



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 Août 1955 Skikda

Faculté de technologie
Département de génie des procédés

Laboratoire d'anticorrosion- Matériaux, Environnement et Structures
« LAMES »



Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master

**un projet pour obtenir le certificat d'une institution émergente dans le cadre de la
résolution ministérielle 1275**

Intitulé

**Production de l'Hydrogène vert par un procédé
électrochimique innovant – Hynnov Dz**

Hynnov DZ



Dirigé par :

Ahmed chekkat fatiha

Chiha mahdi

présenté par :

loucif malek

kouicem amira

Année universitaire 2022/2023

Remerciement

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous aider à mener ce travail et
à le concrétiser

Tout au long de cette année, nous avons reçus l'aide et l'attention de
beaucoup de monde et nous tenons particulièrement à les remercier

Nous souhaitons encore dire un très grand merci à nos directeurs de
recherche, **M.F Ahmed Chekkat** et **MAHDI Chiha**, docteur et Professeur à
l'université 20 aout 1955 Skikda, pour la qualité de son encadrement
exceptionnel et ces conseils, sans oublier bien sûr l'équipe de recherche
TSA & POA au sein du laboratoire anticorrosion-matériaux,
environmental and structure (LAMES) pour son incontournable et totale
coopération.

Nous remercions en particulier les doctorantes Nesrine BOUGOUIZI,
Amina BOUCIREB et Khadija KAHOUL, Nour El houda SOUAMES.

Pour ces informations et motivations pendant la période de stage
professionnel.

Toute notre gratitude va aux membres de jury pour leur attention et
temps acceptant d'examiner cette mémoire.

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect, avec de l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

A mon paradis, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, celle que j'aime le plus au monde qui s'est donné corps et âme pour l'éducation de ses enfants et sans qui je ne serais jamais devenue ce que je suis, ma moitié, maman.

A celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, à mon support qui était toujours à mes côtés, celui qui m'a épaulé tout au long de ma vie pour me soutenir et m'encourager, à mon prince papa.

A mon frère SIDALI pour l'amour, le courage et le soutien qu'il me réserve

A mon adorable petite sœur NOURINE qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille

A tous les membres de ma grande famille

Sans oublier mon amie AMIRA avant d'être mon binôme pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet

A tous ceux qui ont sacrifier un peu de leur temps précieux pour m'écouter, me guider vers la bonne voie

A tous mes camarades de génie chimique promotion 2023



Malak

Dédicace

Je dédie ce mémoire a mon cher père et ma très chère mère
pour tous leurs sacrifices et leur soutien moral durant mes
études ;

Que cette réussite soit pour eux le témoignage de ma
profonde affection et ma reconnaissance éternelle,

A tous mes adorables sœurs et frère : Loubna, Bessma, et
raouf, à qui je leur souhaite beaucoup de succès et de
bonheur ;

A mes cousins et mes cousines ;

A tous les membres de ma grande famille

Sans oublier mon amie Malek avant d'être mon binôme pour
son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au
long de ce projet

A tous mes amis, surtout Manel, Imene, Rayane, et Ines.



Amira

Résumé

ملخص

تهدف دراستنا الى تسليط الضوء على ضرورة انتهاج مجال تحول الطاقة الذي يهدف الى ضمان امن الطاقة في البلاد على المدى الطويل من خلال استغلال الطاقات المتجددة وتقليل الاعتماد على الطاقات الاحفورية المسببة لمشاكل البيئة والانتقال نحو الطاقة النظيفة المتمثلة في الهيدروجين الاخضر لما يحمل من اهمية وانفراجات للطاقة وبالتالي ضمان مستقبل امن الطاقة وتعزيز النمو الاقتصادي

Résumé

Notre étude vise à mettre en lumière la nécessité de poursuivre le domaine de la transition énergétique, qui vise à assurer la sécurité énergétique du pays à long terme en exploitant les énergies renouvelables, en réduisant la dépendance aux énergies fossiles qui causent des problèmes environnementaux et en s'orientant vers des énergies propres représenté par l'hydrogène vert, en raison de son importance et de ses avancées énergétiques, assurant ainsi la sécurité énergétique future, favorisant la croissance économique

Abstract

Our study aims to highlight the need to continue the field of energy transition, which aims to ensure the country's energy security in the long term by harnessing renewable energy, reducing dependence on fossil fuels that cause environmental problems and moving towards clean energy represented by green hydrogen, due to its importance and energy advancements, thus ensuring future energy security, promoting economic growth

Sommaire

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Résumé	
Introduction Générale	1-2
Chapitre I : La sécurité et la transition énergétique	
I.1. Introduction	4
I.2. La sécurité énergétique	4
I.3. L'énergie	5
I.3.1. Définition	5
I.3.2. Les sources d'énergie	5
I.3.2.1. Les énergies conventionnelles fossiles	5
I.3.2.1.1. Le pétrole	5-6
I.3.2.1.2. Le gaz naturel	6
I.3.2.1.3. Le charbon	7
I.3.2.1.4. L'énergie nucléaire	7-8
I.3.2.1.5. Gaz de schiste	8-9
I.3.2.1.6. Pétrole de schiste	9
I.3.2.2. Les inconvénients des énergies fossiles	10
a. la pollution atmosphérique	10
b. l'effet de serre	11
c. le changement climatique	11-12
I.4. La transition énergétique	12
I.4.1. Définition	12-13
I.4.2. Historique de la transition énergétique	13-14
I.4.3. Nécessité de la transition énergétique	14-15
I.5. Les énergies non-conventionnelle (nouvelles et renouvelables).....	15
I.5.1. Définition	15
I.5.2. Historique des énergies renouvelables	15-16

I.5.3. Les différents types des énergies renouvelables	16-17
I.5.3.1. L'énergie solaire	17
I.5.3.2. L'énergie éolienne	18-19
I.5.3.3. L'énergie hydraulique	19-20
I.5.3.4. L'énergie géothermique	20-21
I.5.3.5. L'énergie de la biomasse.....	22-23
I.6. Conclusion	24

Chapitre II : la chimie verte et l'hydrogène vert

II.1. Introduction	27
II.2. La chimie verte	28
II.2.1. Définition.....	28
II.2.2. Les 12 principes de la chimie verte	28-29
II.3. Généralités d'hydrogène.....	30
II.3.1. Définition.....	30
II.3.2. Bref historique	31-32
II.3.3. Propriétés de l'hydrogène	32
II. 3.3.1. Isotopes de l'hydrogène.....	32-33
II. 3.3.2. Les Propriétés physique.....	34-35
II. 3.3.3. Les Propriétés chimique	35-36
II.4 L'hydrogène : vecteur d'énergie.....	37
II.5 Les couleurs de l'hydrogène et leurs applications.....	38-39
II. 6. Nature de production de l'hydrogène	39
II. 7. Les procédés de production de l'hydrogène	40-41
II. 7.1. PRODUCTION D'HYDROGENE A PARTIR DES ENERGIES FOSSILES.....	41
II. 7.1.1. La production d'hydrogène par vaporeformage	41-42-43
II. 7.1.2. La production d'hydrogène par oxydation partielle	43-44
II. 7.1.3. Reformage autotherme.....	44-45
II. 7.1.4. Gazéification de charbon	45
II. 7.2. Production d'hydrogène par procédés biologiques.....	46
II. 7.2.1. Bio photolyse de l'eau par les algues et les cyanobactéries	46-47-48
II. 7.2.2. Photo décomposition des composés organiques par les bactéries photosynthétiques	48
II. 7.2.3. Fermentation des composés organiques par les bactéries.....	49
II. 7.2.4. Système hybride utilisant des bactéries photosynthétiques et des bactéries	

Anaérobiques.....	50
II.7.3. Production d'hydrogène à partir de la biomasse	50-51
II.7.4. Production d'hydrogène par nucléaire.....	51-52
II.7.5. Production d'hydrogène par énergie renouvelable	52-53
II. 7.6. Production d'hydrogène par décomposition de l'eau.....	53
II. 7.6.1. Photo-électrolyse de l'eau.....	53-54
II. 7.6.2. Électrolyse de l'eau.....	54
II. 7.6.2.1. Principe	54-55
II. 7.6.2.2. Les différentes technologies d'électrolyse.....	55
a. Electrolyse alcaline.....	55-56
b. Electrolyseur a haute température	56-57
c. Electrolyseur à membrane échangeuse de protons PEM.....	57-58-59
II.7.6.2.3. Comparaison entre les technologies	59-60
II.8. Coût de production	61
II.8.1. Coût de l'hydrogène gris et bleu.....	61
II.8.2. Coût de l'hydrogène vert issu de l'électrolyse de l'eau.....	61-62
II.9. Stockage de l'hydrogène.....	62
II.9.1. Stockage gazeux	62-63
II.9.2. Stockage liquid	63
II.9.3. Stockage solide	64
II.10. Transport de l'hydrogène.....	64-65
II.10.1. Pipeline	65
II.10.2. Rail.....	66
II.10.3. Navire	66
II.10.4. Camion.....	67
II.11. Distribution.....	68
II.11.A. Technologies de la distribution de l'hydrogène en station-service.....	68
A. Distribution d'hydrogène comprimé	69
B. Distribution d'hydrogène liquide.....	69-70
C. Distribution pour les réservoirs a hydrures métallique.....	70
II.12. Les risques liés à la Chain logistique d'hydrogène	70
II.12.1. Des risques de niveaux de criticité élevés	71
A. Risque incendie	71
B. Risque explosif	71

II.12.2. Des risques de niveaux de criticité a priori faibles	71
A. Risque d'asphyxie (anoxie)	71
B. Risque acoustique	71-72
C. Risque thermique	72
II.12.3. Les risques liés à la production.....	72
A. Risque d'inflammation ou d'explosion	72
B. Risque mécanique à température et pression élevées	72-73
II.12.4. Les risques liés au transport.....	73
A. Par pipelines	73
B. Par camion et train.....	73-74
II.12.5. Le risque lié au stockage.....	74
A. Stockage sous hautes pressions	74
B. Stockage solide	74
II.12.6. Risques associés à la distribution dans les stations-service.....	74-75
II.13. Les applications de l'hydrogène comme vecteur énergétique	75
II.13.1. La pile à combustible.....	75
II.13.2. Le moteur à combustible interne	75-76
II.13.3. Synthèse du méthanol	76
II.13.4. Synthèse de l'ammoniaque	76-77
II.13.5. Désulfuration des hydrocarbures	77
II.14. Conclusion	78

Chapitre III : Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire LAMES

III.1. Introduction	84
III.2. Cellule électrochimique utilisée (électrolyseur)	84-85
III.3. Les électrodes	85
III.4. L'électrolyte (solution électrolytique)	85
III.5. Matériels et produits utilisés	86
III.5.1. Agitateur magnétique	86
III.5.2. Générateur d'un courant électrique	86-87
III.5.3. Chronomètre	87
III.5.4. Thermocouple	87

III.5.5. Balance	87
III.5.6. Distillateur d'eau	88
III.5.7. pH-mètre.....	88
III.5.8. Hydroxyde de potassium (KOH)	89
III.5.9. Câbles de connexion.....	89-90
III.6. Le protocole expérimental	90
III.6.1. Le prétraitement de l'eau de mer	90-91
a. La filtration physique	91
b. La décantation	91
c. Mesure du Ph	91
III.6.2. Le réacteur cylindrique	92
III.6.3. Le réacteur rectangulaire	93-94
III.7. Résultats et discussions	94
III.7.1. Réacteur 1/.....	94
A. La première expérience	94-95
B. La deuxième expérience	95
C. Conclusion	95
III.7.2. Réacteur 2/.....	95
a. La première expérience	95-96
b. La deuxième expérience.....	96-97
C. Conclusion	97
III.8. L'analyse de l'hydrogène et de l'oxygène	97
III.8.1. Analyse de gaz.....	97
III.8.1.1. La chromatographie en phase gazeuse (CPG)	97-98
III.9. Conclusion.....	99
Conclusion générale	100
Business model canvas (BMC)	

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I :

Figure I.1. Les énergies conventionnelles	5
Figure I.2. Pétrole brut	6
Figure I.3. La composition du gaz naturel	6
Figure I.4. Le charbon	7
Figure I.5. Le fonctionnement d'une centrale nucléaire	8
Figure I.6. Gaz de schiste	9
Figure I.7. Pétrole de schiste	9
Figure I.8. Pollution de l'air	10
Figure I.9. Un diagramme montrant le fonctionnement de l'effet de serre sur la Terre	11
Figure I.10. La transition énergétique	13
Figure I.11. Les énergies renouvelables.....	17
Figure I.12. L'énergie solaire.....	17
Figure I.13. L'énergie éolienne.....	19
Figure I.14. L'énergie hydraulique	20
Figure I.15. La géothermie.....	21
Figure I.16. L'énergie de la biomasse	23

CHAPITRE II :

Figure II.1. Les douze principes de la chimie verte.....	30
Figure II.2. Origine de l'hydrogène produit dans le monde en 2011.....	31
Figure II.3. Les isotopes de l'hydrogène.....	34
Figure II.4. Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie.....	37
Figure II.5. Les différents couleurs de l'hydrogène.....	38
Figure II.6. Nature de l'hydrogène produit en Europe en 2006.....	40
Figure II.7. Les procédés de production de l'hydrogène.....	41
Figure II.8. Illustration des intrants et des produits du vaporeformage du gaz naturel, un processus qui produit de l'hydrogène et du CO ₂ , gaz à effet de serre qui peut être séquestré.	42
Figure II.9. Bio-photolyse directe d'algues vertes ou de cyanobactéries.....	48
Figure II.10. Processus de photo-fermentation par des bactéries photosynthétiques.....	49

Figure. II.11. Mécanisme biochimique de la décomposition du glucose par des microorganismes photosynthétiques et des bactéries anaérobiques pour la production hybride de l'hydrogène.....	50
Figure. II.12. Mécanismes de la gazéification.	51
Figure II.13. Réacteurs nucléaire pour la production de l'hydrogène (Inel, 2010) (a) Réacteur à refroidissement au sodium liquide (b) Réacteur à gaz à haute température	52
Figure. II.14. Vue d'ensemble des applications basées sur l'électrolyse de l'eau alimentée par des sources d'énergie renouvelables. Damien Guilbert, Author provided.....	53
Figure. II.15. Schéma montrant les intrants et les produits de l'électrolyse de l'eau, pour produire de l'hydrogène potentiellement sans émission de gaz à effet de serre.	55
Figure II. 16. Schémas opérationnel de l'électrolyse alcaline.	56
Figure. II.17. Schéma du principe de fonctionnement d'un électrolyseur à haute température.	57
Figure. II.18. Schéma de fonctionnement de l'électrolyse par membrane	58
Figure. II.19. Les différents types de réservoirs gazeux.	63
Figure. II.20. Un pipeline à hydrogène.	65
Figure. II.21. Navire à hydrogène.	66
Figure. II.22. Camion porte tubes.	67
Figure. II.23. Camion-citerne cryogénique.....	68

CHAPITRE III

Figure III.1. Agitateur magnétique	86
Figure III. 2. Générateur d'un courant électrique	87
Figure III. 3. Chronomètre.....	87
Figure III. 4. Thermocouple.....	87
Figure III.5. Balance	87
Figure III. 6. Distillateur d'eau	88
Figure III.7. PH-mètre	88
Figure III. 8. Flacon d'hydroxyde de potassium.....	89
Figure III.9. Câbles de connexion	90
Figure III.10. La filtration de l'eau de mer	91
Figure III. 11. La décantation de l'eau de mer	91
Figure III.12. Plaque en platine	92
Figure III.13. Plaque en cuivre	92

Figure III.14. Les deux plaques émergées dans l'électrolyte.	92
Figure III.15. Des plaques en inox.	93
Figure III. 16. Le réacteur cylindrique	93
Figure III.17. Plaques d'inox	94
Figure III. 18. Le réacteur rectangulaire	94
Figure III.19. Les ions Cu^{2+}	95
Figure III.20. Variation de pourcentage d'hydrogène en fonction de concentration de KOH	96
Figure III.21. Variation de pourcentage d'hydrogène en fonction du nombre d'électrode	97
Figure III.22. CPG	98

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1. Principales caractéristiques chimiques et physiques de l'hydrogène	
Moléculaire.....	36-37
Tableau II.2. Vaporeformage du gaz naturel en quelques chiffres.....	43
Tableau II. 3. Oxydation partielle du gaz naturel en quelques chiffres	44
Tableau II.4. Réactions chimiques de base et plage de température de fonctionnement pour différents types d'électrolyse de l'eau.	59
Tableau II.5. Comparaison entre les technologies.	59-60
Tableau III.1 Taux de production du gaz hydrogène (v/v).....	95
Tableau III.2. Taux de production du gaz hydrogène (v/v)	96

Liste des abréviations

Liste des abréviations

TW : térawatts

GPL : gaz de pétrole liquéfié

GES : Gaz à Effet de Serre

ENR : Energie Nouvelles et Renouvelables

L'EPA : l'agence américaine pour la protection de l'environnement (« U.S.

SMR: Steam Methane Reforming.

PSA: Pressure Swing Adsorption.

CPOX: Catalytic Partial Oxidation.

ATR: Autothermal Reforming.

WGS: water-gas-shift.

CEA: commissariat à l'énergie atomique.

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor

KOH : Hydroxide de Potassium.

SOFC : Solid-Oxid Fuel Cell.

PEM : Proton Exchange Membrane.

HER : la réaction d'évolution de l'hydrogène.

OER : la réaction d'évolution de l'oxygène.

M Pa : Méga pascal.

PAC : La pile à combustible.

MTBE: Methyl Tertiary-Butyl Ether.

RMFC: Reformed Methanol Fuel Cell.

DMFC: Direct Methanol Fuel Cell.

Introduction générale

Introduction générale :

Au cours du siècle dernier, la demande mondiale d'énergie a continué à augmenter rapidement en raison du développement mondial et de la croissance de la population. Elle devrait passer de 16 térawatts (TW) en 2010 à 23 TW en 2030, et même à 30 TW en 2050 [1]. Selon les statistiques récemment publiées, 79,5 % de l'énergie totale consommée provenait de sources d'énergie conventionnelles (telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel), tandis que les sources d'énergie renouvelables, notamment l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, l'énergie biologique et l'énergie solaire photovoltaïque, ne représentaient que 20,5 % de la consommation mondiale d'énergie en 2016[2]. Ce qui entraîne une forte augmentation d'émissions de gaz à effet de serre, en particulier celles de CH₄ et de CO₂. Ces émissions sont responsables du réchauffement climatique qui ne cesse d'augmenter et qui provoque des conséquences lourdes liées par exemple à l'augmentation du niveau de l'eau des mers et des océans, l'augmentation de la fréquence et l'intensité des incendies de forêts, la disparition de certaines espèces sur la Terre etc. Afin de lutter contre le réchauffement climatique, la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques de 2015 (COP21) a fixé comme objectif la limitation du réchauffement climatique entre 1,5 à 2,0 °C d'ici 2100.

Aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, presque exclusivement, par les hydrocarbures, notamment le gaz naturel, énergie la plus disponible. Le secteur des transports, qui représente à lui seul environ 41% de la consommation total du pays, est considéré comme l'une des premières sources de pollution en Algérie avec des émissions atteignant 14 millions de tonnes équivalent CO₂, soit un taux de 46% des émissions de gaz à effet de serre, L'essentiel de l'énergie consommée dans ce secteur provient des dérivés du pétrole dont 65% gasoil et 26% essence, alors que le GPL, qui est un carburant propre, ne représente que 3% [2].

Pour remédier les problèmes causés par le secteur de transport, la transition énergétique de l'économie traditionnelle basée sur les combustibles fossiles vers une économie durable basée sur l'hydrogène dans les prochaines années pourrait transformer la politique énergétique de l'Algérie, et permet de diversifier les carburants consommés, tout en réduisant les impacts environnementaux.

L'hydrogène moléculaire (H₂) est l'un des carburants les plus intéressants. L'hydrogène a la densité énergétique gravimétrique la plus élevée et son seul sous-produit de combustion est de l'eau non polluée, ce qui en fait un excellent vecteur d'énergie et un candidat potentiel pour les

futurs systèmes énergétiques à faible émission de carbone. Cependant, la majeure partie du H₂ est actuellement produite par reformage à la vapeur de ressources fossiles [3]. Cette voie de production consomme non seulement des combustibles fossiles avec un faible taux de conversion, mais émet également du CO₂. C'est pourquoi une technique propre, renouvelable et efficace pour produire de l'hydrogène sans ajouter d'autres problèmes est l'élément clé de la réalisation réussie de l'économie de l'hydrogène. L'électrolyse de l'eau, ou séparation électrochimique de l'eau pour produire de l'hydrogène (et de l'oxygène), a été considérée comme une stratégie propre, efficace et durable pour remplacer les combustibles fossiles, car l'eau est à la fois la seule molécule de départ et le sous-produit dans le cycle de l'économie de l'hydrogène, où la combustion du H₂ libère de l'énergie et reproduit de l'eau en même temps.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire se décompose en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par définir la sécurité énergétique, l'énergie et ses types (conventionnels et non conventionnels), ainsi que les avantages et les inconvénients de ces énergies.

Pour le deuxième chapitre, nous avons présenté l'hydrogène comme futur vecteur énergétique grâce à ses propriétés d'alternative aux combustibles fossiles, et présenté les méthodes de sa production, son transport, son stockage et son utilisation.

Quant au troisième et dernier chapitre, nous discutons en détail des méthodes expérimentales permettant de mener une étude sur la production d'hydrogène vert par le procédé d'électrolyse de l'eau alcaline.

En conclusion, nous avons conclu ce travail par une conclusion générale.

Références:

[1] Lewis, N. S.; Nocera, D. G. Powering the Planet: Chemical Challenges in Solar Energy Utilization. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 2006, 103, 15729.

[2] Ministère de l'Énergie sur <<http://www.energy.gov.dz/>> (Consulté le 25/02/2016)

[3] United States Department of Energy. A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy To 2030 and Beyond; Washington, DC, 2003.

Chapitre I : la sécurité et la transition énergétique

I.1. Introduction

Au XXI^e siècle, la population mondiale continue de croître et plusieurs facteurs socio-économiques entraînent une consommation de plus en plus grande d'énergie. Ce qui suscite la demande mondiale de l'énergie a atteint sa forte croissance, qui nécessite de revoir les différentes politiques énergétiques tout en basant sur la transition énergétique. Ce fait nous permet d'une part de diversifier les sources de l'énergie et d'autre part d'assurer la sécurité énergétique.

Cette croissance exponentielle de la population mondiale nécessite des sources d'énergie potentielles, propres et moins coûteuses. Les fortes demandes en matière d'énergie sont proportionnelles à la production des énergies fossiles, réputée par ses émissions des gaz à effet de serre (GES). Aussi, Cette source devient de plus en plus limitant puisqu'elle est répartie juste dans des zones bien connues dans le monde. Dans l'optique de satisfaire ce besoin, les grands producteurs et utilisateurs industrielles de telles puissances énergétiques tendent vers celles qui sont plus rentables et respectant les normes environnementales. L'apparition des énergies renouvelables (éolien, solaire, biomasse, etc.) est apparue comme un espoir pour l'humanité même si leurs applications restent limitées à l'heure actuelle, dues à leurs coûts d'investissement et/ou des conditions spécifiques dans lesquelles elles opèrent.

C'est la raison pour laquelle la stratégie énergétique parait sur l'innovation en énergie pour accélérer aux nouvelles technologies et prioriser les énergies renouvelables. L'utilisation des énergies vertes, combinées aux bioénergies, permettrait d'être plus indépendant en matière énergétique et de devenir un modèle dans la lutte contre les gaz à effet de serre.

I.2. La sécurité énergétique :

Cette notion de sécurité énergétique définit « les critères de sûreté du système énergétique, notamment le critère de défaillance. Il précise les mesures mises en œuvre pour garantir la sécurité d'approvisionnement en gaz naturel. Il peut aussi prévoir la mise en œuvre de dispositions spécifiques, comme la diversification des moyens de production ou des sources d'approvisionnement d'énergie, pour se prémunir des risques systémiques. Il précise également les besoins d'importation d'énergies fossiles, d'uranium et de biomasse et les échanges transfrontaliers d'électricité prévus dans le cadre de l'approvisionnement » [1].

I.3. L'énergie

I.3.1. Définition

L'énergie est le moteur de tous les phénomènes naturels : la croissance des plantes, le vent, les courants des rivières, les vagues, la chute d'objets... En physique, on la définit comme la capacité d'un système à produire un travail. Elle se présente sous de multiples facettes (thermique, cinétique, électrique...), et l'une de ses propriétés majeures est de pouvoir être convertie d'une forme en une autre [2].

I.3.2. Les sources d'énergie

I.3.2.1. Les énergies conventionnelles fossiles

C'est l'énergie qui est épuisée, c'est-à-dire une énergie qui ne peut pas être reconstruite ou compensée rapidement [3].

Les énergies fossiles, telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, l'énergie nucléaire, gaz du schiste, pétrole du schiste sont des ressources qui se renouvellent très lentement et sont largement consommées.



Figure I.1. Les énergies conventionnelles

I.3.2.1.1. Le pétrole

Le pétrole est un mélange d'hydrocarbures (molécules formées d'atomes de carbone et d'hydrogène) et de molécules contenant également d'autres atomes, principalement du soufre, de l'azote et de l'oxygène. Certains de ses constituants sont, à température et à pression ambiantes, gazeux (méthane, propane, etc.), liquides (hexane, heptane, octane, benzène, etc.) et parfois solides (paraffines, asphaltes, etc.). Le pétrole contient des milliers de molécules

différentes qu'il va falloir fractionner et transformer chimiquement pour obtenir des produits utilisables [4]



Figure I.2. Pétrole brut

I.3.2.1.2. Le gaz naturel

Le constituant principal des gisements de gaz naturel est le méthane. Le méthane est un hydrocarbure composé d'un atome de carbone et de quatre atomes d'hydrogène. Pour être utilisable, le gaz naturel peut nécessiter un adoucissement (retrait de la majeure partie des composants acides, gaz carbonique et sulfure d'hydrogène essentiellement) et un dégasolinage (retrait des fractions lourdes du gaz). Il doit dans tous les cas être déshydraté. Toutes ces opérations visent à éliminer les impuretés présentes avec le gaz en sortie de puits [5].

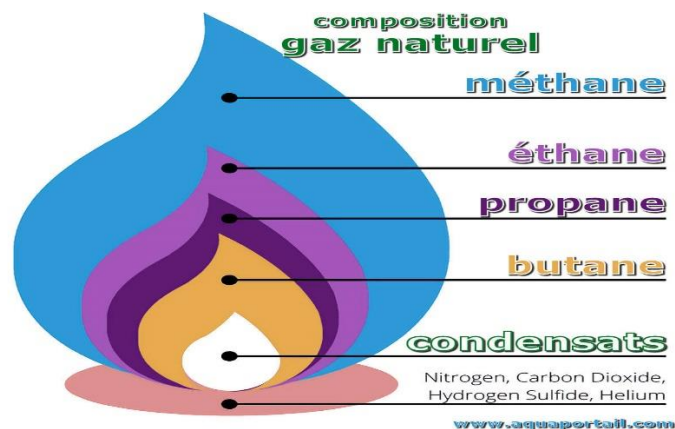


Figure I.3. La composition du gaz naturel

I.3.2.1.3. Le charbon

Le charbon est un combustible fossile d'origine organique. Il est le résultat de la transformation de biomasse (résidus de forêts notamment) enfouie dans le sol au cours des temps géologiques.

