

الجمهورية الجزائرية الشعبية الديمقراطية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieure de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université–Ain T'émouchent-Belhadj Bouchaib

Faculté des Sciences et de Technologie Département de

Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et de Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité: Génie des Procédés des Matériaux

Thème

Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau

Présenté Par:

1) MOHAMMEDKRACHAI Hanane

2) BENTOUIR Narimen Fatima Zahra

Devant le jury composé de:

Dr. YOUNES Kawther	MCB	UAT.B.B(AinTemouchent)	Président
Dr.CHOUAT Nadjat	MCA	UAT.B.B(AinTemouchent)	Examineur
Dr.REMLAOUI Ahmed	MCA	UAT.B.B(AinTemouchent)	Encadrant

AnnéeUniversitaire2024/2025

Résumé

L'hydrogène est un vecteur énergétique qui n'est pas directement disponible dans la nature : il doit donc être fabriqué avant d'être stocké et utilisé. Il est essentiellement obtenu par reformage ou gazéification d'hydrocarbures et par électrolyse de l'eau. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'électrolyse de l'eau et la production de l'hydrogène. En conséquence, l'étude expérimentale a donné de bons résultats. Cependant, l'eau seule donne très peu de valeurs d'hydrogène dans l'électrolyse de l'eau. L'hydrogène est le carburant d'avenir du fait que sa combustion ne produit que de l'eau.

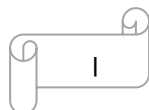
Mots clés : Electrolyse ; Production de l'Hydrogène ; Production de l'Oxygène ; Eau. **Abstract:**

The Hydrogen is an energy carrier that is not directly available in nature, so it must be manufactured before it is stored and used. It is essentially obtained by reforming or gasification of hydrocarbons and electrolysis of water. The main objective of this work is to study the electrolysis of water and the production of hydrogen. Consequently, the experimental study gave good results. However, water alone gives very few hydrogen values in the electrolysis of water. The hydrogen could be considered as the fuel of the future.

Keywords: Electrolysis; Hydrogen production; Oxygen production; Water.

ملخص :

الهيدروجين هو ناقل لا يتوفر مباشرة في الطبيعة، لذلك يجب تصنيعه قبل تخزينه و استخدامه، يتم الحصول عليها بشكل أساسي عن طريق تبخير غاز الهيدروكربونات والتحليل الكهربائي للماء. إن الهدف الرئيسي من هذه العمل هو دراسة التحليل الكهربائي للماء ومعرفة الأفاق المستقبلية له، مع ذكر ايجابياته وسلبياته. الهيدروجين هو وقود المستقبل لان احتراقه ينتج الماء فقط .
الكلمات المفتاحية : التحليل الكهربائي، إنتاج الهيدروجين، إنتاج الأوكسجين



Remerciements

Avant tout développement sur cette expérience il apparaît opportun de commencer ce travail par des remerciements

Nous remercions Dieu pour tout le courage et la force qu'il nous a donné pour faire ce travail.

Merci à toutes nos familles et surtout nos parents, merci à tous qui nous aide sans exception. Nous les remercions pour leur soutien permanent.

Nos remerciements spéciaux vont à Mr. REMLAOUI notre encadreur de mémoire pour sa gentillesse, pour ces conseils et de nous avoir guidés pas à pas dans notre travail.

Nous tenons à remercier vivement les membres du jury Dr YOUNES kawther

Et Dr CHOUAT nadjat pour avoir examiné notre travail.

Nous tenons à remercier vivement Mr. Otsmane Mohammed, et Mr. Fetehi Bouneama qui nous ont formés et accompagnés tout au long de cette expérience professionnelle avec beaucoup de patience et de pédagogie, nous possédons désormais une expérience du terrain qui nous donne des pistes pour nous améliorer.

Ce travail n'est pas seulement le fruit de notre travail personnels, nombreux sont ceux qui ont contribué à sa concrétisation. A propos nous remercions tout d'abord Mr Faycel Kratima , Bourhoum Najlaa le DRH pour nous avoir bien accueilli au sein de central électrique TERGA dont il assure la responsabilité et le remercie pour sa disponibilité et ses conseils constructifs ainsi sa gentillesse et sa patience.

Enfin, nous remercions, tous nos amis et nos collègues, toutes les personnes qui nous ont encouragées soutenu de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.

Dédicace

À tous ceux qui sont chers, ceux à qui je dois mon succès:

À notre « Seigneur. Dieu tout puissant », merci dieu de m'avoir donné la vie, la foi, les prières exaucées pour m'y arriver.

À celui qui m'a dit un jour que je suis la prunelle de ses yeux, et qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui car il est mon Père, celui dans les yeux duquel je vois la fierté de moi, mon model de respect et d'amour d'un père, de la compréhension et de la générosité.

Grace à toi j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureux et fier.

À celle dont ses paroles m'accompagnent depuis que j'étais petite, la première Femme Forte. courageuse qui a souffert sans nous laisser souffrir, celle qui m'a appris à être une fille forte et qui cherche toujours à achever ses objectifs à tout prix: celle qui m'a encouragé à poursuivre mes rêves même les obstacles semblaient insurmontables.

Mon ange gardien ton amour et ta présence dans ma vie et le fait d'être ma Mère continueront d'éclairer mon chemin.

À mon premier ami d'enfance, mon épaule solide, celui qui m'a apporté le véritable sens de fraternité et les moments de bonheur, mes pensées les plus profondes s'adressent aussi à toi Mon frère Abdelkrim.

À mes chers témoins des étapes de ma vie, dans mon succès, joie, tristesse, mes chers ame grands frère Réda et Belhadri je n'oublierai jamais vos encouragements permanents et soutiens moraux, votre présence dans mon cœur est un trésor précieux.

À ma grand-mère KOLILA

Dont la présence me manque chaque jour et dont l'amour et le soutien ont été essentiels. Ce mémoire est un témoignage de l'amour profond que je lui porte et de l'empreinte indélébile qu'elle a laissée dans ma vie. Bien que physiquement absente, elle continuera d'être une source d'inspiration pour moi et pour les générations futures.

Je sais qu'elle aurait été fière.

À toutes mes amies que j'ai rencontré tout au long mon cursus universitaire.

À mes tantes , spécialement ma tante Mouna Hansali merci pour vos encouragements et présence.

À toute personne formidable que je connaisse. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux allégués, et le fruit de votre soutien infaillible

Enfin je dédie ce travail à moi-même, c'est le temps D'y être !

Hanane

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A moi

A mes parents

A ma grand-mère

Ma tante

A ma sœur

A ma binôme

A mes cousines

Amina -tawiya-yousra-mamiya -hanane-souad -maryam

Mayssane-ibrahime hamadouche.

Sommaire

Résumé	I
Remerciements	II
Dédicace	III
Sommaire	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Listes d'abréviations	VII
Introduction générale	1

Table des matières

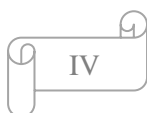
Chapitre I :

Introduction.....	3
I.1 Historique de l'hydrogène:.....	3
I.2 Définition de l'hydrogène :	6
I.3 Propriété de l'hydrogène:.....	6
I.3.1 Propriété chimique	6
I.3.2 Propriété physique:.....	7
I.4. Utilisation de l'hydrogène :.....	8
I.4.1. Production d'ammoniac :.....	9
I.4.2. Les turbines à gaz :.....	10
I.4.3. Fluide de refroidissement :	12
I.5. Production de l'hydrogène :	12
I.5.1. Différents procédés de production :.....	13
I.6. Applications de l'hydrogène :	17
I.6.1. Comme produit chimique dans l'industrie :.....	17
I.6.2. En tant que vecteur d'énergie :	17
I.6.3. Application stationnaire :.....	18
I.6.4. Application mobile :.....	18
I.6.5-Applications industrielles :.....	18
I.7. Stockage de l'hydrogène :	18
I.7.1. Stockage sous pression :	19
I.7.2. Stockage solide :	20
I.7.2. Stockage solide :	21
I.8. Transport de l'hydrogène :.....	22
I.8.1. Transport par route :.....	22
I.8.2. Transport par mer :.....	23
I.8.3. Transport par gazoducs :.....	24
I.9. Impact de l'hydrogène :	26

I.9.1. Sur la santé :	26
I.9.2. Sur l'environnement :	27
I.10. Production de l'hydrogène par les énergies renouvelables :	27
I.10.1. Energie renouvelables :	27
I.11-Electrolyse de l'eau:	31
I.11.1. Principe de fonctionnement de l'électrolyse de l'eau	31
I.11.2. Relation de Nernst :	32
I.11.3. La tension de l'électrolyse de l'eau :	33
I.11.4 Loi de Faraday :	34
I.12. Technologies d'électrolyseurs :	34
I.12.1. Electrolyseur Alcaline :	35
I.12.2. PEM électrolyseur :	36
I.12.3.	37
I.13. Technologies de production d'hydrogène :	40
I.13.1. Décomposition catalytique du gaz naturel :	40
I.13.2. Gazéification de charbon :	41
I.13.3. Oxydation partielle :	41
I.14. Effet de la tension d'électrolyse :	43
I.14.1. Effet de la température sur la tension d'électrolyse :	43
I.14.2. Effet de la pression sur la tension d'électrolyse :	44
I.14.3. Effet de la pression sur la pureté des gaz produits :	44
I.15. Le coût de production d'hydrogène :	46
I.16. L'hydrogène comme vecteur d'énergie :	47
I.17. Réalisations mondiales dans le domaine de l'hydrogène :	48
Conclusion:	49

chapitre II

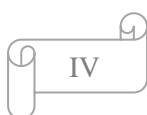
Introduction:	42
II.1. Caractéristiques de l'hydrogène :	43
II.2. Utilisation industrielle de l'hydrogène :	43
II.2.1 Industriels électronique :	45



chapitre III

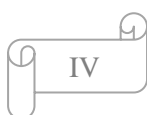
Introduction :	61
III.1 Partie Pratique :	61
III.2 Description de l'électrolyseur de l'eau:.....	63
III.2.1 L'électrolyseur:.....	63
III.2.2 Electrolyseur(90QJG07AT010):.....	68
III.2.3 La cathode:VeineH2:	70
III .2.4 L'anode:VeineO2:.....	71
III .3 Matériels utilisés:	72
III.3.1 Redresseur :	72
III.3.2 Electrolyseur :	72
III.3.3 La cellule d'électrolyse:.....	73
III.3.4 Les électrodes:.....	74
III.3.5 Séparateur:	74
III.3.6 Pompe de circulation d'électrolyte:.....	75
III.3.7 Réservoir de stockage électrolyte:.....	75
III.3.8 Gazomètre :.....	76
III.3.9 Compresseurs :.....	78
III.3.10 Purificateur:	78
III.3.11 Sécheur:.....	79
III.3.12 Boucle de régulation:.....	79
III.3.13 Analyseur:.....	79
III.3.14 Réservoir d'eau déminéralisée :	80
III.3.14 Groupe de refroidissement:.....	80
III.4.1 Contrôle des principaux paramètres de production:	81
III.4.2 Contrôle qualité/analyses du gaz en sortie de la station de remplissage	82
III.4.3 Contrôle du niveau d'électrolyte dans les séparateurs:	83
III.5 Les Caractéristiques de générateur utilisé:	83
III .5.1 Générateur utilisé:	83
III.5.2. Les Caractéristiques de générateur utilisé:.....	85
III.6 Hydroxyde de potassium :	88
III.6.1.Les propriétés physico-chimiques de KOH :	90

IV



III.6.2 L'hydroxyde de potassium dans l'unité d'hydrogène:	91
III.7.Les paramètres de calcul :	93
III.7.1. les paramètres de Redresseur :	94
Conclusion:	94
chapitre <u>IV</u>:	
IV.1 Point de rosée de l'eau dans l'hydrogène	96
IV.2 Pression quotidienne d'hydrogène :	97
IV.3 Variations de la Pression d'Hydrogène au Cours des Différentes positions :	99
IV .4 La variation d e l'intensité de courant en Ampère fournit par le redresseur :	100
IV.5. La variation de l'intensité de courant en volt fournit par le redresseur :	101
IV .6 Évolution de la Température de l'Hydrogène:	102
IV.7 La variation de débit dans l'unité de production :	104
IV .8 La distribution relative de KOH dans l'unité de production :	105
IV .9 La vérification de la quantité de l'oxygène dans l'hydrogène	107
IV .10 La pureté de l'hydrogène produit dans la centrale électrique Terga :	108
IV .11 Les paramètres de production d'hydrogène	109
IV .12 La densité d'électrolyte dans l'unité d'hydrogène :	111
IV .13 Les méthodes de production de l'hydrogène :	112
Conclusion :	114
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	115
Conclusion générale :	116

Référence bibliographique



Liste des figures :

chapitre 01 :

FIGURE (I.1) :CONSOMMATION MONDIALE D’HYDROGENE8

FIGURE(I.2):PROCEDE HABER BOSCHE AVAL D’UNE GAZEIFICATION.....9

FIGURE(I.3): PROCEDE HABER BOSCH UTILISANT L’HYDROGENE PROVENANT D’ELECTROLYSE
.....10

FIGURE(I.4):ÉQUIVALENCE ENERGETIQUE TYPIQUE DE L’HYDROGENE.....11

FIGURE(I.5):PRINCIPALES ORIGINES DE LA PRODUCTION D’HYDROGENE.....12

FIGURE(I.6):LES PRINCIPALES ETAPES DE LA PRODUCTION D’HYDROGENE.....14

FIGURE (I.7):PRINCIPE DE HTE SELON LE TYPE D’ELECTROLYTE16

FIGURE(I.8):CAPACITE VOLUMIQUE DES DIFFERENTES MODES DE STOCKAGE DE L’HYDROGENE
.....19

FIGURE(I.9):REACTION DE L’HYDROGENE AVE AVEC LE METAL20

FIGURE(I.10):CAMION-CITERNE POUR LE TRANSPORT DE L’HYDROGENE LIQUIDE.....22

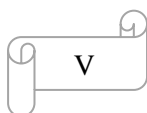
FIGURE(I.11):NAVIRE TRANSPORTEUR D’HYDROGENE.....23

FIGURE(I.12): RESEAU DE PIPELINES D’HYDROGENE DANS LE NORD DE LA FRANCE – BELGIQUE
.....25

FIGURE(I.13): SCHEMA DE PRODUCTION D’HYDROGENE PAR ENERGIE SOLAIRE28

FIGURE(I.14): METHODE DE LE SOLAIRE THERMIQUE.....28

FIGURE(I.15):METHODE DE LE SOLAIRE THERMIQUE	29
FIGURE (I.16):METHODE DE LE PHOTOVOLTAÏQ.....	30
FIGURE(I.17): PRODUCTION D’HYDROGENE PAR L’ELECTROLYSE DE L’EAU	30
FIGURE(I.18):PRODUCTION D’HYDROGENE PAR ELECTROLYSE D’EAU.....	31
FIGURE(I.19): PRINCIPE DE L’ELECTROLYSE D’EAU	32
FIGURE(I.20): GRAPHE DE LA TENSION DE L’ELECTROLYSE DE L’EAU	33
FIGURE(I.21):TECHNOLOGIES DE D’ELECTROLYSEUR	35
FIGURE(I.22):ELECTROLYSEUR ALCALINE.....	36
FIGURE(I.23):ELECTROLYSEUR PEM.....	37
FIGURE(I.24):ELECTROLYSEUR A HAUTE TEMPERATUR.....	38
FIGURE(I.25):DECOMPOSITION CATALYTIQUE DU GAZ NATUREL	40
FIGURE(I.26):EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA TENSION D’ELECTROLYSE	43
FIGURE(I.27): EFFET DE LA PRESSION SUR LA TENSION D’ELECTROLYSE	44
FIGURE(I.28): EFFET DE LA PRESSION SUR LA PURETE DES GAZ PRODUITS	45
FIGURE(I.29): COUT DE L’HYDROGENE EN FONCTION DU MODE DE PRODUCTION	46



CHAPITREII:

FIGURE(II.1):LES USAGES DE L'HYDROGENE 1	44
FIGURE(II.2):SCHEMA L'HYDRODESULFURATION	47
FIGURE(II.3): <i>PRODUCTION D'HYDROGENE PAR VAPOREFORMAGE</i>	53
FIGURE (II.4):DIFFERENTE METHODES DE CONVERSION DU METHANE EN GAZ DE SYNTHESE	54
FIGURE(II.5): SCHEMA TYPIQUE D'UN REACTEUR DE REFORMAGE AUTOTHERME	56
FIGURE (II.6) : SCHEMA DE PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'L'ELECTROLYSE DE L'EAU	56
FIGURE(II.7):PRINCIPE DE L'ELECTROLYSE D'EAU	58
FIGURE(II.8):ELECTROLYSEUR ALCALINE	62
FIGURE(II.9): SCHEMA DE PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT D'UN AME DANS UN ELECTROLYSEUR PEM.....	64
FIGURE(II.10):SCHEMA DE ELECTROLYSEUR A HAUTE TEMPERATUR	65
FIGURE(II.11):RENDEMENTS DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES ELECTROLYSEURS	67
FIGURE(II.12): SCHEMA DE ELECTROLYSE DE L'EAU PAR PHOTOVOLTAÏQUE	68

CHAPITRE III :

FIGURE(III.1):SCHEMA D'UNITE D'HYDROGENE62

FIGURE(III.2):ELECTROLYSEUR.....64

FIGURE(III.3):ÉLECTROLYSEUR(90QJG07AT010 168

FIGURE(III.4):FICHE TECHNIQUE DEL' ELECTROLYSEUR69

TABLE(III.5):DENSITE ET TENEUR EN KOG DE 192

FIGURE(III.6):UN REDRESSEUR72

FIGURE(III.7):REPRESENTE UN ELECTROLYSEUR.....72

FIGURE(III.8):SEPARATEURH₂/ELECTROLYTEET74

FIGURE(III.9):RESERVOIR D'ELECTROLYTE DE KOH.....76

FIGURE (III.10):UN GAZ-HOLDER76

FIGURE(III.11):GROUPE DE SECHAGE77

FIGURE(III.12):UN COMPRESSEUR.....78

FIGURE (III.13):ANALYSEUR DE LA PURETE DEL 'HYDROGENE.....79

FIGURE(III.14):LA BACHE DE L'EAU DEMINERALIDE.....80

FIGURE (III.15) :DISPOSITIF DE LAVAGE DE REFROIDISSEMNT	80
FIGURE(III.16):REFROIDISSEMENT A L' AIR.....	83
FIGURE(III.17):REFROIDISSEMENT A L'HYDROGENE.....	84
FIGURE(III.18): LE SYSTEME D'HUILE D'ETANCHEITE	85
FIGURE(III.19):FICHE TECHNIQUE D'UN GENERATEUR DE TERGA	86
FIGURE (III.20):HYDROXYDE DE POTASSIUM UTILISE.....	91
 <u>Chapitre IV :</u>	
FIGURE (IV.1) PRESSION D'HYDROGENE PAR HEUR.....	98
FIGURE (IV.2) PRESSION D'HYDROGENE PAR POSITION	99
FIGURE (IV.3) LE COURANT ENTRANT DANS LE REDRESSEUR	101
FIGURE (IV.4) LA TENSION ENTRANT DANS LE REDRESSEUR	102
FIGURE(IV.5):TEMPERATURE D'HYDROGENE PAR POSITION.....	103
FIGURE(IV.6) :LE DEBIT DE L'HYDROGENE.....	104
FIGURE(IV.7) :LA QUANTITE D'HYDROXYDE DE POTASSIUM DANS L'UNITE DE L'HYDROGENE	106
FIGURE(IV.8)QUANTITE D'EAU DANS L'HYDROGENE.....	109
FIGURE(IV.9)L'ENTHALPIE DE L'HYDROGENE	110

Liste des tableaux :

CHAPITRE I:

TABLE(I.1):PROPRIETE CHIMIQUE DE L'HYDROGENE	7
TABLE (I.2) :PROPRIETE PHYSIQUE DE L'HYDROGENE	8
TABLE(I.3): EXEMPLES DE TURBINES A GAZ ACCEPTANT DE L'HYDROGENE EN MELANGE.....	11
TABLE(I.4): VARIABILITE DES COMPOSITIONS DU GAZ DE SYNTHESE PRODUIT PAR UN ATR.....	15
TABLE(I.5): REACTIONS MISES EN JEU POUR UNE HTE.....	17
TABLE(I.6): CONDITIONS D'HYDRURATION DE DIFFERENTS COMPOSES METALLIQUES.....	21
TABLE(I.7): LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LES TROIS TECHNOLOGIES	39

CHAPITRE III :

TABLE(III.1)TABLEAU MONTER LES SYMBOLES DES MATERIAUX	65
TABLE(III.2):FICHE TECHNIQUE D'UN GENERATEUR	88
TABLE(III.3):PROPRIETE ATOMIQUE DE KOH	90
TABLE(III.4):PROPRIETE PHYSIQUE DE KOH.....	90
TABLE(III.5):DENSITE ET TENEUR EN KOG DE 1	92

CHAPITE IV:

TABLE (IV.1) : RELEVÉ DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE.....97

TABLE(IV.2) :QUANTITÉ DE KOH DANS CHAQUE COMPOSANTS..... 107

TABLE(IV.3)LES PARAMÈTRES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE 110

TABLE(IV.4) : LES MÉTHODES DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE 112

Listes d'abréviations :

Ppm: Particule par million.

GES : Gaz a effet de serre .

KOH: Hydroxyde de potassium.

PEM :membrane échangeuse de protons.

SKT – SPE :Sharikat kahraba TERGA .

SOEC :Strong Oxide ElectrolysisCell.

PB: plaques bipolaires.

PTL : collecteurs de courant.

EHT :électrolyseur a haute température.

PEC :les cellules photo électrochimique.

Dlr :Dispositif de lavage .

GS : groupe de séchage.

CDA : la conduite d'alimentation.

RDP : le régulateur de pression.



Introduction Générale



Introduction générale :

La 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 une voie pour l'humanité même si leurs applications restent limitées à l'heure actuelle ,dues à leurs couts d'investissement et/ou des conditions spécifiques dans lesquelles elles opèrent.

L'Algérie est parmi les leaders en matière de production et d'utilisation d'énergies vertes (hydroélectricité, éolienne, etc.), mais de grandes quantités d'hydrocarbures (huiles lourdes, essence, diésel, gaz naturel, etc.) sont encore consommées. C'est la raison pour laquelle la stratégie énergétique de l'Algérie 2023-2030 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 au Québec d'être plus indépendant en matière énergétique et de devenir un modèle dans la lutte contre les gaz à effet de serre. Parmi ces nouvelles bioénergies, se trouve l'hydrogène (H₂)

L'hydrogène présente de nombreux avantages en tant que vecteur énergétique à cause de ses propriétés physicochimiques. En effet, dans les conditions standards de température et de pression (0°C, 1 atm), l'hydrogène est inodore, incolore, non toxique, combustible et son énergie massique est la plus importante répertoriée, soit 122 kJ/g (contre 50 kJ/g et 45 kJ/g dans les cas du méthane et de l'essence respectivement). Toutefois, la molécule de dihydrogène est la molécule qui possède le plus faible poids moléculaire(2 g/mol).Avec cette faible densité moléculaire, l'hydrogène occupe un volume plus élevé qu'un autre gaz et son énergie volumique de combustion est très faible (10 kJ/L contre 30 kJ/L avec le méthane)

L'hydrogène semble être la source et le vecteur d'énergie idéal. Il est disponible en très grande quantité dans l'eau. Les produits de sa combustion sont non polluants car on régénère l'eau. Il conduit à une meilleure utilisation des ressources ce qui signifie qu'on en retire une plus grande quantité d'énergie que la plupart des combustibles actuels. Il peut servir de moyen de transport et de stockage d'énergie.

Pour des raisons tant économiques qu'écologiques, l'hydrogène est de plus en plus perçu comme un vecteur énergétique clé de la transition. Pour qu'il puisse s'imposer durablement, il est impératif d'apporter des réponses robustes aux questions cruciales qui se posent. La première est de déterminer la méthode de production la plus efficace et économiquement viable (électrolyse, reformage, gazéification de biomasse, etc.) tout en minimisant l'empreinte carbone. La seconde interrogation majeure concerne le rôle et l'intégration de l'hydrogène dans les centrales électriques, ainsi que la mise en place d'une infrastructure adéquate pour son transport et son stockage. C'est dans ce contexte que plusieurs axes de recherche stratégiques sont actuellement explorés.

Les méthodes permettant de produire de l'hydrogène sont nombreuses, mais pour répondre. Anos questions, nous avons porté notre choix sur la production par électrolyse de l'eau. Pour l'alimentation de notre unité en courant électrique,

L'électrolyse est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. La première électrolyse (électrolyse de l'eau) a été réalisée le 2 mai 1800 par deux chimistes britanniques, William Nicholson (1753-1815) et Sir Anthony Carlisle 1768-1842, quelques jours après l'invention de la première pile électrique (publication soumise le 20 mars 1800 dans une lettre en français au président de la Royal Society, Joseph Banks) par Alessandro Volta et grâce à celle-ci.

L'électrolyse peut être menée à des fins : Préparatifs, elle permet de réaliser des oxydations et des réductions, par conséquent elle modifie la nature des espèces dissoutes (changement du degré d'oxydation en chimie minérale ou de fonction en chimie organique),

Séparatives, elle Effectue une séparation par électrolyse consiste à éliminer une espèce dissoute sous forme d'un solide déposé sur l'électrode ou le faire dégager sous forme de gaz.

Les conditions opératoires et le milieu ont une influence sur la qualité du dépôt et son Adhérence et Analytiques, Dans ce dernier cas, soit on mesure la quantité d'électricité mise enjeu au cours de la réaction électrochimique, soit on mesure un dépôt sur l'électrode. On opère le plus souvent à potentiel ou à intensité constante. Un avantage de cette méthode est que l'on maîtrise parfaitement les conditions opératoires.

Objectifs de recherche :

Ce travail de recherche a pour but de réaliser une revue des technologies émergentes pour la production d'hydrogène et d'approfondir l'étude du procédé d'électrolyse de l'eau. L'objectif est d'analyser les paramètres influençant le rendement de la production d'hydrogène par cette méthode.

Structure du mémoire :

Suite à cette introduction :

- ❖ Dans le premier chapitre, une revue de la littérature sera présentée Généralité sur l'hydrogène
- ❖ Dans le deuxième chapitre, une étude de production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau
- ❖ Le troisième chapitre présente la partie expérimentale de l'unité d'hydrogène de la centrale de Terga
- ❖ Le dernier chapitre est interprétation des résultats

Enfin, nous concluons par une conclusion générale de ce manuscrit.



Chapitre I: Généralités sur l'hydrogène



Introduction

Nous sommes à l'aube d'une nouvelle ère de l'histoire où toutes les possibilités sont possibles. Le contenu des étoiles et notre propre hydrogène solaire sont maintenant exploités par l'ingéniosité humaine et utilisés à des fins humaines. La bonne voie depuis le début de ce voyage est importante si vous souhaitez en forcer l'âge de l'hydrogène de vos enfants avec des promesses élevées et un héritage précieux pour les générations futures. Jeremy Rifkin[1]

Depuis la révolution industrielle, la production internationale d'énergie a augmenté de plus en plus pour répondre aux besoins incommensurables de ce secteur. En fait, cette génération d'énergie quantitative est généralement effectuée par la dissolution du gaz de dédouanement. Il s'agit d'une menace sérieuse pour la santé publique en raison de l'épuisement de l'ozone. Compte tenu de cette situation, les gens conviennent que les carburants actuels doivent être remplacés par l'utilisation de sources d'énergie renouvelables qui sont rapidement épuisées. L'hydrogène est la source idéale et semble être le vecteur d'énergie idéal. Il peut être utilisé en très grande quantité sous l'eau. Ses produits en feu ne sont pas conditionnés à régénérer l'eau. Cela conduit à une meilleure utilisation des ressources. Cela signifie éliminer plus d'énergie que la plupart des carburants courants. Peut être utilisé comme moyen de transport et de stockage d'énergie.[2]

1.1 Historique de l'hydrogène:

1776 L'hydrogène a été identifié pour la première fois comme un élément distinct par le scientifique britannique Henry Cavendish après qu'il ait développé de l'hydrogène gazeux en réagissant du zinc métallique avec de l'acide chlorhydrique. Dans une démonstration à la Royal Society de Londres, Cavendish a appliqué une étincelle à l'hydrogène gazeux produisant de l'eau. Cette découverte a mené à sa conclusion ultérieure que l'eau (H_2O) est faite d'hydrogène et d'oxygène.[3]

1788 En s'appuyant sur les découvertes de Cavendish, le chimiste français Antoine Lavoisier a donné à l'hydrogène son nom, qui est dérivé des mots grecs «hydro» et «gènes», ce qui signifie «eau» et «néde»[4]

1800 Les scientifiques anglais William Nicholson et Sir Anthony Carlisle ont découvert qu'en appliquant un courant électrique à l'eau, ils produisaient de l'hydrogène et des gaz oxygénés. Ce processus a été appelé plus tard « électrolyse »[5] .

1838 L'effet de la pile à combustible, qui combine l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau et un courant électrique, a été découvert par le chimiste suisse Christian Friedrich Schönbein.[6]

1839 Sir William Grove, un scientifique et juge anglais, démontra la découverte de Schönbein sur une échelle pratique en créant une « batterie à gaz ». Il a obtenu le titre de « père de la pile à combustible » pour ses réalisations.[7]

1874 Jules Verne, un auteur anglais, a prophétisé l'utilisation potentielle de l'hydrogène comme combustible dans son .[3]

1889 Ludwig Mond et Charles Langer tentent de construire le premier appareil à pile à combustible en utilisant l'air et le gaz de charbon industriel. Ils ont appelé l'appareil une pile à combustible.[8]

Dans les années 1920, l'ingénieur allemand Rudolf Erren a converti les moteurs à combustion interne des camions, des autobus et des sous-marins pour utiliser de l'hydrogène ou des mélanges d'hydrogène. Le scientifique britannique et écrivain marxiste J.B.S. Haldane a introduit le concept de l'hydrogène renouvelable dans son article intitulé Science and the Future en proposant que « il y aura de grandes centrales électriques où, par temps venteux, l'énergie excédentaire sera utilisée pour la décomposition électrolytique de l'eau en oxygène et hydrogène. [9]

1937 Après dix vols transatlantiques réussis entre l'Allemagne et les États-Unis, le Hindenburg, un dirigeable gonflé à l'hydrogène, s'écrase lors de son atterrissage dans le Lakewood, au New Jersey. Le mystère de l'accident a été résolu en 1997. Une étude a conclu que l'explosion n'était pas due à l'hydrogène, mais plutôt à une décharge électrique statique liée aux conditions météorologiques qui a enflammé le revêtement extérieur de toile argenté du dirigeable, qui avait été traité avec les ingrédients clés du combustible solide pour fusées.[3]

1958 Les États-Unis créent la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Le programme spatial de la NASA utilise actuellement l'hydrogène le plus liquide au monde, principalement pour la propulsion des fusées et comme combustible pour les piles à combustible. [10]

1959 Francis T. Bacon, de l'université de Cambridge en Angleterre, construit la première pile à combustible hydro-aérogène. Le système de 5 kilowatts (kW) alimente une machine à souder. Il a nommé sa conception de pile à combustible la « cellule Bacon ». Plus tard cette année-là, Harry Karl Ihrig, ingénieur à la Allis—Chalmers Manufacturing Company, a fait une démonstration du premier véhicule à pile à combustible : un tracteur de 20 chevaux. Les piles à combustible à hydrogène ,d'après la conception de Francis T. Bacon, ont été utilisées pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau à bord des astronautes à bord du célèbre vaisseau spatial Apollo et de toutes les missions de navette spatiale subséquentes.[11]

1970 L'électrochimiste John O'M. Bockris a inventé le terme «économie de l'hydrogène» lors d'une discussion au centre technique de General Motors (GM) à Warren, dans le Michigan. Il a par la suite publié *Energy: the Solar-Hydrogen Alternative*, décrivant son économie de l'hydrogène où les villes des États-Unis pourraient être approvisionnées en énergie dérivée du soleil.[3]

1972 Le Gremlin de 1972, modifié par l'université de Californie à Los Angeles, participe au concours de 1972 pour la conception de véhicules urbains et remporte le premier prix pour les émissions les plus faibles dans les tuyaux d'évacuation. Les étudiants ont converti le moteur à combustion interne du Gremlin pour qu'il fonctionne avec de l'hydrogène fourni par un réservoir embarqué.[3]

1973 L'embargo pétrolier de l'OPEP et le choc d'approvisionnement qui en a résulté suggèrent que l'ère du pétrole bon marché est terminée et que le monde a besoin de carburants de remplacement. Le développement de piles à combustible à hydrogène pour des applications commerciales conventionnelles a commencé.[3]

1974 La National Science Foundation transfère le programme fédéral de R-D sur l'hydrogène au ministère américain de l'Énergie. Le professeur T. NejatVeziroglu de l'Université de Miami, en Floride, a organisé la conférence *The Hydrogen Economy Miami Energy (THEME)*, la première conférence internationale consacrée à l'énergie hydrogène. Après la conférence, les scientifiques et ingénieurs qui ont assisté à la conférence THEME ont formé l'Association internationale pour l'énergie de l'hydrogène (IAHE).[3]

Une brève histoire de l'hydrogène FuelLe plus ancien exemple que nous avons d'une pile à combustible à hydrogène vient de 1839, lorsque l'inventeur gallois, Sir William Robert Grove, a développé la cellule Grove. Ce n'est qu'au cours des années 1920 que la recherche sur les piles à combustible a abouti à l'utilisation de combustibles solides à base d'oxydes et à des niveaux de puissance qui pouvaient être considérés comme utilisables. Sa conception finale, la cellule Bacon, a été perfectionnée en 1959 ; ses principes fondamentaux ont conduit au développement de piles à combustible utilisées par la NASA dans ses fusées. Depuis les années 1960, elle a financé plus de 200 contrats de recherche qui ont progressivement permis d'obtenir des piles à combustible à hydrogène plus petites et plus efficaces pouvant être utilisées dans les voitures, les avions et autres véhicules. En 2004, la marine allemande a testé un sous-marin à hydrogène et la Chine a testé le premier train au monde à hydrogène en 2015. Deux voitures à hydrogène sont actuellement en production commerciale : la Toyota Mirai et la Hyundai Nexa[12]

I.2 Définition de l'hydrogène :

Premier élément dans la table périodique. Dans les conditions normale c'est un gaz sans couleur, inodore et insipide, constitué par les molécules diatomiques, H_2 . L'atome d'hydrogène, le symbole H, est constitué par un noyau avec une unité de charge positive et d'un électron. Son nombre atomique 1 et son poids atomique 1,00797. C'est un des composés principaux de l'eau et de toute la matière organique, et il est largement étendu non seulement dans la terre mais également dans l'univers entier.

Il y a trois isotopes d'hydrogène: le protium, de masse 1, trouvé dans plus de 99.98% de l'élément normal; le deutérium, de masse 2, trouvé dans la nature à approximativement 2%, et tritium, de masse 3, qui apparaît en petite quantité dans la nature. Il peut aussi être artificiellement produit par diverses réactions nucléaires.

L'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique important, ce qui signifie qu'il peut stocker et livrer de l'énergie sous une forme utilisable . À la température et à la pression normales ($0^{\circ}C$ et 1013 hPa), l'hydrogène existe sous forme gazeuse.

Il est inodore, incolore, insipide, non toxique et plus léger que l'air. La fraction stœchiométrique de l'hydrogène dans l'air est de 29,53 % vol. Abondant sur terre comme élément, l'hydrogène est présent partout, étant l'élément le plus simple de l'univers représentant 75% en poids ou 90% en volume de toute la matière. Entant que vecteur d'énergie, l'hydrogène en est pas une source d'énergie en soi ; il ne peut être produit qu'à partir d'autres sources d'énergie, telles que les combustibles fossiles, les sources renouvelables ou l'énergie nucléaire, par différents processus de conversion énergétique .La réaction de combustion exothermique avec l'oxygène forme de l'eau (chaleur de combustion $1,4 \cdot 10^8$ J/kg) et aucun gaz à effet de serre contenant du carbone n'est émis dans l'atmosphère.

I.3 Propriété de l'hydrogène:

I.3.1 Propriété chimique:

L'hydrogène est l'élément le plus simple, le plus léger et le plus répandu de l'univers ; Il y a très peu d'hydrogène moléculaire (H_2) dans l'atmosphère de la Terre. On explique cela par sa faible masse volumique 0,0899 g/L ce qu'il lui permet de s'échapper à l'attraction gravitationnelle terrestre. C'est le premier élément de la classification périodique, n'appartient en réalité à aucun groupe, il est mis arbitrairement dans le groupe I (1s1).[13]

Numéro atomique	1
Masse atomique	1.007825g.mol ⁻¹
Électro négativité de Pauling	2,1
Masse volumique	0,0899.10 ⁻³ g.cm ⁻³ à 20 °C
Température de fusion	-259,2 °C
Température d'ébullition	-252,8 °C
Rayon atomique (vanderwaals)	0.12 nm
Rayon ionique	0,208(-1)nm
Isotope	Le deutérium et le tritium (respectivement 1 et 2 neutrons)
Configuration électronique	1s ¹
Énergie de premier ionisation	1311kJmol ⁻¹
Découverte	En 1671 par Boyle. Cavendish étudie ses propriétés. Lavoisier lui donne son nom.
Abondance	C'est l'élément le plus abondant de l'univers et le troisième élément le plus abondant sur le globe terrestre

Table(I.1): Propriété chimique de l'hydrogène. [14]

I.3.2 Propriété physique:

L'hydrogène forme une molécule diatomique H₂. C'est un gaz incolore, inodore, non toxique, hautement inflammable et très léger. Sa très petite taille lui permet une grande facilité de diffusion et d'effusion (ex : dans les métaux :hydrures métalliques). L'hydrogène est aussi un bon conducteur calorifique, utilisé, par exemple pour le refroidissement des gros alternateurs[15]

Formule	H ₂
N° de cas	1333-74-0
État physique	Gazeux
Point de fusion	-259.1°C(14.01K)
Point de d'ébullition	-252.9°C(20.28K)
Masse Molaire	2.2
Solubilité	1,6 mg/Là21 °C
Température d'auto-inflammation	560°C
Distance interatomique	74 pm

Table (I.2) :Propriété physique de l'hydrogène .[16]

I.4. Utilisation de l'hydrogène :

L'hydrogène est un combustible propre qui, lorsqu'il est consommé dans une pile à combustible, ne produit que de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. L'hydrogène et les piles à combustible peuvent jouer un rôle important dans notre stratégie nationale en matière d'énergie, avec le potentiel de leur utilisation dans une vaste gamme d'applications, dans pratiquement tous les secteurs : transport, commercial, industriel, résidentiel et portable. Les piles à hydrogène et à combustible peuvent fournir de l'énergie pour diverses applications, notamment la chaleur et l'électricité distribuées ou combinées; l'alimentation de secours; des systèmes permettant de stocker et d'alimenter les énergies renouvelables; l'énergie portable; l'énergie auxiliaire pour les camions, les avions, les trains et les navires; véhicules spécialisés comme les chariots élévateurs; et véhicules de transport de passagers et de marchandises, y compris les voitures, les camions et les autobus.

