d'un électrolyseur alcalin: Compartiment anodique (1), compartiment cathodique (2), diaphragme (3), électrodes (4), cadre de la cellule (5), alimentation en courant continu (6), endplates (7), séparateurs du gaz (8) [30].

La solution de KOH est choisie comme électrolyte en raison de sa bonne conductivité, et la densité de courant typique est généralement située entre 100 et 300 (mA/cm²). Cependant, la production d'eau reste coûteuse en raison de sa consommation énergétique élevée, qui se situe entre 4,5 et 5 (kWh) par (m³) d'hydrogène [31].

Ces coûts énergétiques élevés sont un défi majeur pour l'électrolyse alcaline, et des efforts sont déployés pour développer des technologies et des procédés plus efficaces qui permettraient de réduire la consommation d'énergie lors de la production d'hydrogène par électrolyse. L'amélioration de l'efficacité énergétique de l'électrolyse alcaline est essentielle pour rendre cette méthode plus compétitive et économiquement viable à grande échelle.

II.1.5.4.2. Electrolyse acide PEM (Proton Exchange Membrane) :

La propriété principale de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide (membrane polymère) qui assure ainsi la conduction des ions hydronium (H₃O⁺) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H₂ et O₂), selon les réactions ci-dessous :



Cette membrane est constituée de fluoro-polymère solide comprenant des groupements acides sulfoniques (HSO_3) qui se transforment aisément en leur base (en ions SO_3^-) [22].

Les privilèges de cette méthode sont une mise en marche simple, des problèmes de corrosion limités, des performances notables, en plus elle est adaptable pour les sources d'énergie renouvelables. Néanmoins le coût élevé des catalyseurs à base de métaux nobles et les membranes mènent à des électrolyseurs PEM plus chers que les électrolyseurs alcalins [32].

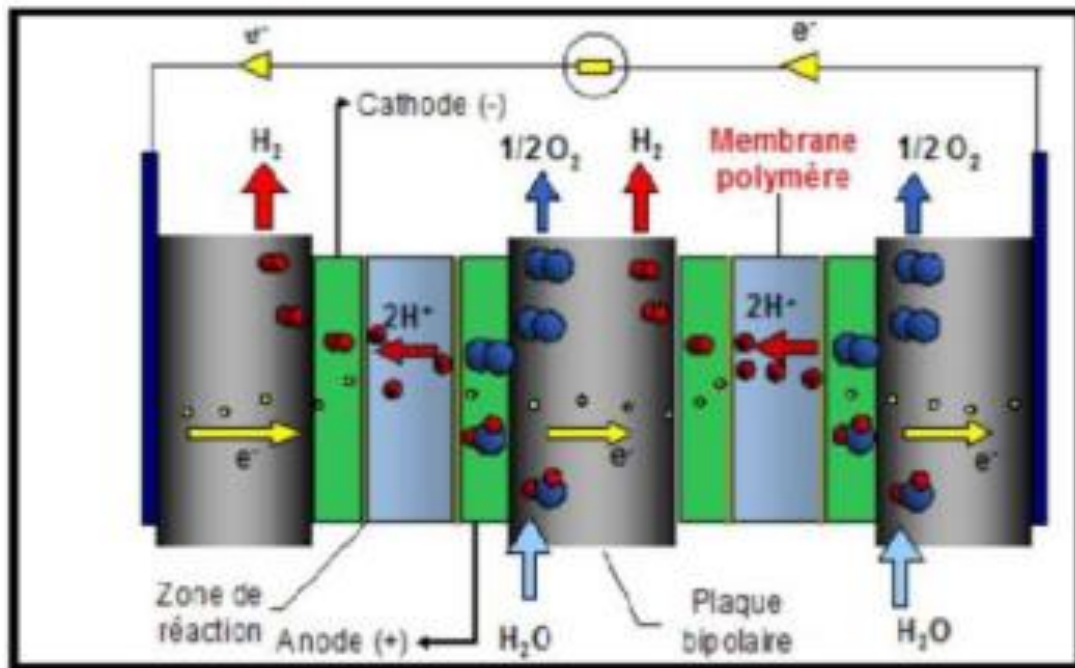


Figure II. 5: Schéma de principe de l'électrolyse PEM.

II.3.5.4.3.Électrolyse à haute température (PCFC ou SOFC) :

L'électrolyse à haute température est plus efficace que le procédé à température ambiante puisqu'une partie de l'énergie nécessaire à la réaction est apportée via la chaleur, moins chère. Ce type de technologie est la pile à combustible de type PCFC ou SOFC (solid oxide fuel cell) (Figure II.7), qui fonctionne dans deux gammes de température 400–600 (°C) et 650–1000 (°C) respectivement avec un rendement qui peut atteindre plus que 80 (%), Il peut être alimenté par l'électricité et par la chaleur en même temps, ce qui le place comme centre d'intérêt important dans des plusieurs groupes de recherche.

anodes sont à base de chromite de lanthane, soit de manganites, ou bien des matériaux céramiques qui annulent le problème de corrosion sauf que la fragilité de ces matériaux limite la taille des cellules concevables [22].