Par enfouissement, sous l'effet des pressions et des températures croissantes avec la profondeur (gravité, gradient thermique), les végétaux ensevelis sont en effet décomposés puis transformés en une matière solide et combustible à haute teneur en carbone : le charbon [6].



Figure I.4. Le charbon

I.3.2.1.4. L'énergie nucléaire

Les combustibles fossiles se consomment plus vite que la nature ne les produit. Les gisements connus de ces formes d'énergie sont voués à disparaître plus ou moins rapidement. L'énergie de fission nucléaire est un cas particulier : les gisements exploitables connus seront épuisés dans, suivant les estimations et le développement de la consommation des pays orientaux (notamment en tenant compte des futures centrales qui seront construites en Chine et en Inde), 50 ans à un siècle, ce qui classe cette énergie dans la catégorie "non renouvelable". Les réacteurs actuellement en fonctionnement sont à 81% des réacteurs à eau légère de 2ème génération, Leur approvisionnement en combustible ne pose aucune difficulté, de même que celui des réacteurs de génération III. Les réserves classiques connues d'uranium représentent en effet 70 années de consommation actuelle et les, réserves probables supplémentaires, 100 années de plus, ce qui permettrait d'engager la croissance du parc électronucléaire mondial avec

le même type de réacteurs. Le niveau des réserves d'uranium sera en effet porté à plusieurs millénaires avec les réacteurs de 4^{ème} Génération, appelés à prendre, vers 2040 [7].

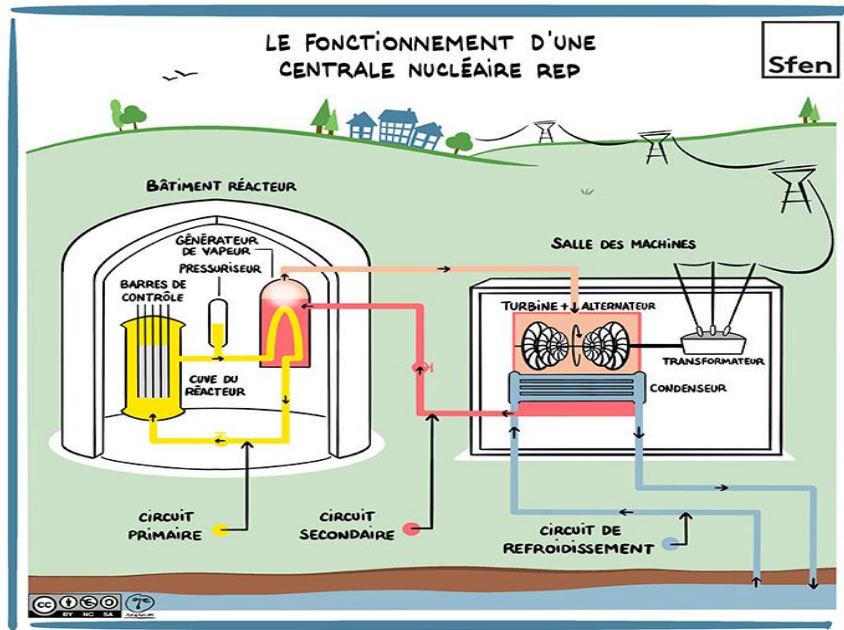


Figure I.5. Le fonctionnement d'une centrale nucléaire

I.3.2.1.5. Gaz de schiste

Est un gaz non conventionnel est contenu dans des roches sédimentaires argileuses très compactes et très imperméables, qui renferment au moins 5 à 10% de matière organique. Généralement la profondeur d'exploitation des shale gas est de l'ordre de 1.500 à 3.000 mètres de profondeur, soit d'un à plusieurs kilomètres au-dessous des aquifères d'eau potable. La fracturation de la roche suppose par ailleurs d'injecter de 10 à 15.000 m³ d'eau à haute pression et du sable. Une partie de l'eau qui a été injectée pour réaliser la fracturation hydraulique peut être récupérée (20 à 50 %) lors de la mise en production du puits après traitement. Le sable injecté combiné additifs chimique a pour but de maintenir les fractures ouvertes une fois la fracturation hydraulique effectuée, afin de former un drain pérenne par lequel le gaz va pouvoir être produit. Cependant de nombreux gisements sont enfouis sous des nappes phréatiques et avec la remontée du gaz, le liquide de fracturation peut parfois atteindre ces nappes, et se mêler à l'eau, qui devient alors impropre à la consommation. Selon un rapport rédigé par la commission de l'énergie et du commerce de la chambre des représentants américaine, l'exploitation du gaz de schiste a entraîné l'utilisation de « plus de 2.500 produits pour la fracturation hydraulique, contenant 750 substances chimiques dont 29 sont connues pour être cancérigènes ou suspectées telles ou présentant des risques pour la santé et l'environnement » [7].

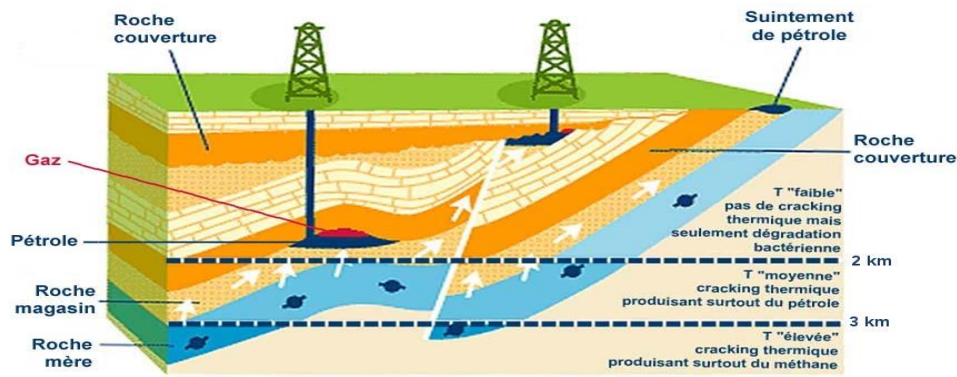


Figure I.6. gaz de schiste

I.3.2.1.6. Pétrole de schiste

Le pétrole de schiste, ou huile de schiste, correspond à un hydrocarbure dérivé des schistes bitumeux, définis comme des roches sédimentaires à grain fin qui renferme des substances organiques en quantité suffisante pour faire l'objet d'une valorisation énergétique. Ces substances organiques sont appelées kérogènes. Là où le gaz de schiste correspond à un gaz non-conventionnel, le pétrole de schiste correspond à un type de pétrole non conventionnel (non renfermé à haute densité dans une cavité comme dans les gisements traditionnels) [7].



Figure I.7. Pétrole de schiste

I.3.2.2. Les inconvénients des énergies fossiles

- Ce sont des ressources d'énergie non renouvelables, alors, épuisables au fil du temps.
- Les sources d'énergie fossile sont inégalement réparties dans le monde. Cela crée plusieurs conflits économiques et sociaux.
- Leur extraction ainsi que leur transformation engendrent l'émission d'une grande quantité de CO₂ (gaz à effet de serre), la principale cause du réchauffement climatique [8].
- Des problèmes environnementaux tels que la pollution de l'air, et l'épuisement des carburants fossiles (pétrole) surviennent

a. La pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique est clairement définie par la loi (article 2 de la loi N° 96-1236 du 30 décembre 1996) : «Constitue une pollution atmosphérique l'introduction par l'homme, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, de substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives ». Bien que cette définition fasse référence aux polluants introduits par l'être humain, il faut considérer que certains polluants atmosphériques peuvent provenir de sources naturelles comme par exemple le radon, gaz radioactif émis notamment par les roches granitiques [9].



Figure I.8. Pollution de l'air

b. l'effet de serre

On compare souvent l'effet de serre à une voiture aux fenêtres fermées au beau milieu d'une après-midi d'été ensoleillée. Les fenêtres laissent passer le rayonnement solaire, mais le verre reste quasiment opaque au rayonnement émis par l'intérieur de la voiture. La chaleur reste donc piégée. Par analogie, les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère jouent le même rôle que le verre : ils laissent passer la lumière visible mais restent plutôt opaques aux infrarouges. S'ils existent en trop grandes quantités, la Terre se réchauffe progressivement. Tout est donc une question de degré. Car sans la présence de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la température moyenne de la Terre serait de -19°C . A l'inverse, la surface de Vénus dont l'atmosphère est riche en CO_2 atteint 460°C , ce qui grillerait tout ce qui existe sur Terre [7].



Figure I.9. Un diagramme montrant le fonctionnement de l'effet de serre sur la Terre.

c. Le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique fait partie des défis environnementaux, sociaux et économiques les plus importants que l'humanité doit affronter. L'effet de serre est un phénomène naturel important pour la survie de la planète. Il permet d'avoir une température moyenne sur Terre de 15°C contre -18°C si cet effet n'existait pas. Cependant les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre ont augmenté depuis l'époque préindustrielle en raison des activités humaines, principalement la combustion des combustibles fossiles et les changements d'affectation des terres et de la couverture terrestre. Des mesures d'adaptation aux changements climatiques doivent être adoptées pour promouvoir la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique et diminuer les incidences des

changements climatiques et des extrêmes climatiques sur la diversité biologique [10]. Au cours de ces dernières décennies, différents symptômes du changement climatique ont déjà été observés [11] :

- Le recul généralisé des glaciers dans le monde :
- La montée régulière du niveau des mers
- La multiplication des épisodes de canicule et de sécheresse :
- Les cyclones et pluies torrentielles
- La perte très marquée de biodiversité dans le monde.

Les inconvénients des énergies non renouvelables accentuent également la nécessité de la transition énergétique.

I.4. la transition énergétique

I.4.1. Définition

La transition énergétique désigne le passage de l'état initial correspondant à un système énergétique carboné limité en ressources (basé sur des énergies de stock) à un état à venir correspondant à un système énergétique dé carboné plus durable (basé sur des énergies de flux) et plus économique face aux enjeux d'évolution des prix, d'approvisionnement en énergie, d'épuisement des ressources naturelles et de respect de l'environnement. Elle prendra la forme d'un ensemble de ruptures majeures dans le système sociotechnique actuel [12]. Cette transition est indissociable de l'efficacité et de la sobriété énergétique (moteurs, ampoules électriques, bâtiments mieux isolés, etc.) et concernera presque toutes les activités humaines (transports, industries, éclairage, chauffage, ... etc.).

La transition énergétique c'est :

- Consommer mieux en économisant l'énergie (moins de carburants fossiles, moins de transport, plus de confort thermique, plus d'efficacité dans l'industrie) ;
- Produire autrement en préservant l'environnement (plus de ressources locales, des énergies renouvelables, moins de déchets) ;

- Faire progresser la société grâce à des projets mobilisateurs (projets coopératifs de production d'énergie, services innovants) ;
- Créer des emplois dans de nouveaux métiers d'avenir et dans le bâtiment.



Figure I.10. La transition énergétique

I.4.2. Historique de la transition énergétique

Le concept de la transition énergétique, né dans les années 1980, est lié à celui de développement durable, et les étapes clés de son développement sont :

En 1972, paraît le rapport « the limits to Growth ». Ce rapport souligne les dangers écologiques de la croissance économique et démographique en lien avec la pénurie des ressources énergétiques et les conséquences du développement industriel sur l'environnement. Cette étude est à l'origine du concept du développement industriel sur l'environnement.

En 1980, le concept de la transition énergétique a été introduit en Allemagne et en Autriche à travers un ensemble de prévisions et de propositions scientifiques élaborées par l'association Allemande Oko-Institu [13], dans l'optique d'un abandon de la dépendance au pétrole et à l'atome. Le 16 février de la même année s'est tenu à Berlin le premier « congrès sur transition énergétique, le retrait du nucléaire et la protection de l'environnement » organisé par le ministre de l'environnement Allemand.

En 1987, la parution du rapport Brundtland [14] a donné naissance au concept de « développement durable » visant à concilier l'écologie, l'économie et le sociale, en établissant une sorte de cercle vertueux entre ces trois piliers.

En 1995, le rapport « Facteurs 4 » [15] : deux fois plus de bien-être en consommant deux fois moins de ressources » est commandé au Wuppertal [16] Institut par le club Rome.

En 2003, « facteurs 4 » est repris en France pour traduire l'objectif de diviser par 4 les émissions de GEde 1999 à 2050. Cet objectif est inscrit dans la « stratégie nationale de développement durable » en Juin 2003, dans le « plan climat » de Juillet 2004, dans « la loi pope » de Juillet 2005, puis dans « la loi Grenelle » en 2007.

En 2006, le mouvement des « initiatives de transition » naît en Angleterre, à l'initiative de Rob Hopkins [17]. Il vise à mettre en œuvre les solutions pour que la société puisse faire face à la pénurie des ressources énergétique et aux impacts des changements climatiques.

En 2009, le concept de la transition énergétique est repris en France, dans deux livres : « la transition énergétique » par Michel J-F. Dubois (2009) et « Réussir la transition énergétique » par Alexandre Rojey (2008).

I.4.3. Nécessité de la transition énergétique

Depuis le début de la révolution industrielle, les systèmes énergétiques ont été conçus et développés suivant le principe d'une production d'énergie toujours croissante, soutien indispensable à la croissance économique.

La transition énergétique est une préoccupation internationale, car elle répond aux problématiques globales du réchauffement climatique, atteinte à la biodiversité, raréfaction des énergies fossiles et inégalité des sources d'approvisionnement. Comme elle suppose une réelle modification des comportements.

Le nouveau paradigme énergétique est fondé sur le fait que l'on peut, en agissant sur les facteurs de la consommation, obtenir la satisfaction des services énergétiques (confort, déplacement, production) avec une faible consommation d'énergie. Les actions sur la demande deviennent alors au moins aussi importantes que les actions sur l'offre : construction bioclimatique, rénovation énergétique des bâtiments existants, développement des modes de déplacement doux, des transports collectifs et du train, appareils électroménagers et audiovisuels plus efficaces, moteurs électriques plus performants.

La transition énergétique concerne tout le monde. Chacun peut contribuer à une société plus pérenne. Les activités et entités les plus consommatrices ou productrices d'énergie restent ciblées en priorité. Il peut s'agir de producteurs d'énergie ou de gros consommateurs.

*Face à la croissance continue de la demande interne en énergie (pétrole et gaz), les risques d'épuisement de ces ressources, ainsi que le réchauffement climatique, le monde se voit dans l'obligation et la nécessité de développer les autres sources d'énergies dont elle dispose de grande capacité notamment (l'énergie solaire ; éolienne...etc.

L'Algérie de sa part a suivi la même réflexion, en adoptant une stratégie énergétique qui se base sur plusieurs facteurs, notamment l'exploitation des énergies renouvelables [18].

I.5. Les énergies non-conventionnelles (nouvelles et renouvelables)

I.5.1. Définition

L'Energie renouvelable est connue aussi sous le nom d'énergie alternative, dérivant de ; ressources naturelles inexploitées et inépuisables, notamment l'énergie solaire, éolienne, aérienne et l'eau [19].

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent brassant les pales d'une éolienne, la lumière solaire excitant les photopiles, mais aussi l'eau chaude des profondeurs. De la terre alimentant des réseaux de chauffage. Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, "ENR". En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes [20].

I.5.2. Historique des énergies renouvelables [21]

Si le terme « énergie renouvelable » est relativement récent « apparition en 1970 », la totalité des énergies qu'existe depuis quasiment l'origine de la terre et leur utilisation par l'homme remonte à plusieurs centaines voire à plusieurs milliers d'années. La biomasse fut utilisée notamment pour se chauffer, et développer l'industrie des métaux. L'énergie thermique solaire fut mobilisée pour sécher les aliments, les céréales ou le foin. Les sources géothermales furent à l'origine de nombreuses implantations humaines. L'énergie éolienne fut utilisée par les civilisations égyptienne et minoenne pour propulsion des navires ; L'énergie hydraulique fut utilisée en perse et dans l'empire romain il y a plus de deux millénaires L'Europe du moyen âge redécouvrit les techniques et les utilisa à grande échelle (moulins à vent, moulins à marée, moulins hydrauliques) pour moulinier les céréales, pomper de l'eau, entraîner des martinets ou

fabriquer du papier par exemple. Et avec le progrès des machines thermiques, les puissances croissantes demandées par les concentrations industrielles et les impératifs de productivités allaient rendre obsolètes ces générateurs mécaniques à faible puissance. Les réflexions engagées dans les pays développés quelque année avant le premier choc pétrolier firent toutefois prendre conscience à l'opinion que l'accroissement exponentiel de la consommation d'énergie fossile risquait d'engendrer, dans l'échelle de temps d'une vie humaine, les pénuries d'approvisionnement et conduire à des situations environnementales irréversibles du fait de la saturation des mécanismes de restaurations des équilibres naturelles. C'est dans tel contexte que l'étude et le développement de convertisseurs susceptibles de capter le potentiel des énergies provenant directement ou indirectement de l'énergie solaire et géothermique furent lancés ou réactivés. On leur donna pour l'occasion le nom énergies renouvelables et on les présenta comme étant une alternative à la domination hégémonique des sources fossiles dans le bilan énergétique mondial

I.5.3. Les différents types des énergies renouvelables [7]

Les sources d'énergies renouvelables sont disponibles en quantité illimitée, leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement. Les principales formes d'énergie renouvelables sont :

- Energie solaire,
- Energie éolienne,
- Energie issue de la biomasse,
- Energie géothermique,
- Energie hydraulique

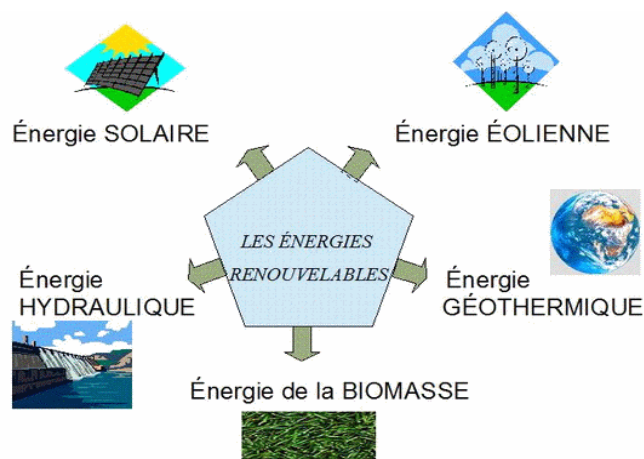


Figure I.11. Les énergies renouvelables**I.5.3.1. L'énergie solaire**

Le soleil bien que distant de 150 millions de kilomètres de notre planète est assurément notre plus grande source d'énergie les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil entretiennent et renouvellent en permanence cette source d'énergie.

Bien sur l'énergie reçus est variable selon les moments. Les nuits, les passages nuageux sont autant de moments où l'énergie solaire est inexistante, ou moindre. En moyenne, la puissance reçue annuellement à la surface du globe peut aller de 85 à 290 w/m². Elle varie donc de 01 à 03 entre les régions les moins ensoleillées et les plus ensoleillées. Cet écart est important mais pas considérable : aucune région du globe n'est dépourvue d'énergie solaire.

L'énergie solaire peut, ou bien être convertie en chaleur, ou bien convertie en électricité. L'exploitation de cette énergie peut se faire de manière thermique, thermodynamique ou photovoltaïque.

**Figure I.12.** L'énergie solaire**Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire****→ Les avantages**

- ♣ Énergie disponible partout à la surface de notre planète.
- ♣ Les panneaux photovoltaïques s'intègrent particulièrement bien aux toitures.
- ♣ Les capteurs solaires thermiques peuvent être intégrés aux toitures ou aux façades.

→ Les inconvénients

- ♣ Énergie renouvelable qui demande une technologie très avancée pour le stockage.
- ♣ Panneaux photovoltaïques encore très chers.
- ♣ Le niveau de production maximal dépend de la surface de capteur exposée au soleil.

- ♣ Énergie renouvelable toujours dépendante de la saison et du lieu où l'on se trouve.

I.5.3.2. L'énergie éolienne

Par définition, l'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Elle est le fruit de l'action d'aérogénérateurs, de machines électriques mues par le vent et dont la fonction est de produire de l'électricité.

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté. L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor qui, couplé à une génératrice, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air.

Les éoliennes peuvent être utilisées soit pour pomper de l'eau soit pour produire de l'électricité, elle est devenue, en moins de 10 ans, la forme d'énergie renouvelable dont la marge de progression est la plus importante.



Figure I.13. L'énergie éolienne

. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

– Les avantages

- ♣ Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre.

- ♣ Le prix de revient d'une éolienne va probablement diminuer dans les années à venir suite aux économies d'échelle qui pourront être réalisées sur leur fabrication.

- ♣ Techniquement, les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées.
- ♣ La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

→ **Les inconvénients**

- ♣ Énergie renouvelable toujours dépendante du vent. En utilisation isolée, il faut donc prévoir un système de batterie de stockage de l'électricité pour les journées sans vent.
- ♣ La très grande variabilité (direction, vitesse, jour/nuit, saison) de cette énergie
- ♣ Les éoliennes sont parfois critiquées pour leur impact sur l'environnement

I.5.3.3. L'énergie hydraulique

Cette énergie est le résultat du cycle de l'eau. Les eaux des mers sont évaporées par le soleil et se condensent pour former les nuages. La pluie libérée va contribuer à la formation des cours d'eau qui à leur tour alimentent des installations comme les barrages. L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique. La puissance des centrales hydroélectriques dépend de la vitesse de l'eau et de son débit.

L'énergie marémotrice est une autre forme d'énergie hydraulique. Cette filière est axée sur la maîtrise et l'exploitation des flux d'énergies naturelles fournis par les mers et les océans. Différentes sources sont exploitées : la houle, l'énergie des vagues, l'énergie des courants, l'énergie des marées et l'énergie thermique des mers.

L'énergie hydraulique fournit 2,3 % de l'énergie primaire produite dans le monde en 2011 et représente 16 % de la production mondiale d'électricité. L'hydroélectricité est la deuxième source d'électricité en France (13%).

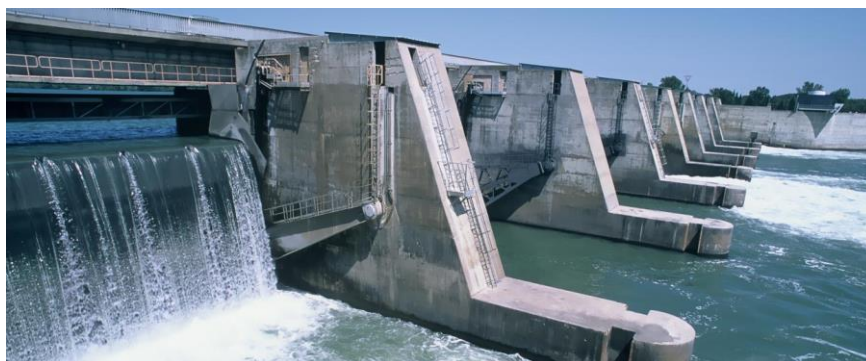


Figure I.14. L'énergie hydraulique

Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique**a. Les avantages**

Tant que le cours d'eau n'est pas à sec, l'énergie est disponible. C'est donc une source d'énergie assez disponible (sauf en cas de sécheresse persistante).

b. Les inconvénients

→ Les plus gros barrages peuvent noyer des surfaces très importantes, pouvant comprendre des zones.

→ Les barrages peuvent s'ensaver car ils réduisent l'écoulement de l'eau mais aussi de tous les éléments charriés par les cours d'eau.

→ Le lâché d'eau (et plus exceptionnellement la rupture d'un barrage) peut provoquer des dégâts considérables en aval du barrage

I.5.3.4. L'énergie géothermique

La géothermie c'est une énergie thermique naturelle dépend de la capture de la chaleur de la croûte terrestre pour produire de l'électricité (température entre 90° et 150°), ou de la chaleur (température inférieure à 90°), elle est composée de deux mots grec ("Gê" signifie la terre et "Thermie" signifie la chaleur). Par rapport à d'autres sources d'ER, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (pluie, soleil, vent...).

Le principe de l'énergie géothermique est basé sur des stations thermiques qui constituent une source de production d'électricité via :

1. Subventionner la chaleur (de la terre) à l'eau qui se transforme en vapeur.
2. Turbine convertit une partie de la vapeur en énergie mécanique.
3. Génère de l'électricité grâce au générateur associé à une turbine

Pour capter l'énergie géothermique on utilise le fluide géothermique contenu dans des réservoirs profonds pour actionner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur qui produit un courant électrique

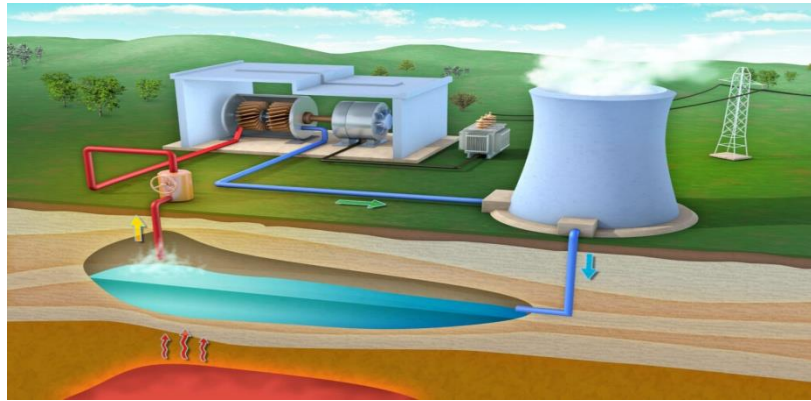


Figure I.15. la géothermie

Les avantages et inconvénients de l'énergie géothermique

→ Les avantages :

- ♣ La géothermie n'est pas dépendante des conditions atmosphériques
- ♣ Le système tire gratuitement du sol près des deux tiers des besoins en chauffage d'une maison ce qui permet de réduire l'utilisation d'énergies fossiles.
- ♣ Le coût d'entretien des systèmes géothermiques est généralement moins élevé que les systèmes de chauffage classique.
- ♣ La durée de vie prévue de la thermopompe d'un système géothermique est d'environ 18 à 20 ans, à peu près la même que celle d'un appareil de chauffage classique. Et 50 à 75 pour la boucle souterraine. Même si la thermopompe doit être remplacée au bout de 20 ans, la boucle souterraine pourra servir beaucoup plus longtemps.
- ♣ Tant que la quantité d'énergie captée n'est pas supérieure à la chaleur provenant du centre de la Terre, la ressource est inépuisable.
- ♣ Cette énergie ne produit aucun déchet.

→ Les inconvénients

- ♣ Les systèmes géothermiques utilisent une source d'énergie renouvelable, mais doivent faire appel à une source électrique pour fonctionner qui elle n'est pas toujours renouvelable
- ♣ L'achat d'un tel système demande un investissement initial assez important. Il est souvent le double d'une installation utilisant une énergie classique

I.5.3.5. L'énergie de la biomasse

Réunit le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants. Le bois énergie représente 14 % de la consommation énergétique mondiale. Issu des déchets de la forêt ou des industries du bois, il est brûlé pour produire de la chaleur.

Le biogaz est issu de la fermentation des déchets organiques. Sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération. Les biocarburants proviennent de plantes cultivées (tournesol, betterave, colza...).

➤ Le biodiesel : provient de Biomasse oléagineuse, huiles végétales, huiles usagées d'origine végétale ou animale.