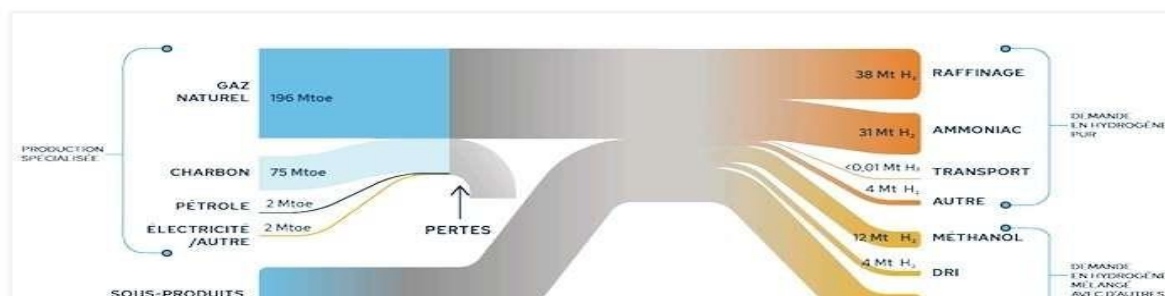


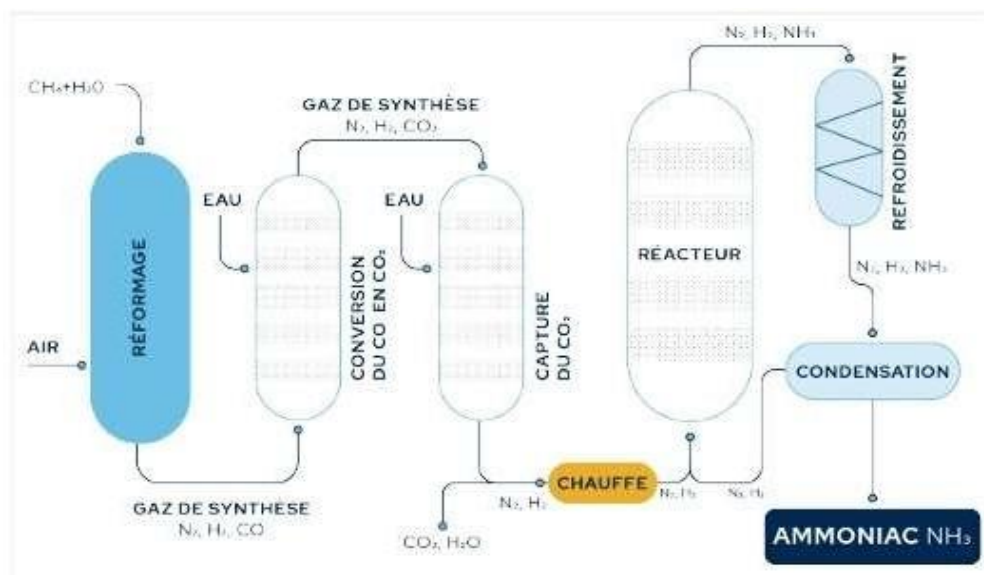
Figure (I.1) :Consommation mondiale d'hydrogène par application[17]

Mtoe: million de tonnes équivalent pétrole ,Mt H₂:million de tonnes d'hydrogène

Les principaux procédés impliquant la synthèse de produits en utilisant de l'hydrogène sont examinés ci-dessous :

I.4.1. Production d'ammoniac :

Ce processus, important pour l'agriculture, représente environ 40 % de la consommation mondiale d'hydrogène, l'ammoniac étant largement utilisé dans les engrais. Au Canada, la production d'ammoniac atteint environ 5 millions de tonnes par an dans plus de 10 usines.⁸ Avec une demande en hydrogène de 0,19 kgH₂/kgNH₃ (léger excès stœchiométrique), cela équivaut à une demande de 1 million de t H₂ par an. Par exemple, Iberdrola et Fert Iberia prévoient de fournir de l'hydrogène vert à l'usine de production d'ammoniac de Fert Iberia Puertollano en Espagne (200 000 tonnes par an) via un électrolyseur de 100 MW. L'objectif est de produire de l'engrais vert à partir d'ammoniac vert et de réduire les besoins en gaz naturel de l'usine de plus de 10 %. L'ammoniac est synthétisé à l'aide du procédé Haber-Bosch. L'azote et l'hydrogène réagissent dans un rapport de 1 :3 à une température optimale de 350-550°C et une pression optimale de 140-320 bar¹⁰. La figure suivante montre le diagramme de processus du procédé Haber-Bosch .[18]

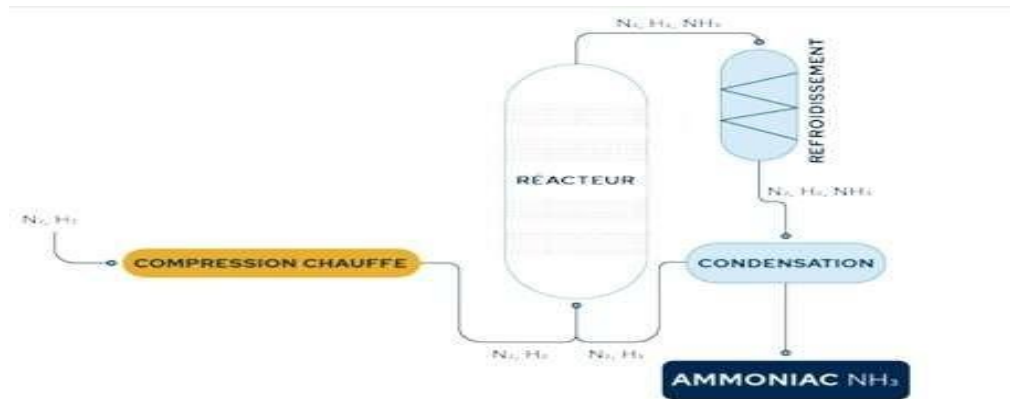


Figure(I.2):Procédé Haber Bosche aval d' 1

Figure(I.2):Procédé Haber Bosche aval d'une gazéification.[19]

Lors de la production d'ammoniac à partir d'hydrogène par électrolyse, l'étape de gazéification est inutile et le processus peut être simplifié comme indiqué dans le schéma suivant.

Figure(I.3): Procédé Haber Bosch utilisant l'hydrogène provenant d'électrolyse



Figure(I.3): Procédé Haber Bosch utilisant l'hydrogène provenant d'électrolyse.[18]

Le mélange azote/hydrogène doit être comprimé avant d'être introduit dans le réacteur catalytique. Étant donné que l'azote, l'ammoniac et l'hydrogène se liquéfient respectivement à -196 , -33 et -253 °C à pression atmosphérique, les produits de réaction constitués d'ammoniac et de réactifs n'ayant pas réagi sont refroidis à au moins -33 °C dans un échangeur de chaleur pour faciliter la séparation de l'ammoniac d'une partie des deux réactifs. L'ammoniac est complètement séparé dans le condenseur et les deux réactifs sont ensuite recyclés.[18]

I.4.2. Les turbines à gaz :

L'hydrogène a une densité énergétique élevée (par kg) et constitue donc une excellente source d'énergie même si sa densité énergétique par unité de volume est moins favorable. En combinant l'hydrogène avec l'oxygène de l'air, l'énergie contenue dans la molécule peut être libérée. Cela peut être réalisé dans une variété de dispositifs tels que des piles à combustible, des turbines à gaz, des moteurs, des chaudières, etc. pour produire de l'énergie thermique et/ou du travail mécanique et/ou de l'électricité.



Figure(I.4):Équivalence énergétique typique de l'hydrogène.[20]

Les principaux fabricants ont développé plusieurs turbines à gaz hautes performances, d'une puissance de plusieurs centaines de MW, capables de traiter des mélanges de gaz naturel et d'hydrogène. Les tests des fabricants indiquent qu'avec la technologie de pointe actuelle, la teneur en hydrogène du mélange est d'environ 20 à 30 %³⁶. La teneur en hydrogène autorisée varie selon le fabricant et le modèle, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.[21]

Manufacturier	Modèle de turbine	Puissance(MW)	MélangesCH ₄ /H ₂ acceptés
Ansaldo Energia ³⁷	GT36 – H	370 – 545	Jusqu'à 50 % (volume)
Baker Hughes ³⁸	NovaLT-16	<20	Jusqu'à 100%
Siemens ³⁹	SGT 700	600 MW	Jusqu'à 60%
Mitsubishi Hitachi Power Systems ⁴⁰	Non spécifié	700 MW	Jusqu'à 30 % (volume)

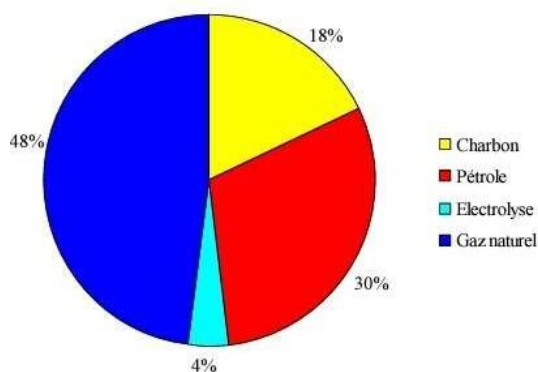
Table(I.3):Exemples de turbines à gaz acceptant de l'hydrogène en mélange.[20]

I.4.3. Fluide de refroidissement :

Les propriétés supraconductrices du matériau se manifestent à des températures inférieures à une température critique, qui peut même être inférieure à la température de liquéfaction de l'azote liquide (77°K), de sorte que l'hydrogène, avec son point d'ébullition de 20°K, est considéré comme un liquide de refroidissement approprié pour ces supraconducteurs. C'est pour cette raison que l'hydrogène liquide est utilisé dans les laboratoires scientifiques et ailleurs pour refroidir cryogéniquement les supraconducteurs. L'hélium est également utilisé dans ces applications, mais à mesure que les coûts augmentent, l'hydrogène présente une opportunité. De plus, l'hydrogène a une conductivité thermique nettement supérieure à celle des autres gaz. De plus, sa capacité thermique spécifique élevée et sa faible densité, entraînant une faible viscosité, en font un gaz réfrigérant haute performance. C'est pour cette raison que l'hydrogène est souvent utilisé dans les centrales électriques comme liquide de refroidissement pour les turbogénérateurs. Comme vous le savez peut-être, l'hydrogène liquide est également utilisé pour refroidir les moteurs de fusée. [22]

I.5. Production de l'hydrogène :

L'hydrogène est rarement présent dans la nature sous forme moléculaire, mais il est très abondant sous forme atomique et est présent dans de nombreuses molécules. Pour le produire, il faut « l'extraire » directement de sources telles que le gaz naturel (CH₄, biogaz), l'eau ou les hydrocarbures. La figure 1.5 montre les principales sources de production d'hydrogène selon Kothari et al. (2008)[23]



Figure(I.5):Principales origines de la production d'hydrogène.[23]

L'électrolyse de l'eau représente que 4% de la production d'hydrogène (et est plus coûteuse), les hydrocarbures fossiles, notamment le gaz naturel (méthane), étant la principale source d'hydrogène. Ce dernier est converti en hydrogène par des procédés de reformage économiques à grande échelle tels que le reformage à la vapeur, le reformage à sec ou l'oxydation partielle. La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est la réaction qui sépare les molécules H_2O en H_2 et O_2 : $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$

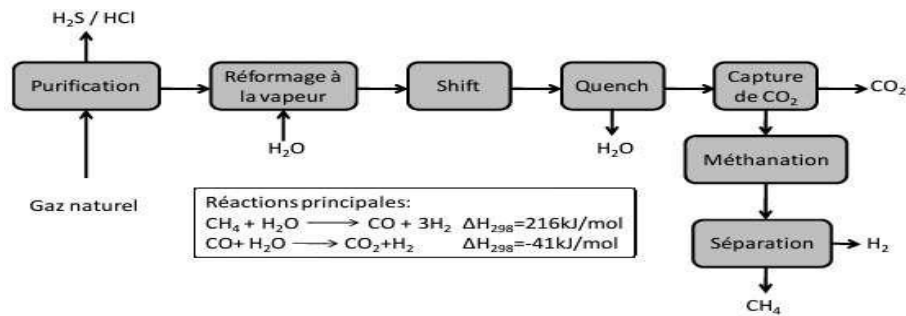
Produire de l'hydrogène par de tels procédés est « propre », mais cela reste plus coûteux que le procédé de reformage, qui est actuellement la solution la plus économique. En fait, le coût de l'hydrogène est de 48 \$/Gj issu de l'électrolyse de l'eau contre 35 \$/Gj issu du procédé de reformage à la vapeur du CH_4 . Ces mesures de réforme restent encore à élaborer. [24]

I.5.1. Différents procédés de production :

I.5.1.1. Reformage des combustibles fossiles à la vapeur d'eau :

L'hydrogène peut être produit à partir de combustibles fossiles par reformage à la vapeur et gazéification du charbon. Environ 90 % de l'hydrogène est produit à partir de combustibles fossiles, le reformage à la vapeur étant la méthode la plus courante [16]. En général, le reformage à la vapeur peut être utilisé pour tout hydrocarbure léger, tel que le méthane, le butane ou le propane. Cependant, l'utilisation du gaz naturel comme matière première pour ce procédé présente plusieurs inconvénients. La gazéification du charbon et d'autres hydrocarbures est relativement bien établie, bien qu'elle soit moins mature que le reformage à la vapeur du méthane. Il existe plus de 15 systèmes de gazéification utilisés dans le monde, principalement pour produire de l'hydrogène pour les engrais ammoniacaux. Contrairement à la refusion à la vapeur, le processus de gazéification peut être utilisé non seulement avec du charbon, mais également avec une large gamme d'hydrocarbures plus lourds, notamment les huiles résiduelles lourdes et d'autres produits de raffinage à faible valeur ajoutée. Cependant, la production d'hydrogène à partir de charbon ou de pétrole lourd génère de grandes quantités d'émissions de carbone. [25]

La figure 6 montre les principales étapes du reformage à la vapeur du méthane. Ce processus consomme de grandes quantités d'eau et libère souvent du CO_2 dans l'atmosphère. L'étape de décalage optimise la production d'hydrogène (réaction du gaz avec l'eau). Toutefois, la nouvelle usine comprendra une étape de capture du CO_2 (voir ci-dessous). Une étape de méthanisation est fréquemment réalisée pour convertir des traces de CO en méthane, qui peut être recyclé et facilement séparé de l'hydrogène

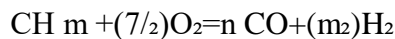


Figure(I.6): Les principales étapes du reformage à la vapeur du méthane .[26]

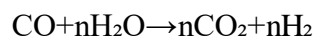
1.5.1.2. Oxydation partielle :

Le procédé consiste en la réaction d'un combustible (gaz naturel, hydrocarbures légers ou charbon) avec de l'oxygène, suivie d'une purification du gaz en présence de monoxyde de carbone. Il peut être réalisé avec des hydrocarbures plus lourds que le reformage à la vapeur. Cependant, comme pour le reformage à la vapeur, le carburant nécessite un nettoyage et une désulfuration supplémentaires, qui peuvent être effectués avant ou après la réaction d'oxydation initiale, après laquelle le CO₂ et le CO sont éliminés. Ce processus est mature. [27]

Production de gaz de synthèse:

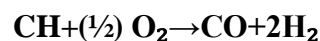


Conversion du monoxyde de carbone:

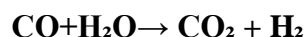


La première réaction se produit généralement à des températures (1300-1400 °C) et des pressions (20-90 bars) élevées et correspond à une oxydation partielle. Il est exothermique et caractérisé par un rapport H₂/Co, d'environ 0,75 (rapport H/C d'environ 1,5). Ceci est suivi par la réaction de conversion eau-gaz et les techniques de purification finale. Dans l'ensemble, la réaction est exothermique. [27]

Lors de l'oxydation partielle du gaz naturel, la matière première est principalement constituée de méthane. Les deux réponses sont :



Cette réaction exothermique est caractérisée par un rapport H_2 / CO de l'ordre de 2 :



Cette réaction est également exothermique et se déroule presque jusqu'à son terme. Le rendement massique maximal d'hydrogène par rapport au méthane est de 37,5%, inférieur aux 50% obtenus par reformage à la vapeur. Le processus de décarbonisation et de purification de l'hydrogène est le même que le processus de reformage à la vapeur mentionné ci-dessus. [27]

I.5.1.3. Reformage autotherme :

En fait, le vaporeformage est un processus qui combine deux réactions majeures. La première est la réaction montrée par l'équation. Il s'agit d'une réaction d'oxydation partielle des hydrocarbures. La deuxième réaction est la combustion du méthane, qui est également exothermique. L'avantage de cette méthode est qu'il peut restaurer l'énergie produite par la réaction exothermique de l'oxydation partielle. Ce processus mélange le gaz naturel et l'oxygène avec une vapeur d'eau. Le mélange est ensuite préchauffé puis introduit dans le réacteur pour produire des syngas constitués principalement de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H_2). Les conditions de fonctionnement typiques pour la réforme de la vapeur sont des températures allant de 900 à 1100(°C) et des pressions allant de 20 à 60 (bar). Ces conditions accélèrent la réaction, permettant la production de syngas riches en hydrogène, qui peuvent ensuite être utilisées dans une variété d'applications industrielles. [28]

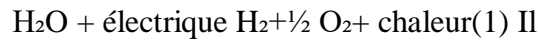
Bien que le rapport H_2 / CO « naturel » du gaz se situe entre 2 et 2,8, ce processus a la flexibilité nécessaire pour adapter ce rapport entre 1 et 3,5 vapeur d'injection, ce rapport est qu'il augmente, mais les cycles de manière entière ou partielle. Le CO_2 peut être réduit à la puissance du réacteur [28].

Cas	Maxi vapeur	Mini vapeur + recyclage de CO_2
Gaz de synthèse (% mol/gaz sec)		
H_2	66.8	39.5
CO	19.8	38.8
CO_2	12.7	21.4
CH₄	0.7	0.3

Table (I.4): Variabilité des compositions du gaz de synthèse produit par un ATR. [28]

I.1.1.1. Électrolyse de l'eau:

L'électrolyse de l'eau a été réalisée pour la première fois par Nicholson et Carlisle au 19^{ème} siècle (2). Cette technologie nécessite l'électricité pour décomposer les molécules d'eau en dihydrogène et dioxygène [29]



Il existe des variations en fonction de la température.

I.5.1.4.1 Electrolyse Eau à basse température (<200> 400 ° C) :

en utilisant une membrane en céramique conductrice d'oxyde ou d'oxyde de proton. Ceci doit être connecté à un système solaire concentré ou à un réacteur à haute température pour utiliser une source de vapeur à faible base [29] .

I.5.1.4.2 L'électrolyse de l'eau à des températures élevées :

l'électrolyse de l'eau à des températures élevées ou E HT (700-1000 ° C) est une technique similaire à l'électrolyse alcaline, mais convertit la vapeur d'eau en eau liquide. Selon le type d'électrolyte, la vapeur d'eau se dissocie à la cathode ou à l'anode (figure I.7). Les réactions qui se produisent aux électrodes sont présentées dans le tableau I.5 [29].

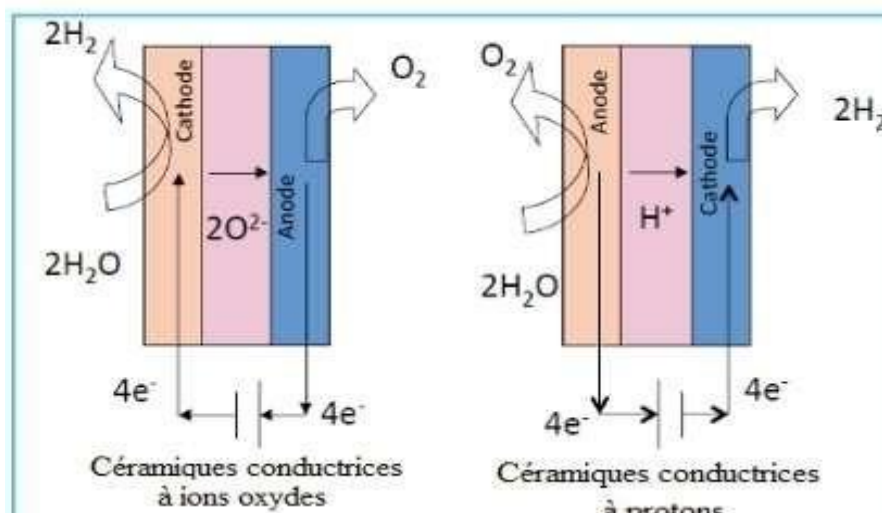


Figure (I.7): Principe de HTE selon le type d'électrolyte [29].

	Électrolyte	
Réaction	A conduction d'ions oxydes	A conduction protonique
Cathode	$\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + \text{O}^{2-}$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$
Anode	$\text{O}_2^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{e}^-$
Globale	$\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$	

Table(I.5): Réactions mises en jeu pour une HTE[29].

Dans le premier cas, la différence de potentiel entre les électrodes produit une réduction de la vapeur d'eau, des formes H_2 et O_2^- ion, qui draine la vapeur d'eau et l'hydrogène en excès. En raison de l'effet d'un champ électrique, l'anion O_2^- qui se déplace de la cathode à l'anode est oxydé à O_2 et est déchargé. Les gaz à balayage (air, azote, vapeur d'eau) peuvent également être utilisés pour faciliter les émissions d'oxygène [29].

I.5.1.5. Gazéification et pyrolyse de la biomasse :

Un procédé en cours de recherche et développement par exemple la conversion chimique de l'OIS à très haute température (entre 1 200 °C et 15 °C) qui lui permet de conserver l'hydrogène. Il contient un mélange d'hydrogène (H_2) et de monoxyde de carbone (CO). Ce mélange est lavé puis l'hydrogène est retenu [30]

I.6. Applications de l'hydrogène :

L'hydrogène peut être converti en électricité, chaleur et propulsion en fonction de l'application ultime. Il est également utilisé de deux manières différentes :

I.6.1. Comme produit chimique dans l'industrie :

Est utilisé comme réactif dans les processus chimiques tels que le raffinage du pétrole et la production d'ammoniac.

I.6.2. En tant que vecteur d'énergie :

Dans ce cas, l'hydrogène est la source de carburant ou d'énergie. Actuellement, presque tout l'hydrogène est utilisé à des fins industrielles. Bien que son application principale soit limitée au secteur spatial, l'hydrogène devient un vecteur d'énergie universel et joue un rôle central.

I.6.3. Application stationnaire :

Fixation de l'électricité et de l'alimentation thermique par la chaleur et l'alimentation combinées, permettant le développement d'un boîtier d'énergie positif.

I.6.4. Application mobile :

L'hydrogène peut être fourni aux véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. De plus, un réservoir d'hydrogène peut être relié à une pile à combustible pour améliorer l'autonomie du véhicule électrique (les véhicules électriques de deuxième génération, dits 2G, correspondent d'abord aux véhicules électriques).

I.6.5-Applications industrielles :

L'hydrogène est un élément chimique largement utilisé dans l'industrie.

La plus grande partie est utilisée par les industriels pour ses propriétés chimiques, notamment dans les usines d'ammoniac (60% de l'hydrogène mondial est consommé par l'industrie en 2022) et dans les raffineries (dégazage et production de gazole, de méthanol, etc.)[31].

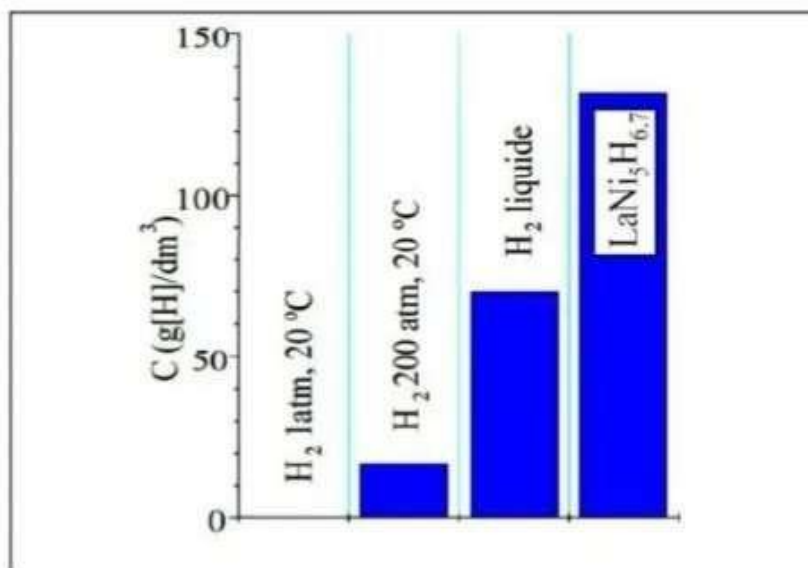
I.7. Stockage de l'hydrogène :

Après avoir été produit, l'hydrogène doit être stocké pour que vous puissiez être distribué. Le problème de stockage est l'un des cours technologiques pour utiliser l'hydrogène comme vecteur d'énergie. D'une part, il doit permettre un niveau élevé de sécurité et d'autre part, il doit être facile à utiliser. En effet, l'hydrogène est si petit et léger qu'il se faufile partout et nécessite des moyens techniques importants pour le stocker. Aujourd'hui, l'hydrogène peut être stocké sous trois formes différentes[9]:

Sous pression, liquide ou solide. Trois méthodes de stockage différentes en fonction de leur poids et de leur densité de gravité en raison de leur aspects de sécurité et de leurs coûts. Différents modes, chaque mode montre leurs avantages et leurs inconvénients en fonction des critères économiques, de l'énergie, de la capacité de masse et de la masse.

La capacité de stocker le volume est fournie par ces différentes méthodes illustrées sur la figure (1.8). Cette image met clairement en évidence la faiblesse du stockage de pression et vice versa la puissance

du stockage solide dans l'hydrure. Métal.



Figure(I.8): Capacité volumique des différentes modes de stockage de l'hydrogène[9].

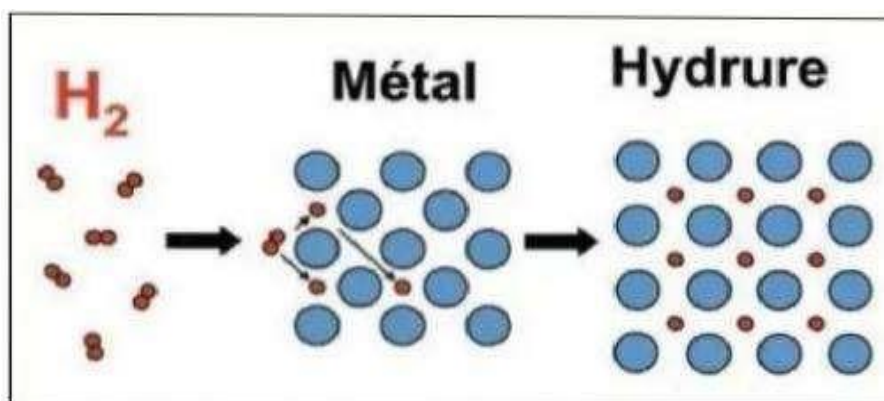
I.7.1. Stockage sous pression :

Le stockage d'hydrogène sous forme gazeux est un choix prometteur. Ce stockage signifie pas cher et parfaitement contrôlé. Le stockage de l'hydrogène gazeux sous la pression d'environ 200 à 250 bars dans le réservoir d'acier est une technique prouvée pendant de nombreuses années. À température ambiante, la capacité de volume est d'environ 14 g / dm³ dans 200 bars. En raison des problèmes de l'acier faible causé par l'hydrogène, les parois doivent être suffisamment épaisses et contre la pression et un choc élevé. . Actuellement, la pression de service à 350 barreaux est ouverte proposée et étudiée vers la pression en core supérieure à 700 à 800 bars . Dans ces conditions, le volume du volume de 40g / dm³ a obtenu et la capacité de volume de plus de 10% . Pour l'air comprimé, ce montant est évalué de 5% à 17% du PCI (puissance de chaleur inférieure) de l'hydrogène pour la pression de 700 barre selon que ce processus est isotherme ou non, très difficile atteint . Le stockage de pression présente certains avantages. Cette technologie est bien contrôlée et la coulée est très rapide. D'un autre côté, l'inconvénient en termes d'énergie est de faible densité de volume, car le même comprimé en 700 barres, l'hydrogène a un poids de 42 kg / m³, avec un facteur 500 fois par rapport à sa densité avec pression la capacité environnante et sa température environnante. À ce niveau de compression, nous avons besoin de 4,6 litres de dihydrogène comprimé pour créer un litre d'essence équivalente). Stocké dans un environnement limité, comme dans les parkings, est considéré comme un problème qui doit être résolu [32].

I.7.2. Stockage solide :

L'hydrogène peut être stocké dans les hydrures métalliques. En effet, il peut réagir de manière réversible avec certains métaux et alliages. L'hydrogène ne devient donc pas solide en lui-même mais il est soit adsorbé ou absorbé par un matériau qui lui, est sous forme solide. L'adsorption est un phénomène de surface réversible par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent uniquement sur les surfaces solides des adsorbants grâce à des liaisons électriques. Le matériau le plus à même d'adsorber l'hydrogène est le charbon actif combiné à du graphite. Cependant, stocker de l'hydrogène avec du charbon actif n'est pas très intéressant pour un usage pratique car, à température ambiante, la proportion d'hydrogène est seulement de l'ordre de 2%. L'absorption est un processus réversible qui a la particularité de combiner chimiquement un élément avec un matériau de nature métallique (palladium, magnésium) dans le cas de l'absorption de l'hydrogène [9].

La capacité de stockage est, pour certains métaux, si grande que la quantité d'hydrogène présente dans 1 cm³ d'hydrure (composé chimique constitué d'hydrogène et d'un autre élément) peut doubler celle contenu dans 1 cm³ d'hydrogène liquide. Malheureusement, cela ne dépasse rarement les 10% de la masse totale de la combinaison hydrure métallique. De plus, l'hydrogène utilisé doit être le plus pur possible pour permettre au matériau absorbant d'effectuer plusieurs cycles de charge-décharge [9].



Figure(I.9):Réaction de l'hydrogène avec le métal [33].

Les hydrures métalliques sont sécuritaires et libèrent, à pression constante de l'hydrogène pur. Il reste que cette technologie soulève quelques difficultés pour être employée dans les véhicules automobiles. D'abord, il y a le poids des hydrures eux-mêmes qui alourdissent considérablement les réservoirs. Puis, il est nécessaire de les chauffer à une température assez élevée pour libérer l'hydrogène de sa "prison" métallique. La cinétique de remplissage est lente à basse température, et le coût de certains métaux (Zr) peut être très élevé [9].

Composé métallique	P(bar)	T (K)	Cm(%)	Hydruure formé
LaNi ₅	1.7	298	1.4	LaNi ₅ H ₆
ZrV ₂	1E-8	323	3.0	ZrV ₂ H _{5.5}
TiFe	5	303	1.9	TiFeH ₂
Mg ₂ Ni	1	555	3.6	Mg ₂ NiH ₄
Bcc	10	313	2.6	TiV ₂ H ₄

Table(I.6): Conditions d'hydratation de différents composés métalliques[9].

I.7.2. Stockage solide :

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide est une option prometteuse. C'est le moins coûteux et le plus efficace que d'autres méthodes de stockage qui peut stocker une grande quantité d'hydrogène. Pour les Applications de transport d'automobile, plusieurs mode de réservoirs ont été développés permettre le stockage de 12 kg de H₂ pour les petits réservoirs des voitures (l'hydrogène liquide possède une masse volumique de 70,973 kg/m³), Cette technologie n'est pas adaptée aux applications d'automobiles, en raison du poids des bouteilles et de la forme du réservoir. Pour stocker l'hydrogène à l'état liquide, on le refroidit jusqu'à 20 K (-253°C) à pression atmosphérique. Dans ces conditions, le liquide est 800 fois plus dense que le gaz à température ambiante et selon le type de réservoir cryogénique utilisé, une capacité massique est obtenue de l'ordre de 6.5 %, la capacité volumique est certes importante, mais la très faible température reste le problème majeur de cette technologie Le remplissage de réservoir ne pose pas de problème particulier (avec des précautions d'usage bien connues de la profession), et peut s'envisager dans le cadre de stations services spécialisées. Cependant, la température de vaporisation étant très basse (-253°C), il faut que le réservoir cryogénique soit très bien isolé thermiquement, en assurant un vide secondaire entre ses deux parois et, capable de supporter la surpression engendrée par la vaporisation partielle de la masse d'hydrogène liquide. Cette évaporation boil-off est due aux pertes d'isolation dont la valeur, selon la taille du réservoir, reste comprise entre 0,1 et 1% par jour [33].

Une purge par des événements doit, de plus, permettre de dégazer en cas de surpression, vers un brûleur catalytique qui évite les fuites vers l'atmosphère. Des réservoirs performants permettent d'éviter ces purges même pour des arrêts de service supérieurs à 5 jours.

La faible température de stockage permet, par ailleurs, de disposer d'une source froide embarquée, ce qui se révèle utile, mais délicat à l'usage, pour optimiser la conception thermodynamique de l'ensemble

I.8. Transport de l'hydrogène :

I.8.1. Transport par route :

Par la route ou par rail, les industriels livrent l'hydrogène gazeux comprimé à 200 ou 220 bars dans des bouteilles cylindriques en acier. Les inconvénients de ce conditionnement sont l'encombrement – seulement 14 kg/m³ à 200 bars à température de 21°C - et le très faible rapport gravimétrique (poids d'hydrogène transporté/poids du contenant, de l'ordre du pourcent).[34]



Figure(I.10):Camion-citerne pour le transport de l'hydrogène liquide[34]

I.8.2. Transport par mer :

La possibilité de transporter par mer d'importantes quantités d'hydrogène liquide dans de vastes réservoirs cyostatiques avait, il y a quelques dizaines d'années, suscité l'intérêt de plusieurs pays pour des importations massives de ce vecteur énergétique. C'est ce qu'avaient prévu les projets japonais «WE-NET» et euro-québécois «Hydro-hydrogène Pilot Project,(EQHHPP)». Le prototype japonais destiné à l'importation d'hydrogène consistait en un cargo pouvant transporter 14 000 tonnes d'hydrogène liquide contenu dans quatre réservoirs cyostatiques sphériques. L'idée de base du projet euro-québécois EQHHPP (1991 - 1995) était de transporter par mer vers l'Europe, de l'hydrogène produit au Québec par électrolyse de l'eau et liquéfié grâce aux importantes ressources hydroélectriques de ce pays. Aujourd'hui, le Japon prévoit à nouveau d'importer par mer de l'hydrogène produit en Australie à partir de lignite, très abondant et bon marché dans ce pays. Un hydrogène qui pourrait coûter la moitié du prix de celui produit par les procédés traditionnels, l'Australie s'engageant à séquestrer le dioxyde de carbone coproduit afin de sauvegarder l'environnement. Pour acheminer cet hydrogène, Kawasaki Heavy, associé à J- Power prévoit un navire adapté (projet Hydrogen Road).



Figure(I.11):Navire transporteur d'hydrogène[35]

La Figure révèle l'aspect de ce bâtiment maritime qui comporte de nombreuses similitudes avec les tankers de LNG. Le premier exemple aère à l'échelle 1 est envisagé pour 2020. Il transporterait 4x40000 m³. Auparavant, il est prévu de réaliser un démonstrateur de plus petite taille transportant deux réservoirs de 1 250 m³. La société Iwatani développe par ailleurs des technologies de chargement/déchargement de l'hydrogène liquide. Ce projet est subventionné par le METI/NEDO. En janvier 2017, le Japon (NHK) et l'Australie se sont mis d'accord sur un standard de sûreté pour le transport d'hydrogène liquide par voie maritime [34].

I.8.3. Transport par gazoducs :

Fonctionnement: L'hydrogène gazeux peut être transporté dans des pipelines, comme le gaz naturel. Avant l'injection, l'hydrogène est comprimé mécaniquement à la pression de fonctionnement du pipeline. Ceci est généralement plus élevé que la pression de sortie des électrolyseurs. Selon les caractéristiques de la conduite et les conditions locales, l'hydrogène doit être recompressé à certaines distances le long de la conduite avant d'atteindre sa destination. En outre, des installations de stockage (telles que des cavernes de sel ou des réservoirs hors sol) sont nécessaires pour assurer la protection contre les approvisionnements volatils. Comme pour les gazoducs, un réseau de canalisations d'hydrogène mature avec des réseaux de transport et de distribution nécessite également des stations de comptage, des vannes de régulation et des vannes pour gérer les flux et assurer la distribution ultérieure aux utilisateurs finaux. Au lieu de construire de nouveaux pipelines, les gazoducs existants peuvent être réutilisés pour transporter l'hydrogène. L'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz existants est également à l'étude, des mélanges jusqu'à 20 % d'hydrogène étant actuellement testés dans le cadre de projets pilotes. Avantages : les pipelines d'hydrogène ont de faibles coûts d'exploitation, une longue durée de vie et un bilan éprouvé d'exploitation réussie en Europe et aux États-Unis, souvent sur plusieurs milliers de kilomètres. Les pipelines peuvent également servir de tampon de stockage, en particulier pour la production d'hydrogène vert hors réseau, car leur pression.

peut être adaptée pour assurer un approvisionnement continu – une exigence clé pour de nombreux acheteurs. Par rapport aux câbles électriques, les pipelines d'hydrogène présentent l'avantage supplémentaire d'une empreinte environnementale plus légère. Un seul pipeline peut remplacer plusieurs câbles qui devraient être installés séparément. La réaffectation des pipelines existants est également avantageuse en termes d'acceptation du public. Inconvénients : Le coût initial élevé des nouveaux pipelines constitue un obstacle majeur à l'expansion, et la construction nécessite des délais de plus de dix ans. Elle est également assujettie à des processus de délivrance de permis et d'autorisation très complexes. La construction de pipelines transfrontaliers implique une complexité supplémentaire [36].

De l'hydrogène d'une pureté de 95 % à une pression d'environ 5 MPa est transporté par un pipeline

d'environ 16 km dans la zone de Billingham. En Allemagne, une conduite d'hydrogène d'un diamètre intérieur de 100 à 300 mm et d'une longueur totale d'environ 220 km, principalement dans la région d'Essen, relie depuis plus de 60 ans Düsseldorf et Recklinghausen ; cette conduite, avec une pression de fonctionnement d'environ 2 MPa, transporte des l'hydrogéné principalement aux usines chimiques. La quantité d'hydrogène qu'il transporte atteint 1 106 m³ par an. Aux États-Unis, il y a une extension totale de plus de 100 km de pipelines d'hydrogène dans l'état du Texas. Ces pipelines sont posés à Corpus Christi , Hous tonet Bayport dans labanlieuedeHouston, dans la zone industrielle de la côte du golfe. En outre, il existe quelques pipelines dont les prolongements s'étendent sur plusieurs kilomètres jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres dans l'État de la Louisiane et de l'Iowa aux États-Unis et dans la province de l'Alberta au Canada. Ces canalisations d'hydrogène sont posées dans des zones industrielles ; par conséquent, beaucoup d'entre elles sont posées conjointement avec d'autres conduites de gaz pour l'oxygène et l'azote, etc. La figure 1 montre le réseau de canalisations d'hydrogène dans le nord de la France/Belgique à titre d'exemple; La figure 12 montre les détails du réseau de distribution des services publics, y compris un pipeline d'hydrogène, à Bayport, aux États- Unis Lorsque l'on manipule l'hydrogène sous pression en utilisant des matériaux de fer et d'acier, le problème de la fragilisation de l'hydrogène se pose dans certains cas, Mais lorsque les pipelines sont exploités dans des conditions de température ordinaire et d'une pression de plusieurs MPa, ou lorsque la pureté de l'hydrogène est de 99,5 % ou moins, on dit qu'il n'y a pas de problèmes graves même si l'on utilise des tuyaux en acier à faible teneur en carbone[36]



Figure(I.12):Réseau de pipelines d'hydrogène dans le nord de la France– Belgique[36].

I.9. Impact de l'hydrogène :

I.9.1. Sur la santé :

Effets d'exposition à l'hydrogène: Le feu: Extrêmement inflammable. Beaucoup de réactions peuvent causer l'incendie ou l'explosion. Explosion : Les mélanges de gaz/air sont explosifs. Itinéraires d'exposition: la substance peut être absorbée dans le corps par inhalation. Inhalation: Les concentrations élevées de ce gaz peuvent causer un environnement en oxygène déficient. Les individus respirant une telle atmosphère peuvent éprouver des symptômes incluant des maux de tête, des sifflements dans des oreilles, des vertiges, des somnolences, des pertes de connaissance, des nausées, des vomissements et dépressions. La peau d'une victime peut avoir une couleur bleue. Dans quelques circonstances, la mort peut se produire. On ne s'attend pas à ce que de l'hydrogène cause la mutagénicité, l'embriotoxicité, la tératogénicité ou la toxicité reproductrice. Des conditions respiratoires préexistantes peuvent être aggravées par une surexposition à l'hydrogène. Risque d'inhalation : Une concentration nocive de ce gaz dans l'air peut être atteinte très rapidement [37].

Danger physiques :Le gaz se mélange bien à l'air, les mélanges explosifs sont facilement formés. Le gaz est plus léger que l'air.