II.2. Stockage de l'hydrogène :

II.2.1. Stockage d'hydrogène à l'état gazeux

L'hydrogène, dans son état gazeux, est inflammable, très explosif et avec une densité extrêmement faible. Il possède un domaine d'inflammabilité dans l'air de 4% à 75% (de 4% à 85% dans l'oxygène gazeux et de 4.1% à 89 % dans le chlore gazeux) [16], une énergie minimale d'inflammation est de 0.02 mJ (13 fois inférieure à celle du Propane). Par contre, sa température d'auto inflammation est de 585°C, la vitesse de combustion dans l'air à la pression atmosphérique et la température ambiante est entre 2.65 et 3.25 m/s. [33]

Actuellement le stockage d'hydrogène à l'état gazeux sous forme comprimée est le plus utilisé. Il peut être stocké sous deux formes différentes : Soit à basse et moyenne pression de l'ordre de 200 bars pour des applications nomades comme étalon utilisé pour le calibrage de certains appareils, ou à haute et à très haute pressions de 350 à 700 bars qui consiste à utiliser des microsphères en verre ou des petites bouteilles de 10 L et jusqu'à de grands réservoirs de 10 000 L. Le tableau suivant présente une comparaison entre l'hydrogène gazeux à l'état libre et comprimé.

	P (bar)	T (K)	Cm (%)	Cv (g/dm ³)
Gaz libre	1,013	293	-	0,084
Gaz comprimé Moyenne pression	220	298	1,5	15
Gaz comprimé Haute pression	350 700	298 298	4 ~ 5 5 ~ 6	24 40

Tableau II. 3: Comparaison entre l'hydrogène gazeux à l'état libre et comprimé. [19]

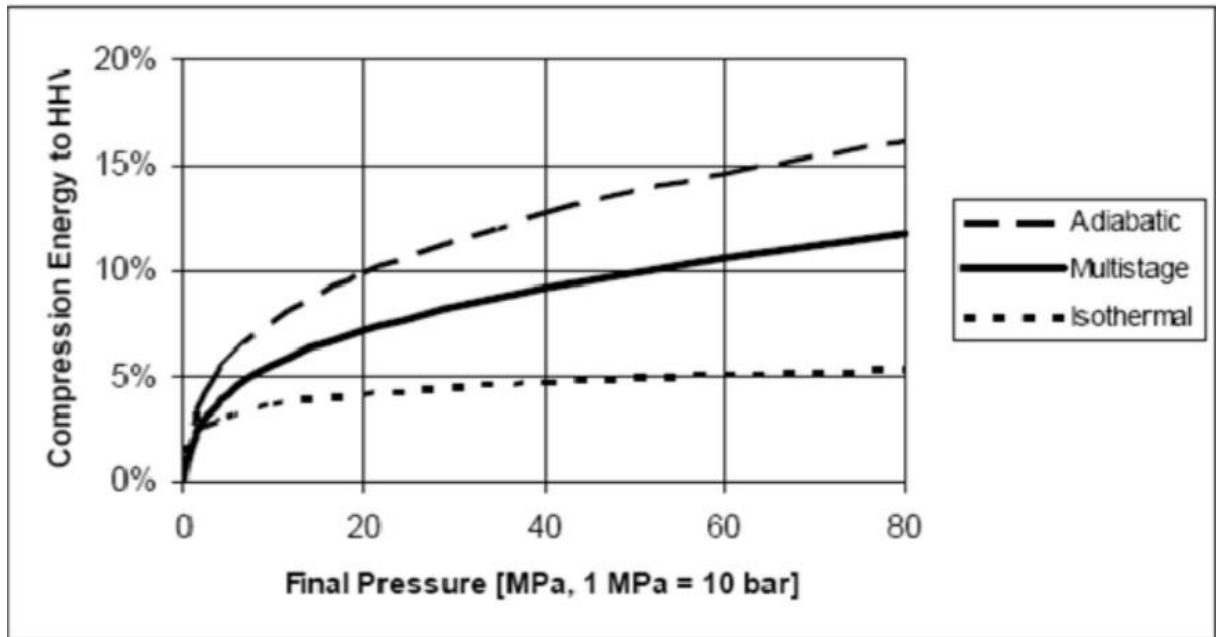


Figure 7 : Energie requise pour la compression par rapport à la quantité d'énergie stockée (10% du PCI). [19]

Cette technique présente des inconvénients tels que :

- Un coût global élevé ;
- Une faible densité volumétrique ;
- Une perte en énergie de l'ordre de 10% ;
- Un problème de sécurité.

II.2.2. Stockage d'hydrogène Sous forme liquide :

En janvier 1884 Sigismund Wroblewski, de l'Université de Cracovie, réussit la première expérience sur liquéfaction de l'hydrogène. Il constate que le gaz refroidi dans un tube de verre capillaire au point d'ébullition de l'oxygène, et rapidement détendu de 100 à 1 atmosphère [27], et c'est l'écosais James Dewar après plusieurs essais infructueux réussit, le 12 mai 1898, à liquéfier l'hydrogène et récupérer 20 centimètres cubes de ce liquide en un bain statique stable. [28-29] Dans des conditions de température compris entre 10 K et 30 K et de pression entre 0.01 et 10 MPa, L'hydrogène peut prendre la forme liquide comme il est montré dans le diagramme de phase de l'hydrogène présenté sur la Figure suivante.