Le bioéthanol : provient de Betteraves, déchets de meunerie, petit-lait, plantes contenant de l'amidon ou de la cellulose

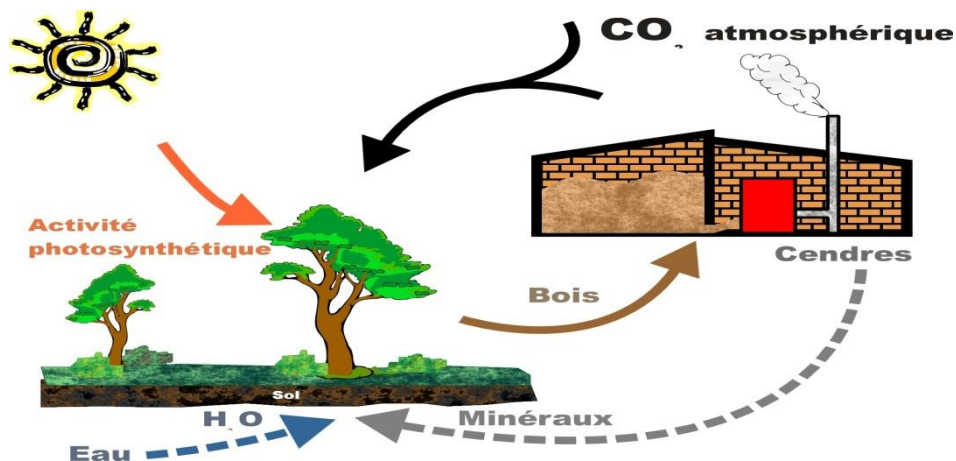


Figure I.16. L'énergie de la biomasse

. Les avantages et les inconvénients de la biomasse :

→ **Les avantages**

♣ Large disponibilité de la ressource sur la terre, sauf dans les régions les plus arides où le bois est rare.

♣ Faibles émissions polluantes et pas de contribution à l'effet de serre.

♣ Le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

→ **Les inconvénients**

♣ C'est une source d'énergie peu dense. Pour se chauffer durant un hiver, il faudra un grand volume de bois, ce qui nécessitera beaucoup de transport, de manutention et un vaste espace de stockage.

♣L'exploitation des bois et forêts doit s'accompagner d'une nouvelle plantation. Dans le cas contraire, on dégrade l'écosystème et on détériore la ressource.

I.6. Conclusion

Il devient aujourd'hui indispensable de réduire les émissions de gaz à effet de serre (notamment de CO₂) pour limiter les changements climatiques, ainsi Le besoin de sources d'énergies abondantes, propres, efficaces et d'un coût abordable devient un enjeu social de première importance pour le maintien de la modernité. Dans ce contexte les énergies renouvelables (éolien, solaire, biomasse, etc.) sont apparue comme un espoir pour l'humanité. Ces dernières pourraient répondre à ce besoin par contre leurs applications restent limitées à l'heure actuelle, dues à leurs coûts d'investissement et/ou des conditions spécifiques dans lesquelles elles opèrent. On peut les remplacer par des énergies vertes et propres, parmi ces nouvelles bioénergies, se trouve l'hydrogène vert (Bio-H₂).

L'hydrogène renouvelable offre dans ce cadre un élément de réponse concret. Il compte parmi les solutions clés de la transition énergétique. Vecteur énergétique versatile à fort potentiel, l'hydrogène possède de nombreux avantages, dont celui de ne pas émettre de CO₂ à son point d'utilisation quand il est employé en tant que source de carburant ou d'énergie propre (Abbasi, Abbasi, 2011).

Références :

[1] <https://www.echosciences-grenoble.fr/articles/securite-energetique-mieux-connaître-la-crise-energetique-pour-mieux-s-adapter>

[2] TOTAL SOLAR EXPERT : Construire un avenir énergétique durable, Juin 2013

[3] **Laurence Serra** , "Barrières à l'implantation de projets d'énergie renouvelable dans les communautés hors réseau des régions Nordiques canadiennes", Mémoire de Magister, Université Sherbrooke, Canada, (2011).

[4] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-fossiles/tout-savoir-petrole>

[5] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-fossiles/tout-savoir-gaz-naturel>

[6] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/charbon>

[7] **CHABANI Zeyneb** , La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030, AHMED OUAMAR Abdelmadjid, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES , 205pages

[8] <https://www.aurel-automobile.fr/fr/les-energies-fossiles---definition--avantages--inconvenients--->

[9] fileadmin/www.combs-la-ville.fr/MEDIA/votre_ville/developpement_durable/ona_la_pollution_atmospherique.pdf

[10] **GITAY Habiba**, SUAREZ Avelino, DOKKEN David Jon, T. WATSON Robert: Les changements climatiques et la biodiversité, Avril 2002

[11] **ROJEY Alexandre** : Energie et climat, Réussir la transition énergétique, édition Technip 2008

[12] **Duruisseau, K.**, 2014. L'émergence du concept de transition énergétique : Quels Apports de la Géographie ? PP. 21-34.

[13] Oko-institut est un institut allemand de recherche sur l'environnement reconnu d'utilité publique. Il réalise des expertises économiques et conseille des hommes politiques.

[14] Brundtland : le nom de premier ministre de Norvège

[15] Facteur 4 : correspond à un objectif de division par quatre de nos émissions de gaz à effet de serre, afin de contenir le réchauffement climatique à un niveau d'évaluation de 2° c

[16] Wuppertal : est un établissement de recherche Allemand qui explore et développe des modèles, des stratégies et des instruments pour soutenir le développement durable au niveau local national et internationale

[17] Rob Hopkins : est un enseignant Britannique en permaculture. Il est l'initiateur en 2005 du mouvement des villes en transition

[18] **RABIA Noura, RAMDA Hakima**, Rôle de la transition énergétique dans l'économie nationale : cas de l'Algérie, BELKADI Ghania, UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA, 55pages.

[19] **Madahi Mohamed**, « Les énergies renouvelables comme option stratégique à la lumière de la responsabilité de protéger l'environnement », une étude de cas de l'Algérie Mémoire de Master, Université de Chlef (2012)

[20] **Abu Bakr El-Gendy**, « Étudier l'avenir de l'énergie solaire en Égypte », Agence centrale pour la mobilisation publique et la presse statistique (2015)

[21] **BONAL Jean. ROSSETTI Pierre** : Energies alternatives. Edition omniscience, France 2007

Chapitre II : la chimie verte et l'hydrogène vert

II.1. Introduction

Pas moins de 80 % de la demande énergétique mondiale est assurée par les énergies fossiles. Ces dernières sont épuisables, sont aussi génératrices de graves problèmes environnementaux liés aux changements climatiques et aux dégagements dans l'atmosphère de polluants organiques et des gaz à effet de serre.

C'est pourquoi les principales préoccupations actuelles portent sur les moyens de fournir une source d'énergie primaire rentable, fiable et respectueuse de l'environnement, avec des émissions de carbone aussi faibles que possible. En outre, cette source d'énergie devrait être durable et accessible dans toutes les régions. Il est donc urgent de trouver et d'utiliser une autre source d'énergie propre, renouvelable et suffisamment sûre pour remplacer les sources non renouvelables.

Sur la base de ces questions, l'hydrogène, qui est considéré comme un vecteur énergétique alternatif, est proposé pour jouer un rôle important dans l'énergie de futur parce qu'il peut être stocké et transporté facilement et qu'il a un pouvoir calorifique élevé, ce qui le rend apte à remplacer les combustibles fossiles. Son processus de production respecte les normes environnementales constitue également l'une de ses principales caractéristiques sur la voie d'un meilleur environnement et du succès du développement durable. La pile à combustible la plus répandue fonctionne à hydrogène. Autrement dit, elle utilise l'hydrogène et le dioxygène ambiant afin de produire de l'électricité sans aucune émission toxique.

L'hydrogène n'est pas lui-même une source d'énergie primaire, il est plutôt produit à partir d'autres sources. Il est d'autant plus intéressant lorsque sa production est de source énergétique propre et renouvelable.

C'est pourquoi ce chapitre donne un aperçu général des techniques de production d'hydrogène en fonction du type de matière première et de la source d'énergie, en se concentrant sur les systèmes de production d'hydrogène à partir l'électrolyse de l'eau. En outre, une comparaison détaillée entre différents types d'électrolyseurs a été effectuée, en mettant l'accent sur leurs avantages et leurs inconvénients.

II.2. La chimie verte**II.2.1. Définition**

En 1991, l'agence américaine pour la protection de l'environnement (« U.S. Environmental Protection Agency ») lance la première initiative de recherche en chimie verte en proposant la définition suivante :

La chimie verte a pour but de concevoir et de développer des produits et des procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation et la synthèse de substances dangereuses.

Dans cette définition, le terme « dangereuses » est pris au sens le plus large : le danger peut être physique (substance inflammable, explosive...), toxicologique (cancérogène, mutagène...) ou global (destruction de la couche d'ozone, changement climatique...) [1].

II.2.2. Les 12 principes de la chimie verte

Les 12 principes de la chimie verte ont été développés à l'origine par des ex agents de l'EPA, Paul Anastas et John Warner, dans *Green Chemistry : Theory and Practice*. Ces principes tracent la feuille de route pour les chimistes en vue d'instaurer une logique chimie verte dans leurs actions [2].

Voici donc les 12 principes tels qu'ils ont été définis par leurs auteurs :

1. Prévenir : Envisager des synthèses chimiques non génératrices de déchets à traiter ou à gérer
2. Maximiser l'économie atomique : Ne pas laisser d'atomes de côté lorsqu'on fait une synthèse. Essayons que le produit final contienne une proportion maximale du produit de départ. Il faudrait qu'il n'y ait pratiquement pas d'atome non utilisé.
3. Prévoir des synthèses chimiques moins nocives ou potentiellement dangereuses
4. Œuvrer à la création de produits chimiques moins nocifs
5. Utiliser des solvants plus sécuritaires : Eviter l'utilisation de solvants, agents de séparation ou autres produits auxiliaires. Si ces derniers sont nécessaires, utiliser ceux qui sont inoffensifs.

6. Favoriser l'efficacité énergétique : Enclencher des réactions chimiques à la température ambiante et pression normale à chaque fois que c'est possible.

7. Utiliser des matières premières renouvelables : généralement des produits agricoles ou des déchets émanant d'autres processus. Il faut éviter d'utiliser toute source provenant du pétrole, gaz et charbon

8. Diminuer la génération de produits de dégradation à caractère toxiques

9. Utiliser des catalyseurs : en lieu et place de réactifs stœchiométrique. Minimiser les déchets en utilisant des réactifs catalytiques.

10. Concevoir des produits biodégradables : qui ne s'accumuleront pas dans l'environnement par la suite.

11. Analyser en temps réel pour prévenir la pollution : Inclure dans la mesure du possible un système de contrôle et de monitoring en temps réel durant les synthèses, afin de minimiser ou éliminer la formation de produits non désirés.

12. Pratiquer une chimie plus sécuritaire pour prévenir les accidents : Concevoir des produits chimiques dans leur forme physique la plus stable (solide, liquide, ou gaz) afin de minimiser l'éminence d'un accident chimique qui inclurait une explosion, une prise de feu ou des émanations toxiques dans l'environnement.



Figure II.1. Les douze principes de la chimie verte.

II.3. Généralités d'hydrogène

II.3.1. Définition

Le nom hydrogène vient des deux mots : hydro = eau, et gène = générateur, donc le mot hydrogène signifie « générateur d'eau », c'est l'élément le plus abondant dans l'univers (Il compose 75% de la masse de toute la matière dans les étoiles et les galaxies.). [3].

L'hydrogène est un gaz diatomique, tient la première place dans la classification de Mendeleïev, il possède la plus simple structure atomique (un proton dans son noyau et un électron dans son atome), il porte les caractéristiques suivantes [4-5-6] :

- Incolore, inodore et non toxique ;
- Très inflammable dans l'air : 4% à 74,5% (20°C et 1atm) ;
- Brûle avec une flamme peu visible et détone facilement ;
- Plus léger que l'air ;
- Réduction très puissant.

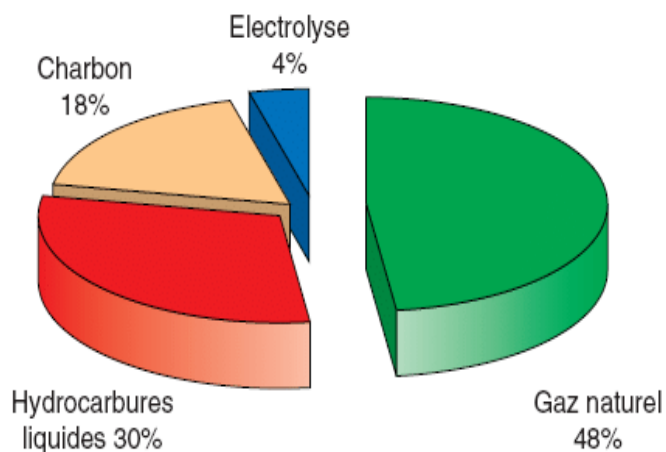


Figure II.2. Origine de l'hydrogène produit dans le monde en 2011.

II.3.2. Bref historique :

- 1671 : Robert Boyle dissout des tournures de fer dans de l'acide chlorhydrique dilué et rapporte que les 'vapeurs' dégagées sont hautement inflammables.
- En 1766, le chimiste britannique Henry Cavendish parvient à isoler un gaz qui, en brûlant dans l'air, donne de l'eau.
- En 1781, le chimiste français Antoine Laurent de Lavoisier donne à ce gaz le nom d'hydrogène, mot composé de deux éléments issus du grec ancien signifiant « qui engendre l'eau ».
- Le 1er décembre 1783, Jacques Charles poursuivit ces travaux et découla avec un ballon gonflé à l'hydrogène et parcourut 35 Km.
- 1804 : Le français Louis Joseph Gay-Lussac et l'allemand Alexander Von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène.
- 1839 : L'anglais William R. Grove découvre le principe de la pile à combustible : il s'agit d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène avec production simultanée d'électricité, de chaleur et d'eau en utilisant des électrodes de platine poreux et de l'acide sulfurique comme électrolyte.

- 1898 : James Dewar produit pour la première fois de l'hydrogène liquide.
- 1900 : Le premier "Zeppelin" effectue son vol inaugural, rempli d'hydrogène.
- 1931 : Harold Urey découvre le deutérium.
- 1939 – 1953 : L'anglais Francis T. Bacon fait progresser les générateurs chimiques d'électricité qui permettent la réalisation du premier prototype industriel de puissance.
- Au début des années 1950, l'idée d'utiliser de l'hydrogène dans un réacteur pour la propulsion d'avion.
- 1960 : À partir de cette date, la NASA utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules Apollo et Gemini) [7, 5,6].

II.3.3. Propriétés de l'hydrogène

II.3.3.1. Isotopes de l'hydrogène

Avec un numéro atomique de 1, l'hydrogène est l'élément chimique le plus léger. L'atome d'hydrogène est composé d'un seul électron en orbite autour d'un noyau et peut être représenté par la Lune en tant qu'électron et la Terre en tant que noyau. L'orbite de l'électron, qui est environ cent mille fois plus grande que la taille du noyau, est formée par l'interaction de Coulomb entre l'électron chargé négativement et le noyau chargé positivement.

L'hydrogène a trois isotopes naturels connus dont le poids atomique standard est de 1,00794 u. Il s'agit du protium ^1H , du deutérium ^2H (également représenté par D) et du tritium ^3H (T). Dans des conditions normales de température et de pression, ces isotopes forment naturellement des gaz moléculaires diatomiques stables, par exemple H_2 .

Le protium est le plus courant, avec une abondance de 99,9885 % des atomes d'hydrogène naturels. Cet isotope, également connu sous le nom d'hydrogène ordinaire, contient un seul proton et aucun neutron dans le noyau et sa masse atomique est de 1,007825032 u. Cet isotope n'est en principe pas radioactif. L'eau est principalement constituée de molécules de protium avec de l'oxygène, à savoir H_2O . Il en va de même pour les organismes composés d'hydrogène et de carbone, par exemple le méthane, CH_4 . Ce manuel traite de la production de cet isotope et de l'hydrogène ordinaire.

L'ajout d'un neutron au noyau du protium donne ce que l'on appelle le deutérium. Ce dernier double donc approximativement la masse atomique du premier. Le deutérium a une abondance

naturelle de 0,0115 % et n'est pas radioactif. Le composé chimique du deutérium et de l'oxygène, D₂O, est connu sous le nom d'eau lourde. L'eau naturelle de la Terre, comme les océans, contient un petit concentré de deutérium. Il est donc possible d'obtenir de l'eau lourde ou du deutérium à partir de l'eau à des fins pratiques. L'eau lourde est utilisée comme modérateur de neutrons et comme liquide de refroidissement dans certains réacteurs à fission nucléaire. Le deutérium est également utile comme combustible partiel dans les réacteurs à fusion nucléaire.

Le noyau du tritium est peuplé de deux neutrons et d'un proton, et pèse environ trois fois plus lourd qu'un atome de protium. Combiné à l'oxygène, il forme de l'eau tritiée, T₂O et plus souvent HTO. Contrairement aux autres isotopes de l'hydrogène, le tritium est radioactif avec une demi-vie de 12,31 ans et se désintègre en ³He par désintégration β avec libération d'énergie électronique (18,61 keV) et émission d'un antineutrino. Le tritium apparaît naturellement à la suite du rayonnement cosmique des gaz atmosphériques, principalement par spallation de l'azote atmosphérique par des neutrons rapides (>4 MeV) ($^{14}\text{N} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^3_1\text{H}$). En raison de sa demi-vie relativement courte, seules des traces de tritium produites de cette manière existent à tout moment et représentent environ 4 pour 10¹⁵ atomes d'hydrogène naturel dans l'atmosphère. La population de tritium est beaucoup moins concentrée dans l'eau naturelle. Cependant, le tritium peut être produit de plusieurs manières, notamment par activation neutronique du lithium-6 et par capture neutronique du deutérium dans les réacteurs nucléaires. Le tritium est considéré comme un élément indispensable du combustible pour l'énergie de fusion nucléaire.

Bien que le deutérium et le tritium soient recherchés pour fournir un combustible atomique pratique pour l'énergie de fusion, ils ne sont pas explicitement requis pour l'hydrogène utilisé comme combustible chimique et matière première de fabrication ordinaire. Ce livre ne traite donc pas du sujet spécifique de la production des isotopes plus lourds de l'hydrogène. [8]

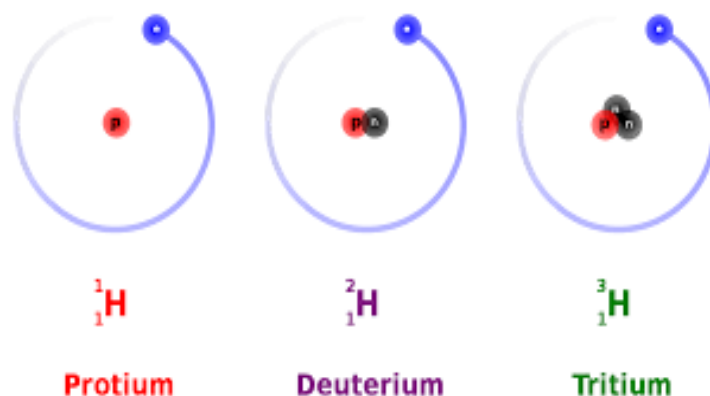


Figure II.3. Les isotopes de l'hydrogène.

II. 3.3.2. les Propriétés physique

L'hydrogène a le deuxième point d'ébullition le plus bas ($-252,78^{\circ}\text{C}$) de toutes les substances, après l'hélium ($-268,92^{\circ}\text{C}$), à la pression atmosphérique. La pressurisation ne peut guère augmenter le point d'ébullition de l'hydrogène. Ces propriétés font qu'il est difficile, mais pas impossible, de stocker l'hydrogène sous forme liquide. C'est pourquoi l'hydrogène utilisé comme carburant automobile est plus souvent stocké sous forme de gaz pressurisé que sous forme de liquide cryogénique dans un réservoir de carburant embarqué. L'hydrogène peut également être stocké et réapprovisionné par hydrogénation et déshydrogénation de divers types d'hydrures tels que les hydrures salins (par exemple NaH), covalents (par exemple NaAlH_4) et interstitiels (par exemple Pd).

La densité de l'hydrogène gazeux (H_2) est de $0,08375 \text{ kg/m}^3$ et son volume spécifique est de $11,940 \text{ m}^3/\text{kg}$ dans les conditions standard de 20°C et $101,325 \text{ kPa}$. Pour estimer la densité ρ (et le volume spécifique qui est l'inverse de la densité) dans la plage modeste de température et de pression à partir des conditions standard, on utilise la loi des gaz idéaux, $\rho = P/RT$, où la constante des gaz spécifiques de l'hydrogène $R = 4124,45 \text{ J/kg K}$.

À haute pression, l'hydrogène gazeux s'écarte considérablement du comportement thermodynamique d'un gaz idéal et la densité de l'hydrogène est en fait inférieure de 2,9 % à 5 MPa et de 5,7 % à 10 MPa par rapport aux prévisions de la loi sur les gaz idéaux. C'est ce qu'on appelle le facteur de compressibilité, qui peut être mesuré directement. L'équation d'état de l'hydrogène gazeux réel (non idéal) a été récemment publiée [1]. L'hydrogène gazeux est souvent stocké à bord d'un véhicule comme carburant dans une plage de pression de 35 à 70 MPa. À une température de 20°C et en tenant compte du facteur de compressibilité, la densité

de l'hydrogène est de 23,651 kg/m³ et le volume spécifique de 0,042282 m³/kg à 35 MPa, tandis que ces valeurs sont de 39,693 kg/m³ et 0,025193 m³/kg à 70 MPa. La densité de l'hydrogène liquide est de 71,107 kg/m³ et le volume spécifique est de 0,014063 m³/kg à -253°C et 101,325 kPa près du point d'ébullition normal.

L'hydrogène a la plus petite taille moléculaire par rapport à tous les autres gaz et peut se diffuser à travers des matériaux imperméables aux autres gaz. Les métaux et les non-métaux exposés en permanence à l'hydrogène peuvent devenir cassants. Les conteneurs d'hydrogène gazeux nécessitent des techniques délibérées en matière de matériaux et de construction, et constituent un problème de développement permanent.

L'hydrogène n'est généralement pas toxique, mais présente un risque d'asphyxie en cas d'inhalation. L'hydrogène gazeux étant inodore, insipide et invisible pour l'homme, il est difficile de détecter une fuite d'hydrogène. Une fuite ne s'étendra pas mais s'élèvera rapidement en raison de la nature hautement flottante de l'hydrogène dans l'air atmosphérique. L'hydrogène gazeux à une densité de 0,0696 à 20°C et 1 atm, soit environ 7% de la densité de l'air. L'hydrogène liquide a une densité de 0,0708 au point d'ébullition (-282,78°C) et représente environ 7% de la densité de l'eau. Une fuite d'hydrogène liquide, qui est 59 fois plus lourd que l'air, s'évaporerait et s'élèverait rapidement dans l'air ambiant en raison du faible point d'ébullition et de la faible densité de l'hydrogène [8].

II. 3.3.3. les Propriétés chimique

L'hydrogène forme une vaste gamme de composés avec le carbone. Des millions d'hydrocarbures sont connus sous le nom de composants organiques. Le gaz naturel et le pétrole brut en font partie. Ils sont d'origine biologique et nombre d'entre eux se sont transformés au fil du temps.

L'hydrogène forme des composants chimiques ou inorganiques avec d'autres éléments. L'eau est le composant chimique que l'hydrogène forme avec l'oxygène. Comme l'hydrogène, l'eau pure est incolore, inodore et sans saveur. Elle n'est ni acide ni basique. L'eau est le composant le plus abondant à la surface de la Terre. Il est intéressant de noter que l'eau est une source renouvelable d'hydrogène. L'utilisation d'hydrogène dans une chambre de combustion ou une pile à combustible produit la même quantité d'eau que celle utilisée pour le produire, sans dioxyde de carbone ni polluants. L'hydrogène carburant promet d'être un vecteur d'énergie propre pour l'avenir.

L'hydrogène peut réagir avec les composants organiques et chimiques. Cette propriété contribue à un large éventail d'activités de fabrication. L'hydrogénation est utilisée pour raffiner ou adoucir les composants organiques dans les processus pétroliers et alimentaires. Les engrais à l'ammoniac sont fabriqués par la réaction chimique de l'hydrogène avec la source d'azote gazeux dans l'air. L'hydrogène, en tant que réducteur efficace, est utilisé pour éliminer l'oxygène (formant H₂O) des oxydes métalliques afin de produire des métaux. Il est également utilisé pour éliminer chimiquement les impuretés indésirables des produits industriels.

Enfin, l'hydrogène peut également former des composés avec d'autres éléments et composants par liaison ionique. En prenant une charge positive partielle, l'hydrogène se lie à des éléments plus électronégatifs tels que les halogènes (par exemple, F, Cl, Br et I). De même, en prenant une charge négative partielle, il forme des composés avec des matériaux plus électropositifs tels que les métaux et les métalloïdes, connus sous le nom de divers types d'hydrures, dont certains sont des supports intéressants pour le stockage de l'hydrogène [8].

Tableau II.1. Principales caractéristiques chimiques et physiques de l'hydrogène

Moléculaire.

Propriété	Valeur numérique
Masse atomique	1,0079 g/mol
Température de solidification	14 K
Température d'ébullition	20,3 K
Température critique	33,3 K
Densité gazeuse à 20,3K	1,34 kg/ Nm ³
Densité gazeuse à 273K	0,08988 kg/Nm ³
Densité liquide à 20,3K	70,79 kg/m ³
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	120 MJ/kg
Pouvoir calorifique supérieur (PCS)	142 MJ/kg
Energie d'évaporation	445 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14112 kJ/kg
Chaleur spécifique Cp	14,3 kJ/kg K
Chaleur spécifique Cv	10,3 kJ/kg K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K

Température de flamme dans l'air à 300K	2318 K
Limites d'inflammabilité dans l'air	4 – 75 (% vol)
Limites de détonation dans l'air	13 – 65 (% vol)
Energie d'inflammation	0,020 MJ
Electronégativité (Pauling)	2,1
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 cm/s
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s
Vitesse de détonation dans l'air	2,0 km/s

II.4 L'hydrogène : vecteur d'énergie

Hydrogène un combustible à pouvoir énergétique élevé, non polluant, non toxique et sa combustion ne produit que de l'eau. Son énergie massique, délivrée lors de sa combustion avec le dioxygène, est élevée (120 MJ/kg), comparée à celle de l'essence (45 MJ/kg) ou du méthane (50 MJ/kg) comme indiqué sur la figure suivante :

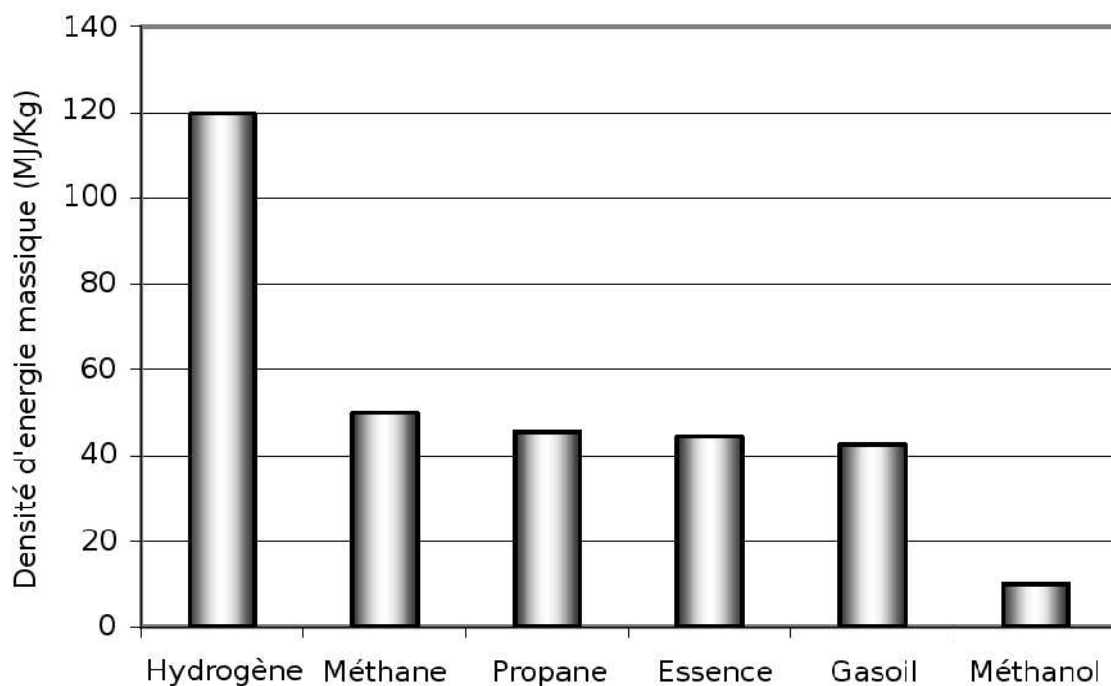


Figure II.4. Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie. [9]

II. 5. Les couleurs de l'hydrogène et leurs applications

GAZÉIFICATION Charbon Lignine		À PARTIR DU MÉTHANE			ÉLECTROLYSE DE L'EAU		RÉACTION FeO+H ₂ O DANS LE SOUS-SOL	
NOIR	BRUN	GRIS	BLEU	TURQUOISE	VERT	ROSE	BLANC	ORANGE
Conversion en gaz de synthèse par traitement thermique		Vaporeformage	Vaporeformage + captage et stockage de CO ₂	Pyrolyse à haute température	Électricité provenant d'énergies renouvelables	Électricité d'origine nucléaire	Production naturelle	Injection d'eau

© B. Valeur

Figure II.5. Les différents couleurs de l'hydrogène.