Dangers chimiques: Le chauffage peut causer la combustion ou l'explosion violente. Réagit violemment avec l'air, l'oxygène, des halogènes et des oxydants forts causant le feu et le risque d'explosion. Les catalyseurs en métal, tels que le platine et le nickel, augmentent considérablement ces réactions.

Les concentrations élevées dans l'air causent une insuffisance de l'oxygène avec le risque de perte de connaissance ou de mort. Vérifiez le contenu d'oxygène avant d'entrer dans le secteur. Il n'y a aucun avertissement d'odeur si les concentrations toxiques sont présentes. Mesurez les concentrations en hydrogène avec le détecteur approprié de gaz (un détecteur normal de gaz inflammable n'est pas adapté à ce genre de but).

I.9.2. Sur l'environnement :

Stabilité environnementale : l'hydrogène se produit naturellement dans l'atmosphère. Le gaz sera absorbé rapidement dans des secteurs bien-aérés.

Effet sur les plantes ou les animaux : Aucun effet sur les animaux n'a été relaté dans des endroits déficients en l'oxygène. Aucun effet nuisible ne se produit sur la flore, excepté le gel produit en présence de gaz s'étendant rapidement [37].

I.10. Production de l'hydrogène par les énergies renouvelables :**I.10.1. Energie renouvelables :**

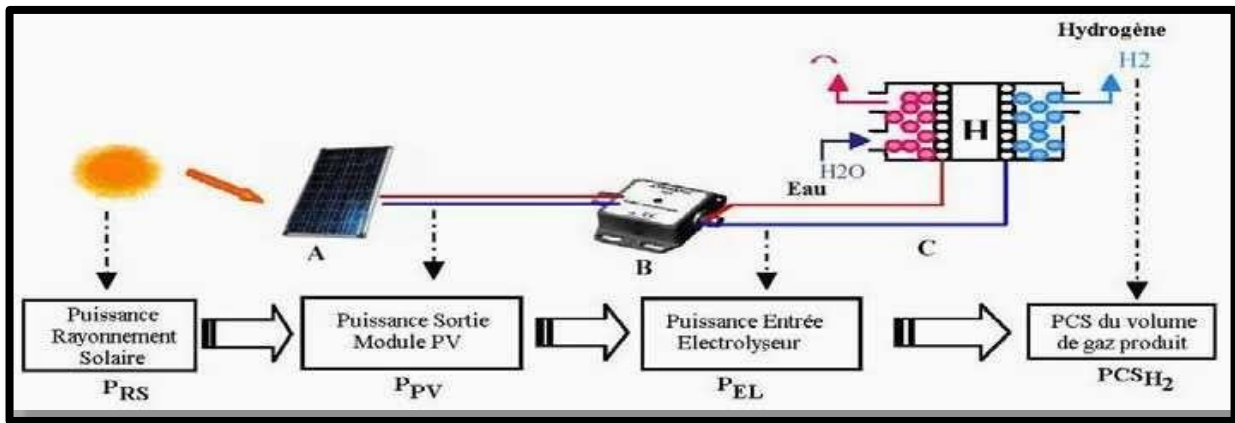
Pierre_ Etienne Franc, responsable de la division mondiale d'énergie hydrogène chez Air Liquide ,est fermement convaincu que «l'électricité est le moyen essentiel qui, associé à l'hydrogène, rendra possible l'abandon des énergies fossiles un jour ». Un rapport solide et bénéfique que peut être établi entre l'hydrogène et les énergies renouvelable intermittentes, comme le solaire et l'éolien, en particulier. Les panneaux solaire et les éolienne s'égrener de l'électricité que lorsque le soleil est éclairant ou quand le vent souffle. Tout se déroule bien lorsque la demande et l'offre se rencontrent. Cependant, si la production d'électricité ne trouve pas d'acheteur, elle est perdue. A moins qu'elle ne puisse être utilisée... pour la production d'hydrogène via l'électrolyse de l'eau. On se réfère généralement à cela commettante «Power to hydrogen ». Cet hydrogène purté durable peut alors être utilisé[38].

I.10.1.1 Production d'hydrogène par énergie solaire :

Cette forme d'énergie renouvelable provient directement de la collecte du rayonnement solaire. On fait appel à des capteurs particuliers pour capter l'énergie des rayons solaires et la redistribuer selon deux modes de fonctionnement principaux :

Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'électricité est produite en captant L'énergie solaire.

Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur issue des rayons solaires est captée et redistribuée et plus exceptionnellement utilisée pour produire d'électricité.[39]



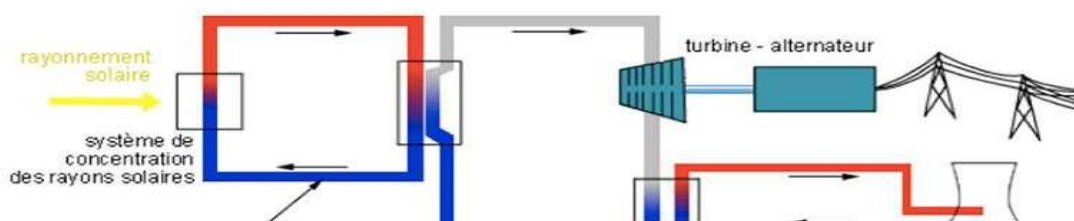
Figure(I.13):Schéma de Production d'hydrogène par énergie solaire.[39]

I.10.1.2 Les trois méthodes d'exploitation de l'énergie solaire :

I.10.1.2.1 Le solaire thermique :

Cette technologie permet de transformer l'énergie solaire en chaleur. Les photons excitent les atomes qui constituent le matériau des capteurs solaires. En saisissant une fraction de leur énergie, les atomes subissent une transformation de leur état énergétique, engendrant ainsi une agitation thermique. Les atomes vont donc émettre l'excès d'énergie sous la forme de chaleur, se traduisant par une énergie thermique.

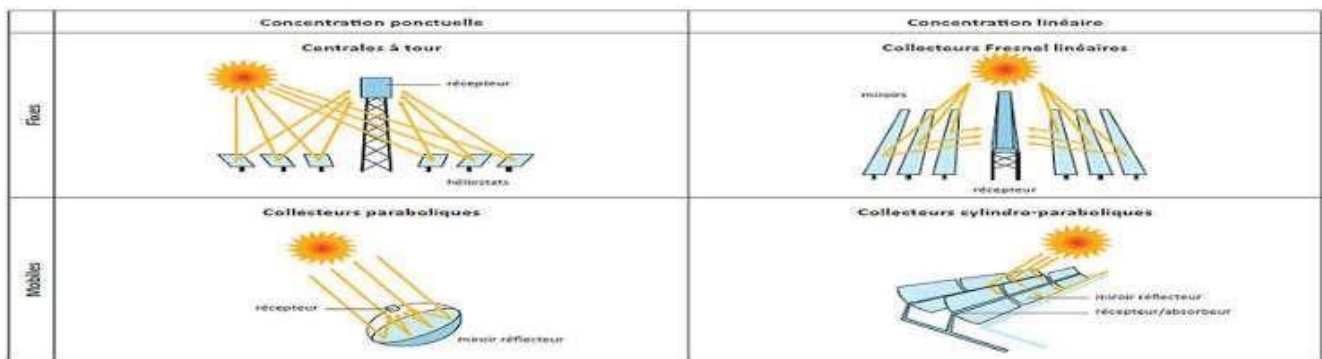
Celle ci sera véhiculée par un fluide caloporteur (comme l'eau ou le gaz): une fois réchauffé, ce dernier peut diffuser progressivement sa chaleur (comme dans le cas d'un plancher chauffant) ou la conserver (comme c'est le cas avec un ballon d'eau) pour une utilisation future [40].



Figure(I.14): méthode de Le solaire thermique.[39]

I.10.1.2.2 le solaire thermique à haute température :

L'idée est de transformer l'énergie solaire en chaleur, puis par la suite en électricité. L'instrument solaire thermique, des capteurs stimulés par les photons généreront de la chaleur. Grâce à un agencement de miroirs (réflecteurs) qui focalisent les rayons solaires on peut obtenir des températures nettement plus hautes (de 250°C à 1000°C). Un fluide caloporteur véhicule cette chaleur, qui est par la suite transmise à un fluide thermodynamique. Suite à des variations de température (et donc de pression), le fluide thermodynamique génère des forces de poussée (énergie mécanique) qui mettent en mouvement une turbine connectée à un alternateur. Cela permet la transformation de cette énergie en électricité [40].



Figure(I.15): méthode de le solaire thermique à haute température.[39]

I.10.1.2.3 photovoltaïque :

Cette méthode et transforme directement l'énergie solaire en électricité.

Comme illustré dans (la figure 16.) Les capteurs sont généralement fabriqués à partir de silicium (Si), un semi-conducteur. Selon les conditions d'utilisation, ce matériau peut se comporter comme un isolant ou un conducteur.

Des électrons seront excités dans ce matériau par les photons, en leur cédant une portion de leur énergie et en les rendant aptes à se déplacer. Ces électrons en mouvement généreront un courant continu, susceptible de nourrir un réseau électrique. Un onduleur transforme ce courant continu en courant alternatif, qui peut être employé par des dispositifs électriques (appareils ménagers, etc.) [40]

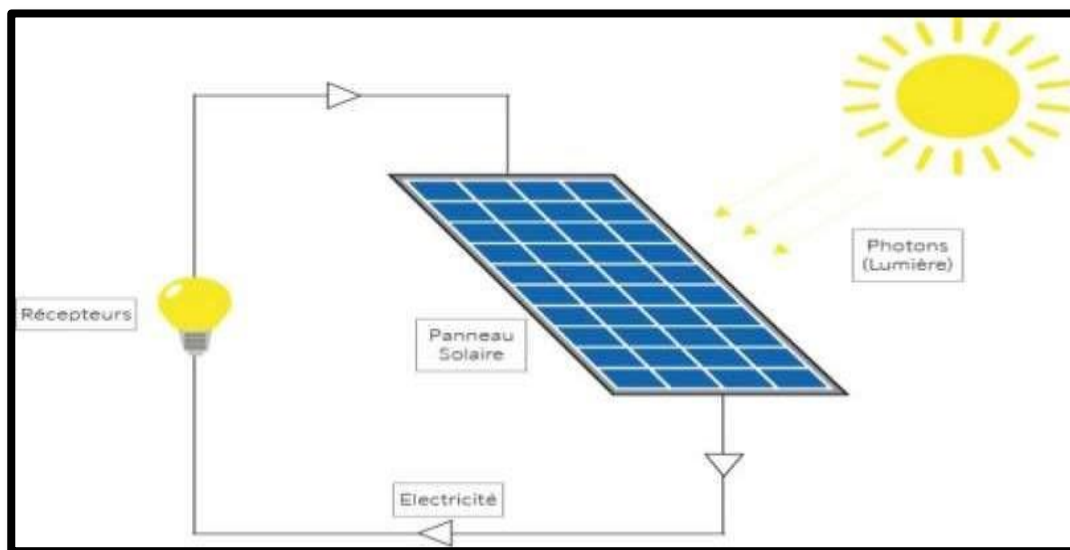
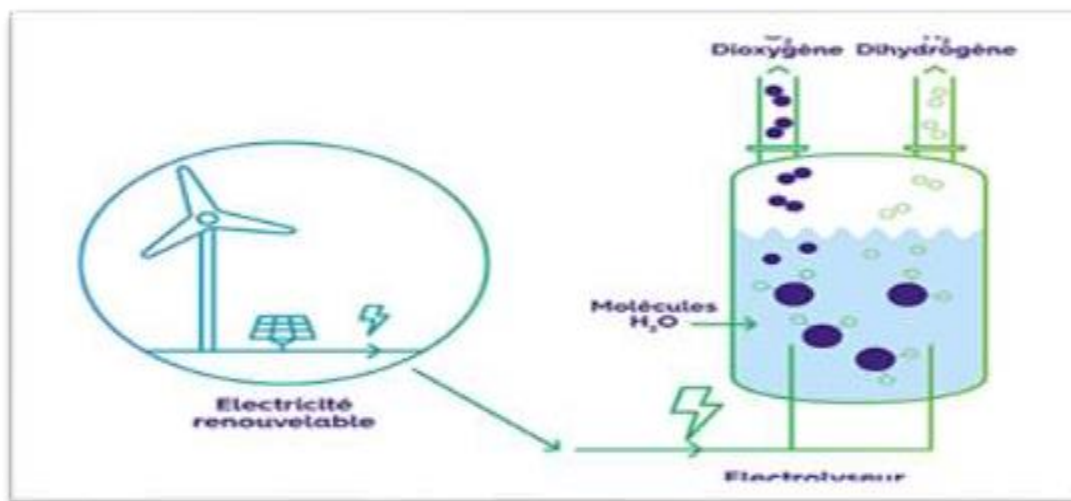


Figure (I.16):Méthode de le photovoltaïque.[39]

I.10.1.2 production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau :

L'hydrogène est produit par électrolyse, processus qui consiste à séparer les molécules d'eau (H_2O) en dioxygène (O_2) et dihydrogène (H_2) à l'aide d'un courant électrique. C'est actuellement la méthode la plus recommandée pour la production d'hydrogène décarboné.[41]

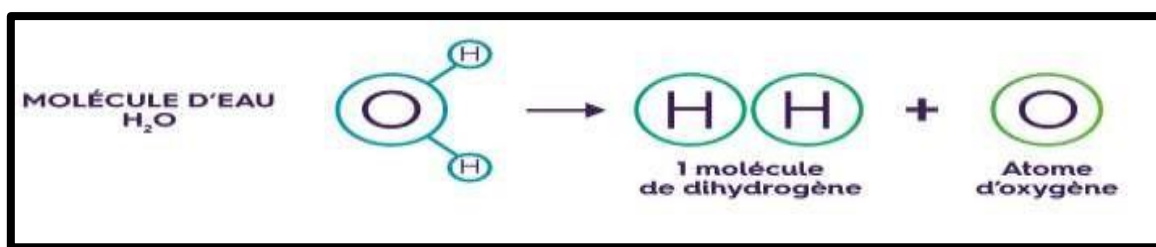


Figure(I.17):Production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau[41]

I.11-Electrolyse de l'eau:

La production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau offre plusieurs bénéfices, car c'est une méthode simple et non polluante qui permet d'obtenir de l'hydrogène de haute pureté. Toutefois, l'électrolyse de l'eau est seulement employée dans des situations spécifiques où un hydrogène d'une pureté élevée est requis. Au cours des dernières décennies, cette technologie a été perçue comme un complément plutôt qu'une substitution aux sources d'hydrocarbures pour la génération d'hydrogène. En outre, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau est actuellement peu compétitive économiquement en raison de sa faible efficacité, découlant d'une forte consommation d'énergie et d'un taux de libération

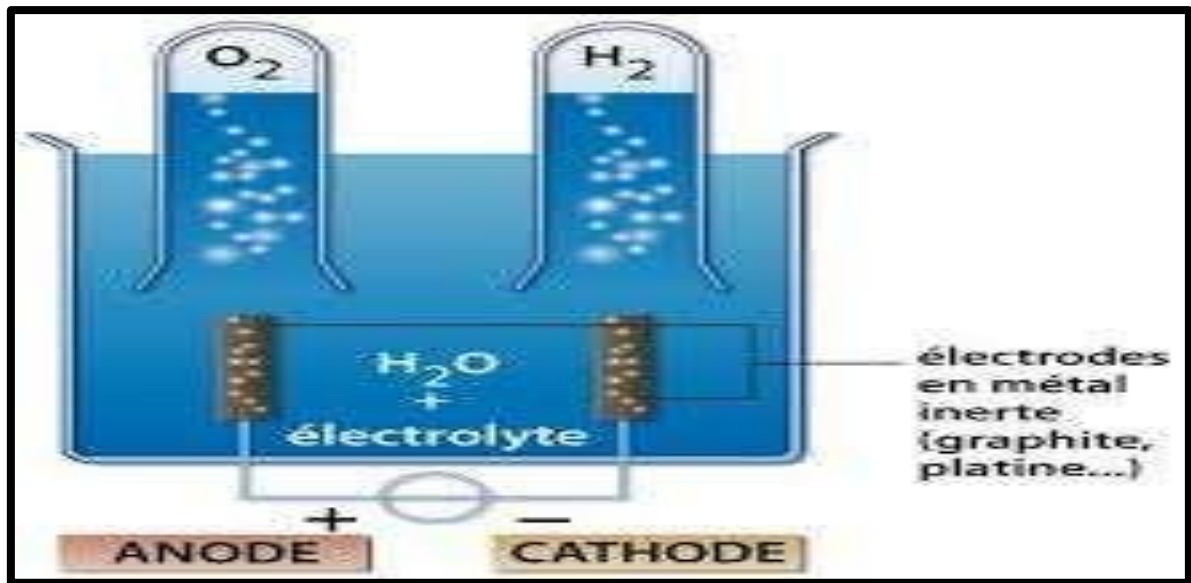
d'hydrogène relativement bas. Ainsi, dans le but d'améliorer l'efficacité et de minimiser la consommation d'énergie, beaucoup de recherches se sont focalisées sur la conception d'électro catalyseurs économiques et à faible consommation d'énergie [42]



Figure(I.18): Production d'hydrogène Par électrolyse d'eau [42].

I.11.1. Principe de fonctionnement de l'électrolyse de l'eau

L'eau ne se dissocie pas d'elle-même en oxygène et en hydrogène. Pour cela, il faut lui donner de l'énergie. L'électrolyse de l'eau est donc une réaction électrochimique (contrainte), qui est effectuée dans un dispositif spécifique nommé électrolyseur. Dans un dispositif de ce type, on introduit un courant électrique « grâce à un générateur électrique » et de l'eau liquide, puis on extrait de l'hydrogène et de l'oxygène sous forme gazeuse. Ainsi, nous pratiquons la chimie, ce qui signifie que nous convertissons un composé chimique, « l'eau », en d'autres composés chimiques (l'hydrogène et l'oxygène), grâce à de l'électricité [43].



Figure(I.19): Principe de l'électrolyse de l'eau [43].

I.11.2. Relation de Nernst :

Lorsqu'une électrode est abandonnée dans un électrolyte (en l'absence de courant), elle acquiert une tension E . Ce potentiel d'équilibre, qui représente un équilibre entre les espèces présentes, est décrit par la relation de Nernst (voir oxydoréduction).[41]

$$E_0 = E_0^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{A_{ox}}{A_{red}}$$

Avec :

E_0 : potentiel d'équilibre de l'électrode par rapport à l'ENH,

E_0^0 : potentiel d'équilibre de l'électrode dans les conditions standard .

R : constante molaire des gaz parfaits.

F : constante de Faraday.

T : température absolue

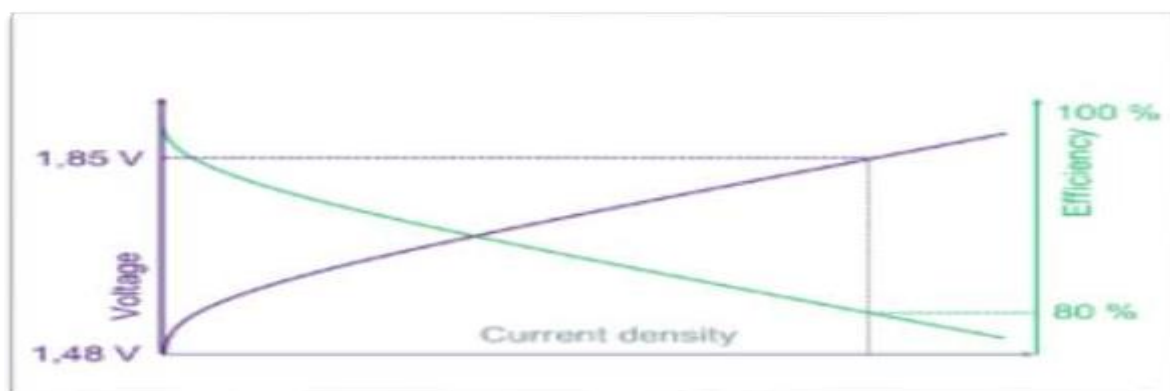
n : nombre d'électrons mis en jeu dans le processus électrochimique,

A_{ox} : activité de l'espèce oxydante,

A_{red} : activité de l'espèce réductrice.

I.11.3. La tension de l'électrolyse de l'eau :

La différence de potentiel entre les deux électrodes doit être d'au moins équivalente à leur potentiel d'équilibre. Dans le cadre de l'électrolyse de l'eau, la tension minimale requise est de 1,23V à une température de 25°C. À cette tension, la vitesse d'électrolyse est pratiquement inexistante. Pour obtenir un courant d'électrolyse significatif, la tension doit dépasser ce seuil. Il est nécessaire d'appliquer une surtension pour surmonter la résistance électrique de l'électrolyte [42].



Figure(I.20): Graphe de la tension de l'électrolyse de l'eau [44].

Cette surtension est fonction de la technologie utilisée et de la productivité désirée. La réaction de séparation de l'eau est endothermique, ce qui signifie qu'elle capte de la chaleur. Pour conserver une température stable de l'électrolyte, il faudra transmettre cette chaleur à l'électrolyte. L'effet Joule de la surtension d'électrolyse permet de générer cette chaleur. On appelle « tension thermoneutre » la tension minimale requise pour conserver stable la température de l'électrolyte pendant le processus d'électrolyse. Pour l'électrolyse de l'eau, la valeur est fixée à 1,48 volts. Si la surtension augmente, l'électrolyte risque de se réchauffer ; il faudra donc le refroidir pour contrôler sa température

I.11.4 Loi de Faraday :

La loi de Faraday décrit le lien entre la quantité d'électricité qui passe à travers une cellule d'électrolyse et l'intensité des réactions qui ont lieu aux bords électrodes-électrolyte [39].

$$P = R_F \frac{M \cdot I \cdot t}{nN \cdot e_0}$$

Avec:

P: masse de constituant mise en jeu au cours de la réaction(g),

R_F : rendement de courant,

M : masse molaire du constituant (g),

$I \cdot t$: quantité d'électricité traversant la cellule(C),

n: nombre d'électrons-grammes changés lors de la réaction,

N : nombre d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$ pour une mole,

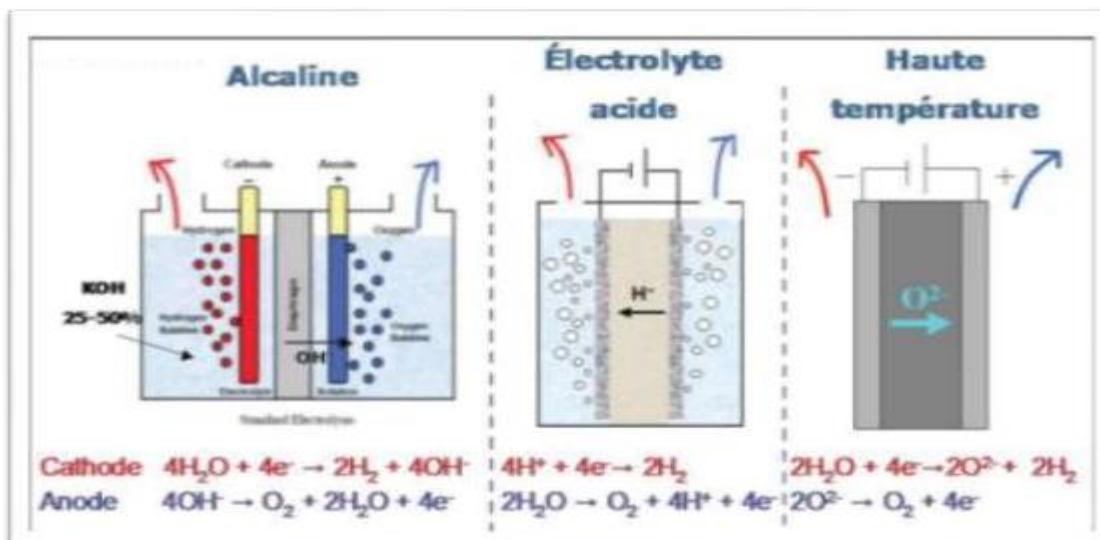
e_0 : charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

I.12. Technologies d'électrolyseurs :

Les technologies modernes de l'électrolyse de l'eau en cours de développement se différencient, d'une part par la structure (monopolaire ou bipolaire) et, d'autre part, par le type d'électrolyte utilisé (alcalin, PEM et PCFC ou SOFC). L'électrolyse a lieu dans un dispositif électrochimique connu sous le nom de cellule d'électrolyse, qui se compose de deux électrodes : une anode et une cathode. Ces dernières sont positionnées de chaque côté d'un conducteur ionique (électrolyte). Les deux électrodes sont liées à un générateur de courant, comme illustré dans la figure I.21. L'électrolyse de l'eau peut s'effectuer dans divers systèmes [45].

L'environnement électrolytique peut être acide ou alcalin, et la réaction est aussi envisageable à des températures élevées. Selon les conditions opérationnelles, on peut distinguer les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent aux électrodes, bien que ces deux réactions conduisent à des produits identiques. Néanmoins, pour que ces réactions se produisent, les matériaux constituant ces systèmes électrochimiques doivent être appropriés.

Chaque l'un des trois types de technologie d'électrolyse présente des avantages et des désavantages (Tableau II.1). La présente thèse se consacre principalement à l'étude de l'électrolyse de l'eau dans un environnement alcalin concentré



Figure(I.21): Technologies de d'électrolyseurs[41]

I.12.1. Electrolyseur Alcaline :

Ce type est basé sur la technologie qui utilise une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) comme électrolyte. L'électrolyse alcaline est la solution de production d'hydrogène la plus fréquemment utilisée aujourd'hui, offrant des coûts d'investissement plus bas par rapport aux autres technologies d'électrolyse, en particulier grâce à la simplicité des matériaux. L'électrolyse alcaline bénéficie déjà de rendements de 68 à 77%, avec des marges améliorées et une faible réactivité par rapport aux variations de performance. Si ce dernier aspect du couplage énergétique intermittent est un problème, il y a peu d'inconvénient à la production d'hydrogène à partir de la production d'énergie hydroélectrique [42].

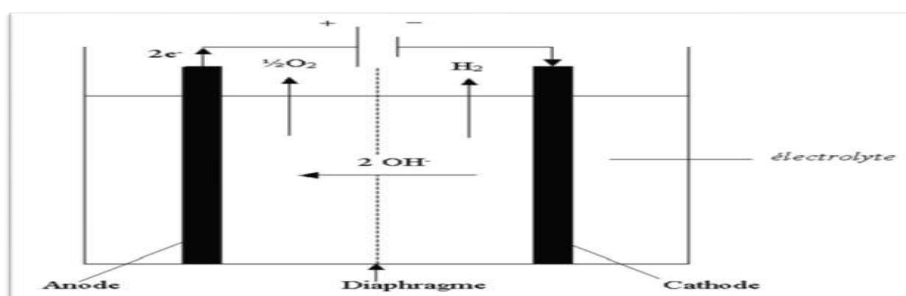
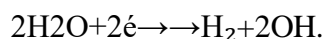
La perspective d'améliorer cette technologie est liée aux coûts de fabrication, aux pressions opérationnelles et aux conditions de couplage pour l'énergie intermittente. En fin de compte, vous pouvez également bénéficier des piles à combustible alcalines. Cependant, ces améliorations sont minimes compte tenu de leur maturité, donc l'étude se concentre sur deux autres techniques électrolytiques.

Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous

À l'anode :



A la cathode :



Figure(I.22): électrolyseur Alcaline[42]

I.12.2. PEM électrolyseur :

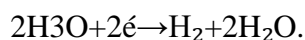
La deuxième technologie d'électrolyser utilise une membrane polymère (PEM de Proton Exchange Membrane) comme électrolyte. Ce développement des électrolytes liquides aux électrolytes solides peut réduire considérablement les coûts de maintenance et d'entretien. En effet, l'influence des électrolytes liquides sur l'installation et la compression de l'hydrogène à l'initiation initiale est importante. De plus, l'électrolyse PEM (photo ci-dessous) offre une solution de production distribuée supérieure avec une meilleure réactivité par rapport aux variations de performances et une plus grande compacité du système [46].

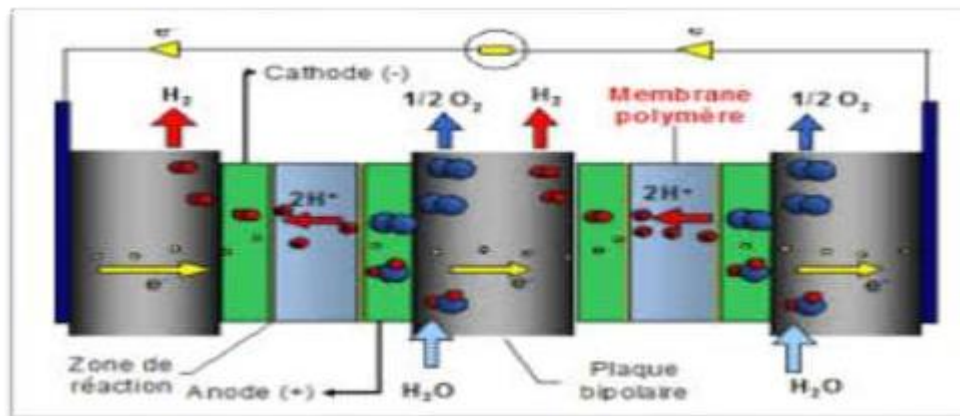
Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous. :

A l'anode:



A la cathode :





Figure(I.23):électrolyseur PEM.

Avec un rendement de 62 à 77%, la technologie est utilisée sur certains marchés de niche, en particulier les sous-marins, mais est toujours à son stade de développement pour une utilisation en masse. Les principaux obstacles sont l'utilisation de matériaux nobles, en particulier le platine, la durée de vie de la membrane et la taille des unités [47].

Les coûts actuels des électrolyseurs PEM sont de l'ordre du double de ceux des technologies alcalines. Toutefois, cette technologie profite de la forte recherche sur les piles à combustible PEM, et dispose de caractéristiques prometteuses (forte densité de courant acceptée, pression élevée). Les perspectives d'amélioration identifiées se situent principalement au niveau de la capacité des empilements, de la diminution de l'utilisation des matériaux nobles ainsi que d'une augmentation de la durée de vie des membranes [47].

Enfin, la recherche en laboratoire expérimente cette technologie à haute température (130-180°C, contre 70 à 80°C pour les électrolyseurs actuels).

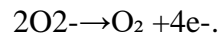
I.12.3. Electrolyseur à haute température :

L'électrolyse à haute température s'appuie sur la décomposition des molécules d'eau en vapeur à la cathode. La décomposition est donc dépendante du type d'électrolyte. Ce dernier peut garantir soit une conduction de protons, soit une conduction d'ions superoxydes O_2^- . Les réactions qui se produisent aux électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte [44].

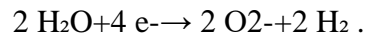
Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous :

I.12.1.1 Electrolyte à conduction d'ions superoxydes:

À l'anode:

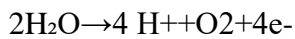


À la cathode :

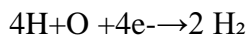


I.12.3.1 Electrolyte à conduction d'ions superoxydes :

À l'anode:



À la cathode :

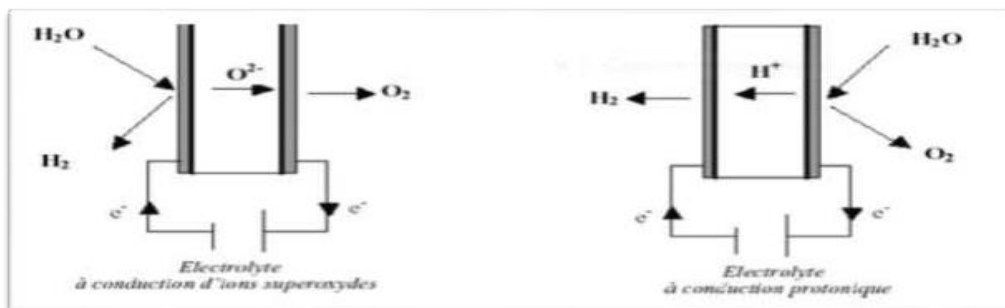
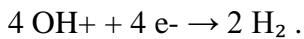


I.12.3.2 Electrolyte à conduction protonique :

À l'anode :



À la cathode :



Figure(I.24):électrolyseur à haute température[42].

La principale technologie d'électrolyse à haute température est la cellule d'électrolyse à oxyde solide (SOEC pour Strong Oxide Electrolysis Cell). Fonctionnant entre 700 et 900°C, l'électrolyse SOEC (figure ci-dessus) présente un dispositif similaire à l'électrolyse PEM. Cependant, une portion significative de l'énergie est apportée sous forme de chaleur, qui antité de 10% à 400 Kelvin à 30% à 1200 Kelvin, mais qu'il est concevable de récupérer lors de l'électrolyse (exothermique). Cette technologie présente l'avantage de pouvoir fonctionner de manière réversible : en électrolyseur ou en pile à combustible. Avec des rendements pouvant dépasser 90%, l'électrolyse SOEC se situe dans la phase de recherche en laboratoire. Si les rendements actuels sont prometteurs, la dégradation accélérée des cellules constitue le principal frein à un développement rapide [44]

I.12.4- Les avantages et les inconvénients de les trois technologies :

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

Table(I.7):les avantages et inconvénients de les trois technologies[41].

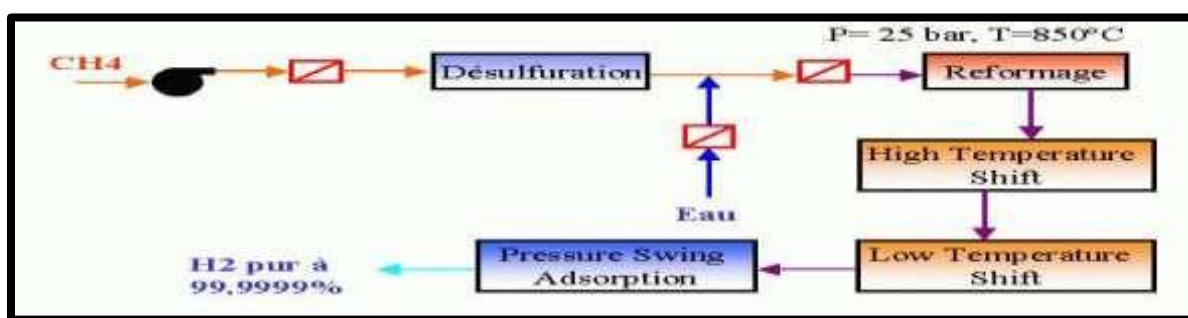
I.13. Technologies de production d'hydrogène :

La « production d'hydrogène vert » consiste à décomposer les molécules d'eau pour générer de l'hydrogène et de l'oxygène pur. Cela requiert un électrolyseur, qui est habituellement l'élément le plus coûteux d'une telle installation en matière de coûts d'investissement et de fonctionnement. Cela constitue approximativement 70 % du coût global de ces technologies de production d'hydrogène. Toutefois, tous les électrolyseurs ne se ressemblent pas. En effet, on distingue quatre technologies majeures. Si vous envisagez de produire votre propre hydrogène, il est primordial d'identifier le modèle d'électrolyseur idéal pour votre utilisation [48].

Cela dépend entièrement de l'usage. L'énergie produite à partir de l'hydrogène peut être exploitée dans divers secteurs, allant des autobus à hydrogène jusqu'aux centrales électriques.

I.13.1. Décomposition catalytique du gaz naturel :

L'intérêt croissant pour la décomposition du gaz naturel, ou cracking, en ses composants de carbone et d'hydrogène est justifié par son potentiel à produire de l'hydrogène sans émettre de CO₂. Dans les années 1960, UOP a examiné, sans donner suite, un procédé à l'échelle pilote. Production d'hydrogène par décomposition catalytique du gaz naturel (méthode « HYPRO »). L'utilisation de catalyseurs facilite la réduction de la température à laquelle la décomposition se produit. Avec sa structure semblable à celle des gaz rares et son manque de caractère dipolaire, le méthane est chimiquement inerte. Sa décomposition sans l'aide d'un catalyseur ne se produit qu'à une température extrêmement élevée, proche de la température adiabatique de combustion [49].

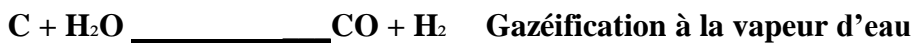


Figure(I.25): Décomposition catalytique du gaz naturel [49].

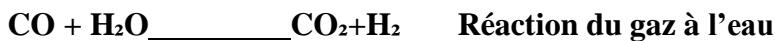
I.13.2. Gazéification de charbon :

La gazéification, du point de vue strictement chimique, est le processus de conversion d'un combustible solide (tel que le bois ou le coke) en un gaz grâce à l'intervention d'un agent oxydant, qui peut être la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone ou même l'oxygène. Dans un processus de gazéification, une multitude [50].

Les réactions sont en concurrence. Nous en mentionnons quelques-unes:



Et deux réactions secondaires homogènes entre les produits issus des réactions de gazéification:



Parmi les différentes réactions, la gazéification par la vapeur d'eau est celle qui prédomine dans la production d'hydrogène. Il faut préciser que cette réaction est endothermique et se déroule à haute température (800 – 1400°C). Elle inclut également les étapes suivantes [50].

- La vapeur d'eau et la chaleur sont transférées de la couche de gaz enveloppant la particule vers sa surface.
- La vapeur d'eau et la chaleur se déplacent à l'intérieur même de la particule.
- Une réaction chimique se produit entre la vapeur d'eau et le carbone à la surface des pores réactifs.

I.13.3. Oxydation partielle :

L'oxydation partielle est une méthode de production contrôlée d'hydrogène. Il existe en deux variantes, catalytique et non catalytique, et peut être utilisée sur toutes les ressources naturelles ayant une teneur significative en carbone (hydrocarbures, charbon, biomasse, etc.). L'exothermicité totale de la réaction est déclenchée par le préchauffage des réactifs à environ 300°C et elle s'effectue à une température comprise entre 1000 et 1400°C. Cette méthode a récemment suscité l'intérêt de nombreux chercheurs, car elle est exothermique et n'exige pas d'apport supplémentaire d'énergie, un aspect essentiel sur le plan économique [51].



$$\Delta H_{0298\text{K}} = -192 \text{ KJ/mol}$$

L'addition de l'oxygène lors de la réaction de reformage à la vapeur améliore la conversion du méthanol en tant que combinaison de reformage à la vapeur.

L'étude du reformage à la vapeur du méthanol a été réalisée sur des catalyseurs contenant du cuivre, ainsi que sur des catalyseurs composés de palladium et de nickel. L'étude de l'oxydation du méthanol a été réalisée en utilisant des catalyseurs basés sur le Pd, le Rh et le Pt. La production de formaldéhyde se fait principalement par l'oxydation partielle du méthanol sur des catalyseurs en cuivre. La réaction d'oxydation partielle génère des ratios H_2/CO_2 moins propices. C'est exothermique, il n'est pas nécessaire de générer de la vapeur et les réactions se produisent à des vitesses élevées [41][51].

L'obtention d'hydrogène via l'oxydation partielle du méthanol, avec l'air comme agent oxydant, a été explorée en utilisant une gamme de catalyseurs Cu/ZnO préparés par la méthode de microémulsion. On a mis en parallèle l'activité catalytique avec celle d'un catalyseur standard préparé par la coprécipitation traditionnelle. Les surfaces spécifiques BET des catalyseurs de microémulsion (composés à 30-70% de Cu) ont connu une augmentation, passant de 22 à 36 m²/g, mais elles demeuraient largement inférieures à celle du matériau de référence (60 m²/g) [41][51].

Toutefois, les catalyseurs de microémulsion ont montré une plus grande activité lors de la réaction d'oxydation partielle, exhibant ainsi des hautes sélectivités pour l'anhydride carbonique et l'hydrogène. À un rapport molaire $\text{O}_2/\text{CH}_3\text{OH}$ de 0.1, la génération d'hydrogène à 185°C se fait sur des catalyseurs de microémulsion. La génération d'hydrogène a démarré à 215°C dans les mêmes conditions. La pression partielle de l'oxygène a démontré une influence significative sur l'activité catalytique, qui est fortement dépendante de cette dernière. De plus, elle joue un rôle crucial dans la répartition des produits. L'augmentation du ratio $\text{O}_2/\text{CH}_3\text{OH}$ provoque une hausse de la conversion du méthanol et de la sélectivité de l'anhydride carbonique [51][41].