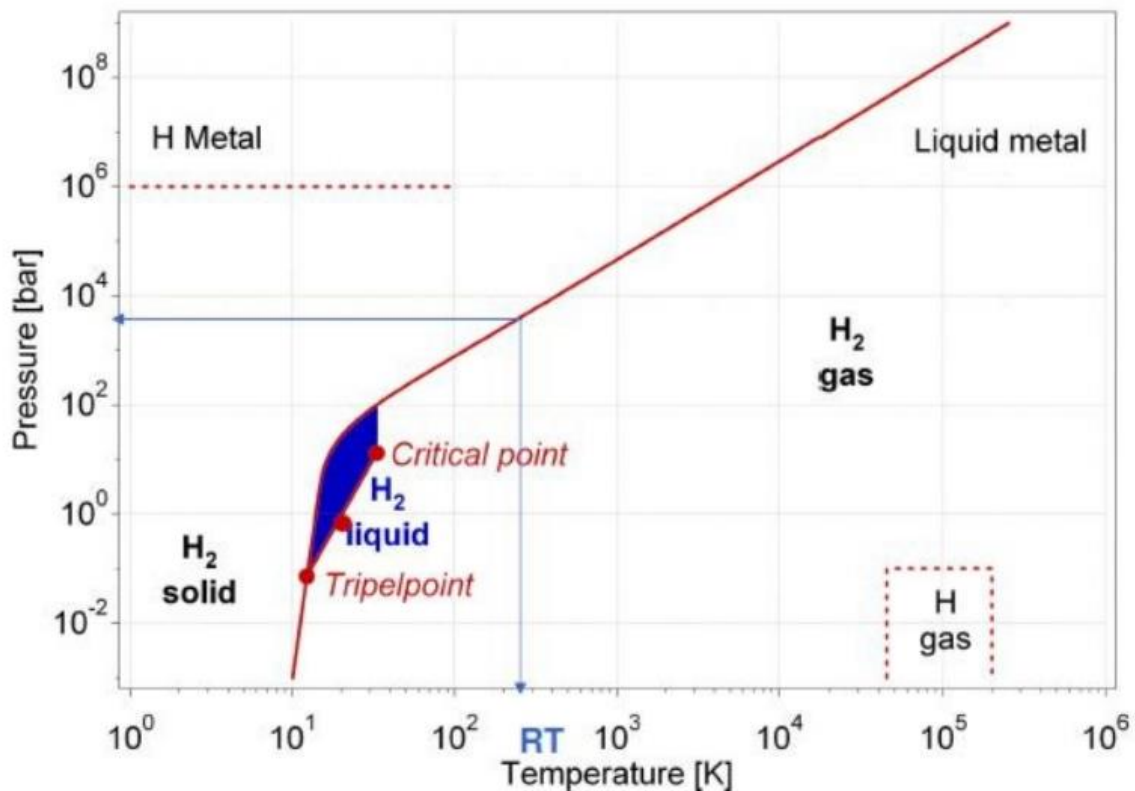


Figure 8 : Diagramme de phase de l'hydrogène. [35]

Les procédés les plus simples de liquéfaction s'appuient sur les cycles de Linde ou de Joule-Thompson. La liquéfaction par le cycle de Linde exige un refroidissement préalable au moyen d'azote liquide ou bien l'utilisation d'une turbine pour refroidir la vapeur à haute pression. Le cycle de Claude ainsi que celui de Haylandt sont aussi utilisés ; ils utilisent des échangeurs de chaleur supplémentaires et de turbines pour diminuer le travail de liquéfaction.

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide nécessite des réservoirs cryogéniques performants. Le réservoir a souvent deux parois séparées par un espace pour éviter les pertes thermiques par convection. Cet espace peut être sous vide ou composé de matériaux super-isolants ou enfin rempli d'air liquide. Ces réservoirs ont une forme généralement sphérique afin de minimiser le rapport surface sur volume et réduire du même coup le transfert de chaleur et en acier mais des matériaux composites sont développés afin de l'alléger.

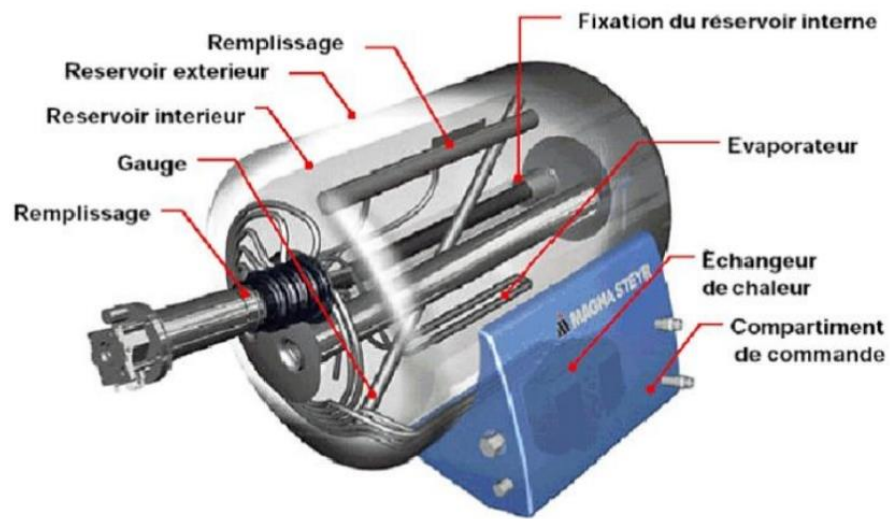


Figure 9 : Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide développé par Magna Steyr.