Actuellement, 96 % de l'hydrogène est produit à partir de combustibles fossiles par des procédés à forte intensité de carbone, soit par reformage du méthane à la vapeur (SMR) sans captage, utilisation et stockage du carbone (hydrogène gris), soit par gazéification du charbon (hydrogène noir). Les émissions de gaz à effet de serre et l'approche du processus de production donnent à l'hydrogène sa couleur.

L'hydrogène noir ou brun : produit par gazéification du charbon.

L'hydrogène gris : La production d'hydrogène gris utilise le gaz naturel tandis que l'hydrogène noir utilise le charbon comme source principale. Le processus de transformation, appelé reformage du méthane à la vapeur (SMR), utilise l'oxygène de la vapeur d'eau dans une chambre de chauffe pour séparer le méthane (CH₄) et produire de l'H₂. Cependant, le processus reste très polluant puisqu'il génère >9 kg de CO₂ pour chaque kilogramme d'hydrogène produit [10].

L'hydrogène bleu : Pour l'hydrogène bleu, on emploie la même méthode que pour l'hydrogène gris, mais les gaz à effets de serre sont captés et stockés sous terre [11].

L'hydrogène turquoise : utilise le gaz naturel ou la biomasse comme source d'énergie par pyrolyse pour produire de l'hydrogène dans un processus endothermique, tandis que le carbone solide est obtenu comme sous-produit. Alors que la pyrolyse de la biomasse est un processus

relativement polluant d'un point de vue environnemental, le processus de pyrolyse du gaz naturel peut être intéressant, à condition que l'énergie provienne de sources renouvelables [12].

L'hydrogène jaune ou rose : produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine nucléaire [13], il est rose pour certains [14-15]. Ou violet pour d'autres [16].

Hydrogène orange : obtenu par réaction de l'eau avec les roches du substratum, qui offre la possibilité de séquestrer géologiquement du dioxyde de carbone dissous dans l'eau injectée [17].

Hydrogène rouge : produit à partir du nucléaire par dissociation catalytique à haute température [18].

L'hydrogène blanc : L'hydrogène blanc désigne l'hydrogène d'origine natif ou naturel [19-20].

L'hydrogène vert : est produit grâce à un procédé appelé « électrolyse » de l'eau. Il consiste à faire passer de l'électricité dans l'eau pour casser ou dissocier les molécules d'oxygène des molécules d'hydrogène présentes dans les molécules H₂O de l'eau. On parle d'hydrogène vert lorsque l'énergie utilisée pour effectuer l'électrolyse est renouvelable (d'origine hydraulique, éolienne, photovoltaïque...) [21].

II. 6. Nature de production de l'hydrogène

Le dihydrogène peut être classé dans trois catégories qui diffèrent selon sa nature de production. Le dihydrogène est alors qualifié de :

- Captif, dans le cas où il est volontairement produit sur place puis consommé par l'industriel,
- Coproduit ou sous-produit, s'il provient de procédés chimiques non dédiés à sa production,
- Marchand, s'il est produit ou acheté par les gaziers puis revendu à leurs clients [22].

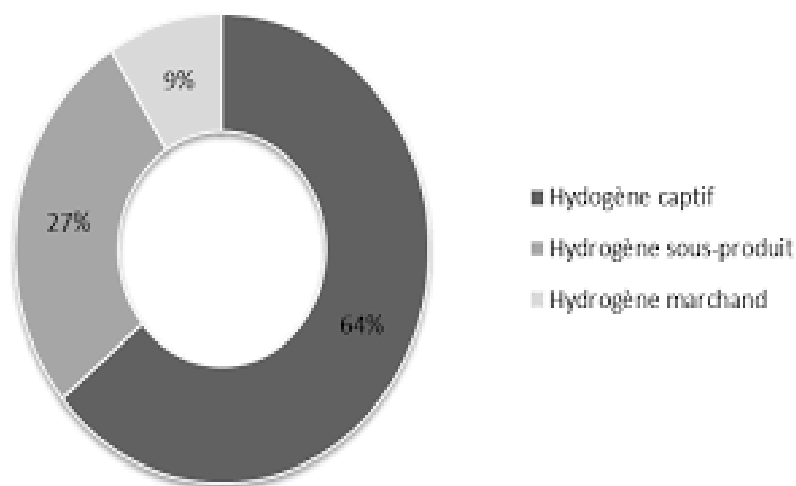


Figure II.6. Nature de l'hydrogène produit en Europe en 2006.

II. 7. Les procédés de production de l'hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène en tant que "vecteur énergétique" en piles à combustible pour des applications mobiles et stationnaires peut représenter à terme (2030 – 2050) un marché potentiel très important. Ainsi, les évaluations prospectives de développement de l'hydrogène en énergie réalisées lors de la dernière décennie montrent des taux de pénétrations du marché automobile mondial à l'horizon 2050 pouvant aller jusqu'à 40% [23], En résumé, cela impliquerait essentiellement de doubler la production mondiale actuelle et de la multiplier par au moins 5 dans les régions les plus industrialisées telles que l'Europe ou les États-Unis, où il y a une voiture particulière pour deux habitants.

La production annuelle de l'hydrogène est estimée à environ 55 millions de tonnes avec une augmentation de consommation d'environ 6% par an [24]. Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. Aujourd'hui, l'hydrogène est produit principalement par le reformage à la vapeur du gaz naturel (vaporeformage), un processus qui conduit à des émissions massives de gaz à effet de serre [25-26]. Près de 50% de la demande mondiale pour l'hydrogène est actuellement généré par reformage à la vapeur du gaz naturel, environ 30% à+ partir des hydrocarbures, 18% à partir de la gazéification du charbon, de 3,9% par électrolyse de l'eau, et 0,1% d'autres sources [27].

Le principal défi de la production d'hydrogène réside dans la nécessité de développer des technologies de remplacement pour les combustibles fossiles. Une approche envisageable pour relever ce défi consiste à exploiter les ressources renouvelables alternatives et les méthodes de

production associées, telles que l'électrolyse de l'eau, la photolyse de l'eau, la gazéification ou la pyrolyse de la biomasse, parmi d'autres. Ces solutions présentent des perspectives prometteuses pour produire de l'hydrogène de manière plus durable et respectueuse de l'environnement.

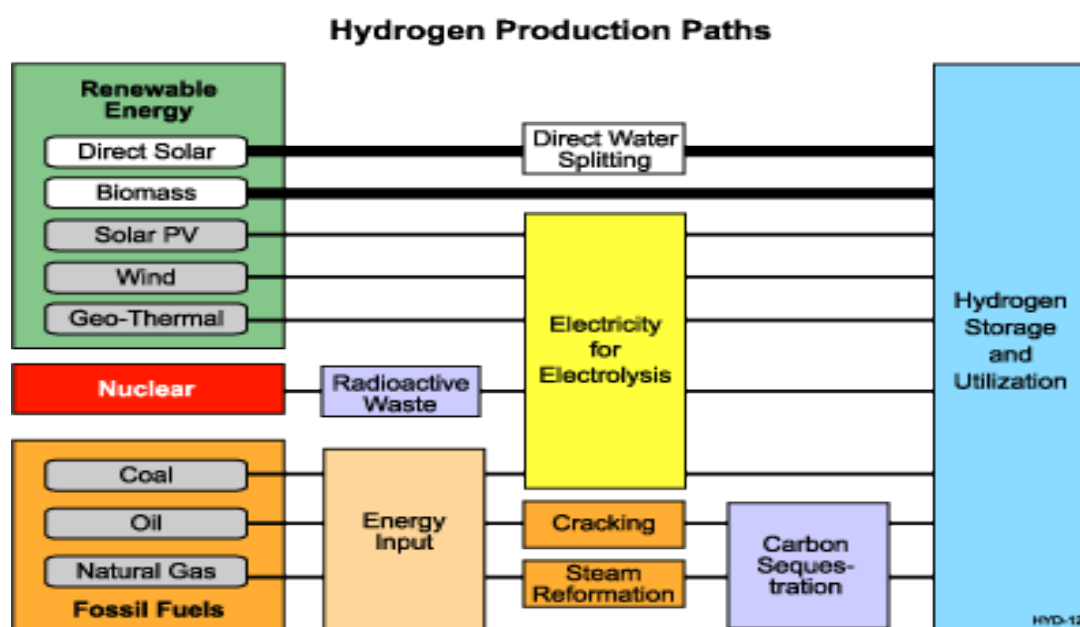


Figure II.7. Les procédés de production de l'hydrogène.

II. 7.1. Production d'hydrogène à partir des énergies fossiles

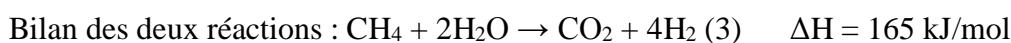
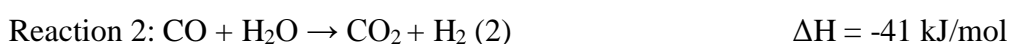
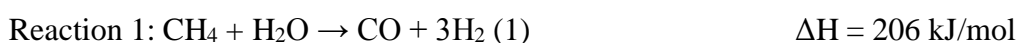
II. 7.1. 1. La production d'hydrogène par vaporeformage

Le reformage à la vapeur est actuellement l'un des processus les plus répandus et en même temps moins coûteux pour la production d'hydrogène [28]. Les matières premières les plus fréquemment utilisés sont le gaz naturel et des hydrocarbures légers, le méthanol et d'autres hydrocarbures oxygénés [29].

Le procédé de vaporeformage (SR : Steam Reforming) comprend deux étapes. Dans la première étape, la matière première d'hydrocarbure est mélangée avec la vapeur d'eau et envoyée dans un réacteur catalytique. Pendant ce processus, le gaz de synthèse (mélange de gaz H_2/CO) est produit avec faible teneur en CO_2 . Dans la deuxième étape, le gaz produit est introduit dans un convertisseur catalytique de CO , où le monoxyde de carbone est converti en grande partie à l'aide de la vapeur d'eau en dioxyde de carbone et de l'hydrogène. Cette étape

est suivie d'une dernière purification du gaz (PSA : Pressure Swing Adsorption) qui permet d'obtenir l'hydrogène pur à 99,99% [30].

Actuellement la technique de reformage du méthane à la vapeur (SMR : Steam Methane Reforming), est la plus communément utilisée pour produire l'hydrogène en grande quantité par une conversion endothermique. Le gaz naturel contient le méthane comme composé majeur, mais contient aussi du CO₂ et du soufre, ce dernier doit être d'abord éliminé avec la désulfuration [31]. Le procédé de vaporeformage se divise alors en deux réactions : la première est la réaction du méthane avec l'eau qui produit du CO et de l'hydrogène, la seconde est la réaction de Water Gas Shift entre l'eau et le CO qui produit du CO₂ et du H₂.



La réaction globale est généralement catalysée par un catalyseur à base de nickel à des températures allant de 900 à 1200K° et à des pressions de 5 à 25 bars [31].

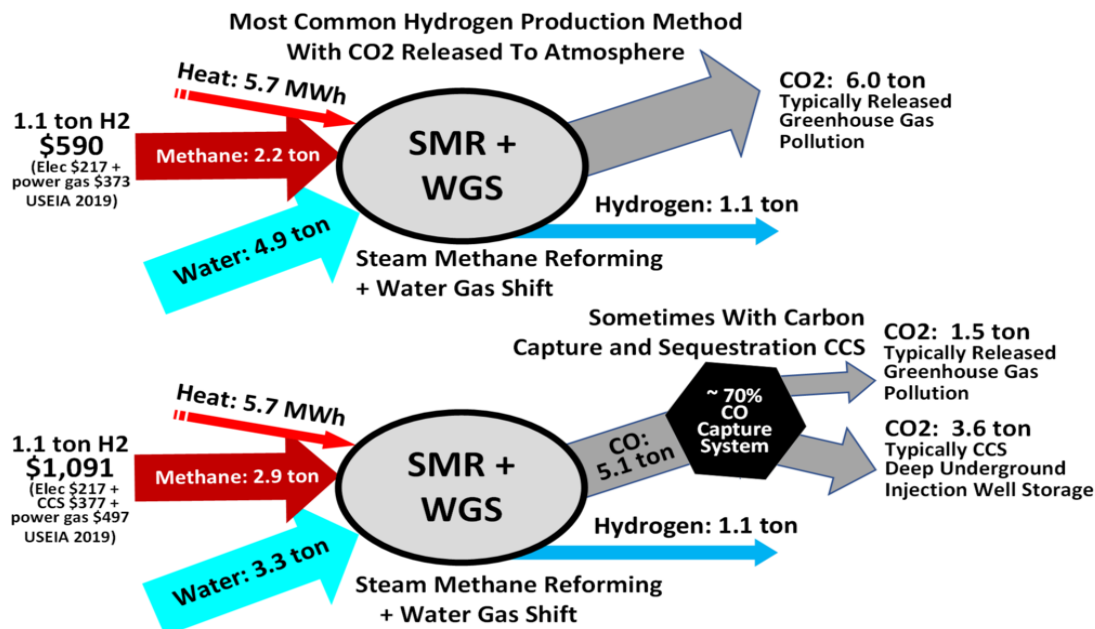
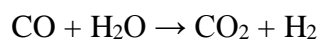
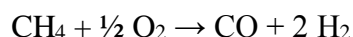


Figure II.8. illustration des intrants et des produits du vaporeformage du gaz naturel, un processus qui produit de l'hydrogène et du CO₂, gaz à effet de serre qui peut être séquestré.

Production d'hydrogène d'une unité type	60 000 Nm ³ /h, soit 43 000 t/an
Alimentation	900 GJ/h de gaz naturel désulfuré (1Nm ³ de gaz naturel ≈ 36MJ)
Consommation d'électricité	1 200 kWh en 1 an
Consommation de vapeur	50 tonnes de vapeur/h à 20 à 30 barg
Combustible	110 GJ/h
Catalyseur	66 €/h
Rendement énergétique	65 %
Émission de CO ₂	10 à 11 t par tonne d'hydrogène produite
Rendement de l'unité de purification PSA	85 %
Investissement	47 M€ (augmenté de 5 % pour une charge de GPL et de 7 % pour une charge de naphta)
Coût de fonctionnement	330 €/h
Coût hydrogène	5 à 10 €/GJ + un surcoût de capture de CO ₂ de ~1 à 1,5 €/GJ

II. 7.1. 2. La production d'hydrogène par oxydation partielle

L'oxydation partielle du gaz naturel, essentiellement du méthane, est actuellement une technique maîtrisée pour la production d'hydrogène, par lequel l'hydrogène est produit par combustion partielle du méthane avec l'oxygène pour donner de l'oxyde de carbone et de l'hydrogène [32]. Les réactions sont exothermiques et se déroulent (en général) sans catalyseur, dans lequel la matière première est gazéifiée en présence d'air ou d'oxygène à des températures dans la gamme 1300 C°-1500 C° et des pressions dans la gamme 3-8 MPa. Le monoxyde de carbone produit (CO) est encore converti à H₂ en présence d'H₂O :



Pour l'oxydation partielle catalytique (CPOX : Catalytic Partial Oxidation), le contrôle de la température est difficile en raison de la nature exothermique des réactions. Des catalyseurs

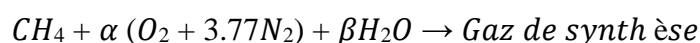
peuvent être ajoutés au système d'oxydation partielle afin d'abaisser la température de fonctionnement.

Production d'hydrogène d'une unité type à partir de résidu sous vide et comportant une purification PSA et une unité de fractionnement d'air (F.A.) pour l'alimentation en oxygène :	60 000 Nm ³ /h, soit 43 000 t/an
Alimentation	30 tonnes/h ± 6% selon la nature de la charge ;
Consommation d'électricité	16 000 kWh en 1 an
Consommation de vapeur	25 tonnes de vapeur/h
Combustible	135 GJ/h
Catalyseur	66 €/h
Rendement énergétique	55 %
Émission de CO ₂	15 t par tonne d'hydrogène produite
Investissement	100 M€ (dont 30 M€ unité F.A.)
Coût de fonctionnement	880 €/h (dont 260 €/h unité F.A.)
Coût hydrogène	8 à 15 €/GJ + un surcoût de capture de CO ₂ de ~1,5 à 2 €/GJ

II. 7.1. 3. REFORMAGE AUTOTHERME

Le reformage autotherme (ATR : Autothermal Reforming) est une combinaison de reformage à la vapeur (endothermique) et l'oxydation partielle (exothermique) [33]. La chaleur dégagée de l'oxydation partielle serait utilisée ensuite par le vaporeformage qui est une réaction endothermique. Donc l'apport de la chaleur au système ne sera plus nécessaire.

Dans ce procédé, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés en parallèle avec la vapeur d'eau avant d'être préchauffés. Ils sont ensuite dirigés vers un réacteur pour la production de gaz de synthèse. La réaction globale mise en jeu est donnée par [34] :

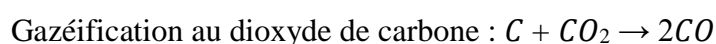
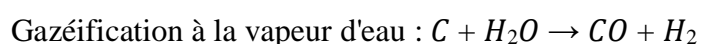


La composition du gaz de synthèse produit dépend essentiellement du rapport molaire (Vapeur / Méthane) dans la charge d'alimentation du réacteur, de la température du réacteur de reformage et de la pression du réacteur de reformage [35]. Outre sa grande souplesse dans l'ajustement du rapport H₂/CO, ce procédé présente l'intérêt d'un arrangement de réacteur très compact permettant, a priori, des capacités de production élevées. Pour ces raisons, il suscite beaucoup d'intérêt pour la filière GtL (Gas to Liquid) qui requiert un rapport H₂/CO de 2.1 environ [36]. Ce procédé est le plus prometteur à court terme car il permet de réduire les coûts actuels de production [37].

II. 7.1. 4. Gazéification de charbon

Cette technique fut la source principale de la production d'hydrogène avant le reformage. Le principe général de la gazéification consiste à mélanger une charge du charbon (soit à l'état solide ou sous forme de boue) avec un oxydant (généralement de l'air ou de l'oxygène pur et de la vapeur d'eau) à une température de 1000 à 1500°C et sous haute pression, ce qui permet d'obtenir un gaz contenant en majorité du CO et de l'hydrogène. L'élimination du monoxyde de carbone se fait grâce à la réaction de Water Gas Shift.

La gazéification [38] se décrit comme une réaction endothermique hétérogène entre le carbone (C) contenu dans le solide et un gaz réactant qui peut être de la vapeur d'eau (H₂O) ou du dioxyde de carbone (CO₂).



La réaction de gazéification à la vapeur d'eau est la réaction prépondérante pour la production du gaz combustible et mérite une attention particulière. Sur le plan industriel, lorsque l'on parle de gazéification, l'objectif est donc de favoriser ces réactions produisant ainsi le gaz combustible. Donc, pour se faire, il faut préalablement ou simultanément générer les éléments nécessaires à ces deux réactions ; à savoir, le charbon très concentré en carbone, les réactants CO₂ et H₂O ainsi qu'une quantité importante d'énergie. La réaction de gazéification du charbon de bois au dioxyde de carbone est plus largement étudiée [39]. Cette dernière caractérisée par une cinétique 2 à 5 fois plus lente que la réaction de gazéification à la vapeur d'eau.

II. 7.2. Production d'hydrogène par procédés biologiques

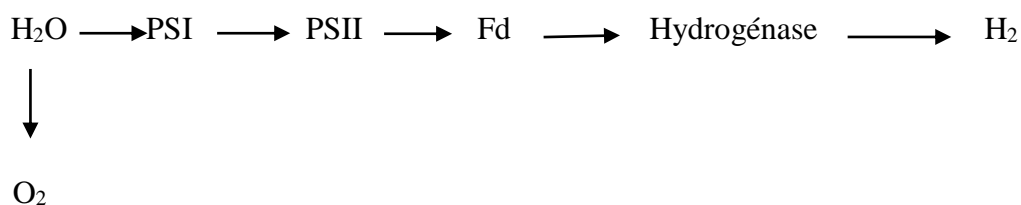
La production biologique de l'hydrogène est définie comme le résultat du métabolisme d'un organisme vivant qui libère, dans des conditions données, de l'hydrogène gazeux comme métabolite secondaire.

Les procédés biologiques de production de l'hydrogène sont classés en 4 catégories, à savoir :

1. la bio photolyse de l'eau par les algues et les cyanobactéries ;
2. la photo décomposition des composés organiques par les bactéries photosynthétiques ;
3. la fermentation des composés organiques par les bactéries ;
4. le système hybride utilisant des bactéries photosynthétiques et des bactéries anaérobiques.

II. 7.2.1. Bio photolyse de l'eau par les algues et les cyanobactéries

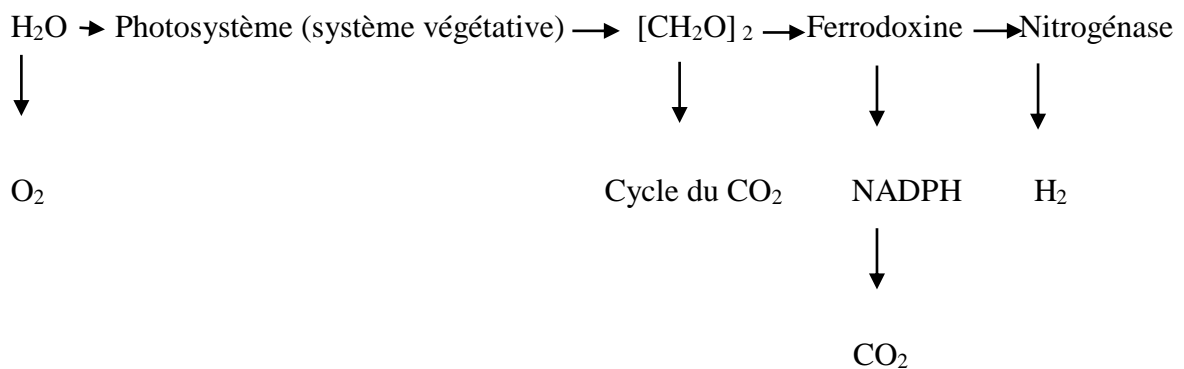
La production de l'hydrogène par bio photolyse repose sur le principe de la photosynthèse connue chez toutes les plantes. Le métabolisme des organismes utilisés est réorienté vers la production d'hydrogène au lieu de la synthèse des hydrates de carbone et la formation de la biomasse. La photosynthèse implique l'absorption de la lumière par deux photosystèmes (Photosystème I : PSI et Photosystème II : PSII) distincts opérant en série pour la dissociation de deux molécules d'eau et libérant de l'oxygène. Ainsi des électrons sont libérés et seront utilisés soit pour réduire le CO₂ (Cycle de Calvin) soit sont eux-mêmes réduits en hydrogène gazeux par une enzyme appelée hydrogénase. Cette dernière absente chez les plantes supérieures et spécifique aux microalgues, quelques macroalgues vertes et les cyanobactéries, peut réduire les protons en hydrogène gazeux sous certaines conditions. Ce phénomène a été rapporté pour la première fois par Gaffron et Rubin [40], puis repris par plusieurs chercheurs [41, 42]. Ces derniers expliquent que la bio décomposition directe de la molécule d'eau par l'énergie des PSI et PSII libèrent des électrons qui sont transportés via des porteurs (Ferredoxine : Fd) jusqu'à une hydrogénase qui va les réduire en gaz selon la réaction simplifiée suivante :



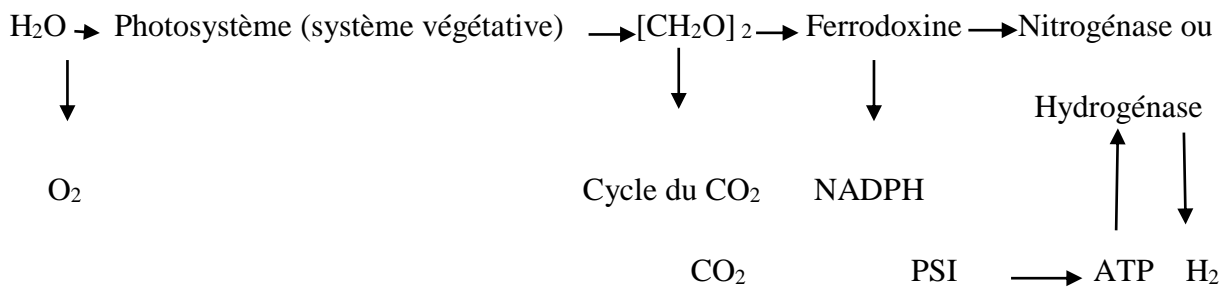
Cependant, le rendement de cette production est tributaire du taux d'oxygène dans le milieu. Des niveaux d'oxygène $\geq 2\%$ inhibe l'activité de l'hydrogénase, ce qui diminue la production de l'hydrogène [43]. Des conditions d'anaérobiose suivies d'une période d'éclairement suffisant, sont déterminantes pour une production soutenue.

Les cyanobactéries appelées aussi bactéries fixatrices d'azote, sont capables de produire de l'hydrogène via la photosynthèse en impliquant un complexe enzymatique faisant intervenir en plus de l'hydrogénase, une nitrogénase en fonction du type de cyanobactérie (avec ou sans hétérocyste) [44].