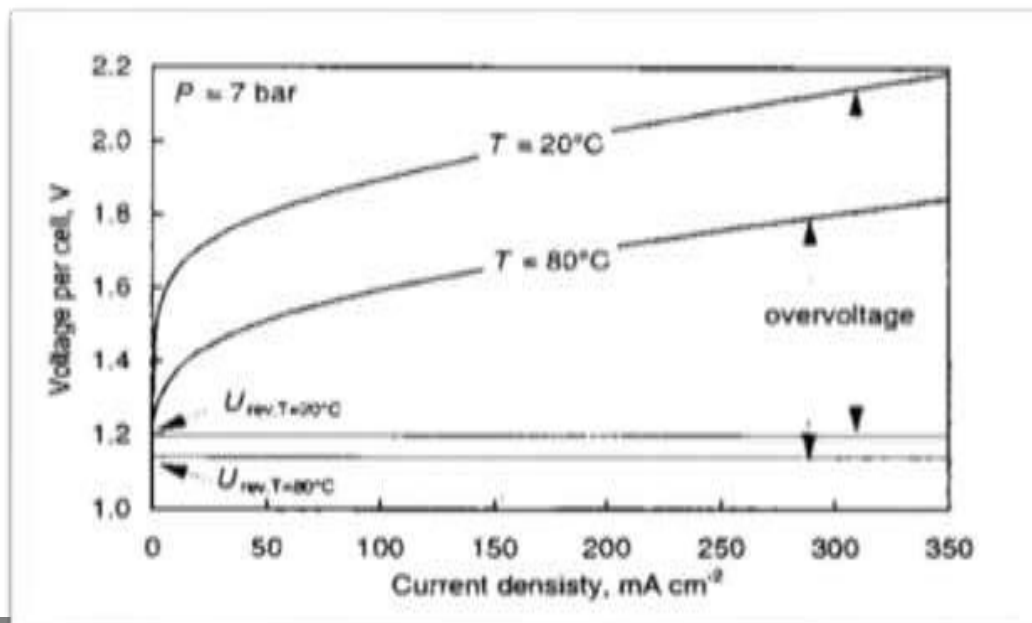
I.14. Effet de la tension d'électrolyse :

I.14.1. Effet de la température sur la tension d'électrolyse :

Des recherches expérimentales réalisées sur l'électrolyse révèlent que toutes les irréversibilités dans une cellule d'électrolyse se réduisent lorsque la température de fonctionnement de l'électrolyseur s'accroît. La résistance ionique, qui joue un rôle majeur, diminue alors, ce qui permet de réduire la tension effective de l'électrolyseur et par conséquent sa consommation d'énergie.

La limitation de l'augmentation de température dépend de la résistance des matériaux constituant l'électrolyseur. Au-delà d'une certaine température, il est impératif de réaliser l'électrolyse sous pression pour minimiser les pertes d'eau par évaporation.

Cette figure montre qu'il est possible d'obtenir des rendements importants, allant même au-delà de 100 % (à une faible intensité), si la chaleur est fournie à la réaction de manière externe.[39]



Figure(I.26): Effet de la température sur la tension d'électrolyse[39]

I.14.2. Effet de la pression sur la tension d'électrolyse :

Malgré que, sur le plan thermodynamique, une élévation de la pression puisse entraîner une hausse de la tension de l'électrolyseur et donc réduire son efficacité énergétique, en réalité, l'effet de la pression sur la tension de cellule à densité de courant et température constantes varie selon la technologie de l'électrolyseur.

Concernant la technologie dénommée « zero gap » (plaques bipolaires), on ne constate aucun impact de la pression sur une vaste plage.

Cette observation incite les fabricants à concevoir des électrolyseurs bipolaires à plaques avec une pression de fonctionnement dépassant 30 bar. Ils sont donc en mesure de se passer d'une étape de compression énergivore, conditionnant les gaz produits à 200 bar[39].

Influence de la pression sur la tension d'une cellule d'électrolyseur alcalin à technologie 'zero gap'. Cependant, dans le cas des électrolyseurs à diaphragme fonctionnant sous haute pression, la dimension des bulles de gaz générées réduit la résistance de l'électrolyte et par conséquent diminue la tension d'électrolyse [39].

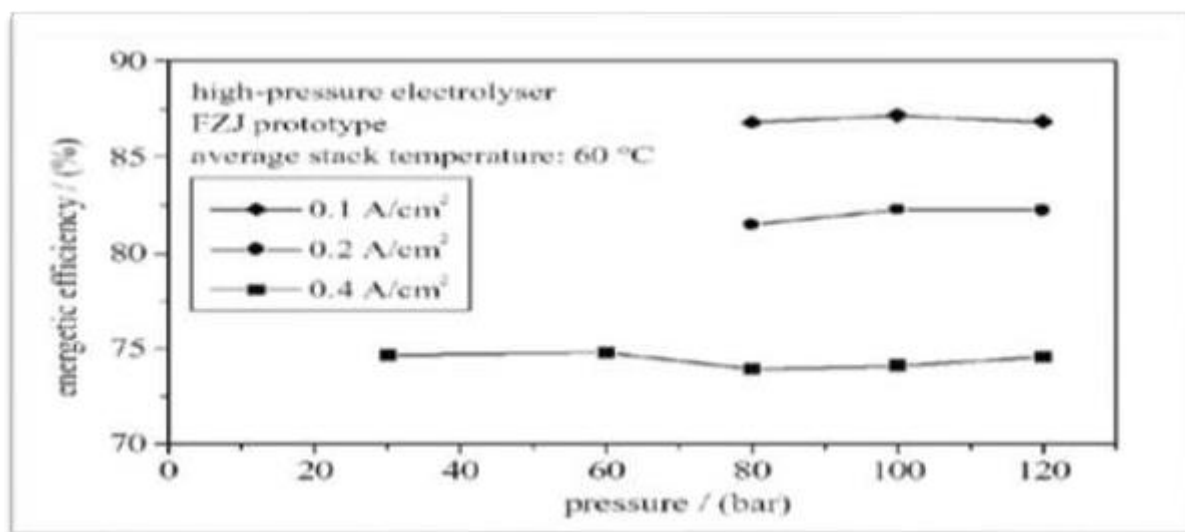


Figure (I.27): Effet de la pression sur la tension d'électrolyse[39].

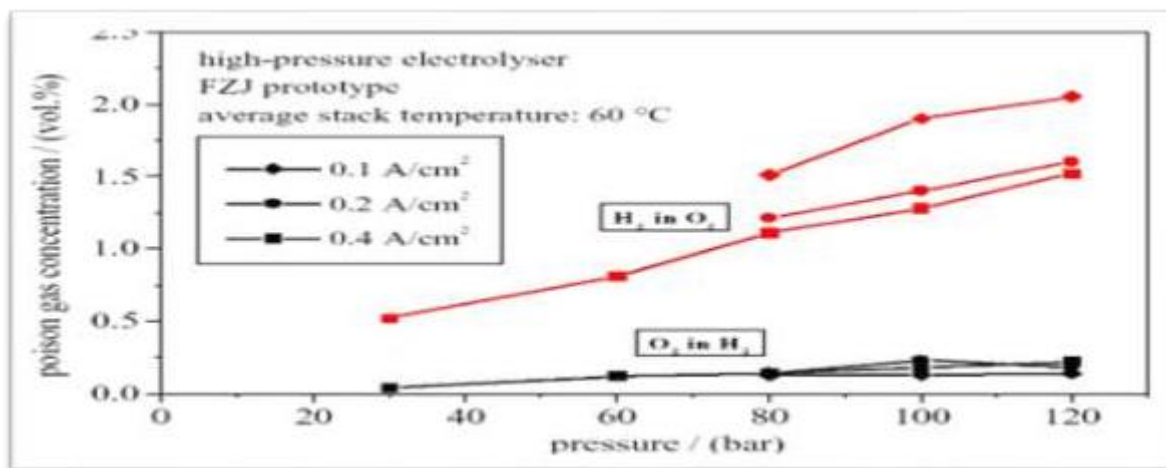
I.14.3. Effet de la pression sur la pureté des gaz produits :

La pureté des gaz (principalement l'oxygène) est influencée à la fois par l'intensité et la pression. Le graphique suivant illustre que la concentration de l'hydrogène dans l'oxygène s'accroît en fonction de la pression. Le débit d'hydrogène produit est faible lorsque la pression reste constante et que l'intensité

Est faible. En raison de la taille réduite des molécules d' H_2 , ce gaz se diffuse à travers la membrane pour atteindre le côté anodique où l'oxygène est généré. Ce phénomène de meure Constantin dépendamment de l'intensité. Lorsque l'intensité est faible, la pureté de l'oxygène produit est donc inférieure. Cette émission on pourrait provoquer un risque d'explosion (si la proportion d'hydrogène dans l'oxygène atteint le seuil critique de 4% en volume) [39].

C'est pour cette raison que les électrolyseurs sont généralement dotés de capteurs pour déterminer la concentration d'hydrogène dans l'oxygène généré. Finalement, on restreint habituellement l'opération

De l'électrolyseur à un courant minimal et par conséquent à une puissance minimale pour prévenir la création d'un mélange explosif. Ce régime minimal s'accroît également sous pression. Même si l'accroissement de la pression de fonctionnement de l'électrolyseur est bénéfique d'un point de vue énergétique (permettant d'éviter une unité de compression pour le stockage des gaz générés, réduisant ainsi la consommation électrique du système), cela affecte négativement la qualité des gaz produits à faible régime [39].



Figure(I.28): Effet de la pression sur la pureté des gaz produits [39].

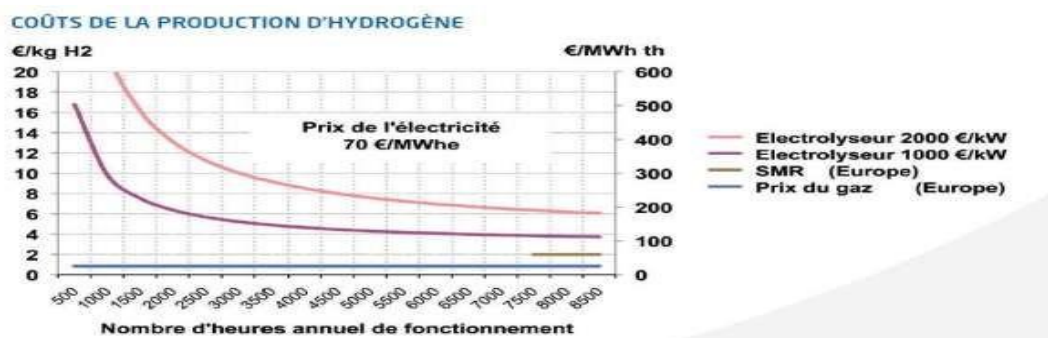
I.15. Le coût de production d'hydrogène :

Evoquer le recours à un nouveau vecteur d'énergie, même à un stade préliminaire, exige non seulement une analyse du cycle de vie, mais aussi une analyse économique globale (coût capital, coûts opératoires et maintenance). Le coût de l'hydrogène produit par électrolyse est lié à celui de l'électricité, donc à son mode de production. Dans le cas d'une électricité «verte », ces ont les coût sen capitaux du système renouvelable (photovoltaïque, éolien...) qui influenceront. Les chiffres varient, selon les auteur set les hypothèses retenues (taille et performances de l'unité, coût capital...) entre 2,5 et 6 €/kg, avec un assez large consensus autour de 3,5 – 5 €/kg d'hydrogène, pour une durée de fonctionnement supérieure à 7 000 h/an (Figure I.30)[52]

Ces chiffres sont à considérer avec prudence, compte tenu du faible retour d'expérience sur les performances réelles de ces systèmes et des coûts associés, mais ils montrent qu'une analyse économique, même préliminaire, ne permet pas de disqualifier cette nouvelle filière qui reste encore à développer, notamment pour des applications captives.

Ces coûts peuvent être comparés aux résultats des travaux du projet national *HyFrance3*. Par exemple, dans l'hypothèse d'une production massive d'hydrogène à partir d'un champ éolien, couplée à un stockage en cavités profondes, dans les régions PACA ou Rhône-Alpes, le coût prospectif, en 2050, de l'hydrogène produit par électrolyse pourrait se situer dans la gamme 0,5 – 0,7 €/kg [52].

Des on côté, le CGSP (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective) a publiée en septembre 2014, les résultats d'une étude sur le sujet (Figure I.30) [52].



Figure(I.29): Coût de l'hydrogène en fonction du mode de production[52].

I.16. L'hydrogène comme vecteur d'énergie :

L'hydrogène est perçu comme un « vecteur énergétique » car, une fois produit, il peut être stocké, transporté et utilisé. Il existe deux méthodes pour récupérer l'énergie présente dans l'hydrogène : en le brûlant ou par le biais d'une pile à combustible. De plus, il est utilisé comme un élément dans certains procédés employés dans le secteur industriel.

Avec l'avancement technologique qui a optimisé l'efficacité et la fiabilité des procédés, on peut générer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, utilisant de l'électricité à faible teneur en carbone.

On qualifie de « décarboné » un produit dont la fabrication et l'usage contribuent à réduire d'au moins 70 % les émissions de CO₂ associées à une production basée sur des sources fossiles [53].

- ✓ Le secteur du gaz, comprenant des producteurs, des opérateurs d'infrastructures ainsi que des fournisseurs.
- ✓ L'industrie, à la fois en sa qualité de consommateurs et de fournisseurs d'équipements industriels, de piles à combustible et de technologie hydrogène.
- ✓ Le domaine de la mobilité, dans son rôle d'utilisateur lors de la transition vers un mode de transport à la fois durable sur le plan économique et écologique.
- ✓ Le domaine commercial et les utilisateurs finaux non professionnels

I.17. Réalisations mondiales dans le domaine de l'hydrogène :

Aujourd'hui, le marché mondial de l'hydrogène se présente principalement comme un marché industriel : l'hydrogène est un produit utilisé dans les procédés de l'industrie pétrolière et chimique. On estime actuellement le marché mondial de l'hydrogène industriel à 60 millions de tonnes, tandis que le marché français est quant à lui estimé à environ 1 million de tonnes. En France, l'hydrogène destiné à l'industrie représente plus de 900 000 tonnes chaque année. Les trois principaux secteurs d'activité sont la désulfuration des produits pétroliers (60%), la fabrication d'ammoniac, principalement destinée aux fertilisants (25%), et l'industrie chimique (10%). En France, il est généré à 94% à partir de sources d'énergie fossiles (gaz, charbon, hydrocarbures). En France, la production d'hydrogène est à l'origine de 11,5 millions de tonnes de CO₂, ce qui représente près de 3% des émissions du pays.[54].

Il y a quelques années, l'Europe avait établi des buts pour l'évolution de son industrie de l'hydrogène. Cependant, compte tenu des retards accumulés dans cette évolution, ces objectifs semblent aujourd'hui très audacieux. Elle a dû affronter de nombreux obstacles au cours des dernières années. En premier lieu, la question de la compétitivité de sa production, spécifiquement en ce qui concerne l'hydrogène à faibles émissions de carbone par rapport à d'autres productions soutenues par des subventions. L'intégration du coût du carbone peut y apporter un élément de réponse. Par ailleurs, la structuration de la filière et l'accroissement des investissements requièrent un cadre réglementaire stable, ce qui n'a pas été le cas puisque celui-ci a constamment changé [54].

Avec des grands groupes et des PME ETI présents sur l'ensemble de la chaîne de valeur, la France a toutes les cartes en main pour se positionner en leader des technologies de l'hydrogène à l'échelle mondiale, en particulier sur des segments stratégiques : la fabrication d'électrolyseurs, la production de piles à combustible et des réservoirs associés pour les véhicules à hydrogène, la production de séries de véhicules tels que les trains, les bus ou les véhicules utilitaires légers, l'implantation de constructeurs de véhicules (camions, bennes à ordures), ou le déploiement à l'échelle d'une infrastructure de stations de recharge. Après la phase des démonstrateurs, l'heure est à l'industrialisation et au passage à l'échelle des technologies [54].

Conclusion:

Il existe plusieurs procédés de production d'hydrogène, chacun avec ses avantages et ses limites. Parmi les procédés industriels largement utilisés, on trouve le reformage à la vapeur du gaz naturel, l'électrolyse de l'eau et la gazéification du charbon. Chacun de ces procédés a ses propres caractéristiques et conditions opératoires spécifiques. Le reformage à la vapeur est couramment utilisé en raison de la disponibilité et du faible coût du gaz naturel. Cependant, il génère également du monoxyde de carbone, nécessitant une étape supplémentaire pour convertir ce dernier en dioxyde de carbone afin de produire de l'hydrogène pur.

L'électrolyse de l'eau est une technique électrochimique qui fait appel à un courant électrique pour séparer l'eau en ses composants, l'hydrogène et l'oxygène. Cela propose une méthode de production d'hydrogène qui est écologique, surtout quand elle est alimentée par des sources d'énergie renouvelables. Toutefois, des améliorations sont toujours nécessaires pour diminuer les coûts et améliorer l'efficacité.

La gazéification du charbon est une technique de production d'hydrogène à partir du charbon, cependant elle est fréquemment liée à l'émission de dioxyde de carbone et d'autres substances polluantes. Il est indispensable de disposer de technologies pour capturer et stocker le carbone afin de réduire l'impact écologique de cette méthode.



CHAPTREII: Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau



Introduction:

Premier élément du tableau périodique, son atome pourtant le plus simple de tous, est le constituant essentiel de l'univers. Son intérêt théorique se double, pour le dihydrogène, d'un intérêt pratique notable. On voit en lui un combustible d'avenir ; énergétique et non polluant, à cela s'ajoute l'espoir encore lointain de maîtriser la « fusion » des noyaux d'hydrogène, source de l'énergie solaire . C'est l'atome le plus abondant de l'univers. Il s'est formé au cours des premières secondes du « Big-Bang » qui marque le commencement de l'univers. Il existe 89% de H₂ dans l'univers, c'est le principal constituant du soleil qui n'est autre qu'une énorme boule de gaz chaud : 92%d'hydrogène, 7%d'hélium et 1% d'éléments lourds.

Ce chapitre examine minutieusement les multiples aspects de la production d'hydrogène, en mettant l'accent sur l'électrolyse de l'eau. Nous commencerons par une étude des propriétés intrinsèques de l'hydrogène, suivie d'une vue d'ensemble de ses applications industrielles, y compris dans les domaines de l'électronique, du transport (hydrogène comme carburant) et de la chimie. Par la suite, nous explorerons les différentes méthodes de production d'hydrogène en soulignant les avantages les inconvénients de ce vecteur énergétique. Nous porterons une attention particulière aux techniques de production, en différenciant celles provenant des énergies fossiles (comme le vaporeformage, l'oxydation partielle et le reformage autotherme) de celles issues de l'électrolyse de l'eau. L'électrolyse de l'eau, élément central du présent chapitre, sera analysée en détail depuis son historique et ses principes jusqu'à sa thermodynamique. Nous explorerons également les technologies d'électrolyseurs disponibles (alcalins, PEM, haute température), en comparant leurs performances et leurs applications. Enfin, nous examinerons l'électrolyse de l'eau couplée à l'énergie photovoltaïque, une approche prometteuse pour une production d'hydrogène durable

II.1. Caractéristiques de l'hydrogène :

L'hydrogène est un gaz incolore et inodore. Il s'enflamme facilement. Une fois enflammé, il brûle avec une flamme bleu pâle, presque invisible. Les vapeurs sont plus légères que l'air. Il est inflammable sur une large gamme de concentrations vapeur/air. L'hydrogène n'est pas toxique mais est un simple asphyxiant par déplacement de l'oxygène dans l'air. En cas d'exposition prolongée au feu ou à une chaleur intense, les conteneurs peuvent se rompre violemment et se propulser. L'hydrogène est utilisé pour fabriquer d'autres produits chimiques et dans le soudage et le découpage oxyhydrique.

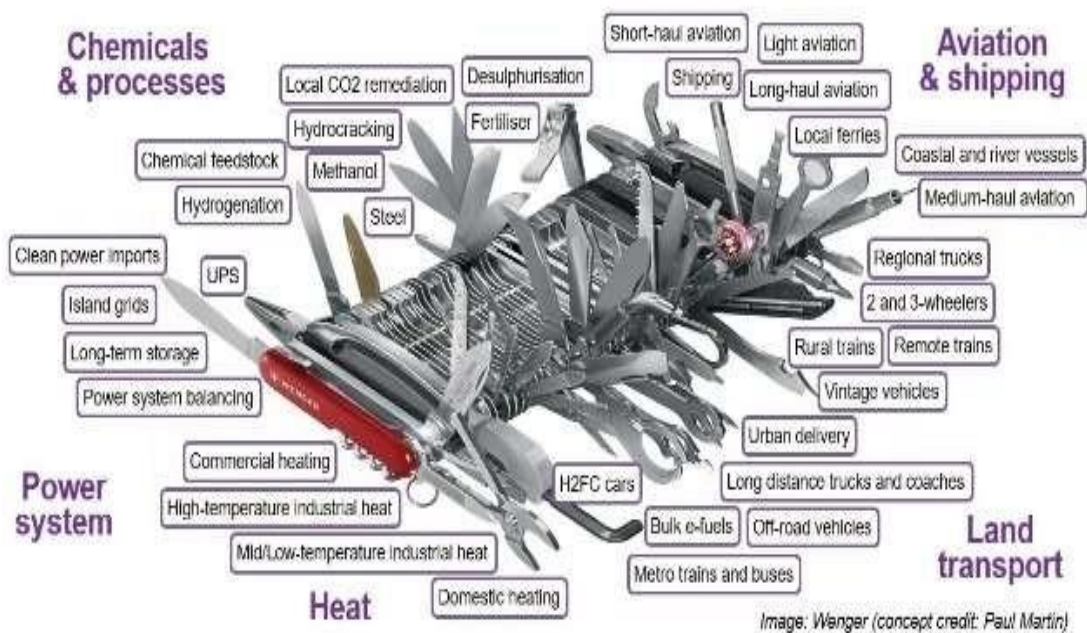
L'hydrogène, liquide réfrigéré (liquide cryogénique) apparaît comme un liquide incolore et très froid expédié dans des conteneurs spéciaux fortement isolés. Bouillit à -442 °F. Le contact provoque des engelures graves. Le gaz hydrogène à des températures normales est plus léger que l'air, mais jusqu'à ce que les vapeurs s'évaporent du liquide se réchauffent, elles sont plus lourdes que l'air. S'enflamme très facilement. Brûle avec une flamme bleu pâle, presque invisible. Une fuite pourrait être soit une fuite de vapeur, soit une fuite de liquide. Le conteneur est conçu pour évacuer la vapeur lorsqu'elle s'évapore. Sous une exposition prolongée à une chaleur intense, les conteneurs peuvent se rompre violemment et s'envoler comme des fusées [55] .

Le dihydrogène est une molécule élémentaire composée de deux hydrogènes liés par une seule liaison. Il joue un rôle d'antioxydant, de donneur d'électrons, de carburant, de métabolite humain et de composant des gaz d'emballage alimentaire. C'est un hydrogène élémentaire, une entité moléculaire gazeuse et une molécule élémentaire.

II.2. Utilisation industrielle de l'hydrogène :

La production d'hydrogène vert est à l'avant-garde de la transition vers un paysage énergétique plus durable. L'hydrogène vert désigne l'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables, telles que l'éolien, le solaire ou l'hydroélectricité, et est considéré comme l'une des formes d'énergie les plus propres disponibles. Contrairement à l'hydrogène gris, qui est produit à partir de gaz naturel ou d'autres sources avec des émissions de carbone significatives, la production d'hydrogène vert ne contribue pas aux émissions de gaz à effet de serre lorsqu'elle est réalisée correctement.

L'un des principaux usages de l'hydrogène vert est son potentiel à remplacer l'hydrogène gris dans les processus industriels où l'hydrogène est inévitable et irremplaçable, comme la production d'engrais, la désulfuration, les matières premières chimiques et bien d'autres. L'hydrogène vert peut également être utilisé pour stocker l'excès d'énergie renouvelable produit dans les centrales photovoltaïques et les parcs éoliens. En période de faible demande énergétique, l'électricité excédentaire peut être utilisée pour électrolyser l'eau, la séparant en hydrogène et en oxygène. Cet hydrogène peut ensuite être stocké pour une utilisation ultérieure dans diverses applications, telles que les piles à hydrogène ou les processus industriels, agissant ainsi efficacement comme un vecteur énergétique et un outil d'équilibrage du réseau.[56]



Figure(II.1): Les usages de l'hydrogène[56].

II.2.1 Industriels électronique :**II.2.1.1 La production de semi-conducteurs :**

Dans le domaine de l'industrie électronique, l'hydrogène est employé pour la fabrication de semi-conducteurs, d'écrans et de LED grâce à ses capacités en matière de conduction thermique, ainsi que comme agent réducteur et gravant («etching»). L'exception ici est que l'hydrogène doit être d'une pureté totale. Par exemple, Linde avait déclaré qu'elle fournirait de l'hydrogène produit à partir d'un électrolyseur PEM à un industriel (Infineon), et qu'en plus de le « purifier pour répondre aux spécifications strictes requises par les procédés d'Infineon ». En effet, l'électrolyse PEM est déjà la méthode qui produit de manière native l'hydrogène le plus pur[57].

II.2.1.1 La production de semi-conducteurs :

Refroidissement direct : L'hydrogène sous forme liquide a la capacité de refroidir directement les éléments électroniques de haute puissance, comme les processeurs et les unités graphiques. Grâce à sa haute capacité de refroidissement, cet appareil garde des températures basses lors de son fonctionnement, ce qui optimise ses performances et assure sa fiabilité.

Refroidissement indirect : L'hydrogène peut servir de vecteur thermique dans les systèmes de refroidissement indirect, où il transfère la chaleur des composants électroniques vers un échangeur thermique.

II.2.1.3 Pile à combustible :

Actuellement, les piles à combustible bénéficient de programmes significatifs de Recherche & Développement dans le contexte d'utilisation de carburants écologiques tels que l'hydrogène solaire. Effectivement, les piles à combustible transforment l'énergie chimique stockée dans l'hydrogène en énergie électrique et thermique. On envisage leur application dans divers domaines tels que le secteur stationnaire (centrales de production d'énergie), le transport (automobile) ou même l'espace, que ce soit en complément ou indépendamment des moteurs thermiques [58].

II.2.2 Hydrogène carburant :**II.2.2.1 Moteurs thermiques à hydrogène :**

D'après la seule vue de la thermodynamique, tous les moteurs alternatifs (cycles diesel, OTTO ou d'allumage) et les turbines à vapeur et à gaz peuvent être convertis en hydrogène. Pour les voitures, les moteurs de chauffage à double carburant ont été développés, avec de l'hydrogène et de l'essence utilisés comme carburant. L'hydrogène utilisé est stocké sous forme liquide sur le véhicule et fournit le moteur. Les prototypes moteurs hydrogène pour TYEV8 et V12 ont été récemment développés et présentés. Ceux-ci peuvent fournir des performances utiles de plus de 135 kW à la vitesse de pointe d'un véhicule à 215 km/h. L'autonomie est de 300 km avec 120 L d'hydrogène liquide sur la planche, ce qui correspond à 8 kg de ce carburant. Dans la région de l'aviation, l'utilisation de l'hydrogène dans les turbines à gaz a été d'environ un demi-siècle. Plusieurs modèles de turbojet ont été modifiés et ont ensuite tenté de valider ces changements sur le site pour mesurer les performances. Le travail américain (Lewis Flight Promotion Institute) est en place depuis 1955 montre qu'il est possible de trouver une solution d'ajustement rapide et satisfaisante[58].

II.2.3 Industrie chimique :**II.2.3.1 Désulfuration du pétrole :**

La désulfuration du pétrole, l'hydrodésulfuration, est un procédé utilisé dans le raffinage du pétrole pour éliminer le soufre contenu dans les fractions moyennes de type essence, kérosène, gazole léger ou gazole moyen. Présent dans les carburants ce soufre serait en effet à l'origine d'une pollution non négligeable car lors de la combustion de ces carburants il générerait du dioxyde de soufre (SO_2), l'agent formateur des pluies acides. De plus, le soufre est un poison pour les catalyseurs utilisés dans les différentes étapes du raffinage. L'opération se fait en présence de dihydrogène pour former du sulfure d'hydrogène (H_2S). L'hydrodésulfuration s'effectue généralement sur un lit catalytique, dans des conditions de haute pression (entre 10 et 200 bar), et de haute température (entre 280 °C et 400 °C). Ce catalyseur est formé d'un support d'alumine (Al_2O_3) sur lequel est greffé un site actif généralement à base de nickel-cobalt ou de nickel-molybdène.[59]

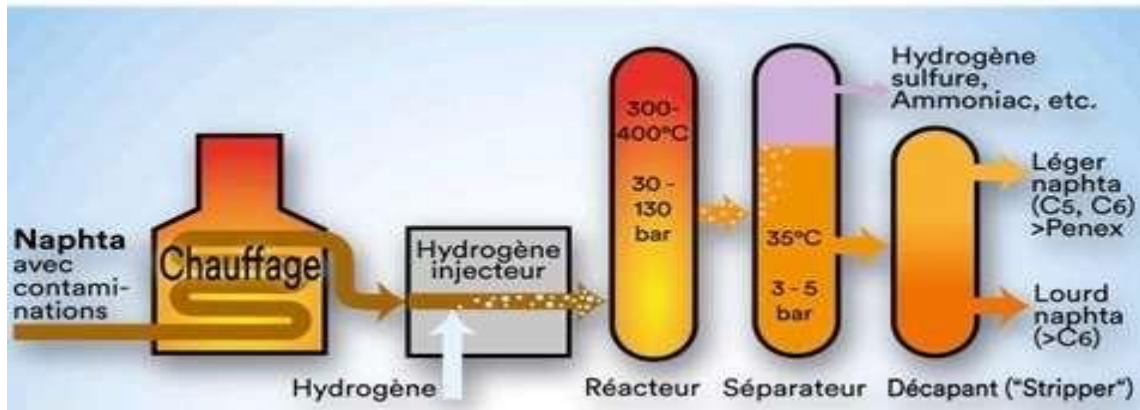


Figure (II.2): Schéma l'hydrodésulfuration [59].

II.2.3.2 Synthèse de méthanol :

Le méthanol est utilisé comme antigel (pour les liquides de refroidissement), solvant, carburant (dans le domaine de l'aéromodélisme ou du speedway), comme agent de dénaturation de l'alcool éthylique et contribue aussi à la production de biodiesel par le biais de la transestérification. Il peut être produit à partir d'hydrogène et de dioxyde de carbone, en présence d'un catalyseur solide (composé de CuO/ZnO/ZrO₂), via la réaction suivante [59]:

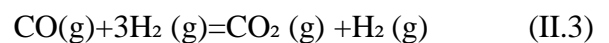
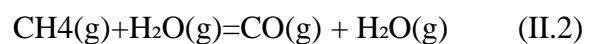


Un procédé de synthèse d'un intérêt notable pour la valorisation du CO₂.

II.2.3.3 Synthèse de l'ammoniac :

Pour ses utilisations industrielles (notamment la préparation de l'NH₃), H₂ est produit in situ (contraintes de transport), par la réaction du carbone ou d'un hydrocarbure (ex. CH₄) avec la vapeur d'eau (1) suivie d'un traitement partiel du CO produit par la vapeur d'eau ou réaction de « shift » eau gaz (2) [59]:

500°C, Ni



N.B . L'hydrogène obtenu contient des impuretés (CO, CO₂).

II.3. Mode de production d'hydrogène

Après avoir exploré les techniques de production d'hydrogène (vaporeformage, biomasse, oxydation partielle, etc.) au chapitre 1, nous aborderons au chapitre 2 les différents modes de production, classés par couleurs d'hydrogène.

Chaque couleur correspond au procédé utilisé pour la production d'hydrogène ou à sa source d'énergie. Ce procédé a évolué avec les années, et tend de plus en plus vers une énergie ou un mode de production plus respectueux de l'environnement

II.3.1 L'hydrogène noir/brun :

Considéré comme l'hydrogène le plus émetteur en CO₂, l'hydrogène noir est produit à partir de charbon. Lui-même est converti en gaz avant d'être transformé en hydrogène[60].

L'hydrogène sera dit brun s'il est produit à partir de lignite et noir pour a production à partir de charbon bitumineux.

Dans les deux cas, il s'agit d'un processus de production extrêmement polluant qui n'est quasi plus utilisé.

II.3.2 L'hydrogène gris :

Aujourd'hui considéré comme le plus courant et le moins cher à produire, l'hydrogène gris est fabriqué à partir du vaporeformage du gaz. Il est donc d'origine fossile. Malheureusement, il ne s'agit pas du moyen de production le plus écologique[60].

II.3.3 L'hydrogène rose ,rouge et violet :

L'hydrogène rose, rouge et violet est généré par la division de l'eau à l'aide de l'électricité produite par les centrales nucléaires.

L'hydrogène rose est produit par l'électrolyse de l'eau, qui décompose l'eau en oxygène et en hydrogène. L'hydrogène rouge est quant à lui produit par fractionnement catalytique à haute température de l'eau, les produits chimiques utilisés dans le processus étant réutilisés dans un cycle de production en boucle fermée[61].

Enfin, l'hydrogène violet est produit en utilisant l'énergie nucléaire et la chaleur par électrolyse chimio-thermique combinée de l'eau.

II.3.4 L'hydrogène vert :

Produit par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité provenant de sources renouvelables, comme l'énergie solaire ou éolienne[62].

II.3.5 L'hydrogène jaune

Produit également par électrolyse mais en utilisant de l'électricité d'origine nucléaire pour alimenter l'électrolyseur[63].

II.3.6 L'hydrogène blanc

L'hydrogène blanc, appelé également «hydrogène natif »ou «hydrogène naturel ». Le gaz se forme de trois manières possibles[63] :

- ✓ Lorsqu'une réaction d'oxydoréduction altère des métaux qui contiennent du fer à un niveau hydrothermal.
- ✓ Lorsqu'une eau à forte teneur en plutonium subit une radiolyse.
- ✓ Lorsqu'un rayonnement ionisant cause la rupture de molécules de H_2O , libérant l'hydrogène.

Contrairement à l'hydrogène vert ou le gris, l'hydrogène naturel n'a pas besoin de séparation par électrolyse ou de vaporeformage. Il est utilisable tel quel.

	Hydrogène blanc	Hydrogène vert	Hydrogène jaune	Hydrogène Bleu	Hydrogène Gris	Hydrogène noir /marron
Source de production	Naturel	Énergie renouvelable et bas-carbone	Électricité nucléaire	Gaz couplé à un système de capture de CO ₂	Gaz	Charbon
Émission de CO ₂ (production)	Quasiment neutre en carbone . Une première analyse de cycle de vie conduit de chiffre 0,4 kg éq de CO ₂	1,59 kg éq CO ₂ /kg H ₂ (H ₂ produit sur site / électrolyse Mix EnR)			11,1 kg éq CO ₂ /kg H ₂ (H ₂ produits sur site / vaporeformage de gaz naturel	
Coût	0,5 à 1 euro/ kilo	10 euros/kilo (Électrolyse)			0,9 à 3 euros/kilo	

Table (II.1): Tableau comparatif des types d'hydrogène -Source: SirEnergies[64].

II.4. Avantages et inconvénients de l'hydrogène :

II.4.1 Avantages :

L'hydrogène est l'un des carburants les plus disponibles et les plus économes en énergie par unité de masse. Lorsqu'il est brûlé, il obtient une grande quantité d'énergie, car il a une capacité énergétique équivalente à deux fois celle du gaz naturel.

L'hydrogène est également considéré comme une énergie renouvelable. L'hydrogène peut être produit à l'aide de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne. Lorsque l'électricité renouvelable est utilisée pour décomposer l'eau dans un processus appelé hydrolyse, l'hydrogène est produit de manière propre et durable. Cela en fait une option saine et respectueuse de l'environnement. [65].

II.4.2 Inconvénients :

Le dihydrogène est un gaz très inflammable et explosif. Plus le dihydrogène (combustible) et le dioxygène (comburant) se trouvent dans les proportions stœchiométriques (deux molécules de dihydrogène pour une molécule de dioxygène), plus cette explosion est intense. C'est notamment ce problème d'inflammabilité qui a donné mauvaise réputation à l'hydrogène. Il faut donc produire des réservoirs de dihydrogène assez étanches pour éviter toute fuite, bien qu'en cas d'accident, ceux-ci doivent laisser s'échapper rapidement le gaz (plus léger que l'air) pour éviter tout risque d'explosion.

L'un des principaux inconvénients est la place très importante prise par l'hydrogène du fait de son stockage: il est très volumineux. En effet un réservoir pour hydrogène est trois fois plus volumineux qu'un réservoir classique pour Essence ou Gasoil. Ceci entraîne donc une diminution de l'espace dans l'habitacle et notamment dans le coffre. [66].

Il se caractérise par une très faible densité (0,07) : il diffuse alors très facilement à travers les parois métalliques.

II.5. Méthodes de production d'hydrogène :

L'hydrogène peut être produit en utilisant diverses ressources domestiques. Les combustibles fossiles, tels que le gaz naturel et le charbon, peuvent être convertis pour produire de l'hydrogène, et l'utilisation de la capture, de l'utilisation et du stockage du carbone peut réduire l'empreinte carbone de ces processus. L'hydrogène peut également être produit à partir de ressources à faible teneur en carbone et renouvelables, y compris la biomasse cultivée à partir de cultures non alimentaires et la séparation de l'eau en utilisant l'électricité provenant de l'éolien, du solaire, de la géothermie, du nucléaire et de l'hydraulique. Cette diversité de sources d'approvisionnement potentielle suscite un intérêt important pour laquelle l'hydrogène est un vecteur énergétique si prometteur [1].

L'hydrogène peut être produit dans de grandes centrales, dans des centrales semi-centrales de taille moyenne, ou dans de petites unités distribuées situées au point d'utilisation ou très près de celui-ci, comme aux stations de ravitaillement ou aux sites de production d'énergie stationnaires.

II.5.1 Production des énergies fossiles :

L'hydrogène peut être produit directement à partir de combustibles fossiles ou de biomasse, ou en faisant passer de l'électricité dans l'eau, ce qui décompose l'eau en ses composants constitutifs : hydrogène et oxygène. Certains imaginent une future «économie de l'hydrogène », où l'hydrogène serait produit à partir de diverses sources d'énergie, stocké pour une utilisation ultérieure, acheminé par pipeline jusqu'au lieu de consommation, puis converti proprement en chaleur et en électricité. Aujourd'hui, la majeure partie de la production d'hydrogène s'effectue par reformage à la vapeur du gaz naturel. Or, ce dernier est déjà un bon combustible, mais il se raréfie et son prix augmente rapidement. C'est également un combustible fossile, et le dioxyde de carbone libéré lors du reformage contribue à l'effet de serre. L'hydrogène possède une énergie très élevée pour son poids, mais très faible pour son volume. De nouvelles technologies sont donc nécessaires pour le stocker et le transporter. La technologie des piles à combustible en est encore à ses débuts et nécessite des améliorations en termes d'efficacité et de durabilité [1].

II.5.2 Vaporeformage :

Le **vaporeformage de méthane** est un moyen de **production d'hydrogène** à partir de méthane grâce à de la vapeur d'eau à haute température (700-1000°C) à des pressions modérées (15-30 bars). C'est la base du **procédé Haber-Bosch**. Même si on peut aussi utiliser de la naphte, du méthanol ou du gaz de pétrole liquéfié, du fuel et du diesel, en pratique, on utilise surtout **le méthane (CH₄)**. (Garcia 2015, p.99 et s.) Nous n'étudierons donc que ce dernier cas. Nous allons voir la réaction chimique elle-même [1].

La principale réaction chimique du vaporeformage de méthane est:



Pour se produire dans le «bon» sens (production d'H₂), la réaction demande une énergie de +206 kJ/mol. On utilise un **catalyseur en nickel** [1].

C'est l'opération de vaporeformage à proprement parler.

Toutefois, on va rajouter une autre réaction importante pour récupérer encore un peu plus de dihydrogène à l'aide du monoxyde de carbone obtenu précédemment: la «*Water-gas shift réaction*» (= «conversion catalytique » ou « conversion à la vapeur d'eau ») [1]:



Cette réaction-ci produit un peu d'énergie ($\Delta H^\circ = -41 \text{ kJ/mol}$).