[36]

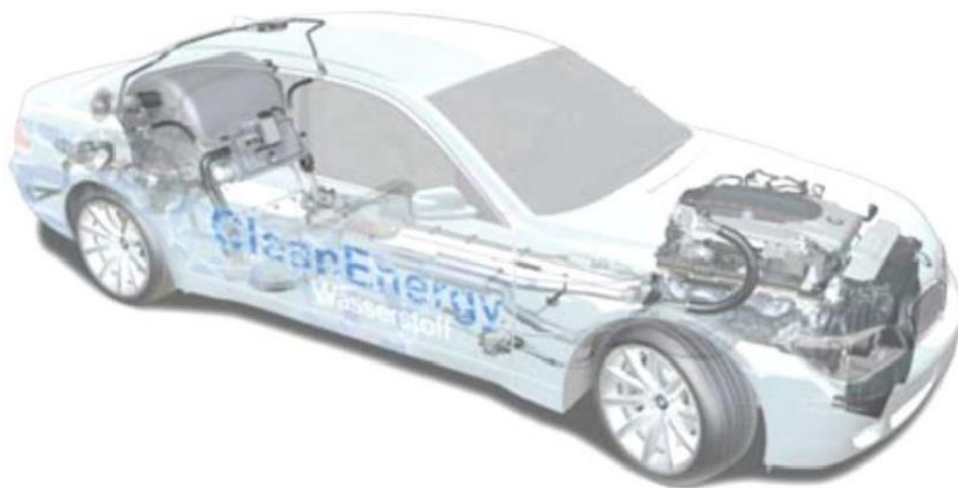


Figure 10: Véhicule développé par BMW (« Hydrogen 7 series ») équipé d'un système de stockage d'hydrogène liquide. [37]

Cette technique est totalement maîtrisée, notamment pour des applications spatiales ou de stockage stationnaire (hôpitaux, station-service). Malgré la capacité volumique soit certes importante, mais cette technologie présente deux grands inconvénients. Le premier est que l'énergie de liquéfaction est très élevée (elle demande environ 30% de l'énergie de l'hydrogène utilisable). Le second est la conservation de l'hydrogène (la très faible température de refroidissement est -253 °C).

Stockage sous forme solide :

Le stockage de l'hydrogène sous forme solide, consiste à conserver l'hydrogène au sein d'un autre matériau via des fortes liaisons (chimisorption : l'hydrogène moléculaire s'absorbe par combinaison chimique réversible avec les atomes composants le matériau métallique) ou des faibles liaisons (physisorption : adsorption de l'hydrogène à la surface du solide sous l'effet de forces intermoléculaires) [38] .

Le stockage d'hydrogène solide peut être classé sous plusieurs formes suivant l'organigramme présenté sur la figure suivante :

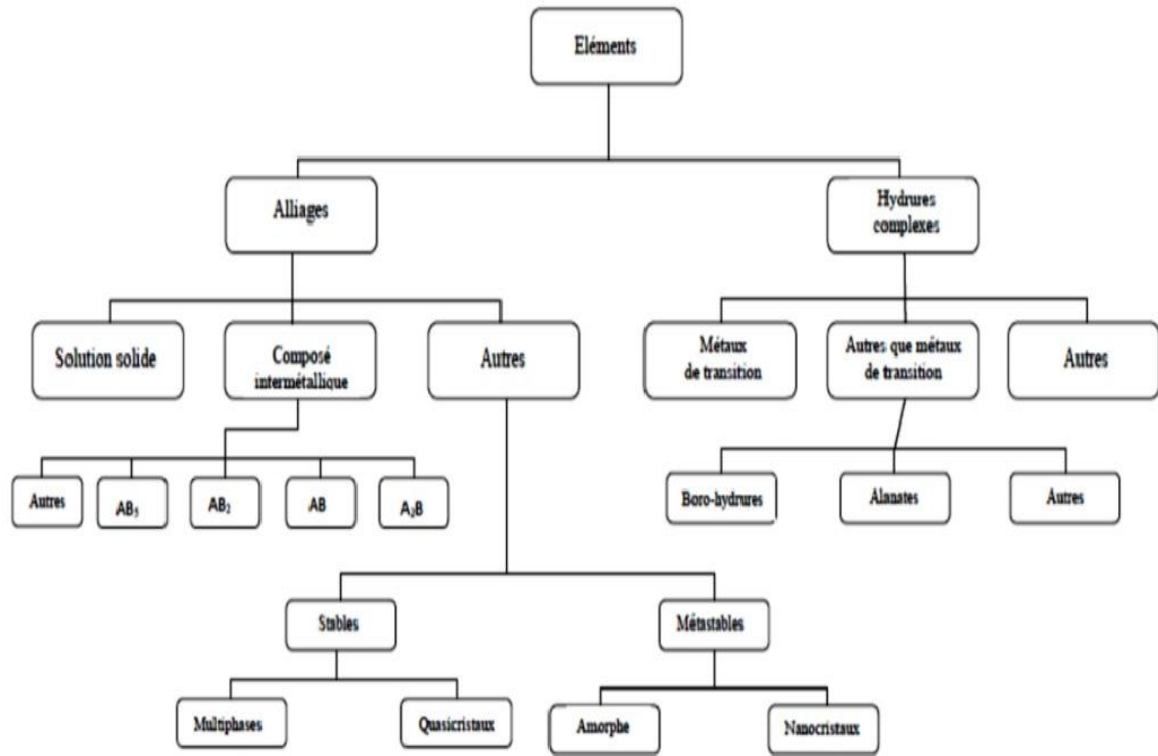


Figure 11: Classification des éléments de stockage solide d'hydrogène. [39]

Chapitre III :

L'application d'hydrogène vert sur les piles combustibles

III. Utiliser l'énergie hydrogène pour les batteries:

L'utilisation de l'énergie hydrogène dans le contexte des batteries peut se référer à plusieurs technologies et concepts, notamment :

III.1. Les piles à combustible à hydrogène (Fuel cells) :

Les piles à combustible à hydrogène, également connues sous le nom de fuel cells en anglais, sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'hydrogène et l'oxygène en électricité et en eau, sans combustion, pour produire de l'énergie. Ces piles fonctionnent sur le principe de l'électrolyse inversée. Elles ont été développées pour offrir une source d'électricité propre et efficace, avec des applications potentielles dans une large gamme de secteurs, y compris le transport, les applications stationnaires, les télécommunications, et plus encore.