Bactéries fixatrices d'azote avec hétérocyste



Bactéries fixatrices d'azote sans hétérocyste



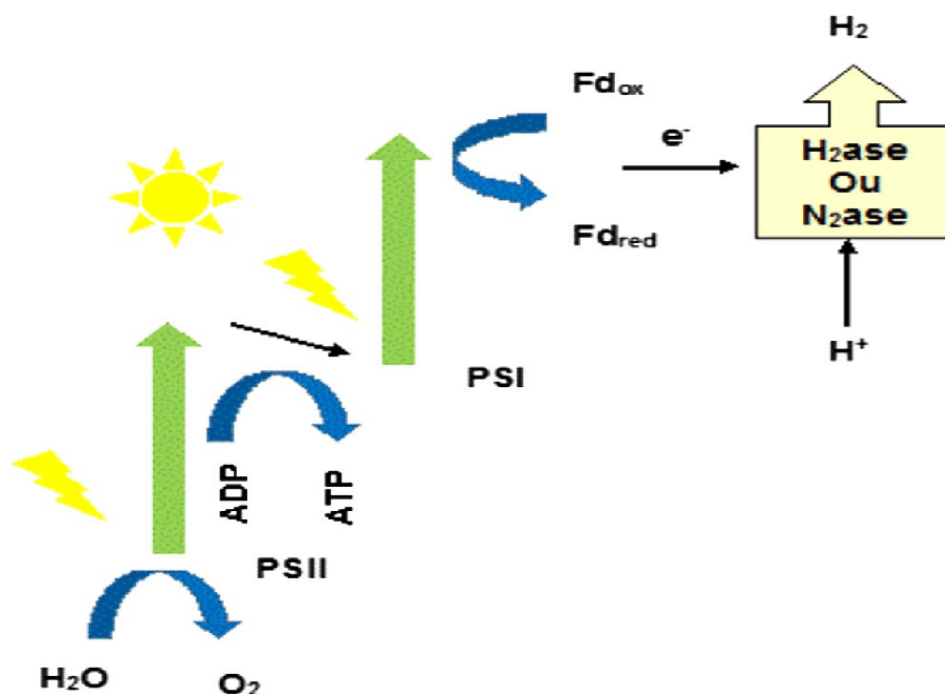
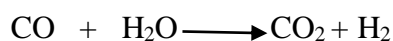
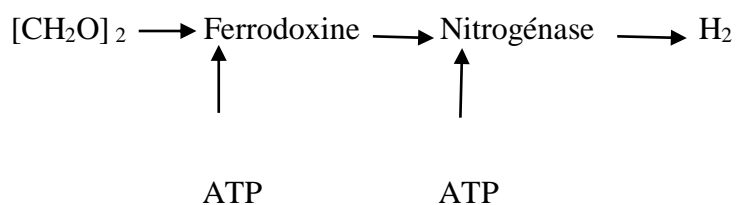


Fig. II.9. Bio-photolyse directe d'algues vertes ou de cyanobactéries.

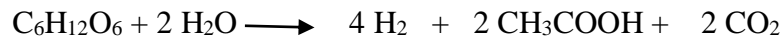
II.7.2.2. Photo décomposition des composés organiques par les bactéries photosynthétiques

Les bactéries photo trophiques peuvent dégrader les composés organiques issus de nombreux substrats dérivés de déchets, en utilisant un large spectre visible en garantissant un haut rendement de production de l'hydrogène [45, 46]. Cette méthode de production est intéressante, puisque l'oxygène n'est pas un facteur limitant. Le monoxyde de carbone est aussi utilisé comme substrat pour produire de l'hydrogène.

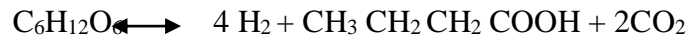


II. 7.2.3. Fermentation des composés organiques par les bactéries

Cette méthode de production d'hydrogène se fait par des bactéries fermentatives qui dégradent à l'obscurité, les composés organiques issus de l'hydrolyse des déchets de la biomasse riche en glucose. Les principales réactions sont les suivantes.



Acide acétique



Acide butyrique

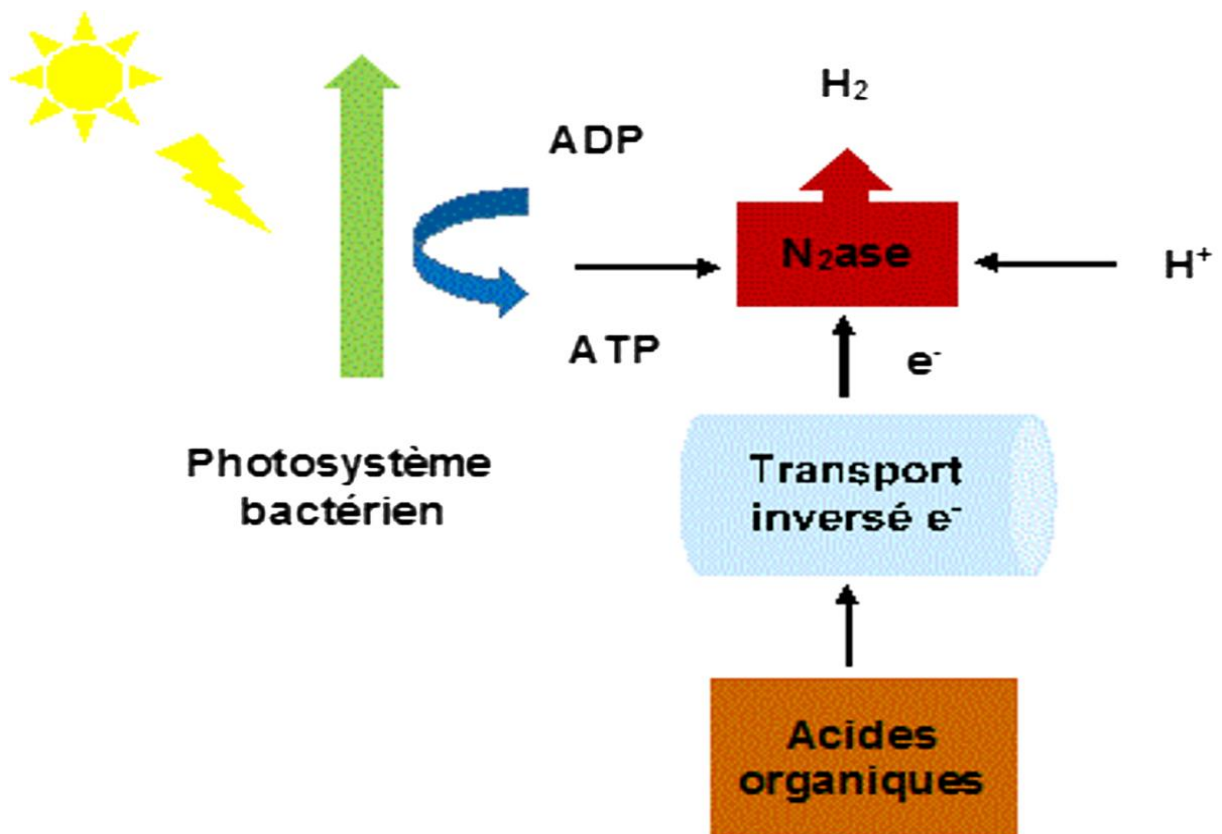


Fig. II.10. Processus de photo-fermentation par des bactéries photosynthétiques.

II. 7.2.4. Système hybride utilisant des bactéries photosynthétiques et des bactéries anaérobies

Dans les systèmes hybrides, les deux types de microorganismes (photosynthétiques et non photosynthétiques) sont impliqués dans le processus de production de l'hydrogène [47].

En effet, certaines bactéries, telle que *Clostridium* peuvent digérer à l'obscurité et en anaérobiose, les carbohydrates produits par des microalgues (en présence de lumière) en acides organiques (Fig. II.11)

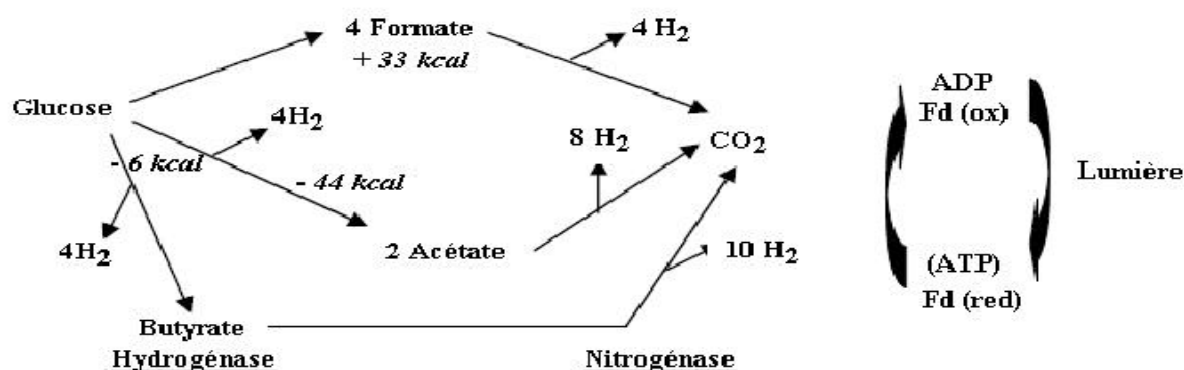


Fig. II.11. Mécanisme biochimique de la décomposition du glucose par des microorganismes photosynthétiques et des bactéries anaérobies pour la production hybride de l'hydrogène.

II.7.3. Production d'hydrogène à partir de la biomasse

La production d'hydrogène à partir de la biomasse repose principalement sur le procédé de gazéification thermique par lequel des composés organiques tels que le bois, les produits agricoles, les déchets urbains, se décomposent principalement en hydrogène et monoxyde de carbone. Le terme gazéification décrit le processus thermochimique se déroulant à température élevée (800-1100°C) entre la biomasse et un réactif gazeux (air, oxygène, vapeur d'eau) pour produire un gaz de synthèse riche en CO et H₂. La différence par rapport à la combustion se situe dans la quantité suffisante pour conduire à l'oxygène utilisée (oxygène de l'air, oxygène de la vapeur) qui n'ait pas en quantité suffisante pour conduire à l'oxydation totale de la biomasse (combustion). Le procédé de production d'hydrogène par gazéification de la biomasse comporte quatre principales étapes [48] :

- Production du gaz de synthèse,
- Purification du gaz de synthèse par élimination des impuretés (H₂S, NH₃, ...),

- Réaction de water-gas-shift (WGS) en vue de convertir le monoxyde de carbone contenu dans le gaz de synthèse en hydrogène en présence de la vapeur d'eau,
- Purification et production d'hydrogène à grande pureté.

D'autres technologies utilisant la biomasse humide sont également à l'étude en raison des besoins énergétiques grands pour le processus de séchage. Les techniques de production varient en fonction des ressources disponibles, le lieu et les conditions climatiques, mais les principaux problèmes sont la qualité inégale et un mauvais contrôle de la qualité des matières premières de biomasse. Il est donc nécessaire de rationaliser la préparation de combustible pour produire plus cohérentes, les carburants de meilleure qualité. Les grands systèmes ont tendance à être adaptés pour moins cher et inférieure carburants de qualité, tandis que les petites plantes ont besoin d'une meilleure qualité de carburant et une meilleure homogénéité de carburant [49].

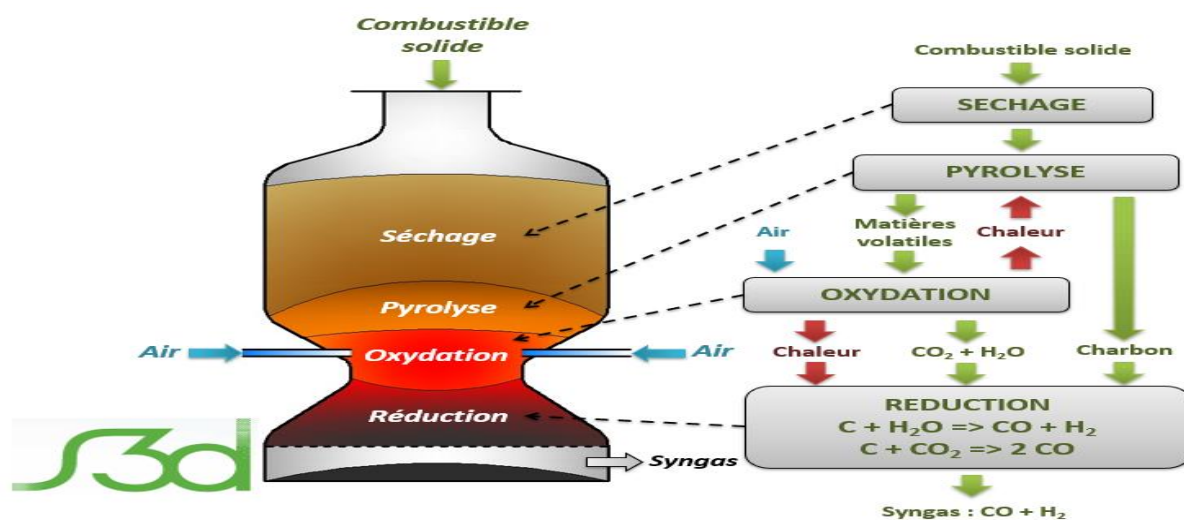


Fig. II.12. Mécanismes de la gazéification.

II.7.4. Production d'hydrogène par nucléaire

Une autre possibilité de production d'hydrogène réside dans le nucléaire. Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires dits de 4^{ème} génération. Non seulement plus sûrs, ils permettront une moindre consommation de combustible nucléaire, une production plus faible de déchets mais également en plus de la fourniture d'électricité, la production d'hydrogène. Les rendements devraient être de l'ordre de 50 %. Aujourd'hui, une dizaine de pays travaillent sur cette innovation technologique : la France, les USA, le Japon, le

Royaume-Uni, la Suisse, l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada et la Corée du Sud. En outre, au total, six nouvelles technologies de réacteur sont à l'étude : un réacteur refroidi avec de l'eau supercritique, un réacteur à neutrons rapides à refroidissement avec au choix sodium liquide ou alliage de plomb liquide (Figure II.13 (a)). Un réacteur à gaz à très haute température et un réacteur à sels fondus (Inel, 2010). Le CEA a choisi de retenir en particulier le réacteur à gaz à haute température (1100°C).

Le haut niveau de température permet la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. S'agissant du Japon et des USA, ils se tournent plutôt vers le réacteur à refroidissement au sodium liquide. Néanmoins, cette technologie ne serait commercialement disponible que vers 2030-2040. Quant au projet ITER de fusion nucléaire également productrice d'hydrogène, ses retombées ne sont attendues que pour la fin du siècle Ryland et al. 2007 [50].

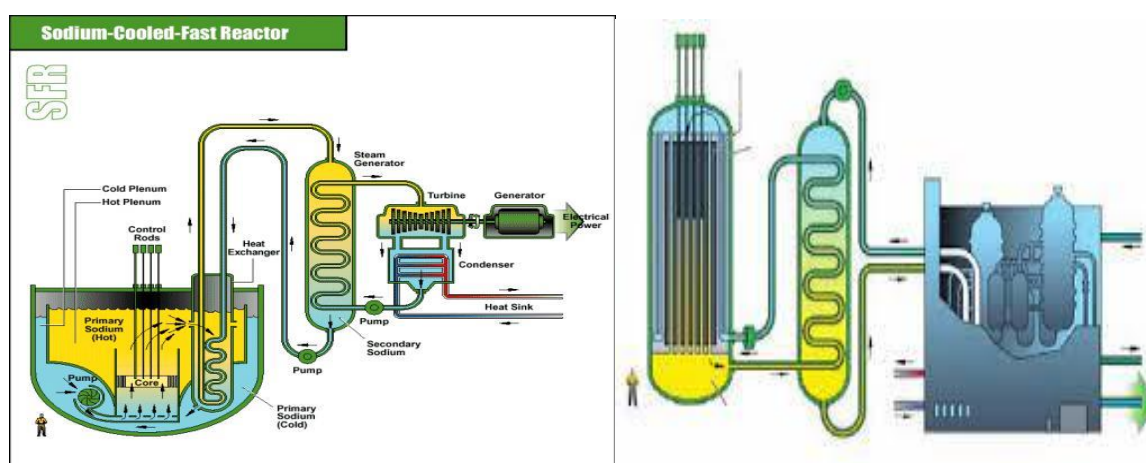


Figure II.13. Réacteurs nucléaire pour la production de l'hydrogène (Inel, 2010)

(a) Réacteur à refroidissement au sodium liquide (b) Réacteur à gaz à haute température

II.7.5. Production d'hydrogène par énergie renouvelable

De nombreux auteurs ont convenu que ni combustibles fossiles, la biomasse, ou nucléaire ne peut pas satisfaire les besoins en électricité existants et ne peut pas fournir de l'énergie de la neutralité climatique suffisante pour voies probables pour la production d'hydrogène avenir à long terme. La biomasse, hydraulique et géothermique même leur matière première peut être estimée par la précision, mais ils ont un potentiel limité et ils ne sont pas toujours neutres pour le climat [51].

Le seul moyen restant pour produire de l'hydrogène est alors les énergies intermittentes, en particulier les énergies solaire et éolienne. Contrairement à ces méthodes de production, les

énergies renouvelables sont une source d'énergie souhaitée pour la production d'hydrogène en raison de leur diversité, régionaliste, l'abondance et le potentiel de durabilité. L'électricité produite à partir de sources renouvelables peut être transformé en hydrogène en utilisant le procédé d'électrolyse. En fait, environ 55 kWh d'électricité sont nécessaires pour libérer 1kg de l'hydrogène à partir de 9 kg d'eau par électrolyse.

Electrolyse entraînée par l'énergie renouvelable peut être une option pour une production d'hydrogène durable. En fait, l'électricité produite par les systèmes d'énergie renouvelable est transférée au système d'électrolyseurs pour la production de l'hydrogène par électrolyse en faisant passer l'électricité à travers deux électrodes dans l'eau. Un avantage de l'électrolyse de l'eau est que de nos jours ; il est compatible avec une grande variété de technologies d'énergies renouvelables disponibles à savoir, solaire, hydraulique, éolienne, géothermique, etc. [51].

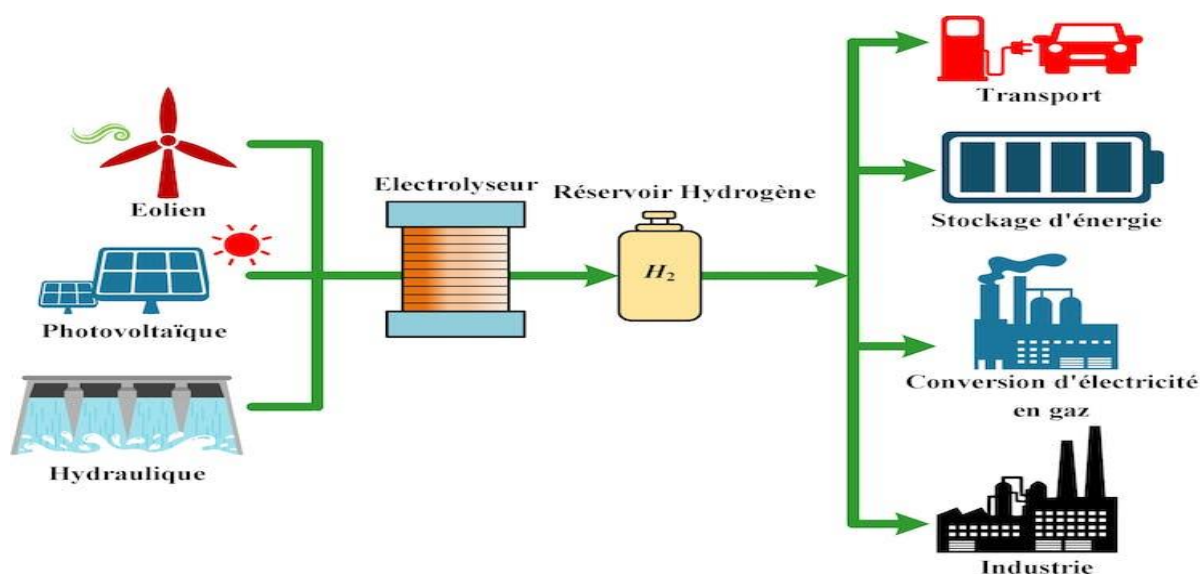


Fig. II.14. Vue d'ensemble des applications basées sur l'électrolyse de l'eau alimentée par des sources d'énergie renouvelables. Damien Guilbert, Author provided.

II. 7.6. Production d'hydrogène par décomposition de l'eau

II. 7.6.1. Photo-électrolyse de l'eau

La production de l'hydrogène par photo-électrolyse est une solution prometteuse [52]. Actuellement, elle est la méthode la moins coûteuse et la plus efficace de production d'hydrogène à partir de ressources renouvelables, même si elle est encore dans la phase de développement expérimental [53]. Le principe repose sur l'utilisation d'un semi-conducteur aux propriétés physiques adaptées. Si la photo-électrode (semi-conductrice) est immergée dans

une solution aqueuse d'électrolyte exposée au rayonnement solaire, elle générera suffisamment d'énergie électrique pour amorcer les réactions de production d'hydrogène et d'oxygène. Lors de la production de l'hydrogène, les électrons libérés seront captés pour la production de l'oxygène [53].

II. 7.6.2. Electrolyse de l'eau

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est une technologie connue depuis plus de deux siècles. C'est à William Nicholson, chimiste britannique du XVIIIe siècle (1753-1815), qu'est attribuée la paternité de l'électrolyse de l'eau au tout début du XIXe siècle. Après avoir lu les travaux de Volta sur les batteries électriques, il en construisit une lui-même et découvrit qu'en immergeant les extrémités de deux conducteurs électriques dans l'eau, cette dernière était décomposée en hydrogène (H₂) et oxygène (O₂) moléculaires. Ce procédé a repris de l'intérêt particulièrement depuis la crise du pétrole dans les années 70 [54] qui a poussé les pays industrialisés à la recherche de sources d'énergie alternatives. L'avantage des procédés électrochimiques est l'obtention des produits de grande pureté, contrairement aux méthodes chimiques qui conduisent à des produits secondaires et des impuretés non désirables, leur inconvénient est son coût relativement élevé et le rendement énergétique n'est pas très bon [55].

II. 7.6.2.1. Principe

Il s'agit d'une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène par l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique et séparées par une membrane pour éviter la recombinaison spontanée des produits de la réaction. En pratique, deux procédés principaux peuvent être utilisés : le procédé alcalin où l'électrolyte est de la potasse KOH, préférable à la soude essentiellement pour des raisons de conductivité supérieure à niveau de température équivalent et de meilleur contrôle des impuretés chlorures et sulfates) et le procédé acide (l'électrolyte est de l'acide sulfurique H₂SO₄). Jusqu'à récemment, seul le procédé alcalin s'est développé sur le plan industriel, bien que le procédé en milieu acide permette un rendement plus élevé. La raison vient de ce que la gestion d'électrolytes acides concentrés pose des problèmes de corrosion quasi insurmontables, les solutions techniques étant très onéreuses. Ainsi, l'utilisation de métaux nobles de la famille du platine comme matériau d'électrode permet un fonctionnement en milieu acide mais cela revient cher et ne règle pas le problème de la corrosion de la cuve d'électrolyse, des pompes et autres éléments où circulent les fluides.

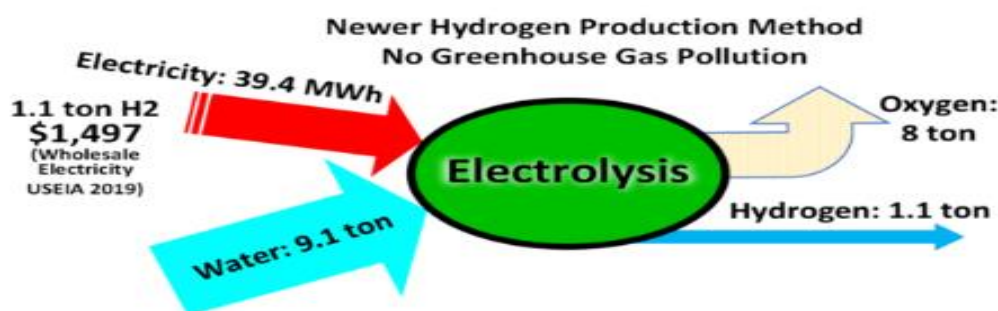


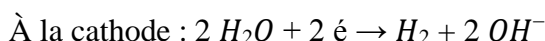
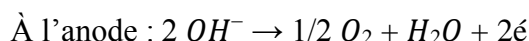
Fig. II.15. Schéma montrant les intrants et les produits de l'électrolyse de l'eau, pour produire de l'hydrogène potentiellement sans émission de gaz à effet de serre.

II. 7.6.2 .2. Les différentes technologies d'électrolyse

a. Electrolyse alcaline

Depuis sa découverte, l'électrolyse alcaline est devenue un procédé mature employé massivement par l'industrie. Cette technologie utilise comme milieu électrolytique une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium de concentration variable en fonction des températures de fonctionnement, typiquement de 25 % en masse de KOH à 80 C° jusqu'à 40 % à 160 C°. Les deux électrodes sont séparées par un diaphragme (Figure (I.4)) qui a pour fonction de séparer les gaz produits. Ce diaphragme n'étant pas complètement imperméable aux gaz, le mélange gazeux peut conduire à des conditions potentiellement dangereuses d'inflammabilité ou d'explosivité [56]. Ce diaphragme doit permettre uniquement la perméation de l'eau, tout en ayant une faible résistance électrique [57].

Lors de son fonctionnement, les ions hydroxydes (OH^-) sont oxydés à l'anode pour produire de l'oxygène et de l'eau. L'eau transite à travers l'électrolyte et le diaphragme afin d'être réduite à la cathode pour donner de l'hydrogène et également des ions hydroxydes. Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites comme suit :



Actuellement, les électrolyseurs à technologie alcaline commercialement disponibles ont des températures de fonctionnement comprises entre 80 et 90 °C. Pour des températures de fonctionnement supérieures, on parle d'électrolyse alcaline dite avancée. Dans les années 90, la technologie alcaline dite avancée avait une température de fonctionnement d'au plus 180°C. Au-delà, la tenue mécanique et chimique des matériaux n'est pas suffisante [58].

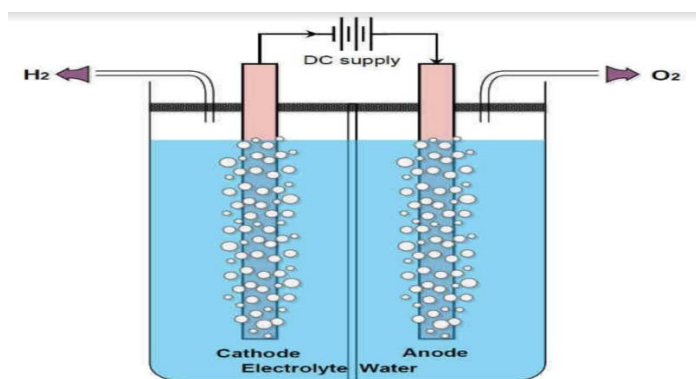


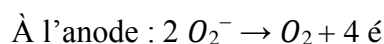
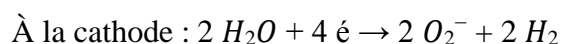
Figure II. 16. Schémas opérationnel de l'électrolyse alcaline.

b. Electrolyseur a haute température

L'électrolyse à haute température correspond au procédé inverse de la pile à combustible dite SOFC (Solid-Oxid Fuel Cell). Cette technologie a donc bénéficié des nombreuses recherches effectuées sur les SOFC. Contrairement aux technologies d'électrolyse à basse température pour lesquelles le coût de production de l'hydrogène est constitué à 80 % par le coût d'approvisionnement en électricité, la technologie d'électrolyse à haute température est basée sur l'apport d'une partie de l'énergie nécessaire à la décomposition de la molécule d'eau sous forme thermique, provenant essentiellement de réacteurs nucléaires [59].