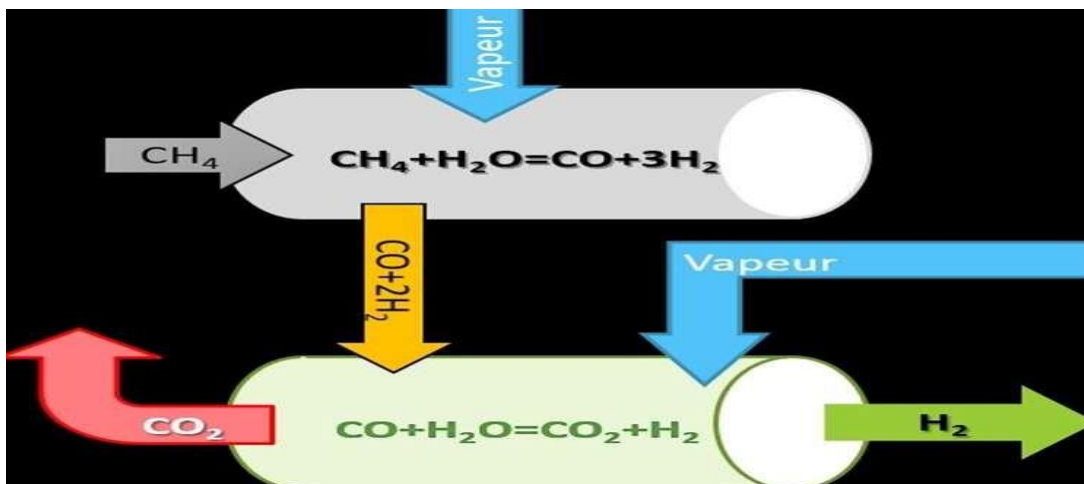
II.5.2.1 Le processus industriel de vaporéformage du méthane :

II.5.2.1.1 Désulfurer le méthane :

La première étape consiste à désulfurer le méthane, le catalyseur étant très sensible aux composés sulfurés. On utilise en général pour cela un « lit d'oxyde de zinc ». Le « gaz quitte cette section avec une teneur en soufre inférieure à 1 ppm et une température entre 350 et 400 °C. » [1].

II.5.2.1.2 Reformage :

Ensuite, on passe dans l'unité de reformage à proprement parler. L'ensemble gaz naturel / vapeur d'eau est chauffé à 800-900 °C à une pression entre 15 et 30 bars. Pour accélérer la réaction, on utilise un catalyseur à base d'oxyde de nickel, placé dans le reformeur sous forme d'un lit fixe. (Garcia 2015)[1].



Figure(II.3): Production d'hydrogène par Vaporéformage[1].

II.5.3 L'oxydation partielle :

L'oxydation partielle est l'un des procédés de reformage pour la production d'hydrogène. Avant même l'électrolyse, le reformage est l'un des procédés les plus importants pour la production d'hydrogène. Plus de 500 milliards de mètres cubes d'hydrogène sont produits chaque année dans le monde par reformage et environ 15 milliards de mètres cubes par électrolyse. Le reformage nécessite des températures extrêmement élevées et un catalyseur. Un agent oxydant est également nécessaire, par exemple de la vapeur d'eau, de l'oxygène ou un mélange des deux. L'utilisation d'oxygène est appelée oxydation partielle. L'oxydation partielle du méthane ou du gaz naturel est également possible, produisant du méthanol, un alcool également utilisé dans les piles à combustible à méthanol direct [1].

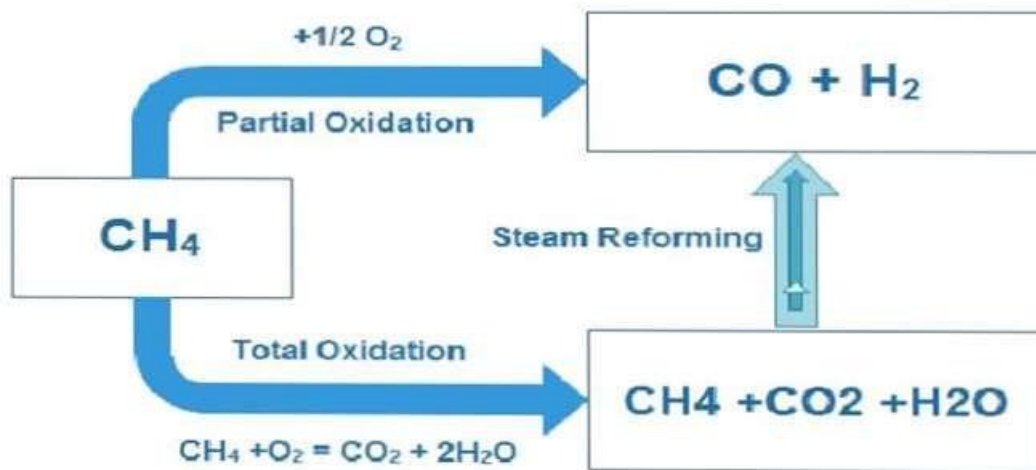
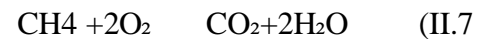
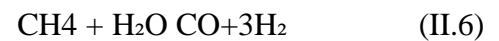


Figure (II.4): Différentes méthodes de conversion du méthane en gaz de synthèse [1].

Le procédé d'oxydation partielle de l'hydrogène est techniquement très abouti. Dans ce procédé, de l'oxygène est ajouté à la matière première disponible, c'est-à-dire du gaz naturel ou des hydrocarbures lourds tels que le fioul ou les huiles résiduelles issues du traitement du pétrole. Ce procédé est exothermique, c'est-à-dire qu'il libère de la chaleur. Les matières premières sont les résidus produits lors du raffinage, c'est-à-dire les hydrocarbures liquides. Bien que liquides, ils présentent une viscosité élevée, c'est-à-dire très visqueux ou visqueux. Lors de l'oxydation partielle, le mélange de combustible et d'air est partiellement brûlé dans un four de procédé. Via un brûleur dédié, il pénètre dans le réacteur, qui fonctionne à une pression de 40 à 100 bars. Ce procédé produit un gaz de synthèse riche en hydrogène (H₂), monoxyde de carbone (CO) et dioxyde de carbone (CO₂), le rendant ainsi adapté à une utilisation ultérieure dans la technologie des piles à combustible. Le gaz de synthèse obtenu est ensuite refroidi et le dioxyde de carbone est séparé par lavage aux amines [1].

II.5.4. Reformage auto thermique :

Le reformage auto thermique est une combinaison d'oxydation partielle et de reformage à la vapeur, comme le montre l'équation suivante :



Cette procédure est utilisée pour compenser la réaction endothermique de la formation de vapeur due à la réaction exothermique de l'oxydation partielle. Dans ce processus, le gaz naturel et l'oxygène sont mélangés en parallèle avec une vapeur d'eau avant de préchauffer. Il est ensuite envoyé à un réacteur (un catalyseur à base de nickel à une pression de 20-60 bar, une température de 900-1100 ° C) pour la production de Syngas. Les compositions typiques des gaz résultants sont 68% H₂, 20% de CO, 10% de CO₂, de petites quantités de CH₄ et N₂ [1].

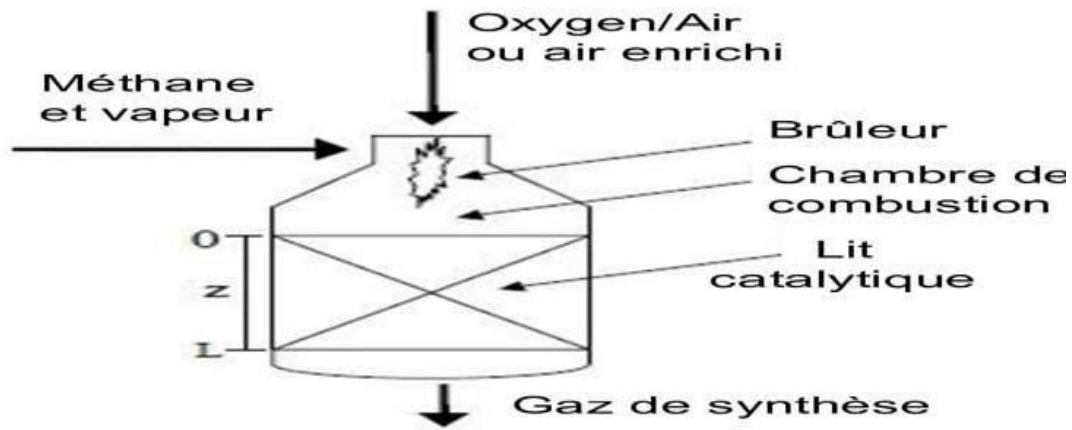


Figure (II.5): Schéma typique d'un réacteur de reformage autotherme [1].

II.1.2 Production par électrolyse de l'eau :

L'électrolyse est une option prometteuse pour la production d'hydrogène décarboné à partir de ressources renouvelables et nucléaires. L'électrolyse consiste à utiliser l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Cette réaction se déroule dans une unité appelée électrolyseur. La taille des électrolyseurs varie, allant d'un petit appareil, parfaitement adapté à la production décentralisée d'hydrogène à petite échelle, à des installations de production centralisées à grande échelle, directement reliées à la production d'électricité renouvelable ou non émettrice de gaz à effet de serre [1].

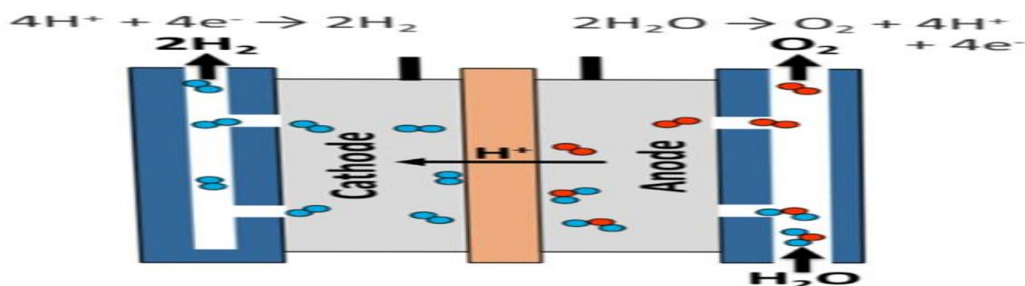


Figure (II.6) : Schéma de Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau [13]

L'« électrolyse » désigne le craquage d'un composé chimique par courant électrique. L'électrolyse sépare ainsi les substances contenues dans le composé. L'électrolyse est réalisée dans un électrolyseur. Elle nécessite deux électrodes (anode et cathode), une source de courant continu et un électrolyte (par exemple, de l'eau pure ou des composés alcalins), c'est-à-dire un liquide conducteur d'électricité. L'hydrogène (H_2) n'existant que sous forme liée, il doit d'abord être dissous de ce composé. L'électrolyse est donc nécessaire à la production d'hydrogène : deux molécules d'hydrogène ($2H_2$) et une molécule d'oxygène (O_2) sont extraites de deux molécules d'eau ($2H_2O$) chacune. Cette forme d'électrolyse est également appelée « électrolyse de l'eau » [1].

II.6.1 Historique :

Jules Verne, un romancier, cité par certains scientifiques dans les discussions d'hydrogène. Ils semblent admirer son idée pour un moteur à hydrogène, comme mentionné dans le roman *The Mysterious Island*. Dans le roman, il décrit l'eau et comment il a la capacité de produire de la chaleur et de la lumière en utilisant constamment de l'hydrogène et de l'oxygène, séparés et ensemble. Une vision future a été écrite comme un roman qui est devenu une réalité [1].

Offre la découverte de molécules de dihydrogène avec l'isolement de l'explorateur britannique Henry Cavendish d'un gaz, lorsqu'il est brûlé dans l'air, produisant de l'eau. L'hydrogène est confondu avec d'autres gaz jusqu'à ce que le chimiste britannique Henry Cavendish prouve en 1766 que l'hydrogène est produit par l'effet de l'acide sulfurique sur le métal. Cavendish montre ensuite que l'hydrogène est une substance indépendante combinée à l'oxygène pour former l'eau [67]

Le chimiste français Antoine-Laurent Lavoisier a ensuite changé son nom en cette « atmosphère inflammable » dans « Hydrogène » en 1781. Enfin, la composition de la molécule d'eau a émergé grâce aux efforts de Louis-Joseph Gay-Lussac, un français et Alexander Von Humbolt. Atomes d'hydrogène pour chaque atome d'oxygène [67].

Les résultats de Diep R. Grove d'une méthode d'utilisation du dihydrogène pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau en 1839 ont ouvert la voie aux piles à combustible. Ces cellules ont été utilisées dans les années 1960 dans le vaisseau spatial de la NASA, y compris les capsules Apollo et Gemini. Un représentant des opportunités importantes liées à l'hydrogène peut être trouvée dans une frise [67].

II.6.2 Principes d'électrolyse :

L'**électrolyse de l'eau** est le procédé qui, à l'aide d'un courant électrique, permet la séparation de la molécule en ses deux éléments [1].

- ❖ L'eau est transportée en contact avec la plaque bipolaire de l'anode. Le potentiel (fourni par une batterie) détruit le composé d'eau chimique (H₂O) en séparant l'atome d'oxygène (O) de l'hydrogène (H). Cette réaction est également libérée :
Est un processus d'oxydation.
- ❖ Les protons d'oxygène (atomes sans électrons, tous sont les protons nucléaires restants) pour provoquer des forces diacides, qui sont transportées dans des conteneurs fournis à cet effet. Les électrons sont bloqués par des membranes "électrolyte" et se déplacent vers le pôle de la batterie. Entre-temps, la membrane "électrolyte" (qui autorise son passage contrairement aux électrons) devient la cathode (pôle -).
- ❖ Une fois à l'intérieur de la cathode, les protons d'hydrogène acquièrent des électrons formés à partir des pôles de la batterie (connectés à la plaque dipolaire de la cathode). Il s'agit d'un processus de réduction de la chimie. Ces atomes d'hydrogène reconstitués (les protons qui ont acquis des électrons) ont également été assemblés pour former le dihydrogène et envoyés au conteneur prévu à cet effet.



Figure(II.7):Principe de l'électrolyse de l'eau[1]

II.6.3. Thermodynamique de l'électrolyse de l'eau :

La réaction chimique globale de l'électrolyse de l'eau sans les valeurs d'énergie thermodynamique requises peut être écrite comme suit[1]:



Dans l'électrolyse de l'eau, l'énergie électrique et thermique est convertie en énergie chimique, qui est stockée dans l'hydrogène. L'énergie requise pour que la réaction décrite par l'équation (1.2) se produise est l'enthalpie de formation d'eau. Seule l'énergie libre de cette réaction, ΔH doit être fournie aux électrodes sous forme d'énergie électrique. Le reste est l'énergie thermique, qui est le produit de la température du processus, T , et du changement d'entropie ΔS . Le changement d'enthalpie peut être exprimé comme [1]:

Où :

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S = zF\left[T\left(\frac{\partial U_{rev}}{\partial T}\right)P - U_{rev}\right] \quad (II.9)$$

z: Le nombre de moles d'électrons transférés dans la réaction, (pour l'hydrogène, $z=2$)

F : La constante de Faraday ($F= 96485,3365 \text{ C/mol}$).

U_{rev}: La tension réversible.

P: La pression dominante (Pa).

Le travail électrique effectué par une cellule électrolytique est égal au changement d'énergie libre qui se produit (à température et pression constantes et force électromotrice positive) [1].

$$\Delta G = -zFU_{rev} \quad (II.10)$$

Sans énergie thermique- génération ou absorption de chaleur - la tension minimale requise pour la décomposition de l'eau est la tension thermoneutre, U_{tn} . A partir de ces données, trois cas peuvent être distingués pour la tension de la cellule d'électrolyse de l'eau (U) [1]:

- ✓ $U < E(\text{réversible})$: la réaction n'a pas lieu.
- ✓ $E(\text{réversible}) < U < E(\text{thermoneutre})$ un apport d'énergie est nécessaire.
- ✓ $E(\text{thermoneutre}) < U$: la réaction crée de la chaleur.

II.6.3.1 Tension réversible :

Elle représente la tension réversible pour la réaction de dissociation de l'eau. Elle est obtenue à partir de l'énergie libre, ΔG , et correspond uniquement à la demande en énergie électrique nécessaire à la réaction d'électrolyse de l'eau (tension minimale thermodynamique). Cette tension est donnée par la formule suivante [1]:

$$E_{\text{réversible}} = \frac{\Delta G^0}{nF} \quad (\text{II. 11})$$

$E_{\text{réversible}}$: Tension réversible (V)

ΔG^0 : Energie libre de la réaction d'électrolyse. ($\Delta G^0 = +237.22 \text{ kJ mol}^{-1}$)

F: Constante de Faraday.

n: Nombre d'électrons échangés lors de la réaction.

Sous les conditions standard de température et de pression ($T = 298.15 \text{ K}$, $P = 1 \text{ ATM}$), la tension de cellule réversible calculée est [1]:

$E_{\text{rev}} = 1.23 \text{ V}$.

II.6.3.2 Tension thermo-neutre :

La tension thermo-neutre représente la totalité de l'énergie nécessaire pour que la réaction ait lieu. Elle est obtenue à partir de l'enthalpie de la réaction ΔH et correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur, cette tension est donnée par la formule suivante [1]:

$$E_{\text{thermoneutre}} = \frac{\Delta H^0}{nF} \quad (\text{II.12})$$

$E_{\text{thermoneutre}}$: Tension thermo-neutre

ΔH° : Enthalpie de la réaction d'électrolyse ($= +285.84 \text{ kJ mol}^{-1}$).

F : Constante de Faraday.

n: Nombre d'électrons échangés lors de la réaction. Sous les conditions standard de température et de pression:

(T = 298.15 K, P = 1 atm)

La tension thermoneutre calculée est :

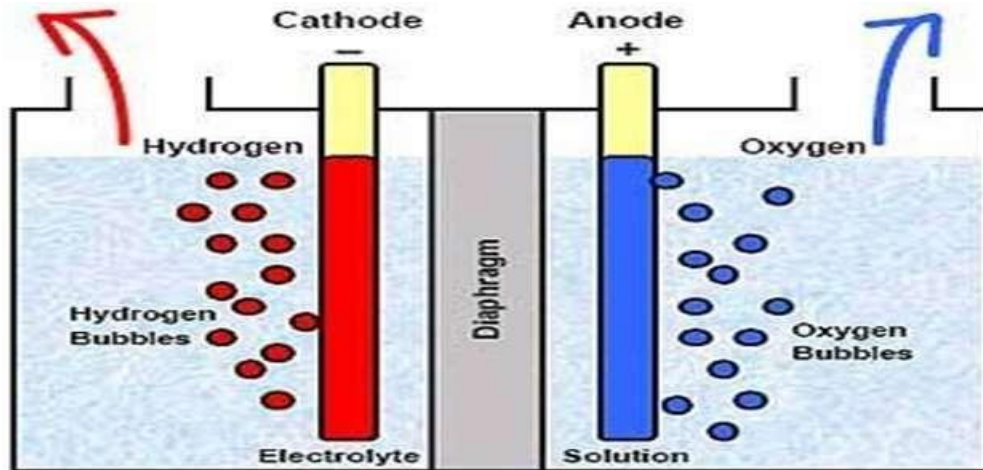
Thermoneutre = 1,48 V ($= 285.84 \text{ kJ/mol}$).

II.7. Technologies de production d'hydrogène :

L'électrolyse est une option prometteuse pour la production d'hydrogène décarboné à partir de ressources renouvelables et nucléaires. L'électrolyse consiste à utiliser l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Cette réaction se déroule dans une unité appelée électrolyseur. La taille des électrolyseurs varie, allant d'un petit appareil, adapté à la production d'hydrogène distribuée à petite échelle, à des installations de production centralisées à grande échelle, directement reliées à la production d'électricité renouvelable ou non émettrice de gaz à effet de serre [68].

II.7.1 Électrolyseur Alcaline :

L'électrolyse alcaline est une technologie bien établie qui utilise deux électrodes séparées par un diaphragme poreux et une solution alcaline qui agit comme électrolyte. Cette solution permet le transport des ions hydroxyde entre les électrodes pour former de l'oxygène et de l'hydrogène, sans être consommée pendant la réaction. Cette technologie est considérée comme extrêmement efficace, fiable et rentable. Sa capacité peut atteindre plusieurs mégawatts, mais elle présente des inconvénients, notamment l'utilisation d'électrolytes liquides corrosifs, un fonctionnement à faibles densités de courant et basses pressions, ainsi que le croisement de gaz. Linde a installé plus de 80 électrolyseurs alcalins dans le monde [68].



Figure(II.8): électrolyseur Alcaline[69].

II.7.1.1 Avantages de l'électrolyse de l'eau alcaline :

L'électrolyse de l'eau alcaline offre plusieurs avantages par rapport aux autres technologies d'électrolyse, telles que la membrane échangeuse de protons (PEM) ou la cellule d'électrolyse à oxyde solide (SOEC), notamment[52] :

- ✓ Rentabilité: l'électrolyse de l'eau alcaline utilise des catalyseurs moins chers que ceux utilisés dans l'électrolyse de l'eau PEM et dont la durée de vie est plus longue. Cela fait de l'électrolyse alcaline une option plus rentable pour la production d'hydrogène.
- ✓ Évolutivité: l'électrolyse de l'eau alcaline peut facilement atteindre des capacités de production de l'ordre du mégawatt. Cela signifie qu'elle peut être utilisée pour la production d'hydrogène à grande échelle, offrant ainsi une flexibilité permettant de répondre à la demande croissante. Pureté des gaz : l'électrolyse de l'eau alcaline produit de l'hydrogène gazeux de haute pureté, essentiel pour diverses applications, notamment les piles à combustible, grâce à la séparation efficace de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux.
- ✓ Efficacité énergétique: l'électrolyse de l'eau alcaline présente un rendement de conversion énergétique comparable à celui des autres technologies. Cela signifie qu'une part importante de l'énergie électrique consommée est convertie en hydrogène gazeux.

- ✓ Respect de l'environnement: l'électrolyse alcaline de l'eau peut être alimentée par des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne ou solaire, permettant ainsi la production d'hydrogène vert. Il en résulte un procédé propre et respectueux de l'environnement, dont la contribution aux émissions de gaz à effet de serre est minimale.
- ✓ Sécurité: l'électrolyse alcaline de l'eau est une technologie bien établie, qui ne présente que peu de risques d'empoisonnement du catalyseur ou de problèmes liés au croisement des gaz.

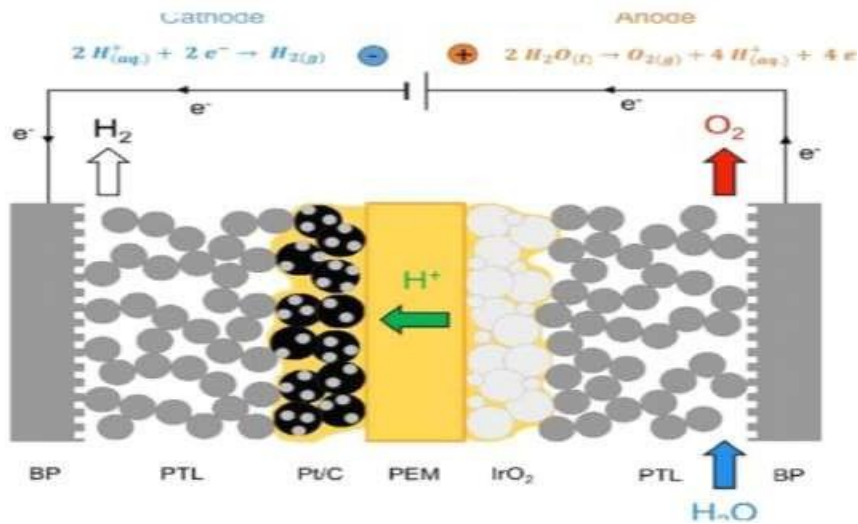
II.7.1.2 Les inconvénients :

- ✓ Le coût peut constituer le principal risque de l'électrolyse de l'eau.
- ✓ L'équipement nécessaire à l'électrolyse peut être coûteux et nécessiter un investissement initial important.
- ✓ Un entretien régulier est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement de l'électrolyseur, ce qui peut augmenter les coûts récurrents.
- ✓ Le processus consomme de l'électricité, ce qui augmente vos factures d'électricité au fil du temps. [42]:

II.7.2. Électrolyseur PEM :

ne échangeuse de protons (PEM) L'électrolyse PEM utilise de l'eau pure et un électrolyte polymère solide plutôt qu'une solution liquide. L'électricité décompose l'eau en hydrogène et en oxygène. Les Protons d'hydrogène traversent la membrane et se combinent aux électrons pour former du gaz H₂ côté cathode[49].

Les électrolyseurs PEM sont parfaitement adaptés aux sources d'énergie renouvelables volatiles grâce à leurs capacités de montée et de descente rapides et à leur large plage dynamique de fonctionnement. Aucun électrolyte corrosif n'est utilisé et ils fonctionnent à une densité de courant élevée, ce qui accélère la décomposition de la molécule d'eau, ce qui impacte in fine le coût de production. Enfin, leur faible encombrement et leur conception compacte constituent un avantage pour de nombreuses applications industrielles sur site[52].



Figure(II.9): Schéma de principe du fonctionnement d'un AME dans un électrolyseur PEM[70].

Sont représentés les plaques bipolaires (BP), les collecteurs de courant (PTL), les couches catalytiques anodiques (IrO₂) et cathodiques (Pt/C) ainsi que l'électrolyte polymère échangeur de protons (PEM).

II.7.2.1 Les avantages de PEM électrolyseur :

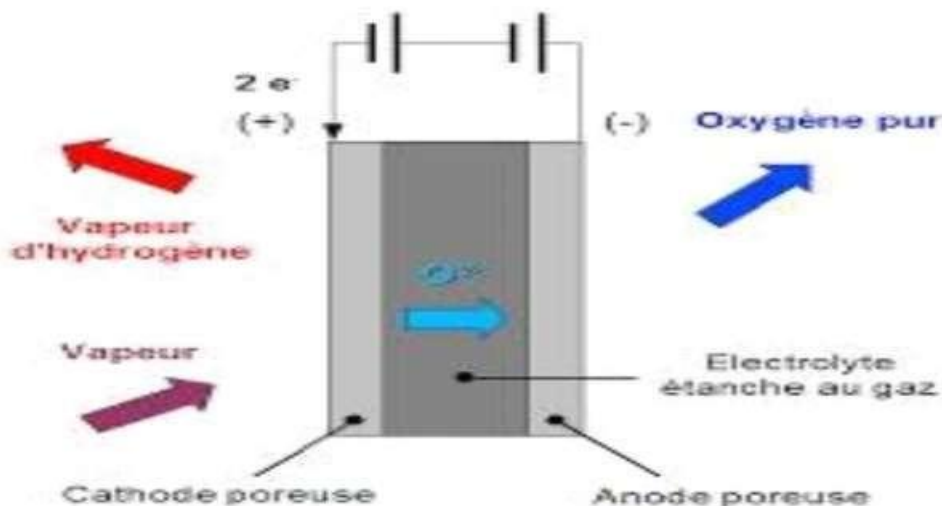
- ✓ Haute efficacité : les électrolyseurs PEM ont un taux de rendement élevé, généralement compris entre 70 et 80 %.
- ✓ Temps de réponse rapide : les électrolyseurs PEM ont un temps de réponse rapide, leur permettant de s'adapter rapidement aux changements de la demande en hydrogène.
- ✓ Taille compacte: les électrolyseurs PEM sont relativement petit set compacts, ce qu'ils rend adaptés à une utilisation dans des espaces confinés ou lorsque l'espace est limité.
- ✓ Basse température de fonctionnement : les électrolyseurs PEM fonctionnent à des températures relativement basses par rapport aux autres technologies d'électrolyse, généralement entre 5 et 80 °C, ce qui entraîne des coûts d'exploitation inférieurs.[49]

II.7.2.2 Les inconvénients de PEM :

- ✓ Faible rendement: les électrolyseurs alcalins ont un rendement inférieur à celui des électrolyseurs PEM.
- ✓ Potentiel de corrosion élevé: la solution alcaline utilisée peut provoquer la corrosion des composants du générateur, réduisant ainsi sa durée de vie et augmentant les coûts de maintenance.
- ✓ Plage de températures de fonctionnement limitée : les électrolyseurs alcalins ont une plage de températures de fonctionnement limitée, ce qui peut affecter leurs performances à des températures extrêmes. [49].

II.7.3 Electrolyseur à haute température :

Selon sa conception, un électrolyseur haute température (EHT) fonctionne dans une plage de températures comprise entre 100°C et environ 900°C, son rendement thermique augmentant en conséquence. Comparé aux électrolyseurs AEL et PEM, il ne nécessite aucun composant en métaux précieux. Dans l'électrolyse EHT pour la production d'hydrogène, la vapeur d'eau rencontre une cellule d'électrolyse à oxyde solide. Dans cette cellule, les molécules d'eau sont séparées via des électrodes vapeur-hydrogène en nickel-cermet et des électrodes mixtes en oxydes de lanthane, strontium et cobalt-oxygène. L'électrolyse EHT garantit un rendement élevé : avec des rendements allant jusqu'à 90 %, l'électrolyse haute température est considérée comme un moyen particulièrement efficace de produire de l'hydrogène à l'échelle industrielle. Ses avantages résident dans les secteurs énergivores, comme la sidérurgie, où de grandes quantités de chaleur résiduelle sont disponibles et peuvent être utilisées dans l'électrolyse haute température. Actuellement, l'électrolyse EHT est encore en phase pilote [71].



Figure(II.10):Schéma de électrolyseur a haute température[1].

II.7.3.1 Les avantages de l'électrolyseur à haute température :

- ✓ Le principal avantage de ce type d'électrolyse est que la majeure partie de l'énergie d'électrolyse est apportée par la chaleur qui est beaucoup moins chère que l'électricité. D'un point de vue cinétique, l'augmentation de température permet de diminuer l'ensemble des surtensions d'électrodes et donc de diminuer la consommation d'énergie électrique.
- ✓ Une efficacité thermodynamique 30-50% plus élevée est possible pour la vapeur par rapport à la dissociation de l'eau (énergie libre combinée et utilisation de l'électricité).
- ✓ Une opération réversible est possible avec une conception optimale des cellules, des piles et des modules.
- ✓ Ne nécessite pas de métaux très précieux. [69].

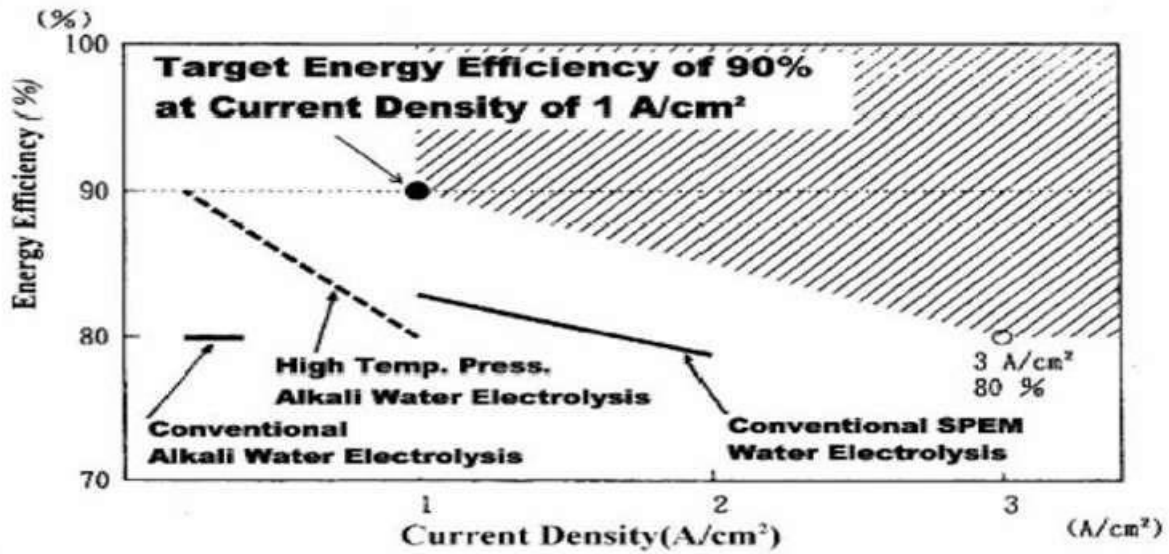
II.7.3.2 Les inconvénients de l'électrolyseur à haute température :

- ✓ Les principales préoccupations sont la dégradation rapide des cellules (frittage, consolidation des pores, migration/empoisonnement du Cr, désactivation du catalyseur (hydrogénation du Ni), délaminage). [60]

II.8 Comparaison des technologies d'électrolyse :

Depuis 1998, des recherches bibliographiques sur l'électrolyse d'eau utilisant la technologie alcaline ont été menées dans le cadre du programme "World Energy Network". Le but de cette étude est de comparer cette technique avec l'électrolyse PEM dans l'eau. Figure I.9 Par conséquent, nous esquissons la première comparaison. Avec une température élevée et une «technologie de pointe» à haute pression, la technologie Alkar a actuellement un rendement optimal pour la densité de courant inférieure à 1 ° C [1].

Quand les objectifs du programme WE-NET concernant l'électrolyseur PEM «rendement de 90% pour une densité de courant de 1 A/cm² » seront atteints, cette technologie sera alors beaucoup plus intéressante que celle citée précédemment, les conditions de température et de pression étant beaucoup moins pénalisantes d'un point de vue énergétique. En outre l'absence de liquides corrosifs « KOH pour l'électrolyse alcaline » favorisera son utilisation [47]:



Figure(II.11): Rendements des différentes technologies électrolyseurs [1].

La très bonne fiabilité de la technologie alcaline est vraisemblablement un de ses principaux avantages. On annonce des durées de vie de 10 ans voire 30 ans avec une importante fréquence d'utilisation. La technologie alcaline est donc excellente d'un point de vue économique [1].

II.9 Électrolyse de l'eau par énergie photovoltaïque :

Comme l'a expliqué Andreas Borgschulte, les chercheurs continuent actuellement de créer diverses idées pour copier la photosynthèse naturelle. Selon l'approche la plus simple, l'eau est séparé en hydrogène et en oxygène par électrolyse via l'énergie solaire. La récolte du soleil avec des collecteurs solaires et la pratique de l'électrolyse d'eau est, en principe, un processus distinct. Cependant, au niveau du microscope, il est possible de les combiner. Ensuite, nous parlerons de la photo électrolyse des cellules ocoelectrochimiques So à l'échelle, qui sont également mentionnées dans les cellules PEC (par nom anglais) [1].

Les chercheurs de l'EMPA ont déjà publié ce processus en 2014. Vous pouvez l'imaginer sous forme d'eau remplie d'eau, y compris un photo anode et une contre-électrode. Le photo anode absorbe la lumière du soleil et fournit de l'électricité pour la décomposition de l'eau. Cela signifie que le processus peut être exécuté sans cellules solaires. Les cellules PEC sont actuellement à environ 5%. En d'autres termes, quelque chose comme 20 d'énergie solaire "capturée" est converti en hydrogène de l'énergie chimique [1].

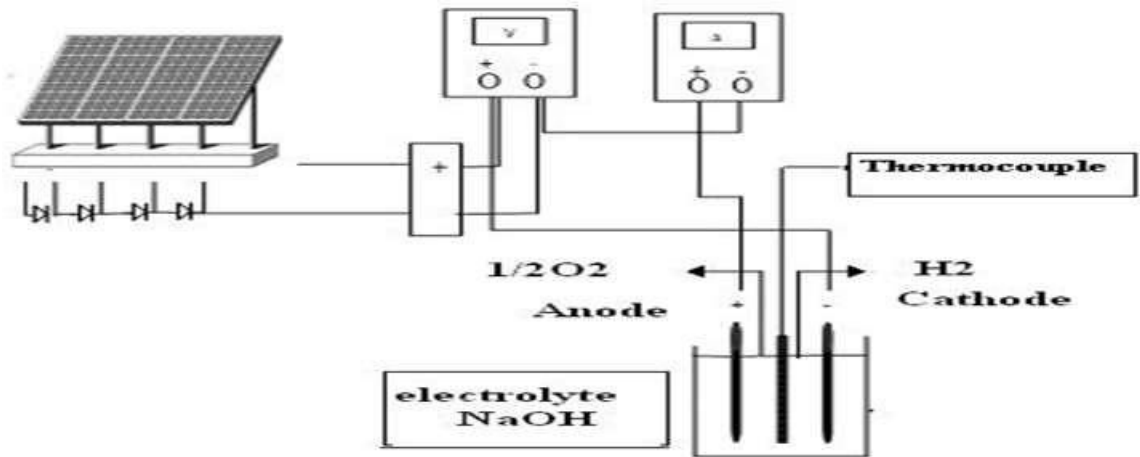


Figure (II.12): Schéma de Electrolyse de l'eau par photovoltaïque[52].

Conclusion :

En conclusion, l'hydrogène représente un vecteur énergétique prometteur pour un avenir plus durable. Son utilisation dans diverses industries, sa production par électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables, et ses avantages environnementaux en font une solution prometteuse pour réduire notre dépendance aux énergies fossiles. Cependant, des défis restent à relever, notamment l'optimisation des technologies d'électrolyse, la réduction des coûts de production et le développement d'infrastructures adéquates. L'exploration continue de l'hydrogène et de son potentiel dans le domaine énergétique est essentielle pour un avenir plus propre et plus durable.



**CHAPTREIII :Partie expérimentale de l'unité d'hydrogène de la
centrale de Terga**



Introduction :

L'hydrogène, l'élément le plus abondant de l'univers, est de plus en plus reconnu comme un pilier essentiel pour l'avenir énergétique mondial et un catalyseur de transformation industrielle. A l'heure où le monde s'efforce de décarboner ses économies et de lutter contre le changement climatique, l'hydrogène émerge comme une solution polyvalente, capable de répondre à un large éventail de besoins en énergie propre. Sa capacité à être produit à partir de diverses sources (énergies renouvelables, gaz naturel avec capture de carbone) et à être utilisé dans des applications allant de la production d'électricité aux transports lourds en passant par l'alimentation de processus industriels complexes, le positionne au cœur des stratégies de développement durable. Au-delà de son rôle de vecteur énergétique, l'hydrogène joue également un rôle technique crucial, notamment dans le refroidissement des très grands générateurs électriques, où sa conductivité thermique supérieure et sa faible densité améliorent significativement leur efficacité et leur fiabilité.

C'est notamment le cas à la centrale électrique de Terga, où l'hydrogène joue un rôle essentiel dans le refroidissement de ses générateurs. La performance et la longévité de ces équipements dépendent directement de la disponibilité d'un hydrogène d'une pureté et d'une quantité suffisantes, soulignant l'importance d'une production maîtrisée et efficace sur site. Cette application spécifique met en lumière l'interdépendance entre les technologies de production d'hydrogène et les impératifs opérationnels des grandes installations industrielles.

Ce chapitre se consacrera à l'étude des aspects pratiques de la production d'hydrogène. La partie expérimentale décrira en détail l'électrolyseur de l'eau utilisé, en présentant ses composants clés tels que la cathode et l'anode. Nous aborderons ensuite le matériel disponible et les caractéristiques du générateur employé pour alimenter le processus. Une attention particulière sera portée à l'hydroxyde de potassium (KOH) en tant qu'électrolyte.