Le fonctionnement d'une pile à combustible repose sur une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène. À l'anode de la pile, l'hydrogène est oxydé en ions hydrogène (protons) et en électrons. Les protons migrent alors à travers un électrolyte vers la cathode, tandis que les électrons circulent à travers un circuit externe, créant un courant électrique qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou charger une batterie. À la cathode, les protons, les électrons et l'oxygène se combinent pour former de l'eau. [40]

Les piles à combustible offrent plusieurs avantages par rapport aux technologies de génération d'électricité conventionnelles. Elles produisent de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre, de polluants atmosphériques ou de particules nocives, ce qui en fait une source d'énergie propre. De plus, elles sont très efficaces, avec des rendements globaux supérieurs à ceux des moteurs à combustion interne traditionnels. Elles sont également plus silencieuses et moins sujettes à l'usure mécanique, ce qui réduit les coûts de maintenance.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les piles à combustible à hydrogène présentent encore des défis à relever. L'approvisionnement en hydrogène reste une préoccupation, car la plupart de l'hydrogène actuellement produit provient de sources non renouvelables telles que le gaz naturel. De plus, les coûts de fabrication des piles à combustible demeurent relativement élevés, bien que des progrès continus soient réalisés pour réduire ces coûts et améliorer la durabilité et la fiabilité des piles.

Malgré ces défis, les piles à combustible à hydrogène continuent de susciter un grand intérêt en raison de leur potentiel à contribuer à la transition vers un système énergétique plus

propre et durable. Avec des investissements supplémentaires dans la recherche, le développement et le déploiement de cette technologie, les piles à combustible à hydrogène pourraient jouer un rôle important dans la réalisation d'un avenir énergétique plus durable et plus respectueux de l'environnement.

III.2. Les batteries à hydrogène métallique :

Les batteries à hydrogène métallique représentent une approche innovante dans le domaine du stockage d'énergie. Contrairement aux batteries traditionnelles qui stockent l'énergie sous forme chimique dans des matériaux intercalaires, les batteries à hydrogène métallique stockent l'hydrogène directement dans un matériau solide, généralement un métal.

Le concept de batterie à hydrogène métallique repose sur l'absorption et la désorption de l'hydrogène par un matériau métallique, souvent un alliage de métaux. Lorsque de l'hydrogène est introduit dans la batterie, il est adsorbé dans la structure cristalline du métal, ce qui entraîne une augmentation de la masse de la batterie. Lorsque de l'électricité est nécessaire, l'hydrogène est désorbé du matériau métallique, libérant ainsi de l'énergie électrique.

Les batteries à hydrogène métallique présentent plusieurs avantages potentiels par rapport aux batteries traditionnelles. Tout d'abord, elles peuvent offrir une densité énergétique plus élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent stocker plus d'énergie par unité de poids ou de volume. Cela les rend potentiellement plus adaptées aux applications nécessitant une grande autonomie, telles que les véhicules électriques ou les systèmes de stockage d'énergie pour les énergies renouvelables. [41]

De plus, les batteries à hydrogène métallique pourraient bénéficier d'une recharge plus rapide par rapport aux batteries lithium-ion, car la recharge implique simplement la réintroduction d'hydrogène dans le matériau métallique. Cela pourrait réduire considérablement les temps de charge et améliorer la commodité des véhicules électriques.

Cependant, malgré leur potentiel, les batteries à hydrogène métallique sont encore au stade de la recherche et du développement. Des défis importants doivent être surmontés, notamment la sélection de matériaux appropriés pour les anodes et les cathodes, la sécurité et la durabilité des batteries, ainsi que la mise en œuvre de procédés de production et de stockage d'hydrogène efficaces et économiques.

Néanmoins, avec des progrès continus dans ce domaine et des investissements dans la recherche et le développement, les batteries à hydrogène métallique pourraient éventuellement devenir une composante importante du paysage énergétique futur, offrant des solutions de stockage d'énergie plus avancées, durables et efficaces.

III.3. Les piles combustibles à hydrogène solide (Solid oxide fuel cells - SOFC) :

Les piles à combustible à hydrogène solide (SOFC - Solid Oxide Fuel Cells) sont des dispositifs électrochimiques qui convertissent directement l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, en utilisant un électrolyte solide, souvent en céramique, pour transporter les ions. Les SOFC fonctionnent à des températures élevées, généralement entre 500 et 1000 degrés Celsius, ce qui permet une haute efficacité énergétique et une utilisation polyvalente des combustibles.

Le fonctionnement des SOFC repose sur une série de réactions électrochimiques qui se déroulent aux interfaces entre les différents composants de la pile. À l'anode, l'hydrogène est oxydé pour produire des ions hydrogène (protons) et des électrons. Les protons migrent alors à travers l'électrolyte solide vers la cathode, tandis que les électrons circulent à travers un circuit externe, générant un courant électrique qui peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou charger des batteries. À la cathode, les protons, les électrons et l'oxygène se combinent pour former de l'eau.

Les SOFC offrent plusieurs avantages par rapport à d'autres types de piles à combustible. Tout d'abord, leur haute température de fonctionnement permet une utilisation polyvalente des combustibles, y compris l'hydrogène, le méthane, le propane et même le gaz naturel. Cela les rend adaptées à une gamme étendue d'applications, de la production d'électricité stationnaire à grande échelle aux applications de cogénération dans les installations industrielles.