L'Electrolyse à Haute Température (EHT) est un procédé avancé où la réaction d'électrolyse s'effectue en phase gazeuse (vapeur d'eau) à température élevée (entre 700 et 1000°C). L'eau est introduite dans le système à la cathode sous forme vapeur et est réduite afin de produire l'hydrogène et les ions oxydes (O_2^-). Ces derniers transitent à travers une "membrane" céramique conductrice ionique pour être oxydés à l'anode et former l'oxygène [60].

Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous :



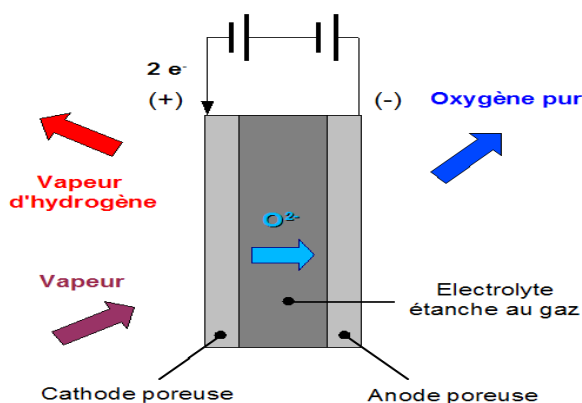


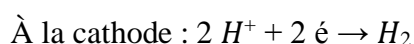
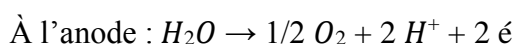
Fig. II.17. Schéma du principe de fonctionnement d'un électrolyseur à haute température.

Les matériaux d'électrodes sont des céramiques poreuses. À l'anode et à la cathode les matériaux utilisés sont des oxydes mixtes conducteurs de type pérovskite (ABO_3). Les éléments les plus couramment utilisés sont le lanthane, le strontium, le manganèse à l'anode, et le nickel et le zirconium à la cathode [61]. L'électrolyte est aussi un oxyde mixte souvent constitué d'oxyde d'yttrium stabilisé par l'oxyde de zirconium [59]. L'inconvénient majeur de ce type de procédé est le coût très élevé des matériaux utilisés et leur durée de vie, actuellement de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle d'électrolyseurs alcalins. Les phénomènes de corrosion sont en effet exacerbés à haute température et les contraintes thermo-mécaniques beaucoup plus importantes pour ce type de procédé.

c. Electrolyseur à membrane échangeuse de protons PEM

L'électrolyse à membrane échangeuse de protons PEM (Proton Exchange Membrane) diffère des deux précédents systèmes. La réaction de dissociation de l'eau s'opère à température ambiante, et l'électrolyte est une membrane conductrice de protons. Le premier électrolyseur basé sur un électrolyte solide a été développé dans les années 1960 par General Electric ; le concept a ensuite été amélioré par Grubb [62] avec l'utilisation d'une membrane de polystyrène sulfoné. La cellule est composée de deux électrodes constituées de matériaux catalytiques déposés directement de part et d'autre de la membrane [63]. Avec ce système, l'eau est injectée dans le compartiment anodique afin d'être oxydée et ainsi produire l'oxygène et des protons H^+ . Ces protons transiteront à travers la membrane jusqu'à la cathode afin d'être réduits et ainsi produire de l'hydrogène.

Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous :



Les électrolyseurs à membrane polymère échangeuse de protons (PEM) sont très prometteurs pour la production d'hydrogène : ils sont compacts, performants électriquement (1 à 4 A cm⁻²), produisent de l'hydrogène très pur (pas ou peu de pollution par l'électrolyte), nécessitent peu de maintenance et peuvent être alimentés par de l'électricité provenant des énergies renouvelables. Les récents développements et les nombreuses recherches pour le développement de la technologie des piles à combustible à membrane échangeuse de protons ont pu être transférés à l'électrolyse de l'eau [64]. La membrane la plus souvent utilisée dans ces deux technologies PEM est le Nafion®. Cet électrolyte solide permet de faire fonctionner la cellule d'électrolyse de l'eau à des pressions et des densités de courant plus importantes qu'en milieu alcalin [65].

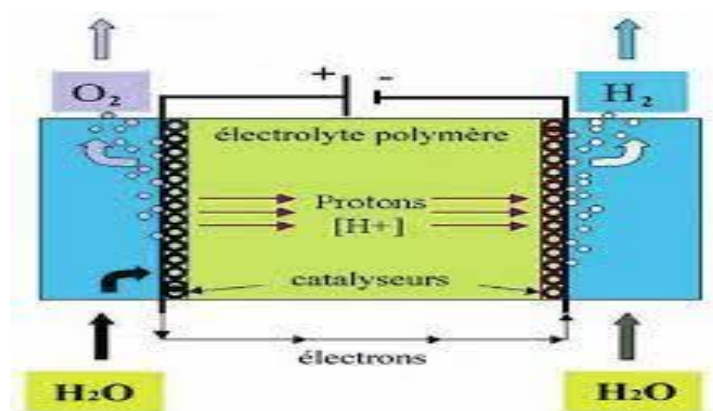


Fig. II.18. Schéma de fonctionnement de l'électrolyse par membrane

Polymère échangeuse de protons (PEM).

C'est un matériau polymère perfluoro-sulfoné à travers lequel la diffusion du dihydrogène est faible. Les matériaux d'électrodes utilisés sont constitués d'électro catalyseurs spécifiques aux réactions ayant lieu à leurs interfaces. Ainsi, des métaux nobles tels que le platine ou le palladium sont utilisés à la cathode [66], et le plus souvent le ruthénium ou l'iridium à l'anode. Les coûts d'élaboration de ces matériaux et de la membrane à conduction protonique sont élevés.

Le tableau II.4 présente trois approches pour la réaction d'évolution de l'hydrogène (HER) et la réaction d'évolution de l'oxygène (OER), la plage de température typique et les ions agissant comme porteurs de charge à travers le diaphragme/la membrane.

Tableau II.4. Réactions chimiques de base et plage de température de fonctionnement pour différents types d'électrolyse de l'eau.

Technologie de l'électrolyse	Électrolyse alcaline	Électrolyse à membrane	Haute température Electrolyse
Réaction de l'anode Réaction d'évolution de l'oxygène (OER)	$2 \text{OH}^- \rightarrow 1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{é}$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1/2 \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{é}$	$\text{O}^{2-} \rightarrow 1/2 \text{O}_2 + 2 \text{é}$
Réaction de la cathode Évolution de l'hydrogène Réaction (HER)	$\text{H}_2\text{O} + 2 \text{é}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$	$2 \text{H}^+ + 2 \text{é} \rightarrow \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} + 2 \text{é} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$
Porteur de charge	OH^-	H^+	O^{2-}
Température de fonctionnement Gamme	40 – 90 °C	20-100 °C	700- 1000 °C

II.7.6.2.3. Comparaison entre les technologies

Le tableau II.5 ci-dessous est un tableau comparatif dans cette comparaison l'électrolyse de l'eau alcaline surpasse les autres procédés d'électrolyse actuellement mature, une efficacité raisonnable, un coût relativement efficace par rapport aux autres technologies émergentes d'électrolyse de l'eau.

TECHNOLOGIE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Électrolyse alcaline	Technologie : La plus ancienne et la mieux établie Coût : Le moins cher et le plus efficace	Densité actuelle : Faible Degré de pureté : Faible (croisement de gaz) Électrolyte : liquide et corrosif

	<p>Type de catalyseur : Noble</p> <p>Durabilité : Long terme</p> <p>Piles : Gamme MW</p> <p>Efficacité : 70</p> <p>Commercialisé</p>	<p>Dynamique :</p> <p>Fonctionnement à faible dynamique</p> <p>Plage de charge : Faible pour charge partielle</p> <p>Pression : Faible pression de fonctionnement</p>
Électrolyse PEM	<p>Densité de courant : Élevée</p> <p>Rendement en tension : Élevé</p> <p>Plage de charge : Bonne plage de charge partielle</p> <p>Conception du système : compact</p> <p>Degré de pureté : grande pureté du gaz</p> <p>Dynamique : fonctionnement très dynamique</p> <p>Réponse : réponse rapide du système</p>	<p>Technologie : Nouvelles technologies et technologies partiellement partiellement établie</p> <p>Coût : coût élevé des composants</p> <p>Type de catalyseur : Catalyseur noble</p> <p>Corrosion : environnement acide</p> <p>Durabilité : relativement faible</p> <p>Pile : En dessous de la gamme des MW</p> <p>Membrane : limitée et coûteuse</p> <p>Commercialisation à court terme</p>
Électrolyse à haute température	<p>Rendement = 100</p> <p>Efficacité thermique neutre > 100 % avec de la vapeur chaude</p> <p>Catalyseur : Non noble</p> <p>Pression : fonctionnement à haute pression</p>	<p>Technologie : En phase de laboratoire</p> <p>Durabilité : faible en raison de la chaleur élevée, Céramique</p> <p>Conception du système : Conception du système en vrac</p>

Tableau II.5. Comparaison entre les technologies.

II.8. Coût de production :

II.8.1. Coût de l'hydrogène gris et bleu :

Avec du charbon et du gaz naturel bon marché facilement disponibles, le coût de production de l'hydrogène gris peut descendre jusqu'à environ 1 USD/kg d' H_2 pour les régions où les prix du gaz et du charbon sont bas, comme le Moyen-Orient, la Russie et l'Amérique du Nord, et reste bien inférieur à 2 USD/kg d' H_2 pour d'autres régions, comme l'Europe.

Jusqu'en 2030 au moins, l'avantage en termes de coûts des combustibles fossiles devrait se maintenir dans la plupart des régions géographiques, et une réglementation sur le prix du CO_2 est probablement nécessaire pour promouvoir le développement de l'hydrogène vert. L'hydrogène bleu reste la technologie de l'hydrogène à faible teneur en carbone la plus rentable jusqu'en 2030, et devient compétitif par rapport au gaz naturel en 2040, principalement en raison du prix du carbone. Par nature, l'hydrogène bleu ne peut pas être compétitif par rapport au gaz naturel en l'absence d'un prix du carbone, en raison de la perte d'efficacité de la conversion du gaz naturel en hydrogène.

II.8.2. Coût de l'hydrogène vert issu de l'électrolyse de l'eau :

Le coût de production de l'hydrogène vert est généralement considéré comme se situant entre 2,5 et 6,5 USD par kg, bien que d'autres sources estiment des valeurs plus élevées. Dans la plupart des cas, cela signifie que l'hydrogène vert est plus cher que l'hydrogène gris et l'hydrogène bleu, mais dans la partie inférieure de la fourchette, il est compétitif par rapport à l'hydrogène bleu.

Les deux composantes les plus importantes de ce coût sont le coût d'investissement de l'électrolyseur et le coût de l'électricité, qui représente environ 90 % des coûts OPEX. Les coûts CAPEX actuels des électrolyseurs alcalins sont d'environ 750 EUR/kW (environ 900 USD/kW), et ils devraient baisser à environ 500 EUR/kW (environ 600 USD/kW) d'ici 2025. Les experts estiment qu'environ 80 % du coût est imputable aux dépenses d'exploitation (si l'on considère 4 000 heures d'exploitation par an), et que le coût de l'électricité est donc un facteur déterminant du coût de l'hydrogène vert.

Dans une perspective à long terme (jusqu'en 2050), le passage à l'échelle et les innovations pourraient contribuer à assurer la parité des coûts avec l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles. [67]



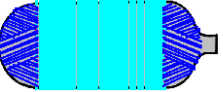
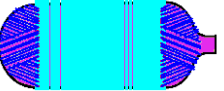




Et si les prévisions s'accordent à ce que le prix de l'hydrogène vert passe à 5 dollar dès 2025 [68], la guerre actuelle en Ukraine et l'augmentation du prix du gaz naturel fait que l'hydrogène vert est déjà moins cher que l'hydrogène fossile issu du gaz naturel dans certaines régions d'Europe, du Moyen-Orient et d'Afrique. Un kilogramme d'hydrogène gris coûte actuellement 6,71 dollars américains dans ces régions, contre 4,84 à 6,68 dollars par kilogramme pour l'hydrogène vert. [69]

II.9. Stockage de l'hydrogène

II.9.1. Stockage gazeux

Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse est la méthode la plus commune. Pour augmenter sa densité d'énergie volumétrique, le gaz d'hydrogène est comprimé sous haute pression allant jusqu'à 700 bars. Ceci impose d'une part, une perte d'énergie de 20% lors de la compression et de sévères exigences en terme de sécurité, et d'autre part, des pénalités en terme de coût liées à la quantité et le prix du matériau composite à utiliser pour le renforcement de la structure du réservoir de stockage. Par conséquent, les recherches se concentrent sur le développement de matériaux composites moins chers sans compromettre les capacités volumétrique et gravimétrique du réservoir. Deux approches sont suivies pour améliorer les performances de cette technique : l'adaptation de la forme du réservoir généralement cylindrique afin d'exploiter au maximum l'espace restreint dans le véhicule, et la compression de l'hydrogène à 77 K, température de l'azote liquide, permettant ainsi de stocker plus de gaz dans le même volume [70].

Type II	réservoir contenant une enveloppe de métal pour la tenue mécanique, frettée par des fibres continues imprégnées de résine.
Type III	réservoir constitué d'une enveloppe de métal pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.
Type IV	réservoir constitué d'une enveloppe non métallique pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.

Type	I	II	III	IV
Schéma				
Réalisation				

Tab. 1.1: Les différents types de réservoirs gazeux [12, 13]

Fig. II.19. Les différents types de réservoirs gazeux.

Pour chaque type de réservoir, le choix de l'enveloppe (liner) en contact avec l'hydrogène est de première importance. Dans le cas du Type I, les contraintes mécaniques sont directement reprises par le liner ; un matériau à grande limite élastique sera donc privilégié (Acier). En revanche, dans le cas des réservoirs de type III et IV, le liner sert de barrière à hydrogène. Un matériau peu perméable à l'hydrogène sera alors préféré (Aluminium dans le cas de type III).

II.9.2. Stockage liquide

L'hydrogène est transformé de son état gazeux à l'état liquide en le refroidissant à une température de 20 K sous pression atmosphérique. Bien que la capacité volumétrique de l'hydrogène à cet état soit supérieure à celle à l'état gazeux (70 kg/m³ comparée à 39 kg/m³ pour le stockage à 700 bars), stocker l'hydrogène à cette basse température résulte en des pertes thermiques inévitables et une évaporation journalière de l'hydrogène stocké, ramenée à 1% par jour pour un système super-isolé. L'inconvénient majeur du stockage liquide est l'énergie requise pour la liquéfaction d'hydrogène, représentant 30% de son pouvoir calorifique inférieur, ce qui pénalise gravement le rendement global de ce mode de stockage [71].

II.9.3. Stockage solide

Le stockage de l'hydrogène sous une forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau, est aussi une piste de recherche prometteuse. Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau

Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption résulte de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates.

Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.

Avant d'envisager des applications à grande échelle, il faut aussi maîtriser certains paramètres comme la cinétique, la température et la pression des cycles de charge et décharge de l'hydrogène dans ces matériaux [72].

Une pastille de MgH_2 contenant 600 litres d'hydrogène est soumise à une chaleur intense (chalumeau) pendant 5 minutes. La pastille ne prend pas feu, ni explose. Cela prouve la sécurité liée au stockage d'hydrogène sous forme solide [73].

II.10. Transport de l'hydrogène

L'émergence de systèmes de transport de l'énergie de l'hydrogène est une partie primordiale de la réussite économique de l'hydrogène. La partie de transport jouera le rôle entraîné dans la construction d'un marché de l'hydrogène dans des territoires différents. Il facilitera le transport de l'hydrogène en base territoriale et entre les différents territoires. Ont indiqué que le choix du mode le plus bas coût de livraison (camions à gaz comprimé, camions liquides cryogéniques ou gazoducs) dépend des caractéristiques géographiques et des marchés spécifiques (par exemple, la population de la ville et de rayon, densité de population, la taille et le nombre des stations de ravitaillement et la pénétration du marché des véhicules à pile à combustible). Selon de nombreux auteurs, les principaux facteurs qui influent sur le choix du mode de transport de l'hydrogène sont l'application, la quantité à transporter, la densité de la demande, et la distance entre le site de production les points de livraison [74]. Méthodes de distribution possible sont les suivantes :

II.10.1. Pipeline

L'hydrogène peut être fourni par l'intermédiaire d'un réseau de distribution de pipeline pour lequel de multiples fournisseurs et consommateurs sont attachés. Cela peut se faire par deux formes qui sont liquides et gazeux. Systèmes de canalisation d'hydrogène liquide sont techniquement possibles. Cependant, en raison de très haute capitale investissements impliqués dans la mise en place de ces réseaux de pipelines, les exigences matérielles et minimisation bouillir-off, etc., il ne peut pas être une option pour la distribution de l'hydrogène liquide de l'autoroute stations-service dans un avenir proche. D'autre part, les systèmes de pipelines gazeux comprimés impliquent un investissement en capital plus faible que liquides réseaux de pipelines d'hydrogène. [70]

Néanmoins, pour un petit nombre de stations-service, l'établissement d'un pipeline ne serait pas économiquement viable. Pour construire un pipeline, une demande stable avec des infrastructures à grande échelle est nécessaire. Seulement de cette manière, les coûts de transmission faibles peuvent être atteints. Cependant, si le pipeline est pensé pour une application à petite échelle, alors le coût de pipeline augmente considérablement et provoque les prix des carburants augmentent. Par conséquent, le calcul des coûts détaillés doit être effectuées avant de décider d'installer un pipeline [70].



Fig. II.20. Un pipeline à hydrogène.

II.10.2. Rail

Distribution de l'hydrogène peut également être effectuée par des voies ferrées. Réservoirs cryogéniques cylindriques tels que ceux utilisés pour le camionnage sont adoptées pour le transport ferroviaire. Ils ont de plus grandes capacités et peuvent transporter jusqu'à 9.100 kg d'hydrogène, avec des taux évaporation estimée à 0,2% par jour. Toutefois, en raison de l'écart entre l'infrastructure ferroviaire et les stations-service et les coûts élevés de transport liés avec le train, il est peu probable que cela deviendra une option pour la distribution de l'hydrogène. [70]

II.10.3. Navire

Le transport intercontinental d'hydrogène sera effectué sous forme utilisant liquides navires. A cet effet, les navires spécialisés avec des réservoirs appropriés et des installations portuaires sont conçus. Transport de l'hydrogène gazeux par bateau n'est économiquement pas réalisable puisque la quantité transportée est faible par rapport à la zone qu'il couvre sur le navire. Cependant, certains potentiels pétroliers d'hydrogène à grande échelle ont été étudiés en détail dans le cadre du programme de recherche du réseau mondial de l'énergie. En 1998, la principale conclusion d'une première étude de trois ans était qu'un navire-citerne d'une capacité de 200.000 m³ ou environ 14 millions de kg d'hydrogène liquide pourrait être construit à l'aide dans une large mesure la conception de base et les concepts en cours d'utilisation pour le transport de GNL [70].



Fig. II.21. Navire à hydrogène.

II.10.4. Camion

Aujourd'hui, la méthode la plus courante pour le transport de l'hydrogène se fait par camions. L'hydrogène peut être transporté sous forme gazeuse en utilisant des cylindres haute pression, remorques porte-tubes et sous forme liquide dans des réservoirs cryogéniques.

Si de l'hydrogène est transporté sous forme de gaz, il doit être comprimé à une pression très élevée afin de maximiser les capacités du réservoir. Bouteilles de gaz à haute pression par exemple sont classés aussi haut que 200 bars et détiennent environ 1,8 kg d'hydrogène, mais sont très coûteux à manipuler et à transporter.

Remorque tube, constitué de plusieurs cylindres en acier montés sur un cadre de protection peuvent être configurés pour contenir de 63 à 460 kg d'hydrogène, en fonction du nombre de tubes. Les pressions de fonctionnement sont 20-60 M Pa.

L'hydrogène liquide est transporté en utilisant des réservoirs isolés à double paroi spéciales pour empêcher l'ébullition de l'hydrogène liquide. Certains liquides pétroliers utilisent également des écrans thermiques de l'azote pour refroidir la paroi extérieure de la cuve d'hydrogène liquide pour minimiser le transfert de chaleur supplémentaire. Les camion- citerne peuvent transporter 360-4,300 kg d'hydrogène liquide. Taux évaporation pour camions sont de 0,3% -0,6% / jour. Le principal problème avec le transport d'hydrogène liquide serait les exigences d'isolation spécialisées et les pertes de pompage et ré-refroidissement de l'hydrogène liquide le long du chemin. [70]



Fig. II.22. Camion porte tubes.



Fig. II.23. Camion-citerne cryogénique

II.11. Distribution

Le jour où la voiture à hydrogène va devenir une réalité courante, la distribution, à l'instar de ce qui existe pour les carburants pétroliers, se devra de rendre l'hydrogène disponible en tout lieu, en toute sécurité, d'une manière commode et à un prix abordable. Il faudra pour cela relever un défi à la fois technologique et économique.

II.11.A. Technologies de la distribution de l'hydrogène en station-service

La distribution actuelle des carburants automobiles, si elle est une référence, n'est guère transposable au cas de l'hydrogène. Les carburants pétroliers sont liquides alors que l'hydrogène, dans sa forme la plus courante, est gazeux et, s'il est liquide, c'est à -253°C , une température qui nécessite un excellent conditionnement cryogénique. Les hydrocarbures distribués aujourd'hui proviennent essentiellement du raffinage du pétrole extrait par l'exploitation de gisements localisés en certains points de la planète ; ils sont parfois enrichis en biocarburants. L'hydrogène, au contraire, peut être obtenu en tout lieu, à partir de toute forme d'énergie primaire, en particulier renouvelable. On peut le produire dans la station de distribution elle-même ou, s'il provient d'une production centralisée, l'approvisionner par route, par voie ferrée, par voie d'eau ou par gazoduc. Enfin, les installations de distribution d'hydrogène à prévoir sont fonction du mode de stockage à bord du véhicule, aujourd'hui essentiellement le gaz comprimé à 35 ou 70 MPa (350 ou 700 bars). [75]

A. Distribution d'hydrogène comprimé

Le stockage de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé est d'une technologie qui s'est répandue grâce aux progrès réalisés dans le domaine des réservoirs composites à 35 et 70 MPa. De plus, ce type de stockage étant relativement facile à mettre en œuvre. Pour cette distribution il existe deux possibilités :

- Transfert direct du gaz sous pression : À partir d'une réserve d'hydrogène comprimé dans la station : il se fait, selon le modèle de véhicule, à 35 MPa ou 70 MPa. Ce type de station avait été, en 1997, associé aux premières opérations de démonstrations des bus Ballard à Chicago et à Vancouver. Si la manipulation du gaz sous pression est, à ce jour, par faite ment maîtrisée, son transfert à répétition dans une station-service demande des aménagements particuliers. Alors qu'un liquide s'écoule aisément d'un récipient à l'autre, par gravité ou par l'action d'une pompe volumétrique, un gaz ne se déplace en grande quantité que lorsqu'une différence de pression notable – plusieurs MPa – est maintenue entre l'amont et l'aval. Pour remplir un réservoir, il y a deux possibilités, la première est effectuée directement le transfert à l'aide d'un compresseur, et le deuxième est effectué le transfert à partir d'une réserve en surpression.

- Echange de réservoir : On remplace le réservoir vide par un réservoir rempli préalablement. Cette solution, peu utilisée, nécessite quelques moyens de manutention mais étant relativement rapide, elle est assez bien adaptée aux véhicules légers. [75]

B. Distribution d'hydrogène liquide

Sous la forme liquide, l'hydrogène offre le meilleur rapport quantité stockée/volume, donc devrait être bien adapté au stockage à bord des voitures particulières. Malheureusement, cette solution exige un équipement cryogénique performant et de plus, la faible ébullition du liquide due aux inévitables pertes thermiques, si réduites soient-elles, exige un réservoir embarqué ouvert permettant un dégagement permanent d'hydrogène. Cela évite l'accroissement de la pression dans le réservoir. Pour cette distribution il existe deux façons :

- Transfert de l'hydrogène liquide : le maniement de l'hydrogène liquide est délicat car sa température est très basse- (253°C) et sa vapeur (de l'hydrogène gazeux) est inflammable. Il est néanmoins parfaitement maîtrisé par le secteur de l'aérospatial pour le remplissage des réservoirs de fusée, un savoir-faire qui, si besoin était, pourrait être adapté aux critères de sécurité et aux spécifications économiques de l'industrie automobile. On peut concevoir une station de distribution d'hydrogène liquide comme étant, dans son principe, constituée d'un

gros réservoir d'hydrogène liquide d'où l'on soutire les quantités demandées par une légère pressurisation. Pour réduire la durée des transferts et limiter la consommation parasite d'hydrogène liquide, il faut que le réservoir à remplir ne soit pas réchauffé, c'est à dire qu'il ne soit pas complètement vide d'hydrogène liquide.

- Echange de réservoirs : une solution qui, jusque-là, n'a pas été expérimentée. Le remplacement du réservoir vide par un plein exigerait, vu le poids, un équipement de manutention, mais l'opération, outre sa relative rapidité, pourrait présenter l'avantage de reporter le transfert de l'hydrogène liquide hors la présence des clients de la station- service. [75].

C. Distribution pour les réservoirs a hydrures métallique

Le stockage de l'hydrogène dans les hydrures métalliques est en rapport quantité stockée/volume du réservoir trois fois supérieur à celui du gaz comprimé et offre en cela de l'intérêt pour la voiture particulière. En revanche, en raison du poids élevé des hydrures métalliques, le pourcentage poids H₂ stocké/ poids du réservoir, environ 7%, n'est pas très favorable. Concernant la distribution proprement dite, il n'est guère possible d'envisager un transfert direct car l'hydratation, qui correspond au remplissage, est très exothermique, et donc exige un refroidissement énergique du réservoir ; de plus, ce processus physicochimique est assez lent. Un remplacement du réservoir vide par un plein pourrait être une meilleure solution à la condition, là encore, de disposer d'un équipement de manutention adapté au poids, 100 kg ou plus, d'un tel réservoir à hydrures. [75]

II.12. Les risques liés à la Chain logistique d'hydrogène

L'hydrogène est un gaz léger, à forte diffusivité, extrêmement inflammable et présentant un domaine d'explosibilité étendu, ce qui en fait un produit réputé dangereux. Dans les conditions normales de température et de pression (15°C et pression atmosphérique), L'hydrogène est un gaz incolore, inodore, non toxique et non corrosif susceptible de générer en particulier, en cas de fuite présente des risques spécifiques de différents niveaux de criticité, on peut considérer des risques de niveaux de criticité élevés (incendie, explosion) et des risques de niveaux de criticité a priori faibles (anoxie, risque acoustique, risque cryogénique. [76]

II.12.1. Des risques de niveaux de criticité élevés

A. Risque incendie

L'hydrogène est un gaz extrêmement inflammable dans les conditions normales de températures et de pression (température et pression sont données à 273,15 K et 1atm).