III.1 Partie Pratique :

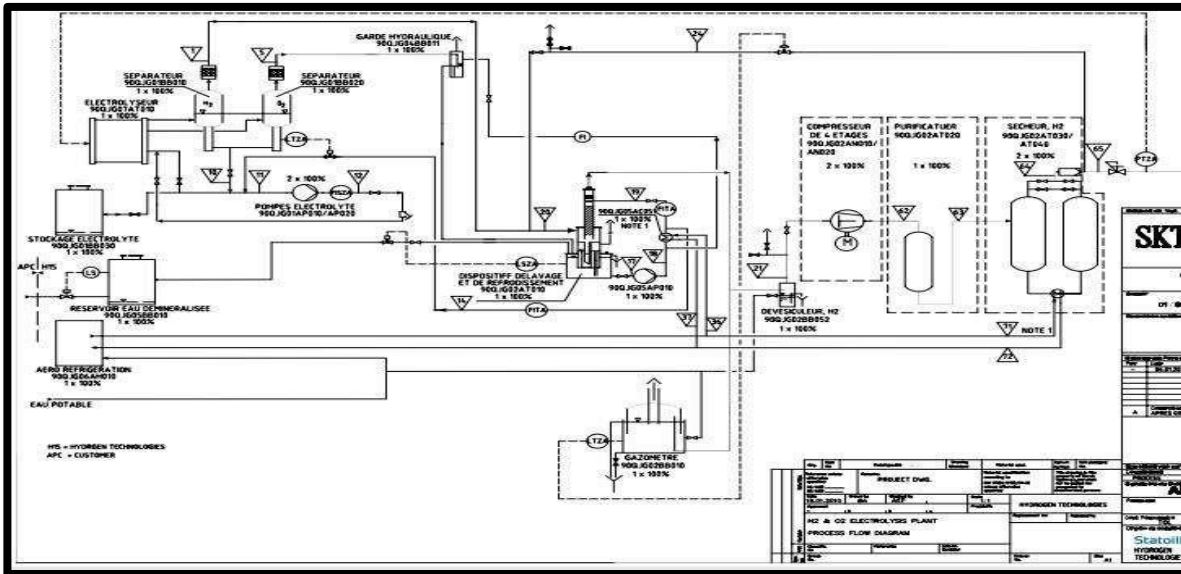
SHARIKET KAHRABA TERGA est une société par deux actionnaires : SONALGAZ avec 51% et SONATRACH 49%.

Le Projet Shariket Kahraba Terga est une centrale électrique située à Terga, Algérie, Afrique, réalisé par un consortium dirigé par Alstom comprenant la société égyptienne Orascom Construction Industries pour le génie civil et la construction. Le début de réalisation de la centrale était en 2008 et mise en exploitation en 2012 elle contribue de 10% de la production nationale. Le démarrage de la

centrale d'une puissance nominale de 1200 MW.

La centrale électrique à cycle combiné de TERGA se compose de trois unités « mono-arbre » (ou single shaft) KA26 d'une puissance de 400MW pour chacun.

La centrale électrique Shariket Kahraba Terga c'est la Première centrale à cycle combiné KA26 en Algérie et en Afrique.



Figure(III.1):Schéma d'unité d'hydrogène de centrale Terga.

La station de production d'hydrogène :

L'installation est commun eaux trois unités et comprend:

- ❖ Un électrolyseur,
- ❖ un groupe de lavage et de refroidissement,
- ❖ un gazomètre,
- ❖ deux compresseurs avec sécheurs,
- ❖ les tuyauteries, pompe accessoires,
- ❖ les équipements électriques,
- ❖ Les équipements de contrôle commande.

La station de production d'hydrogène, conçue pour alimenter trois unités, est un ensemble complexe d'équipements inter connectés. Au cœur de cette installation se trouve un électrolyseur, essentiel pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Le gaz produit passe ensuite par un groupe de lavage et de refroidissement pour éliminer les impuretés et réduire sa température. Un gazomètre assure le stockage tampon de l'hydrogène avant sa compression. Deux compresseurs, associés à des sécheurs, augmentent la pression du gaz et éliminent l'humidité résiduelle pour une utilisation optimale. L'ensemble est interconnecté par un réseau de tuyauteries, de pompes et d'accessoires, et géré par des équipements électriques et de contrôle-commande sophistiqués. Cette infrastructure commune garantit une production d'hydrogène efficace et sécurisée pour les trois unités qu'elle dessert.

III.2 Description de l'électrolyseur de l'eau:

III.2.1 L'électrolyseur:

Au niveau de SPE, (terga) ils utilisent L'électrolyseur dans l'unité de production d'hydrogène, pour produire l'hydrogène qu'ils utilisent à leur tour pour le refroidissement dans de nombreux processus.

L'électrolyseur utilisé pour produire l'hydrogène est de type PEM

L'électrolyseur PEM utilise l'électricité pour diviser la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène par électrolyse. Ce procédé technologique se fait dans un électrolyseur composé de cellules individuelles PEM empilées les unes sur les autres. Au sein de chaque cellule, une membrane polymère conductrice de protons sépare physiquement l'hydrogène et l'oxygène. Quand le courant électrique passe, les molécules d'eau se dissocient : les protons traversent la membrane et se transforment en hydrogène gazeux, tandis que l'oxygène est évacué séparément.

En SPE il sont choisis ce type car il contient plusieurs avantages:

La technologie des électrolyseurs PEM présente l'avantage majeur de pouvoir rapidement s'adapter aux variations de production des électricités renouvelables intermittentes comme l'hydraulique, l'éolien ou le solaire, grâce à sa membrane polymère, très réactive. En quelques secondes à peine, ils passent d'un fonctionnement à pleine puissance à l'arrêt total, suivant les fluctuations de l'énergie. Un atout essentiel pour coupler la production d'hydrogène renouvelable aux énergies intermittentes et produit de manière locale, durable et décarbonée.

Haute densité de courant : grâce à la faible épaisseur de la membrane et à sa bonne conductivité protonique, les électrolyseurs PEM peuvent fonctionner à des densités de courant élevées (des valeurs supérieures à 2 A cm^{-2}). Cela permet d'augmenter le taux de production d'hydrogène et de répondre à des puissances élevées. Cependant, une augmentation trop importante de la densité de courant peut conduire à l'assèchement de la membrane ou à un échauffement trop important.



Figure(III.2) : électrolyseur.

Par contre certaines industries n'utilisent pas ce type en raison des inconvénients:

- ✓ Le coût élevé des membranes polymères.
- ✓ Des catalyseurs en métal noble.
- ✓ Processus de fabrication compliqués et coûteux.
- ✓ Le coût élevé des catalyseurs.
- ✓ Stock inférieur au MW.

Nom	Symbole	Numéro
Branche	90QJG01BR011	Branche(1)
le séparateur H ₂ /électrolyte	(90QJG01BB010	Séparateur(1)
le séparateur O ₂ /électrolyte	(90QJG01BB020	Séparateur(2)
Un indicateur local de pression (H ₂)	90QJG02CP011	Indicateur(1)
Un indicateur local de pression (O ₂)	90QJG04CP011	Indicateur(2)
Branche	90QJG01BR005/BR006	Branche(2)
Un transmetteur	90QJG01CL041	Transmetteur(1)
Vanne	90QJG05AA091	Vanne(1)
l'analyseur O ₂ in H ₂	90QJG02CQ401	Analyseur (1)
Dispositif de lavage et de refroidissement	(90QJG02AT010)	Dir
Pompe	90QJG05AP010	Pompe(1)
l'échangeur vanne	90QJG05AC051	
	90QJG05AA071	Vanne(2)
Un indicateur de température	90QJG05CF071	Indicateur(3)
l'indicateur de pression	90QJG02CP012	Indicateur(4)
Lavanne trois voies	90QJG02AA302	Vanne(3)
Branche	90QJG05BR011	Branche(3)
Branche	90QJG05BR012	Branche(4)
Lagarde hydraulique coté oxygène	90QJG04BB011	GRCO
Vanne	90QJG05AA111	Vanne(4)
Débitmètre	90QJG05CF111	Débitmètre(01)
Le transmetteur	90QJG01CL041	Transmetteur(2)

Vanne	90QJG05AA091	Vanne(5)
Branche	90QJG05BR009	Branche(5)
Débit	90QJG05CF091	Débitmètre
Un capteur	90QJG02CL031	Capteur(01)
Vanne	90QJG05AA032	Vanne(6)
Branche	90QJG04BR001	Branche(6)
l'atmosphère	90QJG04BR201	Atm
analyseur de gaz pourcentage H2 dans O2	90QJG04CQ401	Analyseur(2)
Tuyauterie	90QJG04BR001	Tuyauterie(1)
Transmetteur	LTZA-90QJG01CL042	Transmetteur (3)
Transmetteur	(LSZA- 90QJG01CL041	Transmetteur(4)
Pompe	90QJG01AP010	Pompe(2)
Pompe	90QJG01AP020	Pompe(3)
Tuyauterie	90QJG01BR011	Tuyauterie(2)
Vanne	90QJG05AA151	Vanne(7)
Vanne	90QJG01AA051	Vanne(8)
Vanne	90QJG01AA112	Vanne(9)
Vanne	90QJG01AA131	Vanne(10)
Vanne	90QJG01AA141	Vanne(11)
un contacteur	90QJG02CL033	Contacteur(1)
un transmetteur	90QJG02CL032	Transmetteur(5)
Vanne	90QJG03AA012	Vanne(12)
Vanne	90QJG12AA031	Vanne(13)
Dévésiculeur	90QJG02BB052	Déshuileur(1)
Compresseur	90QJG02AN010	Compresseur(1)
Compresseur	90QJG02AN020	Compresseur(2)
un contacteur	90QJG02CP091 pour AN010	Contacteur (2)
un contacteur	90QJG02CL091 à CL095 pour AN010	Contacteur(3)
un contacteur	90QJG02CP098 pour AN010	contacteur (4)
un contacteur	90QJG02CT091	Contacteur(5)
un filtre	90QJG02AT091	Filter(01)
Déshuileur	90QJG02AT092	Déshuileur(2)
Branche	90QJG02BR211	Branche(7)
Branche	90QJG02BR245	Branche(8)
le purificateur	90QJG02AT020.	Purificateur (01)
le contacteur de température	90QJG02CT131	Contacteur(9)
transmetteur de température	90QJG02CT141	Transmetteur(6)
les groupes de séchage	90QJG02AT030 /90QJG02AT040	GS
Branche	90QJG02BR018	Branche(9)

En sortie des sécheurs et à l'aval du filtre	90QJG02AT181	
Branche	90QJG03BR001	Branche(10)
La vanne	90QJG03AA012	Vanne(14)
le transmetteur	90QJG02CL032	Transmetteur(7)
L' analyseur H ₂ o en H ₂ en ppm	90QJG02CM410	Analyseur(3)
L' analyseur O ₂ in H ₂ en ppm	90QJG02CQ431	Analyseur(4)
Vanne pour l'hydromètre	90QJG02AA306/90QJG02CF410	Vanne(15)
Vanne pour l'analyseur d'O ₂ dans H ₂).	90QJG02AA431/ 90GJG02CF431	Vanne(16)
d'un contacteur	LS-90QJG05CL031	Contacteur(10)
la vanne de remplissage du réservoir	90QJG05AA012	Vanne(17)
Un groupe de refroidissement	90QJG06AH010	Groupe de refroidissement(01)
Echangeur	90QJG05AA051	échangeur(01)
d'une pompe de circulation d'électrolyte	90QJG01AP010	Pompe(4)
Sécheur	90QJG02AT030	Sécheur(01)
Compresseur	90QJG02AN010	Compresseur(3)
Branche	90QJG02BR202	Branche(11)
Transmetteur	LSZA-90QJG02CL031	Transmetteur(8)
la vanne	90QJG03AA012	Vanne(18)
Transmetteur	(90QJG10CP031	Transmetteur(9)
l'analyseur de O ₂ dans H ₂	90QJG04CQ401	Analyseur(5)
Vanne	90QJG01AA111	Vanne(19)
le séparateur O ₂ /électrolyte	LT 90QJG01CL042	Séparateur(3)
la conduite d'alimentation	90QJG05AA091.	(CDA)
Transmetteur	90QJG05CL031	Transmetteur(9)
le régulateur de pression	90QJG10AA012	(RDP)

Table(III.1) Tableau monter les symboles des matériaux

III.2.2 Électrolyseur(90QJG07AT010):

La production d'hydrogène a lieu dans l'électrolyseur, où l'hydrogène et l'oxygène sont produits simultanément par électrolyse de l'eau (les 25% de KOH servant à améliorer la conductivité de l'eau et donc le rendement). L'électrolyseur comprend une entrée électrolyte (branche 7), une sortie électrolyte + O₂ directement connectée au séparateur électrolyte + O₂ et une sortie électrolyte + H₂ directement connectée au séparateur électrolyte + H₂. L'électrolyseur est constitué de cellules bipolaires assemblées en configuration du type « filtre presse ». Chaque cellule comporte une anode (production de O₂) une cathode (production de H₂) et un diaphragme entre les compartiments anode et cathode de chaque cellule qui assure la diffusion des ions mais qui empêche la diffusion des gazes d'un compartiment à l'autre. La partie supérieure de toutes les anodes est connectée à une galerie interne à l'électrolyseur qui collecte l'électrolyte + O₂ (sortie séparateur O₂), et la partie inférieure de toutes les cathodes est connectée à une galerie interne à l'électrolyseur et collecte l'électrolyte + H₂ (sortie séparateur H₂). Une unique galerie interne court aussi le long du bas de l'électrolyseur et est connectée aux anodes et cathodes de toutes les cellules afin de permettre l'appoint en électrolyte et de garantir la circulation dans l'électrolyseur (Branche (1)). L'électrolyte circule donc du bas vers le haut dans chaque cellule. [71]



Figure(III.3):Électrolyseur(90QJG07AT010).

ENERGY Power Plants		SPECIFICATION PARTICULIERE ELECTROLYSEUR		
		Project : TERGA	Unit : 90	
1	CLIENT - SET			REPERE FONCTIONNEL
2	QUANTITE	1	800/100"AT015	
3	DESTINATION	ELECTROLYSEUR	CONSTRUCTEUR	REF. CONSTRUCTEUR
4	INSTALLATION	INTERIEURE	Hydrogen Technologies Steril	B-POLAR 5005 1 1/2
CHARACTERISTIQUES D' OPERATION				
7	Nature du fluid	ELECTROLYTE (23% KOH, H ₂ , O ₂)		
8	Temperature nominale / max	°C	50/80	
9	Capacité de production	Nm ³ /h	14	
10	Plage de production	%	20-100	
11	Pression de calcul	bars	ATMOSPHERIQUE	
12	Temperature de calcul	°C	90	
13	Type	BIPOLAIRE / ATMOSPHERIQUE		
PURETE DES GAZ DE SORTIE				
16	H ₂	%	99.9 ± 0.1	
17	O ₂	%	99.9 ± 0.1	
CONSTRUCTION				
20	Norme de construction/ Code d'essai	ASME SECTION VIII FOR VESSELS, ASME B31.3 FOR PIPING, ADMIRALTY PLATE		
21	Position	HORIZONTAL		
22	Nombre de cellules	14		
23	Intensité Nominale	A	2500	
MATERIAUX				
26	- CADRES DES CELLULES	ACIER CARBONE		
27	- Electrodes	Cathode : ACIER CARBONE (OSICKLE) (1) / Anode ACIER CARBONE		
28	- JOINTS CELLULES	EPDM		
29	- JAMBAGAME	Organique		
30	Joints (Autres)	Klingerseal C 4430		
POIDS ET DIMENSIONS GENERALES				
DIMENSIONS VITOLE				
34	LARGEUR	mm	2500	
35	LONGUEUR	mm	3700	
36	Hauteur	mm	3850	
37	Poids A VIDE	kg	7000	
38	Poids Plein	kg	8100	
REMARQUES				
44	(1) NICKEL DEPOSE PAR ELECTRODEPOSITION (HYDROGEN TECHNOLOGIES)			
52	REVISION	-	A	
53	DATE	14.12.09	27.03.2010	
54	AUTEUR	AEF	AEF	
55	VERIFIEE PAR	MN	OKE	
56	APPROUVEE PAR	HN	HN	
				N° TRG/90/M-----H15/DS002

Figure(III.4):FicheTechniquedel'électrolyseur("Technologie'd'hydrogène," 2007)

III.2.3 La cathode: Veine H₂:

L'hydrogène quitte le séparateur (Séparateur (1)) et la teneur en O₂ est mesurée en pourcentage de O₂ dans H₂ par l'analyseur (Analyseur (1)). Après séparation dans le séparateur H₂/électrolyte et contrôle de sa qualité, le gaz H₂ est envoyé vers le dispositif de lavage et de refroidissement (dispositif de ref). Ce dispositif est équipé de : 1 bassin d'eau déminéralisée (contenant des traces de KOH du au lavage des gaz), une colonne à garnissage, un diffuseur en eau de colonne, un dévésiculateur tout en haut de colonne, une pompe de circulation de l'eau, un échangeur de chaleur à plaques et de l'instrumentation nécessaire. Le gaz H₂ est injecté en bas de la colonne et l'eau circulant à contre courant assure son refroidissement. La circulation de l'eau de refroidissement est assurée par la pompe (Pompe(1)) et son refroidissement par l'échangeur (01). L'eau sert à l'élimination de toute trace de KOH et au refroidissement du gaz.

Le dévésiculateur tout en haut de colonne assure l'élimination des fines gouttelettes d'eau de lavage entraînées vers le gazomètre et compresseurs par le gaz. Le débit d'eau de circulation est réglable par la vanne manuelle (Vanne(2)) et le débit de circulation est contrôlé localement par l'indicateur (Indicateur (3)). Un indicateur de température permet de contrôler la température de l'eau avant l'entrée dans la colonne (Indicateur (3)). Le débit d'eau de circulation est réglé de sorte qu'une perte de charge pré établie soit atteinte; la mesure de perte de charge se fait manuellement par l'indicateur de pression (Indicateur (4)) et la vanne trois voies (Vanne (3)). Une dérivation de la boucle de circulation (voire branche (Branche(3)) et Branche(4)) assure une circulation constante d'eau déminéralisée (avec traces de KOH) dans la garde hydraulique coté oxygène (GRCO.)

Le débit dans cette boucle est régulée par la vanne (Vanne(4)) et contrôlé par le débitmètre (Débitmètre(01)). Le bassin d'eau dans le dispositif de lavage et de refroidissement sert aussi de réservoir d'eau d'alimentation pour l'électrolyseur. Le transmetteur dans le séparateur

O₂/électrolyte (Transmetteur(2)) agit sur la vanne (Vanne(5)) qui introduit un appoint d'eau dans le système par la branche (Branche(5)) Une mesure de débit (90QJG05CF091) permet de compter la quantité d'eau envoyée à l'aspiration des pompes de circulation et donc à l'électrolyseur. Un capteur de niveau dans le bassin (Capteur(01)) permet de piloter la vanne (vanne(06)) qui alimente ce bassin en eau déminéralisée pour garder un niveau constant.

Ainsi, étant donné que l'on fait barboter dans la garde hydraulique O₂ (GRCO) l'oxygène dans l'eau du laveur, et que l'hydrogène est lavé avec la même eau dans le laveur, et cette eau (avec les traces de KOH récupérées) alimente l'électrolyseur, tout le KOH est récupéré. Les pertes en KOH sont négligeables.

III .2.4 L'anode: Veine O₂:

L'oxygène quitte le séparateur (Séparateur(2)) via la branche (Branche(5)) jusqu'à la garde hydraulique (GRCO) et est éventée dans l'atmosphère (90QJG04BR201). Un analyseur de gaz pourcentage H₂ dans O₂ (Analyseur(2)) est utilisé pour contrôler que la quantité de H₂ dans le O₂ ne dépasse pas une valeur maximum indiquant un défaut dans l'électrolyseur (diffusion au travers de la membrane). Cet analyseur déclenche une alarme et arrête le transformateur/redresseur dans le cas où la concentration en H₂ est de 1.5% et de 1.9% respectivement (valeurs réglables lors de la mise en service). Une condensation partielle des fines gouttes restantes dans le gaz et un refroidissement partiel se produisent dans la tuyauterie (Tuyauterie(1)) et dans la garde hydraulique O₂. La tuyauterie (Tuyauterie(1)) est en pente et garantit donc l'écoulement des condensats de retour vers le séparateur O₂/électrolyte. La température de l'oxygène à l'évent est comprise entre 50°C et 60°C du fait du refroidissement partiel. [71]

La réfrigération de la veine O₂ n'est pas nécessaire

III.3 Matériels utilisés:

III.3.1 Redresseur :

L'alimentation en puissance électrique est fournie au système de production de H_2 par un transformateur/redresseur qui transforme le 400 VCA, 50 Hz, triphasique, en courant 30 VCC, 2500 A maximum envoyé à l'électrolyseur. Le système de control/commande du redresseur requière un courant monophasé 230 V/ 50Hz.



Figure(III.6):Un redresseur

III.3.2 Électrolyseur :

L'électrolyse de l'eau consiste à faire passer un courant électrique dans une saumure d'hydroxyde de potassium. C'est un procédé aujourd'hui coûteux de production d'hydrogène. Il peut être mis en œuvre industriellement, dans les installations de plusieurs mégawatts, lorsque l'électricité est disponible à faible coût. Elle pourrait se développer aussi bien dans de petites installations utilisant des énergies renouvelables.



Figure(III.7):représente un électrolyseur("Technologies d'hydrogène," 2007)

L'électrolyseur est équipé:

- d'un bloc de cellules divisé en deux chambres pour séparer l' H_2 produit à la cathode de l' O_2 se dégageant à l'anode.
- Des réparateurs de gaz l'un pour l' H_2 et l'autre pour l' O_2 pour la séparation du gaz de l'électrolyte

III.3.3 La cellule d'électrolyse:

Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode) conducteurs électroniques reliées à un générateur de courant continu et d'un électrolyte.

L'électrolyte C'est une solution aqueuse conductrice de courant électrique à laquelle on peut faire subir une 1 décomposition. L'électrolyte de l'eau est en général une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration variable en fonction de la température de fonctionnement est:

- ❖ de 25% en masse pour une température de 80 à 90°C
- ❖ de 30 à 35% à 120°C
- ❖ de 40% à 160°C.

Ces concentrations correspondent à la conductivité électrique maximale de la solution à la température considérée. Le choix se porte de préférence sur des solutions de potasse au lieu de solution de soude, car :

- Pour une température donnée leur conductivité est supérieure à celle des solutions de soude;
- Elles ont en générale une teneur plus faible en impureté chlorure liée à la fabrication d'hydroxyde
- Leur pression de vapeur saturante est inférieure pour une même température, ce qui permet de réduire le débit d'eau de réfrigération destiné à condenser la vapeur entraînée par l'hydrogène

III.3.4 Les électrodes:

Une bonne électrode doit être peu coûteuse, avoir une bonne rigidité mécanique, être résistante à la corrosion, avoir une bonne stabilité à long terme même lorsque l'on inverse la polarité du système ou qu'on laisse le système en circuit ouvert, avoir une bonne conductivité électrique et thermique, être sensible aux poisons, montrer une grande surface réelle, avoir une bonne activité catalytique et être relativement facile à fabriquer.

- L'anode C'est l'électrode par où entre le courant électrique, elle est reliée à la borne positive du générateur. L'oxygène est recueilli du côté de l'anode.
- La cathode C'est l'électrode par où sort le courant électrique ; elle est reliée à la borne négative du générateur. C'est elle qui recueille l'hydrogène.

Avec $DH=285 \text{ kJ/mol H}_2\text{O}$ enthalpie de dissociation de l'eau

III.3.5 Séparateur:

Le flux électrolyte + H_2 est véhiculé vers le séparateur H_2 /électrolyte et le flux électrolyte + O_2 est véhiculé vers le séparateur O_2 /électrolyte afin d'assurer la séparation des gazes et l'électrolyte. Les deux séparateurs sont munis de dévésiculateurs afin d'assurer l'entrain minimum de gouttelettes d'électrolyte dans les gazes. Un indicateur local de pression est monté sur le séparateur H_2 /électrolyte et un indicateur local de pression est monté sur le séparateur O_2 /électrolyte afin de contrôler la pression dans les séparateurs (elle doit être atmosphérique).[71]



Figure(III.8):Séparateur H_2 /électrolyte et O_2

L'électrolyte, après séparation des gazes, sortant en bas des séparateurs est collecté dans la branche et est envoyé vers les pompes de circulation d'électrolyte.

Le niveau d'électrolyte dans les séparateurs est plus haut que le niveau supérieure de l'électrolyseur afin de garantir le remplissage complet de l'électrolyseur par l'électrolyte (pas de poches de gaz). Des transmetteurs et contacteurs de niveau (avec fonction d'alarme), (Transmetteur (3)) et (Transmetteur(4)), sont installés sur le séparateur O₂/électrolyte et permettent de contrôler le niveau dans le séparateur de O₂ (donc dans le séparateur H₂) et ainsi le niveau dans l'électrolyseur. Ces contacteurs et transmetteurs de niveau agissent sur la vanne qui introduit un appoint d'eau dans le système dans le cas où le niveau dans les séparateurs soit trop bas.

III.3.6 Pompe de circulation d'électrolyte:

La fonction principale des pompes de circulation d'électrolyte (2 x 100%, une en marche et la deuxième en attente) est de garantir une circulation continue de l'électrolyte dans l'électrolyseur et dans les séparateurs.

L'électrolyte collecté en branche est aspiré par la pompe en marche (soit Pompe(2) ou Pompe(3)) et est ensuite refoulé dans la tuyauterie commune de refoulement Tuyauterie(2) directement connecté à l'entrée électrolyte de l'électrolyseur.

Le débit d'électrolyte en circulation est indiqué localement et transmis au PLC par un débitmètre équipé aussi d'un contact d'avertissement de débit faible. Le débit d'électrolyte en circulation est réglable par la vanne .

Les pompes de circulation d'électrolyte servent également à mettre en circulation la solution aqueuse 25% KOH dans la bache de stockage afin de permettre une bonne dissolution des pastilles de KOH et une préparation rapide de la solution. Cette opération est faite en fermant la vanne (sortie des séparateurs) et la vanne (entrée électrolyte dans électrolyseur) et en ouvrant les vannes (de l'entrée) et (de sortie). Une pompe en route assure alors une recirculation dans la bache de stockage lors de la préparation de l'électrolyte.[71]

III.3.7 Réservoir de stockage électrolyte:

Le réservoir appelé « stockage électrolyte » sert essentiellement à la préparation de la solution électrolytique. Il a une capacité totale de 5m³. En hauteur, il est équipé d'un panier dans le quel les pastilles de KOH sont introduites. Une certaine quantité d'eau déminéralisée (en rapport avec la quantité de pastilles introduite dans le panier) est ensuite injectée dans le réservoir par la vanne (Vanne(7)). L'eau passe par le panier et dissout partiellement les pastilles de KOH. Le système est mis en mode de circulation (fermeture vanne (Vanne(8)) et vanne (Vanne(9)) et ouverture des vannes (vanne (10) e vanne (11)) et une pompe de circulation est mise en marche. L'eau au début faiblement chargée en KOH se charge au fur et à mesure jusqu'à atteindre la concentration de 25% en KOH.



Figure(III.9):Réservoir d'électrolyte de KOH

III.3.8 Gazomètre :

Un gazomètre, permet de maintenir une pression positive égale à 200 mm Watergauge en sortie du scrubber et en entrée des compresseurs. Le gazomètre joue également un rôle tampon pour les compresseurs. Le gazomètre a un volume utile tampon de 500 litres.

Il comprend un contacteur de niveau bas (Contacteur(1)) et un transmetteur de niveau de la cloche (Transmetteur(5)). Le transmetteur de niveau Transmetteur(5) contrôle la vanne (Vanne(12)) qui garantit le fonctionnement normal du système de production. En effet, pour que le système de production fonctionne correctement un peu de gaz est toujours circulé de la sortie des sécheurs à l'entrée du dispositif de lavage. Lorsque la cloche du gazomètre s'élève, la vanne (Vanne(13)) aura tendance à se fermer afin de permettre à moins de gaz de recalculer. La cloche du gazomètre descendra donc. C'est cette vanne (Vanne(13)) qui permet de maintenir un niveau dans le gazomètre constant et aussi d'amortir les variations de production ou aspiration par les compresseurs. Le gazomètre est rempli avec de l'eau potable d'eau par la vanne manuelle (Vanne(13)). [71]



Figure (III.10):Un Gaz-holder

fonctionnement. Le gaz chauffé absorbe l'humidité du matériau absorbant à l'intérieur de la colonne en cours de régénération. [71]

À la fin du cycle de régénération, le réchauffeur est éteint et le gaz de régénération sert à refroidir le matériau absorbant avant de passer à l'autre colonne.

Le sécheur fonctionne automatiquement sans perte d'hydrogène.

Un filtre est situé en sortie des deux sécheurs sur la branche (Branche 9) pour éviter l'entraînement de fines des lits absorbants vers les analyseurs et la station de remplissage



Figure(III.11):Groupe de Séchage

III.3.9 Compresseurs :

Les sorties du système de lavage et du gazomètre sont connectées au dévésiculateur (Déshuileur(1)) à avant de passer dans les compresseurs, 2 x 100%, (Compresseur(1) et Compresseur(2)). Ce dévésiculateur mécanique enlève les gouttelettes de liquide dans le gaz.

Chaque compresseur est refroidi à l'air et comprend un contacteur de pression bas en entrée (Contacteur (2)), 4 étages (4 cylindres), un pot commun au drainage des 4 étages, des contacteurs de niveau avec alarme (Contacteur(3)) et indicateurs de pression dans le pot, des indicateurs de pression pour chaque étage de compression (Contacteur(3)), un contacteur de pression haut en sortie (contacteur (4)) et un contacteur de température haute en sortie (Contacteur(5)). Chaque compresseur comprend aussi un filtre en entrée (Contacteur(5)) et un déshuileur en sortie (Déshuileur(2)). L'hydrogène est comprimé à 160 barg. Une conduite de purge se situe au niveau bas des compresseurs (branche (Branche(7)) et Branche(8)).[71]



Figure(III.12):Un Compresseur

III.3.10 Purificateur:

Après compression du gaz, l'hydrogène est purifié (réduction catalytique du O_2 contenu dans le H_2 en H_2O) dans le purificateur (purificateur(01)). Le dispositif de désoxydation comprend une résistance chauffante pour préchauffer le gaz et un catalyseur. La température de pré-chauffage est indiquée par le contacteur de température (Contacteur(9)). Après sortie du catalyseur, la teneur en O_2 du gaz H_2 est réduite à 5 ppm (en volume) au mieux. La réaction qui a lieu sur le catalyseur est exothermique et la température du gaz augmente en sortie du purificateur jusqu'à environ $16^\circ C$ pour chaque 0,1% d' O_2 réduit. Un indicateur/transmetteur de température (Transmetteur(6)) avec une alarme de niveau haut et très haut se trouve en aval du groupe de purification pour contrôle.[71]

III.3.11 Sécheur:

Après purification, le gaz entre dans les groupes de séchage (G DE S), 2 x 100%, un sécheur fonctionne tandis que l'autre est en attente. Chaque sécheur est composé de deux colonnes jumelles remplies d'un lit absorbant.

Tandis que l'hydrogène est séché dans une des colonnes du sécheur en passant à travers une colonne remplie d'un absorbeur, l'autre colonne est en mode de régénération. La régénération a lieu en utilisant une purge du gaz brut comme gaz de régénération. Le gaz de régénération est préchauffé par un réchauffeur électrique avant d'entrer dans la tour de séchage en cours de régénération. Le gaz de régénération est ensuite refroidi et appliqué dans l'écoulement de gaz jusqu'à la tour de séchage.

III.3.12 Boucle de régulation:

En sortie des sécheurs et à l'aval du filtre (filter(01)) une dérivation, branche (branche(10)), permet de dévier une certaine partie de l'hydrogène produit vers le dispositif de lavage et de refroidissement. Cette boucle comprend principalement la vanne automatique (Vanne(12)) piloté par le transmetteur de niveau Transmetteur(7) de la cloche dans le gazomètre. Plus la cloche du gazomètre est haute plus la recirculation vers le dispositif de lavage et de refroidissement est faible.[71]

III.3.13 Analyseur:

Utilisé pour contrôler la pureté de H_2

Deux analyseurs sont situés en aval du groupe de séchage. L'analyseur Analyseur(3) mesure la teneur en H_2O dans l' H_2 en ppm et l'analyseur Analyseur(4) mesure la teneur en O_2 dans l' H_2 en ppm. Chaque analyseur comporte en entrée une vanne manuelle qui permet le réglage du débit de gaz et un indicateur locale de débit (Vanne(15) pour l'hydromètre ; Vanne(16) pour l'analyseur d' O_2 dans H_2).



Figure (III.13): Analyseur de la pureté de H_2

III.3.14 Réservoir d'eau déminéralisée :

Le réservoir d'eau déminéralisée, d'une capacité de 800 litres, est équipé d'un contacteur de niveau (Contacteur(10)). Ce contacteur enclenche la vanne de remplissage du réservoir Vanne(12) afin de garantir le niveau d'eau entre un minimum et un maximum. La capacité minimum dans le réservoir d'eau déminéralisée assure une production d'hydrogène pendant 12 heures sans apport d'eau. Le réservoir alimente le bassin d'eau du dispositif de lavage et de refroidissement qui alimente à son tour l'électrolyseur.



Figure(III.14):La bâche de l'eau déminéralisée

L'eau déminéralisée du réservoir est aussi utilisée comme eau d'alimentation pour la préparation de la solution d'hydroxyde de potassium (KOH) .[71]

III.3.14 Groupe de refroidissement:

Un groupe de refroidissement (Groupe de refroidissement(01)) sert à refroidir l'hydrogène lors des différentes étapes de séchage dans les deux sècheurs et à refroidir l'eau dans le circuit d'eau du dispositif de lavage (voir échangeur (01)).



Figure (III.15) :dispositif de lavage de refroidissement

III.4 Fonctionnement de système:

En cours de fonctionnement normal, un seul groupe constitué d'une pompe de circulation d'électrolyte (Pompe (4)), d'un sécheur (Sécheur(01)) et d'un compresseur (Compresseur(3)) fonctionne à la fois.

III.4.1 Contrôle des principaux paramètres de production:

Le débit d'hydrogène, la pression en sortie, et la qualité de l'hydrogène sont les principaux paramètres de commande/contrôle.

III.4.1.1 Régulation du débit de sortie :

L'information du débit d'hydrogène à produire (valeur contractuelle $14 \text{ Nm}^3/\text{h}$), préalablement consignée, est convertie en un signal « ampère » envoyé au redresseur. L'électrolyseur produit donc $14 \text{ Nm}^3/\text{h}$ d'hydrogène. Le gaz produit est lavé, comprimé à un débit de $15.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (débit des compresseurs), purifié et séché. Le compresseur est dimensionné avec un débit 10% au-dessus du débit de production. Ceci permet de garantir une position stable de la cloche et cela au travers de la boucle de régulation (branche (11)). Cette régulation se fait grâce au transmetteur de position dans le gazomètre (Transmetteur (8)) qui agit sur la vanne (Vanne(18)). En fonctionnement stable l'électrolyseur produit $14 \text{ Nm}^3/\text{h}$, le compresseur débite $15.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ donc $1.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ sont redirigés vers le dispositif de lavage et de refroidissement pour assurer un débit de sortie de $14 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Le contrôleur de position du gazomètre est placé par défaut au milieu du gazomètre. Si le niveau du gazomètre monte au-dessus de cette position par défaut (due à une faible augmentation de production) la vanne (Vanne(18)) se ferme pour réduire le flux de by-pass, ainsi le débit de sortie augmente et la cloche redescend à sa position par défaut. Si le niveau du gazomètre descend (due à une faible diminution de production) au-dessous de cette position par défaut la vanne (Vanne(18)) s'ouvre pour augmenter le flux de by-pass, ainsi le débit de sortie diminue et la cloche remonte à sa position par défaut. Cette régulation souple s'effectue entre 20% et 80% du niveau de la cloche dans le gazomètre. A 80% du niveau totale l'alarme de niveau haut a baisse le courant du redresseur à zéro. Si le gazomètre continue de monter jusqu'à la position maximale, le gaz en excès est ventilé dans l'atmosphère par le conduit de sortie situé au sommet. Si le gazomètre descend à une position basse d'environ 20% , le contacteur niveau de proximité active une alarme et arrête le compresseur.[71]

III.4.1.2. Régulation de la pression de sortie :

La pression de sortie est manuellement réglée sur le régulateur de pression (RDP). Un contacteur de pression haute (Transmetteur(9)) permet de dévier le débit de production vers l'entrée du dispositif de lavage et de refroidissement si la pression monte au dessus d'une valeur limite au tour de 165 bar. Cette valeur de 165 est atteinte lorsque les bouteilles sont remplies.

Note: en fin de remplissage des bouteilles, la production d'hydrogène est graduellement diminuée par un signal en provenance du transmetteur de pression (transmetteur(9)), lequel communique la pression en amont des batteries de remplissage. Ce signal abaisse graduellement l'intensité du courant d'alimentation de l'électrolyseur.[71]

III.4.2 Contrôle qualité/analyses du gaz en sortie de la station de remplissage :

III.4.2.1 Analyse de H₂ dans O₂(%), (Analyseur(5)):

Le pourcentage d'hydrogène dans l'oxygène est mesuré continuellement par l'analyseur Analyseur(5) Le signal 4-20 mA, envoyé au PLC, correspond à la plage 0-2% de H₂ dans O₂. Le niveau d'alarme haut correspond à 1,5% et le niveau d'alarme très haut correspond à 1,9%. A 1,5%, une alarme se déclenche. A 1,9%, une alarme d'urgence se déclenche et un signal d'arrêt est envoyé au redresseur.

III.4.2.2 Analyse de O₂ dans H₂(%) : (Analyseur(3)):

Si le niveau d'hydrogène dépasse une valeur de 1,5% une alarme « H₂ dans O₂ haut » est initiée. Si la valeur augmente encore, une alarme « H₂ dans O₂ très haut » est déclenchée et le redresseur est amené à un courant de sortie nul. Le niveau d'alarme « H₂ dans O₂ très haut » est de 1,9%.

III.4.2.3 Analyse de O₂ dans H₂(ppm) : (Analyseur(4)):

Un analyseur d'oxygène est situé en amont de la station de remplissage. Il mesure la quantité d'oxygène en ppm dans le flux de H₂. L'analyseur a une sortie 4-20 mA directement envoyée au PLC.

Si le niveau d'oxygène dépasse la valeur déterminée 4 ppm, une alarme « O₂ dans H₂ haut » est initiée. Si la valeur augmente encore 5 ppm, une alarme « O₂ dans H₂ très haut » est initiée et le redresseur est amené à un courant de sortie nul.

III.4.2.4 Analyse de H₂O dans H₂(ppm) ; (Analyseur(3)):

Un analyseur d'humidité, situé après le groupe de séchage, mesure la quantité d'eau dans l'hydrogène et un signal est envoyé au PLC. A 4 ppm, soit environ -67°C une alarme haute est déclenchée. A 5 ppm, soit environ -65°C une alarme « très haut » est déclenchée et le redresseur est amené à un courant de sortie nul.

III.4.3 Contrôle du niveau d'électrolyte dans les séparateurs:

Le niveau d'électrolyte est régulé par un dispositif magnétique flottant dans le séparateur O₂/électrolyte (Séparateur(3)). Afin de garantir le remplissage total de l'électrolyseur par l'électrolyte

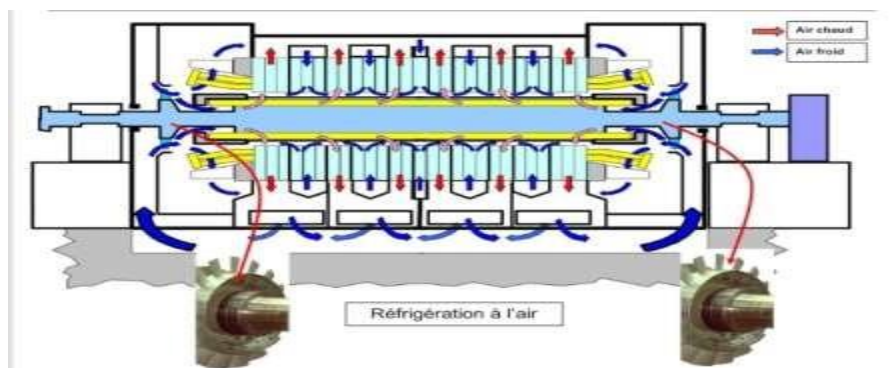
le niveau minimum d'électrolyte dans le séparateur O₂/électrolyte est au dessus de l'électrolyseur. Si le niveau d'électrolyte descend au niveau alarme bas, le redresseur est amené à un courant de sortie nul. L'alimentation en eau vers l'électrolyseur est assurée par un contrôleur de niveau dans le séparateur de gaz/lessive pour O₂ qui fonctionne en conjonction avec une vanne de régulation dans la conduite d'alimentation d'eau d'alimentation (CDA).[71].