De plus, les SOFC offrent un rendement énergétique élevé, supérieur à celui des piles à combustible à basse température, car la chaleur résiduelle peut être récupérée et utilisée pour des applications de cogénération ou de chauffage. En outre, les SOFC sont généralement robustes et durables, avec une longue durée de vie opérationnelle et une faible dégradation des performances au fil du temps.

Cependant, malgré leurs avantages, les SOFC présentent également des défis à relever. Le principal défi est lié à la haute température de fonctionnement, qui nécessite des matériaux de construction résistants à la chaleur et des procédés de fabrication complexes. De plus, les coûts de production élevés et la nécessité de systèmes de gestion thermique efficaces peuvent limiter leur application dans certains contextes. [42]

Malgré ces défis, les piles à combustible à hydrogène solide continuent de susciter un grand intérêt en raison de leur potentiel à fournir une source d'électricité propre, efficace et polyvalente. Avec des investissements continus dans la recherche, le développement et le déploiement de cette technologie, les SOFC pourraient jouer un rôle important dans la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

III.4. Les systèmes de stockage hybrides :

Les systèmes de stockage hybrides sont des installations qui combinent plusieurs technologies de stockage d'énergie pour maximiser l'efficacité, la fiabilité et la flexibilité. Ces systèmes sont conçus pour répondre à la demande énergétique de manière plus efficace en intégrant différentes solutions de stockage d'énergie, telles que les batteries, les supercondensateurs, les générateurs d'hydrogène et les piles à combustible. Voici quelques exemples de systèmes de stockage hybrides et leurs avantages :

1. **Batteries et générateurs d'hydrogène :** Dans ce type de système, les batteries sont utilisées pour répondre à la demande énergétique instantanée et fournir une alimentation rapide, tandis que les générateurs d'hydrogène convertissent l'énergie excédentaire en hydrogène, stockant ainsi l'énergie à plus long terme. L'hydrogène peut ensuite être utilisé dans des piles à combustible pour générer de l'électricité lorsque la demande est élevée ou lorsque les batteries sont déchargées.
2. **Batteries et supercondensateurs :** Les supercondensateurs, également appelés supercapacités, sont utilisés en combinaison avec des batteries pour fournir une réponse rapide aux fluctuations de la demande énergétique. Les supercondensateurs peuvent stocker et libérer de l'énergie rapidement, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant une puissance de crête élevée ou une régulation de fréquence rapide du réseau électrique. [40]
3. **Batteries et énergies renouvelables :** Les systèmes de stockage hybrides peuvent également être associés à des sources d'énergie renouvelable telles que le solaire et

l'éolien. Les batteries peuvent stocker l'énergie produite par ces sources intermittentes lorsque la demande est faible, puis la libérer lorsque la demande est élevée ou lorsque les sources renouvelables ne sont pas disponibles.

4. **Stockage thermique et batteries :** Dans certains cas, les systèmes de stockage hybrides peuvent combiner le stockage thermique avec les batteries pour une utilisation efficace de la chaleur et de l'électricité. Par exemple, l'électricité produite par des panneaux solaires peut être utilisée pour chauffer un fluide caloporteur dans un système de stockage thermique, qui peut ensuite être utilisé pour fournir de l'énergie thermique et électrique lorsque cela est nécessaire.

Les avantages des systèmes de stockage hybrides incluent une meilleure utilisation des ressources énergétiques disponibles, une réduction des coûts opérationnels, une augmentation de la fiabilité du système et une plus grande flexibilité pour s'adapter aux fluctuations de la demande énergétique. Ces systèmes sont de plus en plus utilisés dans une variété d'applications, notamment les réseaux électriques, les véhicules électriques, les bâtiments commerciaux et les installations industrielles, pour contribuer à la transition vers un système énergétique plus durable et résilient. [42]

CONCLUSION

Conclusion :

En résumé, l'hydrogène vert représente une solution prometteuse pour relever les défis énergétiques et environnementaux actuels. En tant que source d'énergie propre et renouvelable, il a le potentiel de réduire significativement les émissions de carbone et de contribuer à la transition énergétique mondiale. La production d'hydrogène vert, principalement par électrolyse de l'eau utilisant des sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire et éolienne, offre une alternative durable aux méthodes traditionnelles de production d'hydrogène, souvent associées à des émissions de gaz à effet de serre.

Au cours de cette étude, nous avons examiné les bases théoriques de l'hydrogène vert et son importance dans le contexte actuel de la lutte contre le changement climatique. Nous avons exploré les différentes applications de l'hydrogène vert, notamment dans l'industrie, le transport et la production d'électricité. Une attention particulière a été accordée à l'utilisation de l'hydrogène dans les batteries à hydrogène, une technologie émergente qui promet de révolutionner le secteur des transports et de l'énergie.

Les défis liés à la production et au stockage de l'hydrogène vert restent importants. La nécessité de réduire les coûts de production et de développer des infrastructures de stockage et de transport sûres et efficaces est cruciale pour l'adoption à grande échelle de cette technologie. Toutefois, les avancées technologiques et les investissements croissants en recherche et développement laissent entrevoir un avenir où l'hydrogène vert pourra jouer un rôle central dans le mix énergétique global.

En conclusion, cette thèse a mis en lumière les opportunités et les défis associés à l'hydrogène vert. Les perspectives de développement de cette technologie sont prometteuses, à condition de surmonter les obstacles actuels. L'hydrogène vert pourrait devenir une composante clé de la transition énergétique, aidant à créer un avenir plus propre et plus durable pour les générations futures.

Contenu des Chapitres

Chapitre 1 : Concept et Importance de l'Hydrogène Vert Ce chapitre a abordé les bases théoriques de l'hydrogène vert, en définissant ce qu'il est et en expliquant ses différences par rapport à l'hydrogène conventionnel. Nous avons également exploré son importance environnementale et économique, ainsi que ses diverses applications dans différents secteurs.