B. Risque explosif

La plage d'explosivité de l'hydrogène est très large, si l'on considère que les limites d'inflammabilité sont similaires aux limites d'explosivité. La vitesse de propagation de la flamme permet de déterminer la nature du régime énergétique de L'explosion :

- Soit la déflagration : le front de flamme se déplace à une vitesse subsonique, les gaz frais sont alors comprimés par l'expansion du volume, on observe une augmentation continue de la pression dans le nuage gazeux ;

- Soit la détonation : la vitesse de propagation de la flamme est supersonique, on observe la formation d'une onde de choc (vitesse de propagation de la détonation dans l'air à TPN est de l'ordre 1480 à 2150 m/s). La flamme d'hydrogène se propage beaucoup plus rapidement. [75]

II.12.2. Des risques de niveaux de criticité a priori faibles**A. Risque d'asphyxie (anoxie)**

Comme pour tous les gaz, l'augmentation de la concentration en hydrogène entraîne la diminution du taux d'oxygène ce qui peut provoquer une asphyxie (anoxie). Le risque d'asphyxie interviendra essentiellement dans les milieux confinés et mal ventilé. L'hydrogène est un gaz très léger (densité = 0,07, beaucoup plus léger que l'air), il aura donc tendance à monter ; et à se diluer très vite dans l'air en milieu ouvert. Il convient toutefois de noter que si les conditions sont propices à l'apparition du risque d'asphyxie (anoxie)

B. Risque acoustique

Une fuite d'hydrogène survenant sur une canalisation ou sur une enceinte de stockage peut générer un bruit très important en fonction de la pression et de la vitesse d'échappement. Des essais ont montrés qu'un cadre ouvert d'azote à 20 MPa, équipé d'un orifice de sortie de lyre de 4 mm fait un bruit de 130 dB (équivalent à un avion au décollage à 100 m environ). L'hydrogène étant une molécule plus petite, le bruit sera toutefois moins important. Il convient de s'éloigner pour s'affranchir des conséquences. [75]

C. Risque thermique

L'hydrogène liquide étant à la température de -253 °C , il présente des risques spécifiques :

- Le risque cryogénique : les liquides cryogéniques sont susceptibles de provoquer des effets sur la peau similaire aux brûlures thermiques.

- Le risque de vaporisation : à pression atmosphérique, un litre d'hydrogène peut se vaporiser quasi instantanément en 780 litres de gaz.

II.12.3. Les risques liés à la production

D'après les expériences réalisées par. [77] ; Concernant le comportement des mélanges hydrogène/oxygène ou air sous pression ou haute température. Dont le but de développer la production de l'hydrogène on peut distinguer deux types de risques lié à la production :

A. Risque d'inflammation ou d'explosion

Il existe un risque de formation d'une atmosphère explosive (ATEX) dans le procédé ou d'inflammation d'une fuite de gaz. Dans le cas de l'électrolyse, le risque d'explosion est plus important dans la mesure où l'on produit simultanément de l'hydrogène et de l'oxygène.

Bien que les cellules soient séparées par des membranes, une étanchéité parfaite n'est jamais atteinte et il existe donc un risque non négligeable de formation d'un mélange explosif hydrogène/oxygène. Ce risque est déjà connu pour les électrolyseurs classiques. Il est cependant moins bien maîtrisé dans le cas de l'électrolyse haute température ou haute pression, même dans la première étude de sécurité réalisé par sur les électrolyseurs haute pression et notamment sur l'évolution avec la pression et la température, la perméation de l'hydrogène à travers les diaphragmes (un autre risque non négligeable).

B. Risque mécanique à température et pression élevées

De même, dans le cas de l'électrolyse, les pressions peuvent aller jusqu'à 30 bars pour une électrolyse classique et jusqu'à 700 bars pour les technologies haute pression. Si dans le cas de l'électrolyse classique, la température ne dépasse pas 160 °C , du fait de l'utilisation d'un électrolyte aqueux, dans le cas de l'électrolyse haute température elle peut atteindre 800 °C . Les risques liés à ces paramètres sont donc principalement les risques de défaillance mécanique des réacteurs et les risques d'éclatement ou de fuite associés.

II.12.4. Les risques liés au transport

Le risque de transport par route est un risque très difficile à appréhender en termes d'identification, de localisation et de quantification (tonnage des matières transportées). C'est un risque diffus car il est disséminé sur l'ensemble du territoire. En effet, les itinéraires routiers ne sont pas fixes, même si certains axes sont privilégiés, et varient à volonté en fonction de la circulation, des cahiers des livraisons. De plus, le risque routier est un risque collectif car l'ensemble de la population du territoire y est exposé. La prévention résulte de l'application de la réglementation et de son contrôle. La sécurité repose principalement sur la fiabilité des matériels (véhicules, citernes, etc.) et sur la formation du personnel qui le met en œuvre.

A. Par pipelines

Il consiste à transporter par canalisations, le plus souvent enterrées. De façon générale, les accidents ou incidents survenant sur les canalisations peuvent avoir deux origines :

- Soit une défaillance de la canalisation et des éléments annexes (vannes, etc.).
- Soit une rupture ou une usure due à un évènement externe : collision, glissement de terrain, séisme, érosion par une crue de rivière, etc.

B. Par camion et train

Dans la majorité du temps, l'hydrogène gazeux reste transporté par camion. Pour les petites quantités, sous deux formes :

- dans des structures métalliques appelées « cadres » contenant plusieurs bouteilles reliées entre elles avec une seule sortie. Les cadres sont déchargés et déposés à la station-service. Ces cadres de bouteilles sont proposés, selon les fournisseurs, dans une gamme allant d'environ 8 kg à plusieurs dizaines de kilos d'hydrogène ;
- dans de grands cylindres, appelés aussi « tubes », sur une remorque contenant plusieurs centaines de kilos d'hydrogène (de 180 à 500 kg). Celle-ci est soit laissée sur site soit transférée ou dépotée, par le livreur, dans un réservoir fixe installé chez le client. Le réservoir peut être la propriété du fournisseur de gaz ou avoir été acheté par le client.

Les cadres ou cylindres ainsi livrés se connectent directement à la station-service d'hydrogène. La pression de remplissage standard des cadres est de 20 MPa (200 bar). Il existe

aussi des cadres à 35 MPa (350 bar) et des développements sont en cours pour fournir une logistique à 50 MPa (500 bar) voire 70 MPa (700 bar). [76]

II.12.5. Les risques liés au stockage

A. Stockage sous hautes pressions

Le stockage d'hydrogène doit être poursuivi, notamment pour améliorer la maîtrise des risques associés aux différents événements redoutés :

Il se caractérise par une faible densité volumique qui nécessite de le stocker dans des bouteilles ou de grands réservoirs à hautes pressions, qui ont déjà été examinés et soumis à des agressions (feu, tir à balle, chute...), afin d'évaluer d'une part le niveau de fiabilité des dispositifs de sécurité (fusible thermique et limiteur de débit) et d'autre part le maintien de l'intégrité de ces réservoirs.

B. Stockage solide

La mise en contact accidentelle du composé adsorbant (sous forme de poudre) avec l'air, l'eau ou encore d'autres agents incompatibles est plus particulièrement redoutée compte tenu des risques d'incendie violents qui peuvent en résulter. Ceci conduit à des tests sur différents matériaux adsorbants qui sont soumis à des conditions similaires à celles rencontrées en situation accidentelle. Les premiers résultats mettent en évidence, pour les hydrures testés, l'absence de réaction à l'air libre et à l'eau. [75]

II.12.6. Risques associés à la distribution dans les stations-service

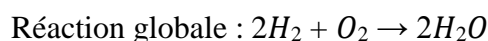
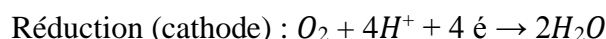
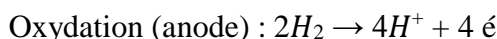
La maîtrise des risques de fuite et d'inflammation de l'hydrogène ainsi que de surpression dans la zone de distribution fait l'objet d'une attention particulière qui conduit à un développement de mesures de maîtrise des risques innovantes et spécialement adaptées à la distribution d'hydrogène. Par exemple la borne de distribution est munie d'un dispositif anti arrachement, un arrêt d'urgence qui déclenche en cas de collision... Le protocole de distribution est défini de manière très précise avec un suivi des paramètres clés (la température, la pression...) et repose sur une interface de communication entre le véhicule et la borne de distribution. La charge du réservoir, la température et la pression sont communiquées et vérifiées en permanence par un système de régulation qui optimise les débits et interrompt le chargement automatiquement. [75]

II.13. Les applications de l'hydrogène comme vecteur énergétique

L'hydrogène comme vecteur énergétique peut être utilisé pour de nombreuses applications. Certaines sont actuellement développées de façon industrielle alors que d'autres sont encore à l'état de prototype.

II.13.1. La pile à combustible

Le principe de la pile à combustible a été démontré par l'Anglais William Grove, en 1839. Le processus peut être décrit comme l'inverse de l'électrolyse de l'eau. En fait, il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur. Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (anode et cathode) chargées en catalyseur et séparées par un électrolyte. L'hydrogène est oxydé à l'anode ; les protons traversent ensuite l'électrolyte pour se retrouver à la cathode où ils réagissent avec les électrons et l'oxygène et donnent de l'eau, seul sous-produit de cette réaction.



En raison de sa haute efficacité énergétique, la pile à combustible est considérée comme l'un des principaux moteurs pour l'hydrogène comme carburant d'avenir [78].

Des constructeurs automobiles ont développés des technologies avancées et des véhicules dotés de moteurs électriques alimentés par des PAC sont déjà commercialisés [79-80].

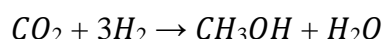
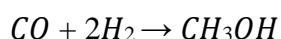
II.13.2. Le moteur à combustible interne

L'hydrogène peut être brûlé directement dans un moteur à combustion interne, avec des avantages remarquables par rapport aux moteurs à essence. Les moteurs à combustion interne à pistons exploités en mode essence ou diesel sont venus sur le marché à la fin du 19ème siècle. Toutefois, un moteur tournant à combustion interne à l'hydrogène à une efficacité maximale d'environ 38%, soit 8% de plus que le moteur à combustion interne à essence et pratiquement sans émission [81].

II.13.3. Synthèse du méthanol

Le méthanol, un carburant écologique produit à partir d'hydrogène et des rejets de CO₂, présente d'importants atouts qui en font un candidat pour contribuer au remplacement d'une partie de l'énergie d'origine fossile ou nucléaire consommée actuellement.

Le gaz de synthèse, obtenu à partir du gaz naturel, vers 830°C, sous une pression de 18 bar, possède la composition suivante en volume : H₂ (72 %), CO (13 %), CO₂ (8 %), impuretés (eau, méthane). Il est alors refroidi et comprimé (15 à 100 bar), puis introduit dans le réacteur de synthèse. Les réactions ont lieu vers 250°C, en présence d'un catalyseur aux oxydes de cuivre et de zinc sur alumine (durée de vie de 3 ans) :

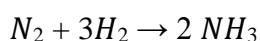


Le méthanol sert principalement à produire le MTBE (Methyl Tertiary-Butyl Ether) qui est devenu l'un des produits de base des carburants suite à des mesures de reformulation des essences (Federal Reformulated Gasoline Program) imposées par l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) en 1995 [82]. Le méthanol est également utilisé dans des piles à combustible telles que les RMFC (Reformed Methanol Fuel Cell) où le méthanol est reformé pour produire le dihydrogène qui alimentera la pile et les piles DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) où le méthanol est directement oxydé dans le cœur de la pile et ne nécessite pas d'être reformé.

La production mondiale de méthanol en 2016 était de 125 millions de tonnes environ. Elle consomme en moyenne 1 500 m³ d'hydrogène par tonne de méthanol produit ce qui correspond à une consommation annuelle avoisinant 190 milliards de m³ d'hydrogène [83].

II.13.4. Synthèse de l'ammoniaque

L'ammoniaque est une substance de base de l'industrie chimique qui sert notamment à fabriquer des engrais azotés et des explosifs. Pour produire 1 tonne d'ammoniaque (NH₃), il faut 658 m³ d'azote et 1974 m³ d'hydrogène, mesurés à 1 bar et 25 °C. La synthèse de NH₃ a lieu à haute pression (8 à 30 MPa), 350 à 500°C, en présence de catalyseurs contenant du fer. Le rendement est faible (environ 20 %), ce qui nécessite un recyclage du gaz non converti après récupération de NH₃ par refroidissement.



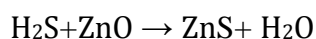
L'azote provient de l'air. L'hydrogène est obtenu principalement par vapo-reformage du gaz naturel (composé de méthane, CH₄) mais aussi, particulièrement en Chine, à partir du charbon, lors de l'élaboration du coke ou par gazéification en présence d'eau. En 2016, les capacités mondiales de production sont de 219 millions de tonnes/an d'ammoniac [84].

II.13.5. Désulfuration des hydrocarbures

La production d'hydrogène par reformage d'hydrocarbures nécessite l'utilisation de catalyseurs généralement très sensibles à l'empoisonnement par le soufre. Il est donc nécessaire d'éliminer préalablement les composés soufrés éventuellement présents dans la charge d'hydrocarbure [85].

La désulfuration s'effectue généralement en deux étapes : une hydrogénation catalytique suivie d'une élimination finale des composés soufrés. Les composés sont d'abord transformés en H₂S par réaction avec de l'hydrogène mélangé au gaz à traiter. La réaction s'effectue à environ 350 - 400°C, en présence de catalyseur d'hydrogénation (Co-Mo ou Ni-Mo). La teneur en hydrogène dans le gaz est de 2 à 5 % en volume.

L'élimination complète du soufre se fait finalement par combinaison irréversible du sulfure de dihydrogène avec de l'oxyde de zinc à environ 400 °C selon la réaction :



II.14. Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes technologies de production, d'utilisation, de distribution et de stockage de l'hydrogène ont été décrites, qui peut être utilisés dans le développement d'une infrastructure future. Plusieurs exemples de projets et tentatives d'économies basées sur l'hydrogène ont été exposés.

Si nous ne regardons que du point de vue de l'utilisation, l'hydrogène semble être la solution miracle pour sortir de la crise énergétique et environnementale actuelle. En effet, l'hydrogène semble inépuisable et est partout sous forme d'eau, il peut donc être produit dans tous les pays, ce qui résout les tensions économiques et sociopolitiques entre les pays. De plus, il ne crée a priori aucune pollution.

Références :

- [1] <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-et-societe/environnement/introduction-a-la-chimie-verte>
- [2] <http://pedagogie.ac-limoges.fr/physique-chimie/IMG/pdf/chimie-verte.pdf>
- [3] CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), « Le soleil – de l'étoile à l'énergie domestique- », ISSN 1637-5408, 2004
- [4] CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), « L'hydrogène », ISSN 1637-5408, 2004
- [5] **Bent Sorensen**, « Hydrogen and Fuel cells: Emerging technologies and applications » Elsevier – Academic Press, ISBN: 0-12-655281-9, 2005
- [6] **Cristina Luliana**, « Phases et nouveaux composés à base de Magnésium pour le stockage de l'hydrogène », thèse doctorat université de Bordeaux, 2008
- [7] **M M. Robert Galley** et **Claude Gatignol** ; « Rapport sur les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible », 3 juillet 2003.
- [8] [file:///C:/Users/Equipe%20Systeme/Downloads/Nuclear%20Hydrogen%20Production%20Handbook%20\(Green%20Chemistry%20and%20Chemical%20Engineering\)%20\(%20PDFDrive%20\).pdf](file:///C:/Users/Equipe%20Systeme/Downloads/Nuclear%20Hydrogen%20Production%20Handbook%20(Green%20Chemistry%20and%20Chemical%20Engineering)%20(%20PDFDrive%20).pdf)
- [9] **Germain gondor** . Thèse ; Pour le stockage de l'hydrogène: analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métallique set optimisation durem plissage d'un réservoir ; 2008
- [10] **Duignan, A. Simonitsc**, T. (2020). US Machinery Hydrogen 101. North America Equity Research. JP Morgan. According to other sources even 10-11kg of CO2 for every kilogram of hydrogen produced.
- [11] <https://unfutursimple.ca/couleurs-de-lhydrogene/>, Par Michel Gérin 16 décembre 2022
- [12] **Megret O., Hubert I., Calbrytrably M., Carrere, H., Garcia-Bernet D., Bernet, N.**, Production d'hydrogène à partir de déchets. État de l'art et potentiel d'émergence. Rapport Final 2015. Record.
- [13] « Les 7 couleurs de l'hydrogène » [archive], sur H2H24 (consulté le 24 juin 2021).
- [14] **Olivier Daelen**, « Cette centrale nucléaire britannique veut produire de l'hydrogène rose : une première en Europe [archive] », sur fr.businessam.be, 2 août 2021.
- [15] « Le plan hydrogène français entérine discrètement la relance du nucléaire » [archive], sur Reporterre, 2 février 2021.
- [16] (en) « Hydrogen produced from nuclear will be considered 'low-carbon', EU official says » [archive] [« L'hydrogène produit à partir du nucléaire sera considéré comme « à faible empreinte en carbone », selon un fonctionnaire de l'UE »], sur EURACTIV, 19 novembre 2020.

- [17] **Florian Osselin**, Cyprien Soullaine, C. Fauguerolles, Éric C. Gaucher, Bruno Scaillet *et al.*, « Orange hydrogen is the new green », *Nature Geoscience*, vol. 15, n° 10, 3 octobre 2022, p. 765-769 (DOI [10.1038/s41561-022-01043-9](https://doi.org/10.1038/s41561-022-01043-9), [lire en ligne \[archive\]](#) [PDF], consulté le 25 janvier 2023).
- [18] (en-US) admin, « Colors » [archive], sur *Hydrogen x Revolve* (consulté le 17 novembre 2021).
- [19] « *Et si l'hydrogène naturel était le game changer de la transition énergétique ?* » [archive], sur *La Tribune* (consulté le 9 septembre 2021)
- [20] « La France a une carte à jouer dans l'hydrogène naturel » [archive], sur *h2-mobile.fr* (consulté le 9 septembre 2021).
- [21] <https://www.mobility-observatory.arval.fr/toutes-les-couleurs-de-lhydrogene>, le 5 novembre 2021.
- [22] **D. Duprez, A. Miloudi, G. Delahay, R. Maurel** (1994) Selective Steam Reforming of Aromatic Hydrocarbons. *J Catal*, Vol 90, 292-301.
- [23] **A. Le Duigou, M. Mignet**. Synthèse du Projet PROTECH2/ ANR05PANH007/ 27 Février 2009 – ENERDATA.
- [24] **A. Godula-Jopek**. Hydrogen Production by Electrolysis; Wiley-VCH, Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2015.
- [25] **M. Balat et al.**, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34 (2009) 3589.
- [26] A. Konieczny, K. Mondal, T. Wiltowski, P. Dydo, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (2008) 264.
- [27] NZ. Muradov, TN. Veziroglu, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30 (2005) 225.
- [28] JM. Ogden, MM. Steinbugler, TG. Kreutz, *Journal of Power Sources*, 79 (1999) 143.
- [29] M. Onozaki, K. Watanabe, T. Hashimoto, H. Saegusa, Y. Katayama, *Fuel*, 85 (2006) 143.
- [30] **P. Bernardo, G. Barbieri**, E. Drioli, *Chem. Eng. Sci.* 65 (2010) 1159.
- [31] **AP. Simpson, AE. Lutz**, *Int. J. Hydrogen Energy*, 32 (2007) 4811.
- [32] K. Shashi, K. Surendra, KP. Jitendra, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 34 (2009) 6655.
- [33] **F. Joensen and J. R. Rostrup-Nielsen**, *Journal of Power Sources*, 105 (2002) 195.
- [34] **N. Hajjaji**. Thèse de Doctorat. Université de Nancy (2011).
- [35] CN. Avila-Neto et al., *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1 (2009) 205.

- [36] Mémento de l'Hydrogène : AFHYPAC – IFPEN, Fiche 3.1.1.octobre (2011).
- [37] **DJ. Wilhelm, DR. Simbeck, AD. Karp, RL. Dickenson**, Fuel Processing Technology 71(2001) 139.
- [38] **L. Chibane**, Thèse de Doctorat. Université de Setif1 (2012)
- [39] **W. Klose, M. Wolki**, Fuel, 84 (2005) 885.
- [40] **H. Gaffron and J. Rubin**, 'Fermentative and Photochemical Production of Hydrogen in Algae', Journal of General Physiology, Vol. 26, pp. 219 - 240, 1942.
- [41] **J.R. Benemann, K. Miyamoto and P.C. Hallenbeck**, 'Bioengineering Aspects of Biophotolysis', Enzyme Microbiological Technology, Vol. 2, pp. 103 - 111, 1980.
- [42] **F.P. Healey**, 'Hydrogen Evolution by Several Algae', Planta, Vol. 91, p. 220, 1970.
- [43] **J.R. Benemann, J.A. Berenson, N.O. Kaplan and M.D. Kauren**, 'Hydrogen Evolution by a Chloroplast-Ferredoxin-Hydrogenase System', Proc. Nat. Acad. Sci., USA, Vol. 70, pp. 2317 - 2320, 1973.
- [44] **G.D. Smith, G.D. Ewart and W. Tucker**, 'Hydrogen Production by Cyanobacteria', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 17, N°9, pp. 695 - 698, 1992.
- [45] **J.S. Kim, K. Ito and H. Takahashi**, 'Production of Molecular Hydrogen by Rhodospseudomonas sp.', Journal of Fermentation Technologie, Vol. 59, N°3, pp. 185 - 190, 1981.
- [46] **M. Vincenzini, R. Materassi, M.R. Tredici and G. Florenzano**, 'Hydrogen Production by Immobilized Cell-I. Light Dependent Dissimilation of Organic Substances by Rhodospseudomonas Palustris', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 7, N°3, pp. 231 - 236, 1982.
- [47] **J. Miyake**, 'Application of Photosynthetic Systems for Energy Conversion', In: T.N. Veziroglu and P.K. Takashashi, Editors. Hydrogen Energy Progress VIII, Proceedings of the 8 th WHEC, Hawaii, N-Y, Pergamon Press, pp. 755 - 764, 1990.
- [48] **J. Agrell, M. Boutonnet and J. L. G. Fierro** (2003) Production of hydrogen from methanol over binary Cu/ZnO catalysts: Part II. Catalytic activity and reaction pathways. Appl Catal A: Gen, Vol 253, 213-223.
- [49] Thèse ,Hydrogène Systems Modelling, Analysis and Optimisation ; Septembre 2009.
- [50] **Noureddine Hajjaji** . Thèse ,Analyse de cycle de vie exégétique de systèmes de production d'hydrogène ;2011.
- [51] **HananeDagdougui**. Thèse ,Decision support systems for sustainable renewable energy systems and hydrogen logistics: modelling, control and risk analysis ;décembre2011

- [52] **Z. Wang, R.R. Roberts, G.F. Naterer, K.S. Gabriel**, International Journal of Hydrogen Energy, 37 (2012) 16287.
- [53] **O. Bicakova, P. Straka**, International Journal of Hydrogen Energy, 37 (2012) 11563.
- [54] **S. Dragicalj, PM. Milica, PS. Sofija, S. Scépan**, Journal of Power Sources, 118 (2003) 315.
- [55] **K. Andreassen**. Hydrogen Production by Electrolysis - Hydrogen Power: Theoretical and Engineering Solutions, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.1998
- [56] **V. Schroder, B. Emonts, H. Janssen, HP. Schulze**, Chemical Engineering &Technology, 27 (2004) 847.
- [57] **VM. Rosa, MBF. Santos, E.P. Da Silva**, Int. J. Hydrogen Energy, 20 (1995) 697.
- [58] **A. Damien**, “Hydrogène par électrolyse de l'eau”, Techniques de l'ingénieur, J 6366 (1992).
- [59] **A. Brisse, J. Schefold, M. Zahid**, Int. J. Hydrogen Energy, 33 (2008) 5375.
- [60] **MA. Laguna-Bercero**, Journal of Power Sources, 203(2012) 4.
- [61] **P. Moçoteguy, A. Brisse**, Int. J. Hydrogen Energy, 38 (2013) 15887.
- [62] **WT. Grubb**, J. Electrochem. Soc. 106 (1959) 275.
- [63] **P. Millet**, ‘Electrolyseurs de l'Eau à Membrane Acide’, Ref. J4810, Techniques de l'Ingénieur, 2007.
- [64] **SJ. Peighambardoust, S. Rowshanzamir, M. Amjadi**, Int. J. Hydrogen Energy, 35 (2010) 9349.
- [65] **P. Medina, M. Santarelli**, Int. J. Hydrogen Energy, 35 (2010) 5173.
- [66] **SA. Grigoriev, MS. Mamat, KA. Dzhus, GS. Walker, P. Millet**, Int. J. Hydrogen Energy, 36 (2011) 4143.
- [67] HYDROGEN PRODUCTION AND STORAGE- R&D Priorities and Gaps, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
- [68] KPMG, The hydrogen trajectory, Disponible sur : <https://home.kpmg/xx/en/home/insights/2020/11/the-hydrogen-trajectory.html>
- [69] Sandra Enkhart, Green hydrogen price may drop to €5 kg by 2025, Disponible sur : <https://www.pv-magazine.com/2022/05/31/green-hydrogen-price-may-drop-to-e5-kg-by-2025/#:~:text=Aurora%20Energy%20Research%20says%20in,plants%20are%20combined%20with%20electrolyzers>

- [70] **Mustafa tasaltin** . Economic and Environmental Supply of Hydrogen Fuels in Comparison with Conventional Fuels ; march2008
- [71] **Maha bhour**i. Optimisation des transferts de chaleur dans un système de stockage d'hydrogène à base d'alanate de sodium ; avril 2012
- [72] Air liquide ;[en ligne]. Disponible sur :<<http://www.planetehydrogene.com/fr/lhydrogene/comment-le-stocker/sous-forme-solide.html> >(Consulté le 25/02/2016)
- [73] Mcphy energy ;[en ligne]. Disponible sur : <<http://www.mcphy.com/fr/produits/stockage-hydrogene-solide/>> (Consulté le25/02/2016)
- [74] **HananeDagdoug**ui. Thèse ,Decision support systems for sustainable renewable energy systems and hydrogen logistics: modelling, control and risk analysis ;décembre2011
- [75] **AMOUMENE Smail** et **BABA HAMOU Mohamed Nacer**, Conception de la chaine logistique de l'hydrogène Application au réseau de transport Routier. Memoir de master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017
- [76] **ADEME**, 2015. Guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations service de distribution d'hydrogène.
- [77] **H. Janssen, J. C. Bringmann, B. Emonts, V. Schroeder**, Int. J. of Hydrogen Energy, 29 (2004) 759-770
- [78] **MN. Eisler**, "Getting power to the people: technological dramaturgy and the quest for the electrochemical engine", History and Technology, Vol.25 (2009) 49.
- [79] **CE. Sandy Thomas**, Int. J. Hydrogen Energy, 34 (2009) 9279.
- [80] **G. Frenette, D. Forthoffer**, Int. J. Hydrogen Energy, 34 (2009) 3578.
- [81] **M. Pagliaro**, AG. Konstandopoulos. Solar Hydrogen-Fuel of the Future. RSC Publishing, Cambridge, UK, 2012.
- [82] **ER. Nesbitt**. Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE): Conditions Affecting the Domestic Industry, Inv. 332-404, DIANE Publishing, Washington CD, 1999
- [82] Documents de la Société Chimique de France/
<http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/orga/methanol/texmeol.htm>
- [84] Documents de la Société Chimique de France/
<http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/mine/nh3/cadnh3.htm>
- [85] **JP. Mazaud**, Production des gaz de synthèse, Techniques de l'ingénieur, J5480, 1996

Chapitre III : Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire LAMES.

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

III.1. Introduction

L'hydrogène vert est devenu un sujet d'intérêt croissant dans le domaine de l'énergie durable en raison de son potentiel à réduire les émissions de gaz à effet de serre et de favoriser une transition vers une économie basée sur les énergies propres.