III.5 Les Caractéristiques de générateur utilisé:

III .5.1 Générateur utilisé:

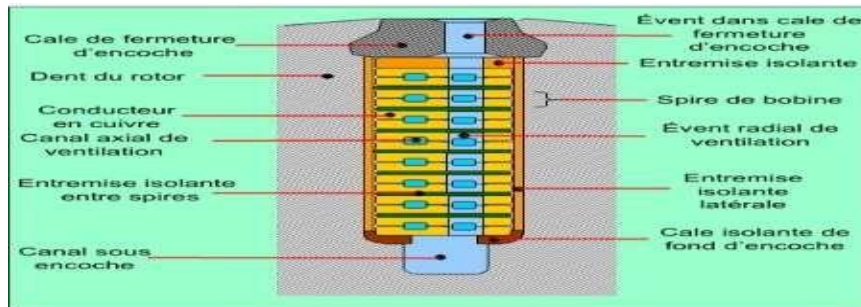
La centrale de Terga est composée de trois Blocs à une seule ligne d'arbre. La ligne d'arbre comprend la turbine à gaz entraînant le turboalternateur via un accouplement rigide. La turbine à vapeur est accouplée via un embrayage auto commutable synchrone sur l'autre côté de l'alternateur. Cette disposition permet de démarrer et d'arrêter la turbine à vapeur indépendamment de la turbine à gaz, alors que la turbine à gaz est déjà en fonctionnement.

III. 5.1.1 Le refroidissement à l'air :



Figure(III.16):Refroidissement à l'air[71]

III.5.1.2 Refroidissement à l'hydrogène:



Figure(III.17): Refroidissement à l'hydrogène [71]

L'hydrogène est choisi pour assurer le refroidissement de rotor, de circuit magnétique du stator et les organes de serrage de l'alternateur.

Ce choix est justifié par rapport aux propriétés physiques de ce gaz

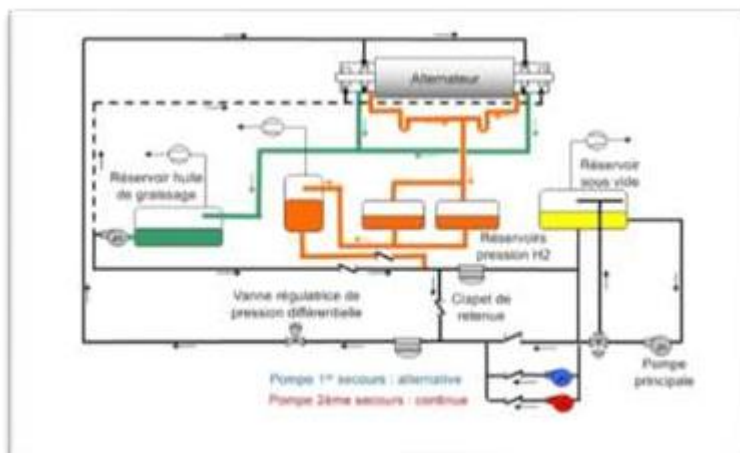
- Sa densité est quatorze fois inférieure à celle de l'air
- Sa conductivité thermique est sept fois supérieure à celle de l'air
- L'hydrogène limite le vieillissement des isolants, car il empêche la formation d'ozone.

La pression interne absolue atteint 4 à 6 bars (0.4 à 0.6 MPa) dans les grands turboalternateurs actuels .

Le vieillissement des isolants retardé, l'augmentation de la pression de l'hydrogène est accrue naturellement encore la possibilité d'échanges thermiques. Les problèmes d'installation, de contrôle et de sécurité posés par l'hydrogène sont maintenant classiques. L'étanchéité aux bouts d'arbre est assurée par des joints radiaux à fuite d'huile dans lesquels une pression d'huile légèrement supérieure à la pression interne d'hydrogène est appliquée entre deux bagues flottantes montées sur l'arbre avec un très faible jeu. [71]

Le débit d'huile passant sous la bague du côté de l'air retourne après dégazage dans le circuit général de graissage du groupe. Le débit d'huile du côté de l'hydrogène assure l'étanchéité et est généralement traité sous vide pour dégazer l'hydrogène dissous puis réinjecté dans le circuit des joints.

III.5.1.3. Le système d'huile d'étanchéité:



Figure(III.18):le système d'huile d'étanchéité[71]

La fonction du système d'huile d'étanchéité du générateur est d'empêcher le gaz externe de pénétrer dans le Générateur et empêcher l'hydrogène de s'échapper de la machine, afin d'assurer la pureté et la pression du gaz à l'intérieur du moteur

Notre générateur adopte un joint annulaire à double courant .Le joint annulaire à double flux utilise une tuile de joint annulaire à double flux, la tuile de joint annulaire à double flux a deux systèmes d'alimentation en huile de circulation indépendants, l'un est le système d'huile côté vide, l'autre est le système d'huile côté hydrogène.

III.5.2. Les Caractéristiques de générateur utilisé:

L'hydrogène produit sur le site de TERGA sert le milieu de refroidissement pour les générateurs 3×400 MW installé dans la centrale électrique, ce Générateur industriel de la marque ALSTOM, modèle TOPGASTUREALTEATEUF, porte le numéro de série HT100189 et a été fabriqué en 2008. Il offre une puissance nominale de 480 000 kVA, avec un facteur de puissance de 0,90.

La tension de l'induit est de 20 000 V, avec une surpression de 5,5 bar. La puissance électrique de l'induit est de 13 856 A3-, tandis que la puissance électrique du champ est de 4 104 A.

Fonctionnant à une fréquence de 50 Hz et une vitesse de 3 000 tours par minute, ce générateur est conçu pour un raccordement spécifique. La direction de rotation, adaptée à une turbine à gaz, est anti-horaire. Il est conforme à la norme IEC et présente une isolation de classe F pour l'enroulement du champ et une isolation Micadur de classe F pour l'enroulement du stator.

Les augmentations de température sont de classe B pour l'enroulement du stator et de classe B pour l'enroulement du champ. Le refroidissement de l'enroulement du stator est assuré par de l'hydrogène (H₂), tout comme le refroidissement du noyau du stator et de l'enroulement du champ.

La température d'entrée de l'hydrogène est de 40°C. Ce générateur se distingue par sa masse imposante : le stator pèse 355 000 kg et le rotor 82 000 kg.

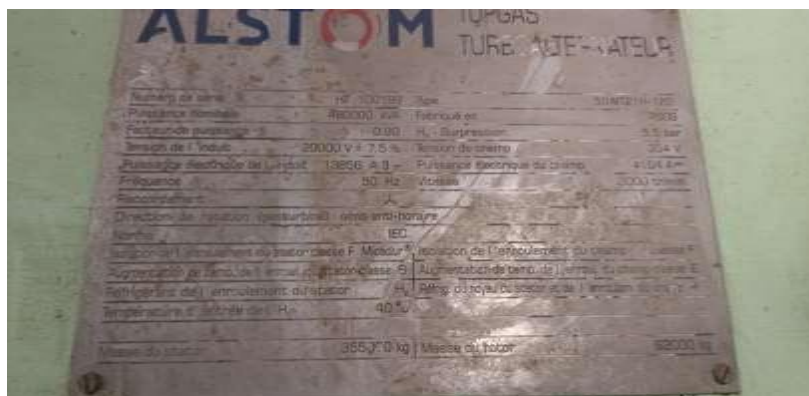
L'alternateur Alstom est entraîné à la fois par la turbine à gaz et par la turbine à vapeur. La puissance est produite à une tension de 20kV.

L'alternateur, à trois phases et deux pôles synchrones, est refroidi à l'hydrogène . L'hydrogène est ensuite refroidi dans des échangeurs à eau se trouvant dans l'enceinte de l'alternateur.

La chaleur issue de ces échangeurs est transférée à l'eau de refroidissement (Circuit fermé d'eau de refroidissement), qui est ensuite refroidi par le circuit principal d'eau de refroidissement. L'hydrogène de refroidissement est stockée dans des bouteilles. L'étanchéité de l'hydrogène vis à vis de l'atmosphère est assurée par une unité d'huile d'étanchéité.

Le rotor alternateur est accouplé Rigidement à l'embrayage.

L'alternateur est utilisé comme un moteur synchrone de démarrage alimenté par Un convertisseur statique de fréquence. L'énergie de démarrage est fournie par le Réseau Haute Tension, à travers le transformateur élévateur



Figure(III.19):Fiche Technique d'un générateur de TERGA.

Numéro de série HT 100199	Puissance nominale 480000 Kva
Facteur de puissance 090	Tension l'induit 20000V
Fréquence 50 HZ	Direction de notation (gasturbine) Sens anti-horaire
Norme IEC	Isolation de enroulement de stator Classe F Micadure
Augmentation de temp enroulement de stator Classe B	Réfrigèrent de enroulement des tator H ₂
Température d'entrée de l'H ₂ 40 C	Masse de stator 355000 kg
Masse de rotor 62000kg	Type 50WT21H-120

H ₂ - Surpression 5.5 Bar	Tension du champ 354V
Puissance électrique au champ 4104A	Vitesse 3000 tr/min

Table (III.2): Fiche technique d'un générateur

III.6 Hydroxyde de potassium :

L'hydroxyde de potassium (KOH) joue un rôle crucial dans la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Dans ce processus, le KOH est dissous dans l'eau pour former un électrolyte, une solution conductrice qui facilite le passage du courant électrique. L'eau pure étant un mauvais conducteur, l'ajout de KOH augmente considérablement sa conductivité, permettant ainsi l'électricité de circuler plus efficacement entre les électrodes.

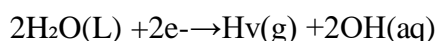
Ce flux d'électrons provoque la séparation des molécules d'eau en hydrogène gazeux (H₂) et en oxygène gazeux (O₂). L'hydroxyde de potassium ne participe pas directement à la réaction chimique de séparation de l'eau, mais il est essentiel pour maintenir la conductivité de la solution, assurant ainsi une production d'hydrogène stable et efficace.[71]

Dans les agents électrolytiques, une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) fournit l'hydroxyde (OH⁻) nécessaire pour transporter les charges entre les électrodes.

Les réactions qui se produisent sont:

Cathode (électrode négative):

Enregistrement de réduction L'eau est réduite avec des ions hydroxyde et hydroxyde:



REPOSITION ET ÉLECTRO



(KOH) A même est utilisé ou produit tout au long de la réaction. Sa tâche principale est d'améliorer la conductivité ionique de solutions:

La présence de K^+ et OH^- transporter une charge électrique entre l'anode et la cathode, abaissant la résistance interne de l'électrolyseur et améliorant son efficacité.

III.6.1. Les propriétés physico-chimiques de KOH :**III.6.1.1. Atomique :**

Formule	Masse Molaire	Moment dipolaire	Structure cristalline
KOH	56.11 g.mol ⁻¹	7.415 D	Orthorhombique

Table(III.3): Propriété atomique de KOH[72]**III.6.1.2. Physique :**

Masse volumique	Température de fusion	Température d'ébullition	Solubilité de l'eau
2.044 g.cm ⁻¹	360.4 °C	1320 °C	178g /100g de l'eau à 100 °C

Table(III.4): Propriété physique de KOH[72]**III.6.1.3. Chimique :****III.6.1.4. Thermodynamique :**

Hydroxyde de potassium cristallisé :

Enthalpie molaire standard de formation à 298,15K: -426 kJ.mol⁻¹

Enthalpie molaire standard de fusion à la température de fusion : 7,5 kJ.mol⁻¹

Enthalpie molaire standard d'ébullition à la température d'ébullition : 128,9 kJ.mol⁻¹

III.6.2 L'hydroxyde de potassium dans l'unité d'hydrogène:

Dans le cadre de notre production d'hydrogène au sein de notre centrale électrique, la préparation de la solution électrolytique est une étape cruciale. Ce processus, bien que technique, est essentiel pour garantir l'efficacité et la sécurité de notre production. La solution de KOH, préparée avec soin, joue un rôle fondamental dans la réaction d'électrolyse. Il est donc impératif de suivre scrupuleusement les instructions et les mesures de sécurité décrites dans ce manuel. La précision et la vigilance sont de mise pour assurer un fonctionnement optimal et sécurisé de notre unité de production d'hydrogène

L'eau qui s'écoule dans la partie supérieure du réservoir dissout le KOH. Continuez à ajouter du KOH à mesure qu'il est dissout[71]

Le KOH et l'eau ont une réaction thermique qui peut produire de la chaleur et de la vapeur. Cette vapeur contient du KOH : ne vous penchez pas au-dessus de la trappe ouverte pour éviter les brûlures chimiques.



Figure (III.20): Hydroxyde de potassium utilisé

III.6.2.1. La quantités de KOH ajouter :

La première force électrolytique d'un bloc de cellules neuf ou remis en état sera une solution à 15% pendant les 3 premiers mois de fonctionnement. Au bout de 3 mois, la solutions passera à 25%. Un échantillon d'électrolyte doit être prélevé tous les 6 mois à des fins de test. La teneur optimale est 25%, mais elle varie entre 23 et 27% selon le niveau dans les séparateurs.

III.6.2.2 .Concentration de KOH :

KOH La concentration dans l'électrolyte est un paramètre important. En général, il est optimisé pour maximiser la conductivité sans trop de problèmes de viscosité ou de solubilité. Les concentrations typiques varient, mais varient souvent de 20% à 0% en masse.

Densité et teneur en KOG des solutions de KOH à 20 °C

Density and KOH content for KOH-solutions at 20 deg. C.

Densité g/cm ³	Teneur g/l	% poids	Be
<i>Density g/cm³</i>	<i>Content g/l</i>	<i>Weight perc.</i>	<i>Be</i>
1.0072	11.1	1	1.0
1.0163	20.3	2	2.3
1.0254	30.8	3	3.5
1.0344	41.4	4	4.8
1.0435	52.2	5	6.0
1.0544	63.2	6	7.5
1.0619	74.4	7	8.7
1.0711	85.8	8	9.9
1.0804	97.4	9	11.0
1.0897	109.2	10	11.9
1.0992	120.9	11	13.0
1.1187	133.0	12	14.1

Table(III.5):Densité et teneur en KOG des solutions a20degC[71].

La solution électrolytique continuera à être circulée par la pompe à électrolyte pendant 4 heures après la fin du chargement.

Laissez l'électrolyte refroidir et les particules se décanter au fond du réservoir Cela prendra environ 24 heures.

III.7. Les paramètres de calcul :

- ✓ La pression en haut des séparations d'O₂ et de H₂ fluctue entre 300 et 400 mm WG lorsque
- ✓ L'électrolyseur est en fonctionnement. Hors production, la pression du H₂ sera d'environ 200 mm WG et la pression du séparateur d'O₂ baissera à 0 mm WG .
- ✓ Température de l'électrolyte relevé sur l'indicateur de température (maximum 80°C)
- ✓ Débit d'électrolyte d'environ 0.4 m³/h
- ✓ La pompe de circulation de l'électrolyte fonctionne de manière silencieuse, sans signe de vibration ni bruits .
- ✓ Le débit dans l'analyseur H₂ dans O₂ est d'environ. 10 L/min
- ✓ Le débit dans l'analyseur O₂ dans H₂ est d'environ. 10 L/min
- ✓ La pompe de l'épurateur est en service et fonctionne normalement
- ✓ Pression de sortie de la pompe 1 ou 2. 2-3 barG
- ✓ Le débit de circulation de l'épurateur est. 5 m³/h
- ✓ La température de circulation de l'épurateur < 30°C
- ✓ La pression différentielle dans l'épurateur est. < 50 mm Wg
- ✓ Le gazomètre est en déplacement libre. 50-60%
- ✓ Le niveau d'huile dans le compresseur en fonctionnement est visible dans le regard:
- ✓ L'huile est transparente, sans signe d'émulsion.
- ✓ La pression de l'huile est comprise entre. 3 et 4 barG
- ✓ pression de 1^{er} étage de 1.5 à 2 barG
- ✓ Pression de 2^e étage de 15 à 20 barG
- ✓ Pression de 3^e étage de 55 à 60 barG
- ✓ Pression de 4^e étage de 155 à 160 barG
- ✓ L'eau réfrigérée du sécheur est froide au niveau des refroidisseurs, de l'eau goutte à goutte
- ✓ S'échappe des Sorties des séparateurs d'eau.
- ✓ Pression à la sortie du sécheur. 155 à 160 barG
- ✓ Analyseur d'humidité. > -55°C
- ✓ Débit à l'analyseur d'O₂ ppm 10 L/min
- ✓ Pression de la bouteille de H₂ 5 à 160 barG
- ✓ Tout signe de fuite de la canalisation de H₂ .

- ✓ Pression d'entrée: Pression atmosphérique
- ✓ Pression de sortie :160
- ✓ Débit de sortie: 16 Nm³

III.7.1. les paramètres de Redresseur :

- ✓ Courant d'entrée: 380V.
- ✓ Courant de sortie: 24-26V.
- ✓ Température de rosée: -55°C°
- ✓ Analyseur H₂O in H₂
- ✓ Température: -89°C°

Conclusion:

Le procédé de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, tel que présenté, repose sur une chaîne complexe et bien structurée d'équipements et de systèmes de contrôle. L'hydrogène et l'oxygène sont produits simultanément, séparés efficacement de l'électrolyte grâce aux séparateurs H₂/ électrolyte et O₂/électrolyte, puis traités par un système de lavage et de refroidissement pour assurer leur pureté. Le système est conçu pour maximiser le recyclage de l'électrolyte (KOH), limiter les pertes, et maintenir une qualité d'eau optimale afin d'assurer la longévité et l'efficacité de l'électrolyseur. Les boucles de régulation, les vannes automatiques, les transmetteurs et les capteurs garantissent un fonctionnement continu, sécurisé et contrôlé. L'importance de la qualité de l'eau d'alimentation est également soulignée pour éviter les dépôts ou la dégradation des électrodes. En somme, ce système illustre une approche rigoureuse et optimisée de la production d'hydrogène industriel, où chaque étape - de la séparation à la récupération - est pensée pour la performance, la durabilité et la sécurité.



CHAPTRE IV: Interprétation des résultats



Introduction:

Après avoir détaillé le protocole et le dispositif expérimental dans le chapitre précédent, ce chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. L'objectif principal de cette étude expérimentale était d'évaluer l'influence de différents paramètres sur l'efficacité de la production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau .

Nous présenterons de manière successive l'impact de chaque paramètre étudié, à savoir [la température, la pression, le débit, la concentration de KOH, etc.] sur le rendement et la cinétique de production d'hydrogène. Chaque section s'attachera non seulement à présenter les données brutes (courbes, tableaux), mais surtout à les interpréter à la lumière des concepts théoriques afin de comprendre les mécanismes sous-jacents. L'analyse de ces résultats nous permettra de déterminer les conditions opératoires optimales pour maximiser la production d'hydrogène dans le cadre de notre étude.

IV.1 Point de rosée de l'eau dans l'hydrogène

Le Table (IV.1) présente les données du "Point de rosée H₂O in H₂" (Point de rosée de l'eau dans l'hydrogène) en fonction du temps (Heure). Cette mesure est cruciale dans le domaine de la production d'hydrogène car elle indique la quantité de vapeur d'eau présente dans le flux d'hydrogène.

Une faible teneur en eau (donc un point de rosée très bas) est généralement requise pour garantir la pureté de l'hydrogène et éviter des problèmes opérationnels dans les applications en aval (comme les piles à combustible) ou la corrosion des équipements de stockage et de transport.

Interprétation des Phases Observées:

- **Phases de Haut Point de Rosée (+5 à +9°C) :**

Ces périodes indiquent une teneur en eau relativement élevée dans le flux d'hydrogène. Cela pourrait être dû à plusieurs facteurs liés au procédé de production d'hydrogène

- **Phases de Bas Point de Rosée (-70 à -89°C) :**

Ces périodes démontrent que l'unité de séchage fonctionne efficacement, produisant un hydrogène très sec. Atteindre et maintenir de tels points de rosée bas est l'objectif des systèmes de purification d'hydrogène modernes et indique une bonne performance du procédé de déshydratation. Ces niveaux sont typiques des exigences pour l'hydrogène de haute pureté.

Date & heure	Point rose H2O in H2
10\04\2025 a 04h21	8.64
04h35	8.87
08h33	9.10
09h00	-72.35
10h00	-84.27
11h00	-85.75
11h30	-86.41
11h34	7.45
12h00	7.56
13h00	8.73
14h00	8.93
18h00	6.44
18h30	5.80
18h48	5.48
20h24	6.61
20h30	6.61
20h46	-6
21h00	-55
22h00	-80.36
23h00	-87.92
23h30	-89.48
00h00	-89

Table (IV.1) : Relevé de production d'hydrogène (point de rosée)

IV.2 Pression quotidienne d'hydrogène :

Le graphique montre l'évolution de la pression d'hydrogène sur une période de 24 heures (de 4h21 à 00h00 le jour suivant). On peut distinguer plusieurs phases :

1.Phase initiale(4h21 -8h33):Pression très basse et stable.

De 4h21 à 4h35, la pression est de 0,22.

De 8h33 à 9h00, il y a une augmentation significative de la pression, passant de 1,59 à 133.

2.Phase de montée rapide (9h00-11h00):

La pression augmente rapidement pour atteindre un plateau.

De 9h00 à 10h00, elle passe de 133 à 142.

À11h00,elleatteint151.

3.Phase de plateau élevé(11h00-14h00environ) :

La pression se maintient à un niveau élevé, autour de150-156.

On observe des fluctuations mineures(ex:11h30à156,12h00à155,13h00à154, 14h00 à 154).

1. Chute brutale(entre14h00 et 18h00):

Après 14h00, la pression chute drastiquement pour revenir à un niveau très bas (0,51 à 18h00). Le point exact de la chute n'est pas clair sur le graphique entre 14h00 et 18h00, mais la table de données montre un passage de 154 à 0.51.

2. Phase de basse pression(18h00-20h30) :

La pression reste à un niveau très bas et stable(0,51)pendant cette période.

3. Deuxième montée(entre20h30et21h00):

La pression remonte brusquement, passantde0,51à106.

4. Deuxième plateau(21h00-00h00):

La pression se stabilise à nouveau à un niveau élevé, mais légèrement inférieur au premier plateau (autour de 121-124).

Elle passe de 106 à121(à21h46 et22h00), puis à 122(23h00)et 124 (00h00).

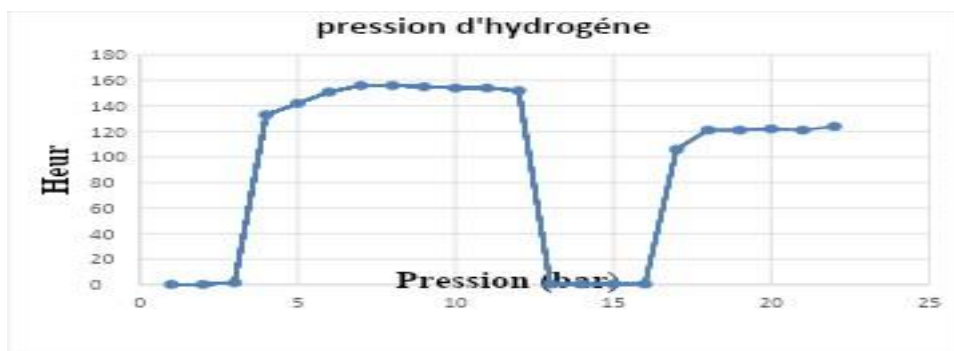


Figure (IV.1) Pression d'hydrogène par heure.

IV.3 Variations de la Pression d'Hydrogène au Cours des Différentes positions :

Ce graphique montre l'évolution de la pression d'hydrogène (y) en fonction de la position (x).

✓ **Phase initiale (Position 0 à environ 20) :** La pression d'hydrogène est très faible, oscillant autour de valeurs proches de zéro (inférieures à 5). Elle semble stable mais à un niveau très bas.

Premier pic majeur (Position environ 22 à 25) : La pression augmente brusquement pour atteindre une valeur maximale d'environ 160-170. Après ce pic, elle chute tout aussi rapidement.

✓ **Phase de basse pression (Position environ 25 à 40) :** Après le premier pic, la pression redescend à des niveaux très bas, similaires à la phase initiale. Il y a une légère remontée autour de la position 35-40, mais la pression reste bien inférieure aux pics.

✓ **Deuxième pic majeur (Position environ 50 à 65) :** La pression augmente à nouveau de manière très significative, atteignant des valeurs similaires au premier pic (environ 160-170). Cette augmentation est progressive initialement, puis très rapide.

✓ **Chute finale (Position environ 65 à 70) :** Après le deuxième pic, la pression chute de nouveau très rapidement pour revenir à des niveaux très bas.

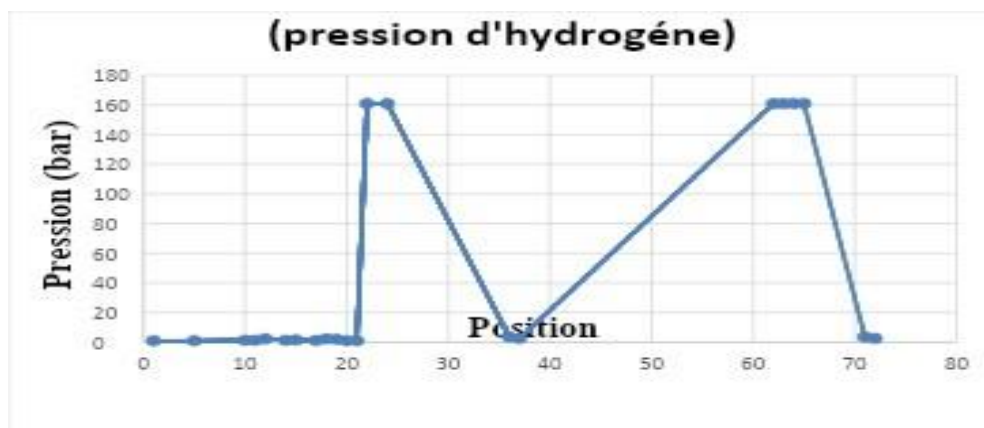


Figure (IV.2) Pression d'hydrogène par position.

IV.4 La variation de l'intensité de courant en Ampère fourni par le redresseur :

Le graphique "Redresseur courant ampérage A" illustre la variation de l'intensité du courant (en Ampères) fourni par un redresseur sur une période donnée.

Pendant la majorité du temps observé, de 4h21 jusqu'à 18h30, puis nouveau à partir de 20h46, le redresseur fournit un courant stable et élevé, se situant aux alentours de **1755 A - 1757 A**. Ce niveau de courant est typique pour des applications industrielles comme l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène.

Le courant **remonte ensuite brusquement** pour retrouver son niveau de fonctionnement normal (1757 A à 20h46).

La durée de l'interruption, où le courant est nul, s'étend donc approximativement de 18h48 à un moment juste avant 20h46, soit une période d'un peu moins de **deux heures**.

On observe une chute brutale du courant à 0 A. D'après le tableau, cette chute se produit après 18h30, le courant étant nul à 18h48.

Le courant reste à 0 A pendant une période significative. Les points de données à 0 A sont enregistrés à 18h48, 20h24 et 20h30.

Cela indique un arrêt complet du redresseur ou de l'équipement qu'il alimente (probablement l'électrolyseur).

Un redresseur est un composant clé dans un système de production d'hydrogène par électrolyse, car il convertit le courant alternatif (AC) du réseau en courant continu (DC) nécessaire pour l'électrolyseur. Les variations observées dans le graphique ont des implications directes.

- ❖ Lorsque le courant du redresseur est à 0 A, l'électrolyseur ne reçoit plus d'énergie. Par conséquent, la **production d'hydrogène est complètement interrompue** pendant cette période (environ 2 heures).
- ❖ . Cela a un impact direct sur le rendement global et la quantité d'hydrogène produite sur une journée.

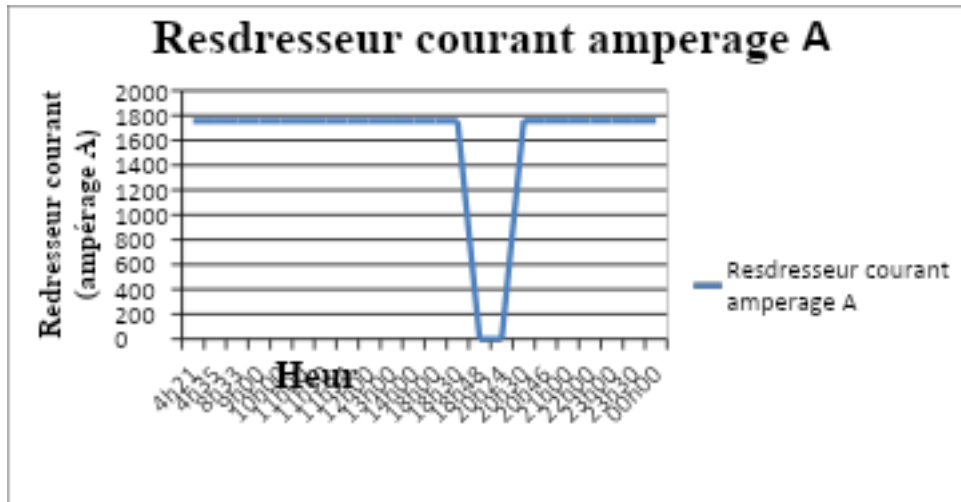


Figure (IV.3) Le courant entrant dans le redresseur (A)

IV.5. La variation de l'intensité de courant en volt fournit par le redresseur :

Le graphique représente l'évolution du "Redresseur courant Voltage V d'hydrogène" (probablement la tension de sortie d'un redresseur alimentant un système lié à l'hydrogène) en fonction du temps.

On observe les points suivants :

- **Période stable à 24V:** De 4h21 à 18h30, la tension est stable et maintenue à 24V. C'est la valeur de fonctionnement nominale.
- **Chute brutale à 0V :** À 18h48, la tension chute brusquement à 0V.
- **Maintien à 0V:** La tension reste à 0V pendant une période, notamment à 20h24 et 20h30.
- **Remontée progressive:** À 20h46, la tension commence à remonter, atteignant 23,96V.
- **Retour à 24V:** À partir de 21h00, la tension est de nouveau stabilisée à 24V et le reste jusqu'à 00h00.

On observe une chute brutale du courant à 0 A. D'après le tableau, cette chute se produit

après 20h24 le courant étant nul à 18h48. La cause la plus directe et la plus probable est une coupure de l'alimentation électrique principale (secteur) du redresseur.

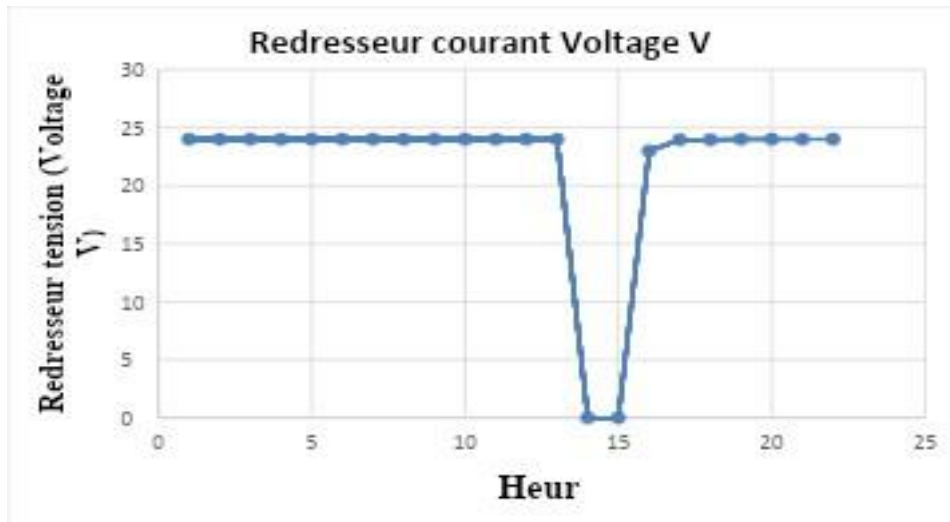


Figure (IV.4) La tension entrant dans le redresseur (V) .

IV .6 Évolution de la Température de l'Hydrogène:

Ce graphique montre l'évolution d'une **position (x)** en fonction d'une **température d'hydrogène(y)** .

- ✓**Phase initiale stable (position 0-15 environ) :** La température est relativement stable autour de 60 unités .Il y a une légère fluctuation, mais elle reste dans une plage constante.
- ✓**Chute de température (position 15-20 environ) :** La température diminue brusquement de 60 à environ 30-40, puis remonte légèrement.
- ✓**Phase de fluctuation(position 20-30 environ):**La température montre des variations plus importantes, descendant des niveaux plus bas (autour de 25-30) avant de remonter.
- ✓**Phase stable basse (position 30-40 environ) :** La température se stabilise à un niveau plus bas, autour de 30-40.
- ✓**Augmentation progressive (position 40-60 environ) :** La température commence à augmenter progressivement, atteignant environ 50-60.

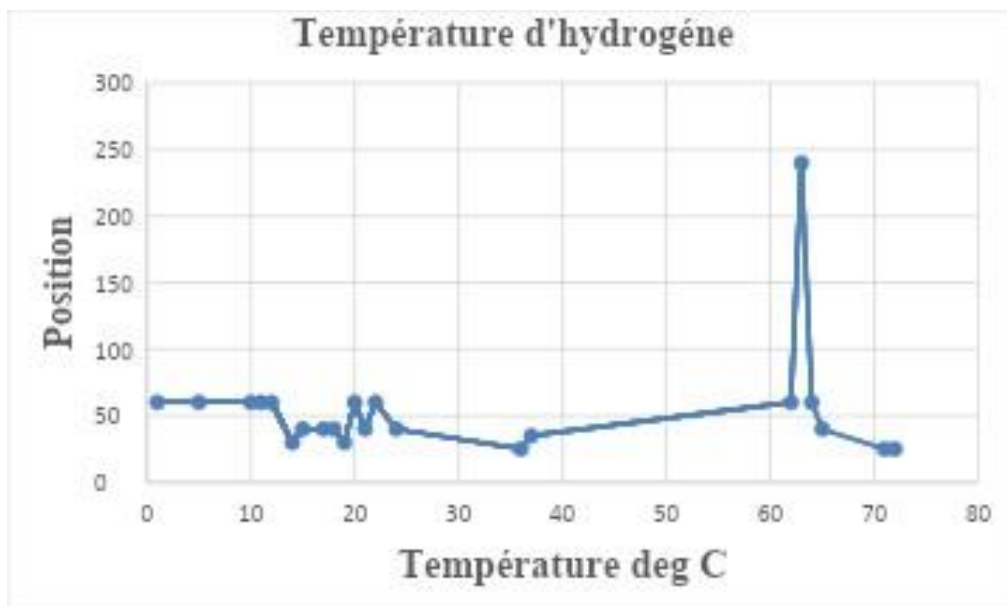
✓ **Pic de température (position 60-65 environ)** : C'est la caractéristique la plus frappante du graphique. La température monte en flèche, atteignant un maximum d'environ 240-250. Ce pic est très aigu et de courte durée.

✓ **Chute et stabilisation finale (position 65-75 environ)** : Après le pic, la température chute rapidement et se stabilise à un niveau plus bas, autour de 25-30.

Chute de température fluctuations (position 15-30) :

Expansion de l'hydrogène: Si l'hydrogène subit une expansion (par exemple, passage d'une haute pression à une basse pression), il se refroidit en raison de l'effet Joule-Thomson. Fuite ou mélange : Une fuite de gaz froid ou le mélange avec un gaz plus froid pourrait faire baisser la température.

Changement des conditions ambiantes : Le système pourrait être exposé à un environnement plus froid.



Figure(IV.5):Température d'hydrogène par position

IV.7 La variation de débit dans l'unité de production :

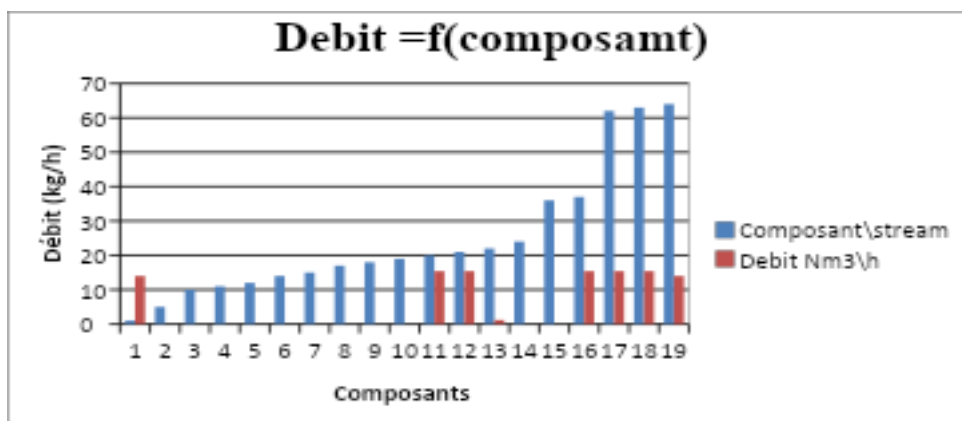
Le graphe représente Débit en fonction de (composant). Le débit d'un flux est la quantité de matière (volume ou masse) qui passe par un certain point par unité de temps. Dans un procédé de production d'hydrogène, les débits des différents flux (gaz produits, électrolyte, eau d'alimentation, fluides de refroidissement, etc.) sont des paramètres opérationnels clés qui déterminent la capacité de production et l'équilibre matière.

Ce graphique présente les débits des 14 composants/flux de l'électrolyseur.

On observe une variabilité significative des débits. Certains composants ont des débits nettement plus élevés que d'autres. Par exemple, les composants 1,6,7,11,12,13,14 semblent avoir des débits plus importants que les composants 2,3,4,5,8,9, 10.

Les flux avec les débits les plus élevés correspondent généralement aux principaux flux de procédé : la circulation de l'électrolyte, les flux de gaz produits (hydrogène et oxygène après séparation primaire), ou potentiellement des flux de service importants comme l'eau d'alimentation ou le fluide de refroidissement .

Les flux avec des débits plus faibles pourraient être des flux de purge, des retours de condenseurs, des alimentations d'additifs, ou des flux d'échantillonnage.



Figure(IV.6) Le débit de l'hydrogène

N	Composant
Numéros	Composant
1	Séparateur H2
2	Séparateur O2
3	Sortie de l'électrolyse
4	Pompe électrolyte
5	S . pompe électrolyte
6	Dispositif de lavage
8	Pompe
9	Gaz Holder
10	Gaz Holder
11	E. H2 Dans le gaz holder
12	Dévésiculeur
13	
14	Sortie de H2 vers comp
15	Aéro réfrigération
16	Aéro réfrigération
17	Compresseur
18	E. purificateur
19	Purificateur
20	S.Purificateur
21	Sécheur H2

IV .8 La distribution relative de KOH dans l'unité de production :

Ce graphique est la représentation la plus claire de la distribution relative du KOH. Chaque part du graphique représente un composant/flux (numéroté de 1 à 14), et la taille de la part est proportionnelle à la quantité totale de KOH trouvée dans ce flux par rapport à la quantité totale de KOH échantillonnée dans l'ensemble du système.

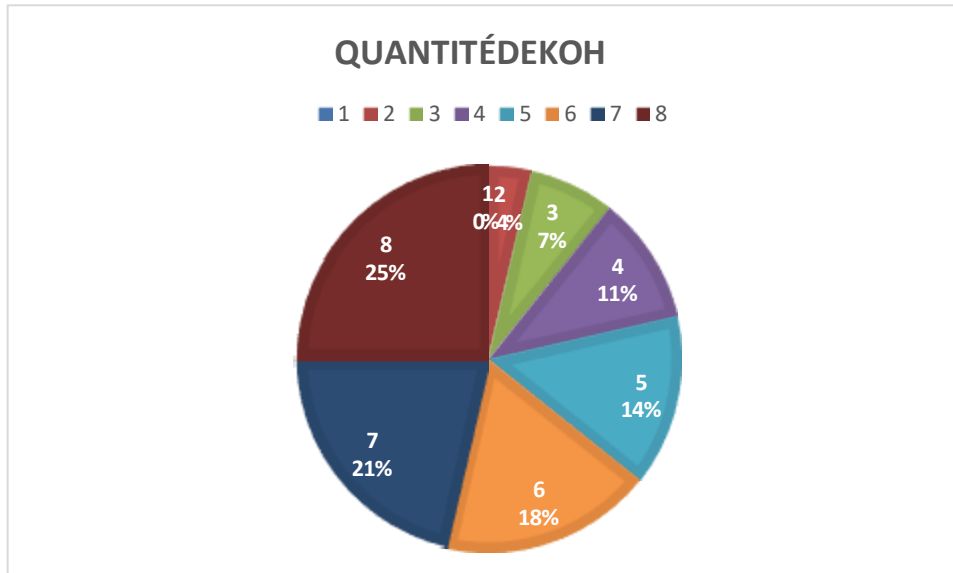
En observant ce graphique, on peut immédiatement identifier les composants qui contiennent la majeure partie du KOH. Si une ou quelques parts sont très importantes, cela indique que la quasi-totalité du KOH se trouve concentrée dans ces flux spécifiques. Les parts plus petites représentent des flux contenant des quantités moindres de KOH, potentiellement des traces ou des entraînements

Analyse:

La présence de KOH dans d'autres flux (purges, retours de condenseurs, circuits de refroidissement s'il y a contact avec l'électrolyte) peut indiquer des pertes d'électrolyte, des inefficacités dans les systèmes de séparation ou de récupération, ou la nécessité de traiter ces flux avant de les rejeter ou de les réutiliser.