Chapitre 2 : Techniques de Production et de Stockage de l'Hydrogène Vert Dans ce chapitre, nous avons examiné les différentes méthodes de production de l'hydrogène vert, telles que l'électrolyse de l'eau, et les défis techniques et économiques associés. Nous avons également abordé les technologies de stockage de l'hydrogène, incluant le stockage sous forme gazeuse, liquide et solide, et discuté des solutions possibles pour surmonter les obstacles actuels.

Chapitre 3 : Utilisation de l'Hydrogène dans les Batteries et Avenir de l'Hydrogène Vert Le dernier chapitre s'est concentré sur l'étude des batteries à hydrogène, en expliquant leur fonctionnement, leurs avantages et inconvénients, et leurs applications potentielles. Nous avons également analysé les perspectives du marché de l'hydrogène vert et les politiques nécessaires pour encourager son développement, mettant en lumière les opportunités futures et les défis à relever pour intégrer l'hydrogène vert dans notre système énergétique global.

Références

Bibliographiques

Conclusion

- [1]. William Lee Jolly, "Hydrogen" dans Encyclopædia Britannica, 2019. Disponible depuis:
- [2]. Michael Ball et al., "The future of hydrogen – opportunities and challenges". International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34, 615-627.
- [3]. International Energy Agency, "The Future of Hydrogen", 2019.
- [4]: R. Boudries, R. Dizène, A. Khellaf and M. Belhamel, «HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER », Editor: Aiden M. Harris, © 2010 Nova Science Publishers, Inc
- [5] E. Amores E. Amores, M. S. z-Molina, M. Sánchez; Effects of the marine atmosphere on the components of an alkaline water electrolysis cell for hydrogen production; Results in Engineering (2021) 10: 100235.
- [6] S. Anwar, F. I. Khan, Y. Zhang, A. Djire ; Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis; International Journal of Hydrogen Energy (2021) 46 :32284-32317.
- [7] D. D'Arc de Fatima Palhares, L. G. M. Vieira, J. J. R. Damasceno; Hydrogen production by a low-cost electrolyzer developed through the combination of alkaline water electrolysis and solar energy use; international journal of hydrogen energy (2018) 43 : 4265
- [8] P. C. Okonkwo, E. M. Barhoumi, I. B. Mansir, W. Emori, H. Bhowmik ; Effect of electrode material on the hydrogen production using a low-cost home-made alkaline electrolyzer; Vacuum (2022) 198 : 110878
- [10] Mémoire sur la Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance Énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie
- [12] CA. Grimes, OK. Varghese, S. Ranjan, "Light, Water and Hydrogen", Springer (2008).
- [13] G. Bourbonneux, Production d'hydrogène ; Le Raffinage du Pétrole, T3 Procédés de transformation, (1998) 463-515
- [14] O. Megret, L. Hubert, M. Calbry, E. Trably, H. Carrere, D. Garcia-Bernet, N. Bernet. Rapport final production d'hydrogène à partir de déchets état de l'art et potentiel d'émergence Septembre 2015.
- [15] P. Marion, S. Vinot, Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles, Mémento de l'Hydrogène, Fiche 311, AFH2, 2009.

Conclusion

- [16] D. Mathieu, JF. Mastrangelo, F. Valmage: *Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques?»*, Ecole des Ponts, Paris Tech, Mars 2004.
- [17] J. Legrand, *Mémento de l'hydrogène*, Fiche 3.3.2, AFH2.
- [18] H. Derbal, M. Belhamel et A. M'Rouï, *L'hydrogène, vecteur énergétique solaire*, *Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07- Tlemcen (2007)* 235-47. [19] Julien Labbe, *Thèse de Doctorat : L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage pour systèmes photovoltaïque isolés école de mines de paris*, Ecole de Mines de Paris (2006).
- [20] T. Nakamura, *Sol. Energy*, Vol. 19 (1977) 467
- [21] T. Sreethawong, S. Yoshikawa, *Int. J. Hydrogen Energy*, 31 (2006) 786.
- [22] TJ. Gardner, EP. Boesflug, CJ. Brinker, AG. Sault, AC. Tsai, JP. Collins, 'Hydrogen Production for Fuel Cells by Selective Dehydrogenation of Alkanes in Catalytic Membrane Reactors, Sandia, Report SAND99-0681, 1999.
- [23] DMF. Santos et al., *Quím. Nova*, 36 (2013) 1176.
- [24] A.Damien, *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés*, J.6366.1992.
- [25] O. Ulleberg, *Intl. J of Hydrogen*, vol. 28 (2003) 21.
- [26] K. Zeng, D. Zhang, *Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications.*, *Int. J. Prog., Energy and Combustion Science*, 36 (2010) 307- 26.
- [27] S. Dunn, *Hydrogen futures: Towards a sustainable energy system*. *Int. J. Hydrogen En.* 27(2002) 235–64.
- [28] E. Mayousse, *Production d'hydrogène, Développement et étude de composants optimisés pour l'électrolyse PEM*, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2010.
- [29] Marcelo Carmo, David L. Fritz, Ju`rgen Mergel, Detlef Stolten, *Review, A comprehensive review on PEM water electrolysis* *Int. J. Hydrogen En.*, 38 (2013)4 901-34.
- [30] M. Kaninski, S. Miulovic, G. Tasic, A. Maksic, V. Nikolic, *Int. J. Hydrogen En.*, 36(2011)5227-35.
- [31] T. Smolinka, *Water Electrolysis*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany 2009, Elsevier B.V.