Dans ce chapitre nous allons décrire les méthodes expérimentales mise en œuvre pour la réalisation de l'étude de la production de l'hydrogène vert on utilisant des procédés électrochimiques.

L'objectif de cette partie expérimentale est de comprendre les mécanismes de marche de ces procédés, ainsi d'identifier les facteurs clés qui influencent les performances de ces dernières et de proposer des améliorations potentielles pour rendre la production d'hydrogène vert plus efficace et économiquement viable à grande échelle.

En mettant en œuvre une approche expérimentale rigoureuse, nous espérons contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la production d'hydrogène vert, en fournissant des données précieuses et des résultats concrets qui pourront guider le développement futur de technologies prometteuses.

III.2. Cellule électrochimique utilisée (électrolyseur)

Pour atteindre notre objectif pour produire de l'hydrogène vert on a pu développer deux types de réacteurs chimiques l'un cylindrique en batch et l'autre rectangulaire équipé de plusieurs chicanes.

Premièrement Les expériences ont été réalisées dans un réacteur cylindrique en batch avec un volume de 1.23 litres composée de deux couches de verre, ses mesures sont comme suivies : (**Hin=7.1cm, Hex=6.5cm, Din=9.9cm, e=0.8cm**). Elle contient deux électrodes de matière et dimensions différentes (l'anode et cathode).

Après avoir fait l'expérience plusieurs fois et obtenu des résultats spécifiques, nous avons changé le réacteur afin d'obtenir de meilleurs résultats.

On a réalisé les expériences dans un réacteur rectangulaire équipée en plusieurs chicanes avec une capacité volumique de 7 litres en plastique et des mesures comme suit :

Hauteur= 19cm ; longueur= 25.5 cm, largeur= 5cm

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

Dans cette cellule on a utilisé des électrodes sous forme d'une plaque d'une seule matière.

Les deux cellules électrochimiques sont équipées d'un agitateur magnétique afin de maintenir l'électrolyte bien mélangé. Ainsi que L'alimentation a été fournie par une alimentation DC (alimentation AC-DC réglable en électronique de laboratoire MCP) avec contrôle de tension (0.6A-0.30V).

III.3. Les électrodes

Réacteur 1

Dans le réacteur cylindrique en batch on a utilisé deux types d'électrodes l'un en platine sous une forme demi-cylindre. Et la deuxième électrode on a utilisé deux types d'électrodes l'une est en cuivre à haute pureté et l'autre fois en acier inoxydable. Dans le réacteur rectangulaire équipé d'un ou plusieurs électrodes en acier inoxydable avec une surface de l'ordre de 15.4cm².

Tous les électrodes sont placées en séries et par le même nombre de compartiment cellulaire (surface interfaciale entre les compartiments de l'ordre 30 mm).

Réacteur 2

Dans le réacteur rectangulaire équipé d'un ou plusieurs électrodes en acier inoxydable avec une surface de l'ordre de 15.4cm². Tous les électrodes sont placées en séries et par le même nombre de compartiment cellulaire (surface interfaciale entre les compartiments de l'ordre 30 mm).

III.4. L'électrolyte (solution électrolytique)

L'eau distillée produite à l'échelle de laboratoire de la faible résistivité de l'ordre 18 MΩ chargée par dissolution du sels (analytical grade). Plusieurs sels ont été testés, étudiés, et évalués.

Le sel de l'hydroxyde de potassium (KOH) déshydraté (KOH.x H₂O) a été choisi en fonction de leur efficacité du transport facilité de la matrice ionique.

Initialement le taux de salinité utilisé est de l'ordre de 35 à 38 g/l (matrice simulée à une eau de la mer méditerranéenne).

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

III.5. Matériels et produits utilisés

Agitateur magnétique

Générateur d'un courant électrique

Chronomètre

Thermocouple

Balance

Distillateur d'eau

PH-mètre

Hydroxyde de potassium (KOH)

Câbles de connexion

Ballon pour stocker le gaz produit

III.5.1. Agitateur magnétique : appareil de base pour homogénéiser des solutions ou dissoudre des éléments solides dans un solvant approprié. L'agitation est assurée par un barreau aimanté placé à l'intérieur du récipient contenant le liquide à homogénéiser. L'option principale de ce type d'agitateur est une plaque chauffante : l'élément chauffant permet d'accélérer la dissolution de certains éléments chimiques dans un solvant.



Figure III.1. Agitateur magnétique

III.5.2. Générateur d'un courant électrique : Des dispositifs permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie (électronique de laboratoire MCD alimentation AC-DC réglable)

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES



Figure III. 2. Générateur d'un courant électrique

III.5.3. Chronomètre : C'est un type d'horloge très précise qui est utilisé Pour mesurer des fractions de secondes à temps.



Figure III. 3. Chronomètre

III.5.4. Thermocouple : est un instrument de mesure utilisé pour évaluer la température



Figure III. 4. Thermocouple.

III.5.5. Balance : Instrument de mesure utilisé pour peser des éléments, pour déterminer leur masse.



Figure III.5. Balance

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

III.5.6. Distillateur d'eau :

Un distillateur d'eau est un appareil utilisé pour purifier l'eau en éliminant les contaminants et impuretés présents. Le processus de distillation consiste à chauffer l'eau jusqu'à son point d'ébullition, puis à collecter la vapeur produite et la condenser pour obtenir de l'eau pure.



Figure III. 6. Distillateur d'eau

III.5.7. pH-mètre :

Un pH-mètre est un instrument de mesure utilisé pour déterminer le Ph d'une solution. Le pH est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'une substance, indiquant la concentration d'ions d'hydrogène (H^+) présents dans cette solution.



Figure III.7. PH-mètre

III.5.8. Hydroxyde de potassium (KOH) :

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

L'hydroxyde de potassium, dénommé de façon usuelle la potasse caustique au laboratoire, est un corps composé minéral de formule brute KOH.

Masse molaire : 56,1056 g/mol

Formule : KOH

Masse volumique : 2,12 g/cm³

Nom IUPAC : Potassium hydroxyde

Point de fusion : 360 °C

Point d'ébullition : 1 327 °C

Solubilité : Eau, Glycérol

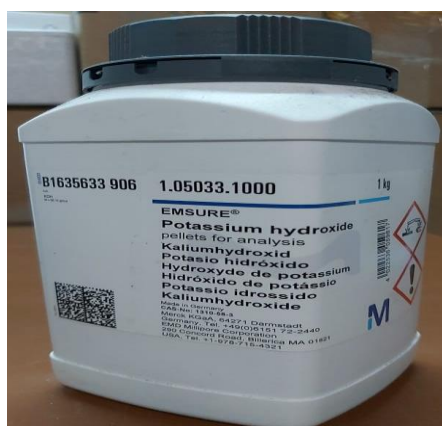


Figure III. 8. Flacon d'hydroxyde de potassium

III.5.9. Câbles de connexion :

Ce sont des câbles conducteurs qui relient la source d'alimentation électrique (généralement une batterie ou une alimentation électrique) aux électrodes où se produit l'électrolyse. Ils doivent être capables de transporter le courant électrique nécessaire pour le processus.

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES



Figure III.9. Câbles de connexion

III.6. Les étapes à suivre pour le protocole expérimental développé au niveau de laboratoire LAMES :

1* la préparation de la cellule électrolytique en plaçant les deux électrodes à l'intérieur de la cellule en assurons qu'ils sont correctement positionnés (Géométrie bien déterminé).

2* Deux solution électrolytique ont été préparées. L'une est l'eau de mer de la cote limitrophe ; filtrée avant d'être utilisée et l'autre une matrice salée simulée à l'échelle de laboratoire.

3* Emplacement des électrodes spécifiques suivant le type de réacteur électrochimique a savoir cylindrique en batch et rectangulaire.

4* Maitrise des points de consignes de générateur électrique de type (MCP) afin de s'assurer une alimentation électrique constante pendant les manipulations.

5* Supervision et régulation de l'enceinte électrochimique.

6* Récupération du gaz produit par des ballons appelés beau de riche spécifiques au laboratoire avant d'être injecté à la chromatographie phase gazeuse.

7* Obtention des chromatographes spécifiques à chaque matrice gazeuse prélevée.

8* Chaque manipulation doive être répétée au moins deux fois.

Remarque :

Nous avons utilisé deux types de réacteurs et chaque réacteur a ses caractéristiques ainsi des matrices salées différentes pour atteindre notre objectif.

III.6.1. Le prétraitement de l'eau de mer

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

a. **La filtration physique** : est un processus visant à éliminer les particules et impuretés présentes dans l'eau de mer en passant cette dernière à travers un papier filtre.



Figure III.10. La filtration de l'eau de mer

b. La décantation –sédimentation et flottation

Est un processus où l'eau de mer est laissée tranquille dans un récipient, permettant aux particules solides plus lourdes de se déposer au fond sous l'effet de la gravité. Cela laisse l'eau plus claire en surface, pouvant être extraite sans les particules déposées.



Figure III. 11. La décantation de l'eau de mer

c. Mesure du Ph :

Temps	ph
Avant filtration	8.34
Après filtration	8.29
Après décantation	8.12

d. Mesure de la conductivité

Entre 1.5 et 2.5 μ S/Cm

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

III.6.2. Le réacteur cylindrique :

Nous avons réalisé deux expériences dans ce réacteur.

Après le processus de prétraitement, nous avons pris un volume de 700 ml pour chaque expérience et en avons rempli le réacteur.

A. La première expérience :

Le réacteur a été rempli de la solution électrolytique choisie en utilisant une alimentation en discontinue DC = 12 V.

La cellule électrochimique équipée de deux électrodes (une anode en platine et une cathode en cuivre), et bien placés sur une plaque d'agitation.



Figure III.12. Plaque en platine



Figure III.13. Plaque en cuivre

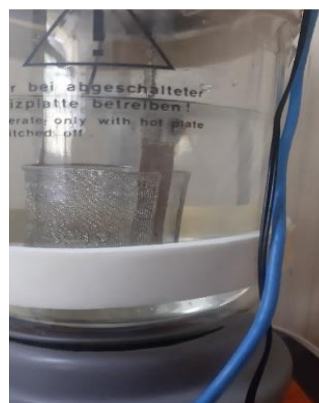


Figure III.14. Les deux plaques émergées dans l'électrolyte.

B. La deuxième expérience :

Cette fois, nous avons répété la même expérience précédente (l'eau de mer comme électrolyte, alimentation DC, anode en platine), mais nous avons changé la cathode (du cuivre) en acier inoxydable.

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

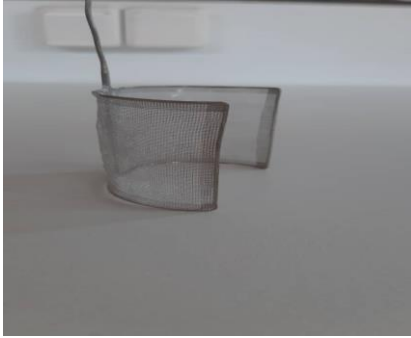


Figure III.12 Une plaque en platine.



Figure III.14. Des plaques en inox.

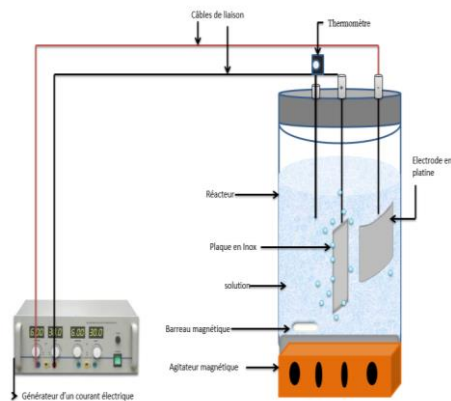


Figure III. 15. Le réacteur cylindrique.

III.6.3. Le réacteur rectangulaire :

Pour le deuxième réacteur, plusieurs expériences ont été réalisées avec le même type d'électrolyte à différentes concentrations tout en conservant les mêmes conditions opératoires à savoir courant d'alimentation 12v en DC.

- ✓ Une eau distillée chargée en KOH comme matrice saline.
- ✓ Un acier inoxydable comme métal pour les deux électrodes (anode et cathode)
- ✓ Un nombre d'électrodes bien défini de chaque compartiment.
- ✓ Un volume d'eau de 6 litres.

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES



Figure III.16. Plaques d'inox.

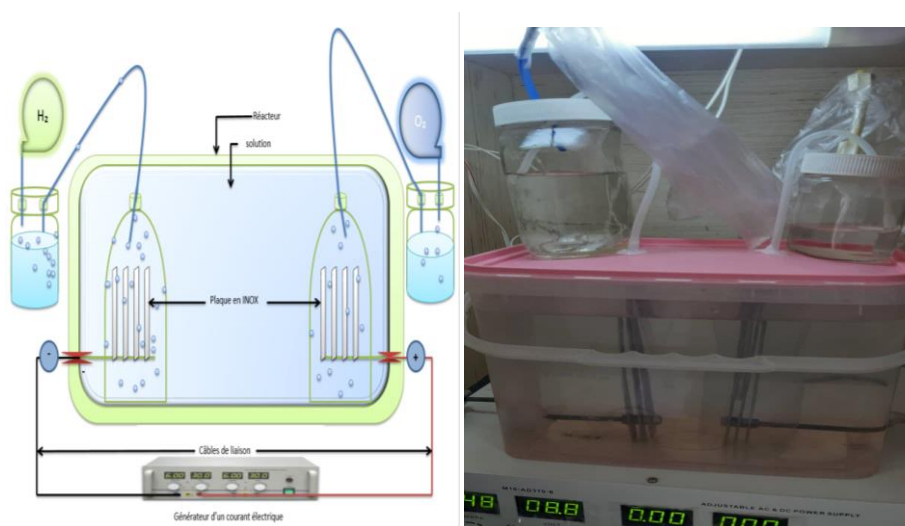


Figure III. 17. Le réacteur rectangulaire.

III.7. Résultats et discussions

III.7.1. Réacteur 1/

A. La première expérience :

Après un certain temps, on remarque la libération d'une petite quantité d' H_2 et la couleur de la solution devient bleue, ce qui indique la transformation du cuivre métallique en ion cuivre cu^{2+} . L'oxydation a été amortie en remarquant l'échappement visuellement des gaz formés. Les gaz récupérés seront injectés dans une CPG.

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

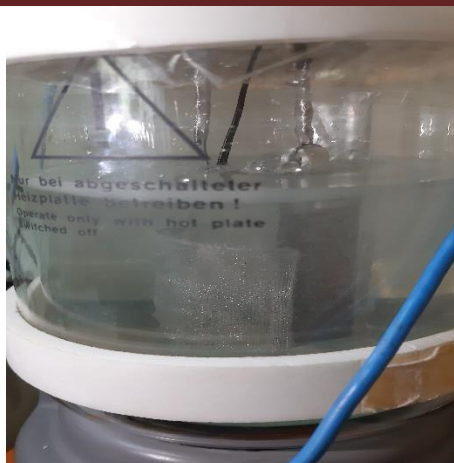


Figure III.18. Les ions Cu^{2+} .

B. La deuxième expérience :

Bien que le cuivre a été remplacé par l'acier inoxydable, après un certain temps de fonctionnement du réacteur électrochimique un véllicement superficielle a été enregistré Ce phénomène est due à la qualité de la matrice d'eau de mer utilisée.

Remarque :

*Comme une contrainte enregistrée et une indication de la limitation d'utilisation des électrodes

* La début de la dégradation de la surface d'électrode implique l'arrêt du processus.

*un traitement sévère de cette matrice d'eau utilisée comme solution électrolytique doivent être respectée minutieusement.

*L'eau de mer est une bonne conductrice, mais elle contient de nombreuses impuretés qui limite à la production d'hydrogène vert.

III.7.2. Réacteur 2/

a. La première expérience :

Après avoir réglé le nombre d'électrodes pour chaque compartiment à deux, tout en ajustant le volume d'électrolyte pour différente concentration KOH, nous avons pu obtenu les résultats ci-dessous :

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

Volume	Concentration	Pourcentage d'H2 (%)
6L	15g	15%
6L	20g	20%
6L	40g	45%
6L	50g	45%

Tableau III.1 Taux de production du gaz hydrogène (v/v)

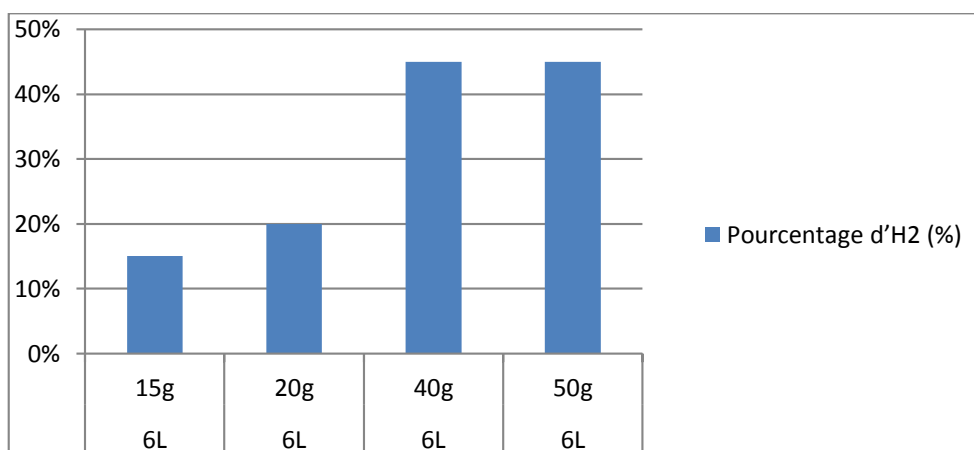


Figure III.19. Variation de pourcentage d'hydrogène en fonction de concentration de KOH

Conclusion :

On remarque que plus le pourcentage d'hydroxyde de potassium (KOH) est élevé, plus le pourcentage de production d'hydrogène vert est élevé.

A un certain pourcentage de sels, le taux de production d'hydrogène est fixe

b. La deuxième expérience :

En gardant les mêmes conditions opératoires utilisées précédemment et en variant la surface spécifique des électrodes par compartiment dans la cellule électrolytique.

Les résultats sont comme suivis :

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

Nombre d'électrode pour chaque coté	volume	concentration	Pourcentage d'H2 (%)
2	6L	40g	45%
3	6L	40g	60%
4	6L	40g	90%

Tableau III.2. Taux de production du gaz hydrogène (v/v)

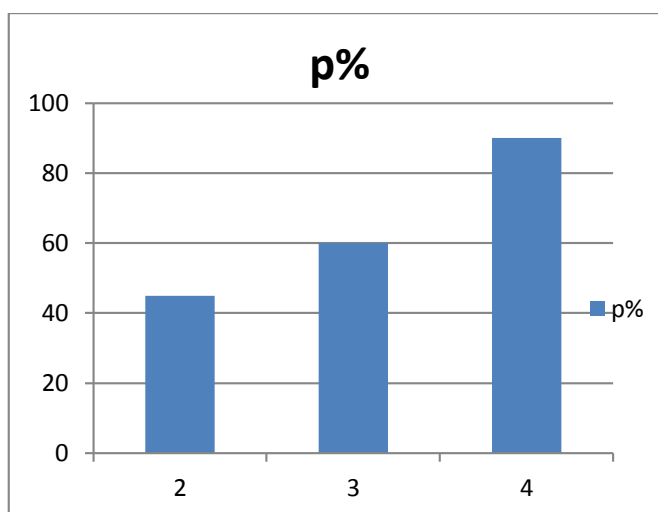


Figure III.20. Variation de pourcentage d'hydrogène en fonction du nombre d'électrode.

C. Conclusion :

Le nombre d'électrodes joue un rôle important dans la production d'hydrogène : plus leur nombre est élevé (surface d'échange élevé), plus le pourcentage est élevé, atteignant son maximum.

III.8. L'analyse de l'hydrogène et de l'oxygène

III.8.1. Analyse de gaz :

L'analyse de gaz peut être effectuée à l'aide de différentes techniques, telles que la Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG), la spectroscopie Infrarouge (IR), la Spectrométrie de Masse (SM), la Conductivité Thermique (CT), la mesure de pression partielle, l'absorption de lumière et la réactivité chimique.

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

Chaque technique a ses avantages et ses limites et peut être choisie en fonction de l'échantillon à analyser et de la précision requise.

III.8.1.1. La chromatographie en phase gazeuse (CPG)

Est une technique de chromatographie qui permet de séparer des molécules d'un mélange gazeux, éventuellement très complexe, de natures très diverses. Elle s'applique principalement aux composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Elle est de plus en plus utilisée dans les principaux domaines de la chimie, ainsi qu'en parfumerie et en œnologie.

Le mélange à analyser est vaporisé à l'entrée d'une *colonne*, qui renferme une substance active solide ou liquide appelée phase stationnaire, puis il est transporté à travers celle-ci à l'aide d'un *gaz porteur* (ou *gaz vecteur*). Les différentes molécules du mélange se séparent et sortent de la colonne les unes après les autres après un certain laps de temps qui est fonction de l'affinité de la phase stationnaire avec ces molécules.



Figure III.21. CPG

Remarque :

Les résultats chromatographiques ont été obtenus et discutés (résultats confidentiels).

Nous avons réalisé un test simple en laboratoire en allumant la flamme avec le gaz produit, et cela nous a donné une grosse fissure

Chapitre III Développement de protocole expérimentale et production de l'hydrogène vert à l'échelle de laboratoire AMES

III.9. Conclusion

Après un travail continu, nous avons pu conclure ce qui suit :

- ✓ *Une recherche bibliographique très riche*
- ✓ *Développement du protocole expérimental*
- ✓ *Comparaison entre les solutions électrolytiques*
- ✓ *Plusieurs électrodes ont été testés.*
- ✓ *Un taux de production très acceptable à l'échelle de laboratoire*
- ✓ *Les résultats chromatographiques ont été obtenu et discuté (résultats confidentielles)*
- ✓ *Un test préalable au niveau de laboratoire d'une explosion modéré du gaz récupéré a été positivement enregistré*

Conclusion générale

Conclusion générale

Le secteur de l'énergie est actuellement confronté à plusieurs défis majeurs. Il y a une demande croissante d'énergie à l'échelle mondiale, une perspective de raréfaction et éventuellement d'épuisement des réserves de pétrole et de gaz, qui ne suffisent actuellement que pour environ 40 et 65 années de production mondiale selon un rapport récent de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), ainsi qu'une aggravation du réchauffement climatique causée par les émissions de gaz à effet de serre provenant du secteur de l'énergie actuel. L'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique est une solution très prometteuse, à la fois sur le plan environnemental et économique, pour assurer l'avenir énergétique de l'humanité.

L'électrolyse de l'eau est l'une des techniques les plus importantes pour la production de l'hydrogène, notamment de par la simplicité de sa mise en œuvre et la grande pureté du produit. Cependant, cette technique n'est pas encore économiquement compétitive avec les procédés actuels de production (reformage du gaz naturel). Le développement de nouveaux matériaux d'électrode, moins chers et ayant une grande activité électro catalytique vis-à-vis de la réaction de dégagement de l'hydrogène (HER) est une option qui prend de plus en plus de l'importance, particulièrement lorsque l'électrolyse est couplé à une source d'énergie renouvelable (solaire, éolienne etc.).

Dans ce mémoire, nous avons présenté premièrement les problèmes énergétiques dans le monde, et la transition énergétique vers des propres ou vert.

Tout au long de ce mémoire nous avons présenté des points importants qui ont permis de mieux connaître les modes de production d'hydrogène, on constate que la production à partir les énergies fossiles occupe environ 80 % de la production totale, L'électrolyse de l'eau ne représente actuellement que quelques pour-cent de la totalité de l'hydrogène produit mais cette méthode est la plus propre et respecte les normes environnementales.

L'objectif de cette étude est d'analyser et de modéliser une cellule électrochimique, en cherchant à comprendre les mécanismes qui régissent ces processus. Il s'agit également d'identifier les principaux facteurs qui impactent les performances de ces cellules, et de proposer des améliorations potentielles afin de rendre la production d'hydrogène vert plus efficiente et économiquement viable à grande échelle.

Le public ciblé :



- *Principales sociétés de production d'électricité
- * Gouvernements locaux et nationaux
- * Entreprises de l'industrie lourde
- * Entreprises de transports publics
- * Entreprises énergétiques
- * Grandes entreprises de logistique
- * Start-up dans le domaine de l'hydrogène vert

Relation client :



- *Bâtir des relations commerciales solides
- *Commercialiser efficacement le produit
- *Négocier des contrats
- *Fournir un support et un service continu
- *Communication constante avec les clients et volonté de répondre à leurs besoins
- *Assurer le suivi des relations et informer les clients de tout développement ou amélioration

Canaux de communication :



- *Réseaux sociaux
- *appel téléphonique
- *Email
- *Réunions et conférences via Internet
- *Rencontres personnelles



Ressources clés :



- *ressource financière
- *ressources humaines
- *les ressources naturelles
- *Ressources et équipements technologiques

Partenariats clés :

- *Entreprises de fabrication d'équipements
- *Fournisseurs de matières premières
- *Prestataires de services techniques



La valeur ajoutée :



- *L'hydrogène vert offre un moyen propre et durable de produire de l'énergie
- *Offre un choix diversifié de puissance de sortie
- *Il contribue à diversifier les sources d'énergie et à atteindre une plus grande indépendance en matière d'approvisionnement énergétique
- *Réduire la dépendance aux combustibles fossiles
- *Améliorer la qualité et l'efficacité

Activités principales :

- *Étude de faisabilité
- *Conception et ingénierie de projet
- *Licences et réglementation
- *Sécuriser les ressources
- *Installations du bâtiment
- * Emploi du travail



Sources de revenus :



- * ventes
- * Exportation
- * Programmes de soutien et d'incitation
- * Financement des investissements
- * Programmes d'échange de droits d'émission
- * Financement gouvernemental
- *Partenariats avec les banques et les institutions financières
- * Financements privés et capitaux d'investissement
- * Revenus des activités annexes

Structure des coûts :



- * coûts des équipements
- * coûts des matières premières
- * coûts de l'énergie
- *coûts de maintenance et d'exploitation
- * coûts de main d'œuvre
- * coûts de mise en conformité aux normes environnementales
- * coûts de recherche et développement
- * coûts de gestion et d'exploitation

ملخص

تهدف دراستنا الى تسليط الضوء على ضرورة انتهاج مجال تحول الطاقة الذي يهدف الى ضمان امن الطاقة في البلاد على المدى الطويل من خلال استغلال الطاقات المتجددة وتقليل الاعتماد على الطاقات الاحفورية المسببة لمشاكل البيئة و الانتقال نحو الطاقة النظيفة المتمثلة في الهيدروجين الاخضرلما يحمل من اهمية و انفراجات للطاقة و بالتالي ضمان مستقبل امن الطاقة و تعزيز النمو الاقتصادي

Résumé

Notre étude vise à mettre en lumière la nécessité de poursuivre le domaine de la transition énergétique, qui vise à assurer la sécurité énergétique du pays à long terme en exploitant les énergies renouvelables, en réduisant la dépendance aux énergies fossiles qui causent des problèmes environnementaux et en s'orientant vers des énergies propres représenté par l'hydrogène vert, en raison de son importance et de ses avancées énergétiques, assurant ainsi la sécurité énergétique future, favorisant la croissance économique.

Abstract

Our study aims to highlight the need to continue the field of energy transition, which aims to ensure the country's energy security in the long term by harnessing renewable energy, reducing dependence on fossil fuels that cause environmental problems and moving towards clean energy represented by green hydrogen, due to its importance and energy advancements, thus ensuring future energy security, promoting economic growth.