L'analyse de la quantité de KOH par composant est fondamentale pour comprendre la circulation de l'électrolyte dans le système d'électrolyse. Elle met en évidence où se trouve la majeure partie du KOH, de manière cruciale, dans quelle mesure l'électrolyte est entraîné dans les flux de gaz produits et potentiellement perdu dans d'autres flux.

- Lorsque le courant du redresseur est à 0 A, l'électrolyseur ne reçoit plus d'énergie. Par conséquent, la **production d'hydrogène est complètement interrompue** pendant cette période (environ 2 heures).
- Cela a un impact direct sur le rendement global et la quantité d'hydrogène produite sur Une journée.



Figure(IV.7) La quantité d'hydroxyde de potassium dans l'unité de l'hydrogène

Composants	Quantité de KOH
1	0.01
2	0
3	105
4	105
5	0.01
6	0
7	0

Table(IV.2) :Quantité de KOH dans chaque composants.

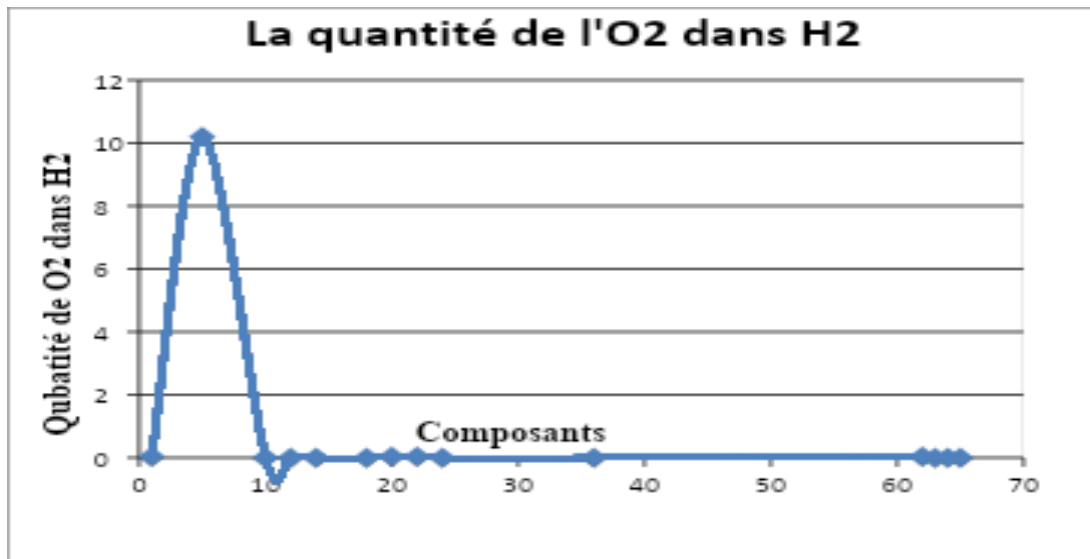
IV .9 La vérification de la quantité de l'oxygène dans l'hydrogène

le graphique montrant la concentration d'O₂ in H₂ (O₂ dans H₂) en fonction du composant.

Le graphique montre un pic très prononcé de la concentration d' "O₂ in H₂" au début du processus (dans le composant 5) Cela suggère une période où une quantité considérable d'oxygène était présente dans le produit hydrogène , suivi d'une diminution rapide puis d'une concentration faible (proche de zéro)

Immédiatement aprèsle pic, la concentration d'oxygène chute brusquement pour revenir à zéro. Cela indique que la cause de la contamination par l'oxygène a commencé à produire un hydrogène beaucoup plus pur.

Pour le reste de la période mesurée, la concentration d'oxygène dans l'hydrogène reste constamment très faible, souvent à zéro. C'est un indicateur positif que le processus de production d'hydrogène est stable et sépare efficacement l'oxygène du flux d'hydrogène, produisant ainsi de l'hydrogène de haute pureté



Figure(IV.7) La quantité de l'O2 dans H2

IV .10 La pureté de l'hydrogène produit dans la centrale électrique Terga :

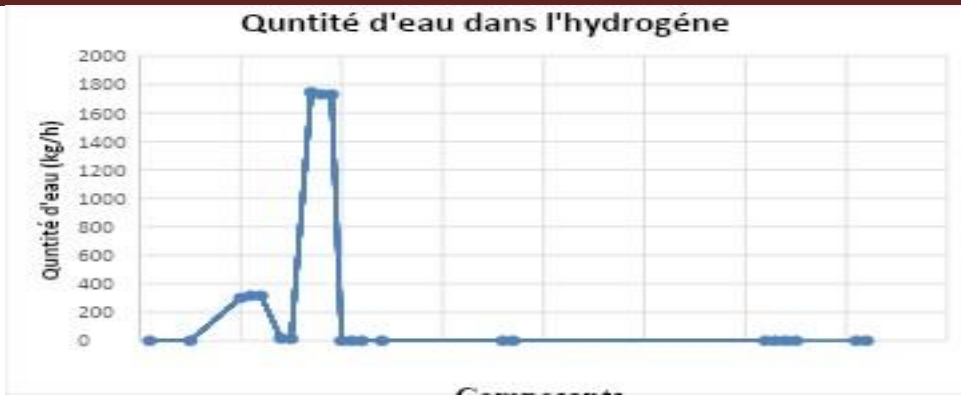
Ce graphique linéaire montre la quantité d'eau présente dans l'hydrogène produit en fonction de différentes positions (Electrolyseur, séparateur, Compresseur, Sécheur, ...). L'axe des ordonnées indique cette quantité par Kg/h.

La teneur en eau est un indicateur clé de la **pureté** de l'hydrogène produit. On observe une faible teneur en eau dans la plupart des positions .

Le pic majeur de contamination par l'eau est observé aux positions 17, 18, et 19 (environ 1730-1746 Kg/h). Et le pic plus modéré se situe aux positions 10, 11, et 12 (environ 300-316 kg/h).

Cela montre que l'hydrogène contient une grande quantité de l'eau(hydrogène humide) indique Une sortie directe de l'électrolyseur avant toute étape de séchage l'hydrogène sortant de l'électrolyseur est saturé en vapeur d'eau.

Plusieurs positions (1,5, 20-22, 24, 62-65, 71, 72) montrent une teneur en eau nulle ou très faible, indiquant un hydrogène relativement sec



Figure(IV.8)Quantité d'eau dans l'hydrogène.

IV .11 Les paramètres de production d'hydrogène:

Ce tableaux représente des déférentes paramètres (Enthalpie , vapeur eau , pression et température) dans déférents composants de notre système de la production d'hydrogène

Dans le composant 1 le débit de vapeur d'eau élevé (2,72 kg/h), basse pression (1,04 Bar), température modérée (60°C).

Ce point représente la sortie de l'électrolyseur. L'hydrogène est encore saturé ou très riche en vapeur d'eau à la température de fonctionnement de l'électrolyseur.

Dans le composant 5 débit de vapeur d'eau faible (0,0653 kg/h), haute pression (161 Bar), température modérée (60°C)

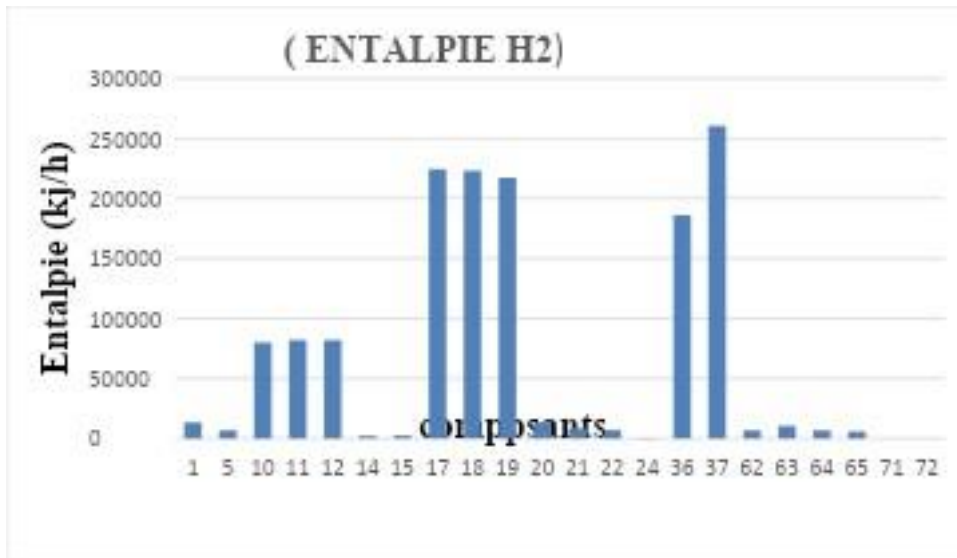
Ce point représenter l'hydrogène **après compression et refroidissement**. La pression est élevée, indiquant une étape de compression. La température de 60°C suggère un refroidissement après compression La faible teneur en eau confirme le séchage.

Le Composant 3 Similaire au Composant 1 (conditions et débit d'enthalpie quasi identiques).

Débit de vapeur d'eau très faible (0,02 kg/h), pression très élevée (161 Bar), et température très élevée (240°C).

Ce point représente de l'hydrogène fortement comprimé, très sec, et haute à température. La haute température pourrait être le résultat direct de la chauffage intentionnelle. Le débit d'enthalpie (6634 kJ/h) est ici majoritairement constitué de la chaleur sensible de l'hydrogène gazeux à haute température et pression.

Le composant 6 Similaire au Composant 5 en termes de haute pression (161 Bar) et température modérée (60°C), mais avec un débit de vapeur d'eau légèrement plus élevé (0,12 kg/h) et un débit d'enthalpie plus faible (6624 kJ/h). La différence de débit d'enthalpie par rapport à C5, malgré des P et T similaires, pourrait s'expliquer par un débit massique d'hydrogène plus faible à ce point, ou une légère variation dans l'efficacité du refroidissement/séchage.



Figure(IV.9) L'enthalpie de l'hydrogène .

Composants	Vapeur d'eau (kg/h)	Enthalpie(KJ/h)	Pression(Bar)	Temperature (deg.c)
1	2,72	13203	1,04	60
2	1,4	6654	1,04	60
3	2,72	13477	1,04	60
4	0,02	6634	161	240
5	0,0653	10394	161	60
6	0,12	6624	161	60

Table(IV.3) Les paramètres de production d'hydrogène

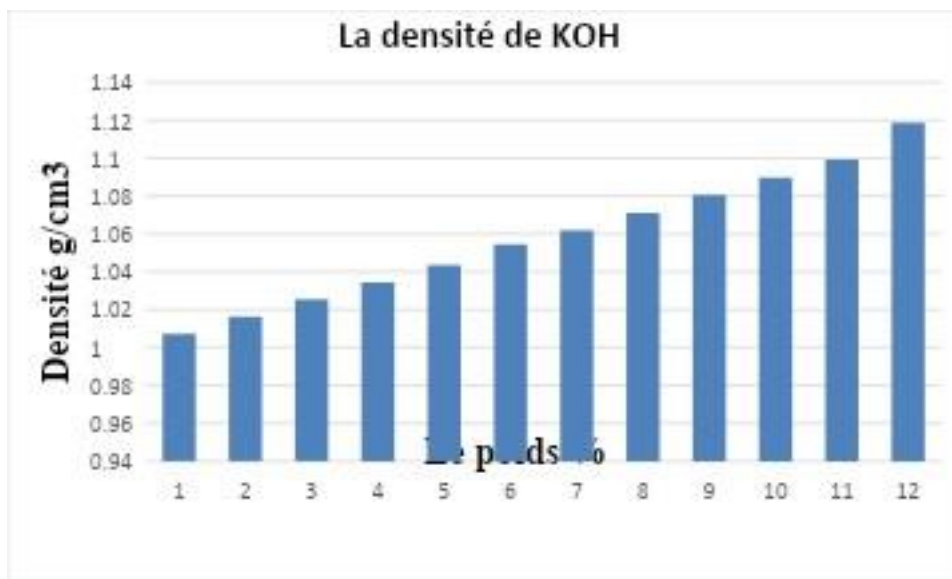
IV .12 La densité d'électrolyte dans l'unité d'hydrogène :

Ce diagramme représente la densité de la solution d'hydroxyde de potassium (KOH) dans l'unité de production d'hydrogène.

La densité de la solution de KOH **augmente** de manière régulière avec l'augmentation de (poids). Ceci est attendu plus la concentration de soluté (KOH) dans le solvant (eau) est élevée, plus la densité de la solution augmente.

Les valeurs de densité varient d'environ 1.0072 à 1.1187 g/cm³.

La concentration de l'électrolyte KOH est un paramètre crucial dans l'électrolyse de l'eau. Elle influence directement la **conductivité ionique** de la solution. Il existe généralement une concentration optimale de KOH (souvent autour de 25-30% en poids) qui maximise la conductivité.



Figure(IV.10) La densité de KOH par le poids.

IV .13 Les méthodes de production de l'hydrogène :

Techniques	Principes	Avantages	Inconvénients
Reformage	Chauffage à haute température (à 840-950) pour obtenir des éléments gazeux ensuite séparés par un jeu de température	Technologie mature, peu coûteuse	Rejets CO ₂ , utilisation d'énergies fossiles
Électrolyse de l'eau	Séparation de la molécule De l'eau 80°C, réaction inverse d'une pile	Technologie mature, pas de rejets de CO ₂	Coûteuse énergétiquement, Taille des installations
Pyrolyse de la biomasse	Chauffage à haute température des corps organiques complexes, pour produire des éléments simples	. Pas de production de CO	Coûteuse énergétiquement
Photo-électrolyse	produisant des bulles de H ₂ et d'O ₂ si elle est immergée dans l'eau.	Pas de rejet de CO ₂	Coûts des bioréacteurs Faible conversion de photo- l'énergie solaire Production limitée d'H ₂

Table(IV.4) : les méthodes de production de l'hydrogène

Méthode de Production	Matière Première	Quantité de Production (Échelle)	Rendement Énergétique	Capacité de Production	Émissions de CO ₂
Vaporeformage du méthane (SMR)	Gaz naturel (méthane)	Très grande (mature)	~70-85%	Très élevée, usines de grande taille	Élevées (9-12 tonnes de CO ₂ par tonne d'H ₂)
Oxydation partielle (POX)	Hydrocarbures lourds, charbon, biomasse	Grande	~50-70%	Élevée	Très élevées (variables selon la matière première)
Gazéification du charbon	Charbon	Très grande	~60-75%	Très élevée	Très élevées (les plus importantes)
Électrolyse de l'eau	Eau, Électricité	Variable (modulaire)	~60-80% (jusqu'à 90% pour l'électrolyse à haute température)	Modulaire, de petite à grande échelle	Nulle (si électricité renouvelable)

Table(IV.5) : comparaison entre les méthodes de production de l'hydrogène

On choisit l'électrolyse de l'eau principalement pour une seule et excellente raison : c'est la seule méthode qui permet de produire de l'hydrogène totalement propre, qu'on appelle "hydrogène vert".

Alors que les autres méthodes dépendent du gaz ou du charbon et polluent beaucoup, l'électrolyse utilise de l'eau et de l'électricité. Si cette électricité vient du soleil ou du vent, la production d'hydrogène se fait sans aucune émission de CO₂.

En résumé, l'électrolyse est la solution d'avenir pour produire de l'énergie propre et lutter contre le changement climatique, même si elle est encore plus coûteuse aujourd'hui.

Conclusion :

Ce chapitre a exploré en détail les paramètres clés de l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène. L'analyse du point de rosée a révélé l'efficacité du séchage de l'hydrogène, essentiel pour sa pureté et la protection des équipements. L'étude des pressions et des courants des redresseurs a mis en lumière les phases de fonctionnement et les interruptions de production, soulignant leur impact sur le rendement. Les variations de température et les débits des composants ont permis de comprendre les conditions opérationnelles et l'équilibre matière. Enfin, la distribution du KOH et la concentration d'O₂ dans l'H₂ ont confirmé l'importance de la gestion de l'électrolyte et l'efficacité de la séparation des gaz pour garantir un hydrogène de haute pureté, un objectif crucial pour les applications aval.



CONCLUSION ET PERSPECTIVES



Conclusion générale :

L'étude que nous avons effectuée dans le cadre de ce mémoire a permis d'explorer en profondeur les divers aspects liés à la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Grâce à une approche combinant les fondements théoriques et les considérations pratiques, nous avons pu mettre en lumière les enjeux et les opportunités de cette technologie cruciale pour la transition énergétique.

Nos travaux ont mis en évidence les avantages significatifs de l'électrolyse de l'eau, notamment sa capacité à produire de l'hydrogène de haute pureté, indispensable pour de nombreuses applications industrielles et énergétiques. L'emplacement stratégique de la centrale de Terga, avec son accès à des ressources énergétiques (électricité produite par la centrale elle-même) et à l'eau, offre un cadre propice à l'implémentation d'une unité de production d'hydrogène par électrolyse.

Nous avons examiné en détail les différents composants nécessaires à un système d'électrolyse de l'eau, incluant le redresseur, l'électrolyseur, les électrodes, le séparateur, et les systèmes de gestion des électrolytes, de gazomètre, de purification et de séchage. L'analyse fonctionnelle du système a mis en lumière les paramètres clés de production, le contrôle qualité du gaz produit et la gestion des niveaux d'électrolyte. Cette investigation a permis de dresser un tableau précis des exigences techniques et opérationnelles d'une telle installation à Terga.

Les résultats de notre travail suggèrent que l'intégration d'une unité de production d'hydrogène par électrolyse à la centrale de Terga présente un potentiel significatif. L'accès à une source d'énergie stable et la possibilité d'utiliser l'eau disponible, potentiellement déminéralisée comme cela est déjà le cas pour d'autres procédés au sein de la centrale, constituent des atouts majeurs. La maîtrise des aspects liés aux matériaux, à la régulation et à la sécurité est cruciale pour garantir l'efficacité et la pérennité d'un tel système.

Nous avons souligné les facteurs clés qui influencent la production:

- ✓ La température de l'électrolyte (eau).
- ✓ La concentration de l'électrolyte.
- ✓ La pression de l'électrolyseur (système d'opération).

En définitive, cette étude démontre la pertinence de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à la centrale électrique de Terga comme une contribution essentielle à la

transition énergétique. Au-delà des aspects techniques abordés, des recherches futures pourraient approfondir l'optimisation énergétique du processus, l'intégration à plus grande échelle de l'hydrogène dans le mix énergétique de la centrale et de la région, ainsi que l'évaluation économique détaillée pour une mise en œuvre industrielle.

Références Bibliographiques

- [1] A. Godula-Jopek, *Hydrogen Production: by Electrolysis*. John Wiley & Sons, 2015.
- [2] M. Seck, “Etude de faisabilité d’une unité de production d’hydrogène par électrolyse de l’eau fonctionnant grâce à une centrale électro-solaire thermodynamique”.
- [3] jonasjams, “THE HISTORY OF HYDROGEN | AltEnergyMag,” in *The history of hydrogen*. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: https://www.altenergymag.com/article/2009/04/the-history-of-hydrogen/555/?fbclid=IwY2xjawKj9SllHRuA2FlbQIxMABicmlkETFtTmdwSHdydHR1QVU2alRLAR47rahPg9HoopIVpAEOFaA3uNHjeo55PZbMDqNLA5ThV5O1IU6hWKaz95ED9Q_aem_sqIpA9ZRQSHIAdlnHqjPqA
- [4] “Histoire de l’hydrogène,” Découvrez la Greentech. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.discoverthegreentech.com/hydrogene-innovation-ecologie-environnement/histoire/>
- [5] “The world of hydrogen.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.theworldofhydrogen.com/gasunie/history>
- [6] “5.2.1.pdf.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.france-hydrogene.org/app/uploads/sites/4/2018/02/5.2.1.pdf>
- [7] G. Pourcelly, “4. Les piles à combustible,” in *L’énergie à découvert*, R. Mosseri and C. Jeandel, Eds., in *À découvert*. Paris: CNRS Éditions, 2013, pp. 206–207. doi:10.4000/books.editions-cnrs.11107.
- [8] “cours_pac_.pdf.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: https://gm.univ-batna2.dz/sites/default/files/mec/files/cours_pac_.pdf
- [9] founasanis bouzidiyanis, “Etude Et Production D’hydrogène Vert | PDF | Hydrogène | Gazéification,” Master, A-Mira, BEJAIA, 2022. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://fr.scribd.com/document/743873796/Etude-et-production-d-hydrogene-vert>
- [10] msavoy, “Hydrogène et espace: déjà une longue histoire,” H2H24. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://h2h24.com/nikola-souhaite-cooperer-avec-hyundai/>
- [11] “pile a combistible PAC.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: http://moodle.univ-skikda.dz/moodle/pluginfile.php/89088/mod_resource/content/1/Chapitre%203.pdf
- [12] scastellani@kdc-group.co.uk, “The History of Hydrogen Fuel,” KDC Projects. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.kdcprojects.com/the-history-of-hydrogen-fuel/>
- [13] “Hydrogène.pdf.” Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://facmed.univ-constantine3.dz/wp-content/uploads/2024/10/Hydrog%C3%A8ne.pdf>
- [14] “hydrogène, propriétés chimiques, effets sur la santé et l’environnement.” Accessed: May 28,

2025. [Online]. Available: https://www.lenntech.fr/periodique/elements/h.htm?fbclid=IwY2xjawKkEF1leHRuA2FlbQIxMABicmlkETE3WFRvQWY0dmFJd2wwUmhSAR6P1oFFYCN7p8Yhq4nQ1PbN3-s-xwJptC1n5RtfyD3mQjUT7nlZmAvvUVQbLg_aemljwyHpNF46JvD1QwHwB8Q
- [15] B. Dr hadjer, "l'hydrogene." 2020 2019. [Online]. Available: https://pharmacie.univ-batna2.dz/sites/default/files/pharmacie/files/hydrogene_-_20192020_-_dr_h._benlatreche.pdf
- [16] "Hydrogène," Dec. 2021, [Online]. Available: file:///C:/Users/power-info/Downloads/FicheTox_326.pdf
- [17] P.A.Tanguy, L.Fradette, J.Chaouki, M.Neisian, and O.Savadogo, "VOLET C: PROPOSITIONS POUR LE DÉPLOIEMENT DE L'HYDROGÈNE VERT AU QUÉBEC".
- [18] pyonnier pour le MERN, "Rapports sur les principaux usages de l'hydrogène." May 13, 2022.
- [19] P. Forestier, "L'industrie des engrais, découvrez leurs processus chimiques," Blog WIKI. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://blog.wika.com/fr/applications/principaux-types-d-engrais-aperçu-de-leurs-processus-chimiques/>
- [20] "principaux usages de l'hydrogène," May 13, 2022.
- [21] "Gas Turbines," ResearchGate. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/topic/Gas-Turbines>
- [22] "FLUIDE CALOPORTEUR," Wattco. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.wattco.com/fr/fluide-caloporteur/>
- [23] Mostafa CHAMOUMI, "NOUVELLE GÉNÉRATION DE CATALYSEURS SUPPORTÉS PAR VALORISATION D'UN RÉSIDU D'ENRICHISSEMENT (PROCÉDÉ UGS) D'UNE SCORIE DE TiO₂: Le catalyseur Ni-UGSO appliqué à la reforme de méthane," Sherbrooke (Québec) Canada: (Québec) Canada, Février 2017, p. 30.
- [24] "International Journal of Green Energy: Vol 5, No 5." Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/toc/ljge20/5/5?nav=toCList>
- [25] zouzou abderahmane Rouai Mohamed, "Estimation du potentiel de la production d'hydrogène à partir de la biomasse," UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 1017 2016, p. 95.
- [26] F.-X. Chiron, "Production d'hydrogène en boucle chimique," phd, École Polytechnique de Montréal, 2012. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://publications.polymtl.ca/964/>

- [27] D. Ghribi, "Etude ,modelisation et simulation d'un systeme de production d'hydrogene parvoiesolairephotovoltaïque," Doctorat, Universityblida1,blida,2016.[Online].Available:https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/12869/1/32-660-233-1.pdf?fbclid=IwY2xjawKkPJlleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE3WFRvQWY0dmFJd2wwUmhSAR7FFAcZTKAH94DLk3GdKOizQDJLi6UDKXnyzEZA-TwDEXRtSaPLN0m0j1_ohw_aem_kfPvpiSMlvhwI8Tv-I2yQg
- [28] T.Alleau–P.Malbrunot–J.Saint-Just, "Mémentodel'Hydrogène,"france,p.17,Nov.2019.
- [29] MezianeFares, "Productiond'hydrogeneparelectrolyseurdel'eauahautetemperatureMezianrfares-RechercheGoogle," Rechercheetdevelopement. Accessed:May28, 2025.[Online]. Available:https://www.google.com/search?q=Production+d%27hydrogene+pae+electrolyseur+de+l%27eau+a+haute+temperature+Mezianr+fares&rlz=1C1GCEU_frDZ1161DZ1161&oq=Production+d%27hydrogene+pae+electrolyseur+de+l%27eau+a+haute+temperature++Mezianr+fares&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOdIBCzEyNTEyM2owajE1qAIAAsAIA&sourceid=chrome&ie=UTF-8
- [30] TurkiKhaled ,Yahyaoui Aymen , AMMARI Abdarraouf, "LES PROCEDES DE PRODUCTIONDEL'HYDROGENE,"Master,MohamedBoudiaf,Messila,2022.Accessed:May 28, 2025. [Online]. Available: <https://repository.univ-msila.dz/items/c811f66e-fead-4000-a0a9-d116684e5448/full>
- [31] admin-lk, "La production d'hydrogène «vert»," Encyclopédie de l'énergie. Accessed: May28, 2025. [Online]. Available: <https://www.encyclopedie-energie.org/la-production-dhydrogene-vert/>
- [32] Pierre Hollmuller, Bernard Lachal, and Franco Romerio, Willi Weber, Jean-Marc Zraggen, "L'HYDROGÈNE, FUTUR VECTEUR ENERGÉTIQUE?," universite d'étude des problemes de l'énergies, Genève, 2005.
- [33] Bouaziz Meriem, "Simulation Numérique des propriétés de stockage d'hydrogène dans les hydrures à base de Magnésium (MgH₂)," Master, Mohamed Khider, Biskra, 2022.
- [34] Mémentodel'Hydrogène, "TRANSPORTETDISTRIBUTIONDEL'HYDROGENE," France,p.14,Dec.2019.
- [35] "Transportdel'hydrogène:comparaisondetroisvecteursénergétiquesconnus,"DemacoCryogenics . Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://demaco-cryogenics.com/fr/blog/transport-de-lhydrogene-comparaison-de-trois-vecteurs-energetiques-connus/>
- [36] kunihirotakahachi, "HydrogenTransportation."CenterforSupplyControlandDisasterManagemen

t, Tokyo Gas Co., Ltd., Tokyo, Japan.

- [37] D. oussama and Hamida Nabil, “La production de l’hydrogenea partir de l’energie solaire,” Master, SAAD DAHLAB, blida, 2019.
- [38] M. OUALID, “Production de l’hydrogène à partir des énergies renouvelables,” Université de Tlemcen, Tlemcen, 2009. Accessed: Feb. 10, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6829/1/Production-de-l%27hydrogLn-a-parti.pdf>
- [39] O. Daghbouche and N. Hamida, “la production d’hydrogène à partir de l’énergie solaire,” Thèse, SAAD DAHLAB, BLIDA 1, 2019. Accessed: Mar. 25, 2025. [Online]. Available: https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/12961/2/Correction%20PFE_2.pdf
- [40] S. Chaib and R. Cherf, “Etude technico-économique et environnementale de capteur solaire hybride photovoltaïque / thermique (PV/T),” Thèse, UNIVERSITE KASDI MERBAH, OUARGLA, 2021. Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/29924/1/UNIVERSITE%20KASDI%20MERBAH%20OUARGLA%201%20%28Enregistr%C3%A9%20automatiquement%29%202_compressed.pdf
- [41] I. Bougada, S. E. Letrache, Y. Dib, A. Derradji, ousoufYBouffelgha, and B. Bakiri, “Etudedela production d’hydrogène par le procédé d’électrolyse de l’eau alcaline,” Thèse, AbdelhafidBoussouf, Mila, 2023. [Online]. Available: <http://opac.centre-univ-mila.dz/z//621-99-11.pdf>
- [42] A. YAHIAOUI, A. AMMARI, and K. TURKI, “Les PROCÉDES DE PRODUCTION DE L’HYDROGENE,” Thèse, Mohamed boudiaf, M’sila, 2022. [Online]. Available: <https://repository.univ-msila.dz/server/api/core/bitstreams/26901777-1f3d-4ca1-9e77-b3e678bb5cd0/content>
- [43] N. BOUAZIZ and A. ALLAM, “Dimensionnement d’un Système photovoltaïque Orienté pour alimenter l’électrolyseur pour produire de l’hydrogène vert,” Thèse, KasdiMerbah, Ouargla, 2022. Accessed: May 01, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/35114/3/BOUAZIZ%20Nasreddine%20%2b%20ALLAM%20Abdelmoumen.pdf>
- [44] L. Lucile, “Étude de l’effet de la pression sur l’électrolyse de H₂O et laco-électrolyse de H₂O et CO₂ à haut température,” DOCTORAT, Bordeaux, france, 2016. Accessed: May 03, 2025. [Online]. Available: https://theses.hal.science/tel-01674502v1/file/BERNADET_LUCILE_2016.pdf
- [45] M. B. DANOUNE, “Etude d’un système d’énergie renouvelables à base d’hydrogène vert,” DOCTORAT, KasdiMerbah, Ouargla, 2020. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/30861/1/danoune_Bilal_Doctorat.pdf

- [46] nadaDjaballahkatre andyoustraDenaguir, “Modélisation et optimisation d’un système de stockage d’énergie à base d’hydrogène dans un réseau électrique,” master, KasdiMerbah, Ouargla, 2018. [Online]. Available: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/21188/1/Djaballah->
- [47] M. BEN AMMAR andala E. EMBARKI, “ModélisationD’ électrolyseur Proton Exchange Membrane (PEM),” master, mohamedkhider, Biskra, 2019. Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/17901/1/BEN_AMMAR_Makhlouf_embarki_ala_eddine.pdf
- [48] S. AMOUMENE and M. N. BABA HAMOU, “Conception de la chaine logistique de l’hydrogène: Applicationau réseau de transport Routier dans la ville de Ouargla,” master, KasdiMerbah, OUARGLA, 2016. Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/15044/1/AMOUMENE-BABAHAMOU.pdf>
- [49] kheireddineSardiandH.Touati, “Simulationd’ un systémede productiond’ hydrogènesolaire photovoltaïque,” master, SAADDAHLAB, BLIDA1, 2019. Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/8747/1/memoire.pdf>
- [50] M. Bouaziz, “Simulation Numérique des propriétés de stockage d’hydrogène dans les hydrures à base de Magnésium (MgH₂),” master, mohamedkhider, Biskra, 2021. Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/21856/1/Bouaziz_Meriem.pdf
- [51] B. LAOUN, “IMULATION ET DIMENSIONNEMENT D’UN SYSTEME DE PRODUCTION D’HYDROGENE PAR ELECTROLYSEUR A MEMBRANE ALIMENTE PAR PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES. INTEGRATION POUR APPOINT A UNE PILE A COMBUSTIBLE.,” MAGISTER, SAADDAHLAB, BLIDA, 2010. [Online]. Available: <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/4856/1/32-660-114-1.pdf>
- [52] khadidja Bouziane, “Etude D’UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE DE PRODUCTIOND’HYDROGENEPARELECTROLYSEDEL’EAU,” MAGISTER, Kasdi Merbah, OUARGLA, 2010. Accessed: May 28, 2025. [Online]. Available: <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/12961/2/Correction>
- [53] M. BEN MADANI, “Développement et Caractérisation des nouveaux matériaux cathodiques pour la production d’hydrogène par électrolyse de l’eau,” master, AKLI MOHAND OULHADJ, BOUIRA, 2022. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: [file:///C:/Users/NewTech-Info/Downloads/Memoire%20finale%20apr%C3%A9s%20correction%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/NewTech-Info/Downloads/Memoire%20finale%20apr%C3%A9s%20correction%20(2).pdf)
- [54] “Livre-blanc-Presidentielle-2022-web.pdf.” Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.france-hydrogene.org/app/uploads/sites/4/2021/12/Livre-blanc-Presidentielle-2022->

web.pdf

- [55] “Uses of Hydrogen-Stargate Hydrogen,” stargatehydrogen. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: <https://stargatehydrogen.com/blog/the-uses-of-hydrogen/>
- [56] “Le 6^e rapport du GIEC: le point complet,” Découvrez la Greentech. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.discoverthegreentech.com/6e-rapport-du-giec/>
- [57] H. Derbal*, Belhame M., and A. M’ Raoui, “L’hydrogène, vecteur énergétique solaire.” 2007.
- [58] p. Malburent, “Application de l’hydrogène en chimie industrielle.” Mar. 2023.
- [59] “Vert, bleu, gris, rose: connaissez-vous les couleurs de l’hydrogène?” Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: https://www-h2--mobile-fr.cdn.ampproject.org/v/s/www.h2-mobile.fr/dossiers/vert-bleu-gris-rose-connaissiez-vous-couleurs-hydrogene/amp/?amp_gsa=1&_js_v=a9&usqp=mq331AQIUAKwASCAAgM%3D&fbclid=IwY2xjawKmkhdleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE2dnh0RVdDdlRtVFBicTBpAR5HrL7-iyh5DlaEA-sYJT_aqH2DJKq8l7bh1RdMMHUweYqK8aVYaSnwT1Uw2Q_aem_Lbzf-bOgrcQcFP2nCOWog#amp_tf=Source%20%3A%20%251%24s&aoh=17423503419566&referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com&share=https%3A%2F%2Fwww.h2-mobile.fr%2Fdossiers%2Fvert-bleu-gris-rose-connaissiez-vous-couleurs-hydrogene%2F
- [60] “Couleurs de l’hydrogène et stations hydrogène - Ataway,” Anytime, Anywhere energie. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: https://atawey.com/couleurs-hydrogene-station-hydrogene/?fbclid=IwY2xjawKmk15leHRuA2FlbQIxMABicmlkETE2dnh0RVdDdlRtVFBicTBpAR5BieurS8czmhW3hUfSjqrKSDJRMzx7YXESzz5_0iF-GDDOHWE-d8GCKeMgTUg_aem_u25YTKSxmG0XztTUVA3XWg
- [61] “Production d’hydrogène: procédés, avantages / inconvénients,” Apr. 29, 2019. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-de-lhydrogene>
- [62] C. lefevre, “Hydrogène Blanc | Clé de l’Avenir Énergétique Durable,” 2024, 23 septembre 2024. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: https://ohm-energie.com/blog/hydrogene-blanc-une-ressource-energetique-davenir?fbclid=IwY2xjawKmlRlleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE2dnh0RVdDdlRtVFBicTBpAR5KQpM6y5Ces46VrYS9-Cij7dBTMBbTyTm3XAdv_pqEpTtwTsp2tMR5huwg_aem_Edun9EjzVGYr2QKm0Ze6wQ
- [63] “Hydrogène blanc: l’avenir de l’énergie propre? ~ Sirenergies,” Hydrogeneblanc, l’avenir de l’énergie. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: https://www-sirenergies-com.cdn.ampproject.org/v/s/www.sirenergies.com/article/hydrogene-blanc-avenir-energie-propre/amp/?amp_gsa=1&_js_v=a9&usqp=mq331AQIUAKwASCAAgM%3D&fbclid=IwY2

- xjawKmlgpleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE2dnh0RVdDdlRtVFBicTBpAR5AQQllbywC8druOtRbSzAenQlaS7koz-a9D8w4PwL08xbyAsVQe_B8Ns-klg_aem_F-
I9POhlXze1Ajgypvp88Q#amp_tf=Source%2%A0%3A%20%251%24s&aoh=17423638372479
&referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com&share=https%3A%2F%2Fwww.sirenergies.com%2Farticle%2Fhydrogene-blanc-avenir-energie-
propre%2Famp%2F%3Ffbclid%3DIwY2xjawKmlgpleHRuA2FlbQIxMABicmlkETE2dnh0RVdDdlRtVFBicTBpAR5AQQllbywC8druOtRbSzAenQlaS7koz-a9D8w4PwL08xbyAsVQe_B8Ns-klg_aem_F-
I9POhlXze1Ajgypvp88Q%23amp_tf%3DSource%25C2%25A0%253A%2520%25251%2524s%26aoh%3D17423638372479%26referrer%3Dhttps%253A%252F%252Fwww.google.com%26ampshare%3Dhttps%253A%252F%252Fwww.sirenergies.com%252Farticle%252Fhydrogene-blanc-avenir-energie-propre%252F
- [64] Mr. RAHAL ISHAK and Mr. BENSLIMANI CHAKIB, “Estimation de la production d’hydrogène vert à partir de l’énergie éolienne,” Master, UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1, blida, 2023.
- [65] AMMOUNE SMAIL, Conception de la chaîne logistique de l’hydrogène: Application au réseau de transport Routier dans la ville de, and Ouargla, “Conception de la chaîne logistique de l’hydrogène: Application au réseau de transport Routier dans la ville de Ouargla,” Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Ouargla, 2017.
- [66] Y. BOUHAMED and A. M. TALEB, “LA PRODUCTION D’HYDROGÈNE PAR LES RESSOURCES RENOUVELABLES (PHOTOVOLTAÏQUE),” master, mohamed khider, Biskra, 2021. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/21816/1/LA_PRODUCTION_D_HYDROGeNE.pdf
- [67] M. H. SIBOUKEUR, “Etude d’une installation de production d’hydrogène par voie photovoltaïque,” master, SAAD DAHLAB, BLIDA, 2012. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/15099/1/Untitled.pdf>
- [68] N. MAMACA, “Synthèse et Caractérisation de Matériaux Électrocatalytiques pour l’Activation de la Molécule d’Eau: Application dans une Anode d’Électrolyseur de Type PEM,” DOCTORAT, Sciences pour l’Environnement Gay Lussac, France, 2006. Accessed: Apr. 29, 2025. [Online]. Available: <https://nuxeo.edel.univ-poitiers.fr/nuxeo/site/esupversions/c166b275-c990-45e0-b9b1-48da9a39cfdc>
- [69] L. FAYARD, “Étude d’un système d’électrolyse fractionnée basé sur l’électrochimie du zinc pour la production d’hydrogène: Caractérisation et modélisation électrochimique Étude Technique, Économique et Environnementale,” DOCTORAT, Toulouse INP, Toulouse, 2024. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: https://theses.hal.science/tel-04609140v1/file/FAYARD_Leo.pdf

- [70] A. Mansuy, "Etude de la durabilité de cellules d'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température," DOCTORAT, Bordeaux 1, France, 2012. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: https://theses.hal.science/file/index/docid/912328/filename/Mansuy_Aurore_T1209.pdf
- [71] "UNITE DE PRODUCTION D'HYDROGENE." CENTRALE A CYCLE COMBINE DE TERGA3 \times 400 MW, 2007.
- "Hydroxyde de potassium," L'Élémentarium. Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: <https://lelementarium.fr/product/hydroxyde-de-potassium>
- [72] "Hydroxyde de potassium," L'Élémentarium. Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: <https://lelementarium.fr/product/hydroxyde-de-potassium/>