- [32] Mémento de l'Hydrogène Fiche 3.2.1 Révision : Mai 2013.
- [33] -Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Fundamentals and Use of Hydrogen as a Fuel, New York: Wiley, pp. 631, 1992.
- [34] Ulf Bossel, Baldur Eliasson, Gordon Taylor, The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?, 15 April 2003.
- [35] W. B. Leung, N. H. March, and H. Motz, Primitive phase diagram for hydrogen, *Physics Letters*, vol. 56A, n°: 16, pp. 425-426, 1976.
- [38] B. Christophe, Hydrogène, *Technique de l'ingénieur*, n° : 1J6368.
- [39] G. Sandrock, A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 293–295, p. 877– 888, 20 December 1999
- [40] S. Dunn, Hydrogen futures: Towards a sustainable energy system. *Int. J. Hydrogen En.* 27(2002) 235–64.
- [41] E. Mayousse, Production d'hydrogène, Développement et étude de composants optimisés pour l'électrolyse PEM, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2010.
- [42] Marcelo Carmo, David L. Fritz, Jürgen Mergel, Detlef Stolten, Review, A comprehensive review on PEM water electrolysis *Int. J. Hydrogen En.*, 38 (2013)4 901-34. [38] M. Kaninski, S. Miulovic, G. Tasic, A. Maksic, V. Nikolic, *Int. J. Hydrogen En.*, 36(2011)5227-35.

Résumé

L'hydrogène vert est une solution prometteuse pour relever les défis environnementaux mondiaux et la nécessité de sources d'énergie renouvelables et durables. Il est produit par électrolyse de l'eau en utilisant des sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire et éolienne, ce qui le rend exempt d'émissions de carbone.

L'hydrogène vert a le potentiel de transformer le paysage énergétique mondial avec des applications variées. Dans le secteur des transports, il peut servir de carburant propre pour les véhicules électriques, les bus et les camions via des piles à combustible, contribuant ainsi à la réduction de la pollution et à l'amélioration de la qualité de l'air. Dans l'industrie, il peut être utilisé comme combustible et matière première, réduisant ainsi l'empreinte carbone des processus industriels. De plus, il offre des solutions pour le stockage de l'énergie renouvelable, atténuant les fluctuations de production des énergies solaire et éolienne.

Malgré ses nombreux avantages, l'hydrogène vert fait face à des défis importants, notamment le coût élevé de production et les infrastructures nécessaires pour son stockage et transport. Néanmoins, avec des investissements croissants dans la recherche et le développement et les progrès technologiques, l'avenir de l'hydrogène vert semble prometteur. Par des politiques de soutien et des investissements stratégiques, l'hydrogène vert pourrait devenir un élément clé du mix énergétique mondial, aidant à atteindre les objectifs de durabilité environnementale et à réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

Les mots-clés sont : hydrogène, énergie, batteries.

Abstract

Green hydrogen is a promising solution to address global environmental challenges and the need for renewable and sustainable energy sources. It is produced through the electrolysis of water using renewable energy sources such as solar and wind power, making it free of carbon emissions.

Green hydrogen has the potential to transform the global energy landscape with various applications. In the transportation sector, it can serve as a clean fuel for electric vehicles, buses, and trucks via fuel cells, thereby reducing pollution and improving air quality. In industry, it can be used as a fuel and raw material, thus reducing the carbon footprint of industrial processes. Additionally, it provides solutions for storing renewable energy, mitigating the fluctuations in production from solar and wind energy.

Despite its numerous advantages, green hydrogen faces significant challenges, including the high cost of production and the infrastructure needed for its storage and transportation. However, with increasing investments in research and development and continuous technological advancements, the future of green hydrogen looks promising. With supportive policies and strategic investments, green hydrogen could become a key component of the global energy mix, helping achieve environmental sustainability goals and reducing dependence on fossil fuels.

The keywords are: hydrogen, energy, batteries.

ملخص الدراسة:

الهيدروجين الأخضر هو حلاً واعدًا لمواجهة التحديات البيئية العالمية والحاجة إلى مصادر الطاقة المتجددة والمستدامة. يتم إنتاجه عن طريق تحليل الماء بواسطة الكهرباء باستخدام مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح، مما يجعله خاليًا من انبعاثات الكربون. الهيدروجين الأخضر لديه القدرة على تحويل المشهد الطاقوي العالمي بتطبيقات متعددة. في قطاع النقل، يمكن أن يكون كوقود نظيف للسيارات الكهربائية والحافلات والشاحنات من خلال الخلايا الوقودية، مما يقلل من التلوث ويحسن جودة الهواء. في الصناعة، يمكن استخدامه كوقود ومادة خام، مما يقلل من البصمة الكربونية للعمليات الصناعية. بالإضافة إلى ذلك، يوفر حلاً لتخزين الطاقة المتجددة، مما يخفف من التقلبات في إنتاج الطاقة الشمسية والرياحية. على الرغم من فوائده العديدة، يواجه الهيدروجين الأخضر تحديات كبيرة، بما في ذلك التكلفة العالية للإنتاج والبنية التحتية اللازمة لتخزينه ونقله. ومع ذلك، مع الاستثمارات المتزايدة في البحث والتطوير والتطور التكنولوجي المستمر، يبدو مستقبل الهيدروجين الأخضر مشرقاً. من خلال السياسات الداعمة والاستثمارات الاستراتيجية، يمكن للهيدروجين الأخضر أن يصبح جزءاً أساسياً من خليط الطاقة العالمي، مما يساعد في تحقيق أهداف الاستدامة البيئية وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجين، الطاقة، البطاريات

