

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de Diplôme de Master en Génie Mécanique
option Energétique et Installation énergétique et turbomachine

**Estimation de la production d'hydrogène vert à
partir de l'énergie éolienne**

Promoteur :

Dr Aiche Hamane Lilia

Réalisé par :

Mr. RAHAL ISHAK

Mr. BENSLIMANI

CHAKIB

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, on remercie Allah le tout puissant qui nous a donné la foi, la patience et la chance d'étudier et suivre, le chemin de la science.

Nos très vifs remerciements s'adressent à notre promotrice Dr Aiche Hamane Lilia pour ses conseils lucides et pertinents, sa patience et son précieux suivi tout au long de la réalisation de ce travail. Ses qualités pédagogiques et humaines, et ses compétences nous ont apporté un encadrement déterminant dans ce travail.

Nos plus sincères gratitudes à Dr Ketfi Omar le chef département de génie mécanique l'Université de Blida 1 pour son aide.

Nous remercions chacun des membres du jury d'avoir consacré une partie de leur temps à la lecture de ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Nos remerciements s'étendent à tous nos enseignants et les membres du département Génie de mécanique l'université de Blida.

En fin nous tenons à remercions toutes les personnes, qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce projet.

Dédicace :

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet. Le chemin parcouru n'a pas été facile, mais grâce à leur soutien, j'ai pu atteindre mes objectifs.

À mes parents qui ont toujours cru en moi et m'ont encouragé à poursuivre mes rêves. Votre amour inconditionnel et vos sacrifices ont été ma principale source de motivation.

À mes amis et camarades de classe et toute la promo 2023/2024, pour les moments de partage, les discussions passionnantes et les fous rires. Vous avez rendu cette aventure encore plus mémorable.

Enfin, je dédie ce projet à moi-même, pour avoir persévéré, pour avoir appris et pour avoir grandi tout au long de ce processus.

Merci à tous ceux qui ont contribué à ce succès. Que cette dédicace soit le reflet de ma reconnaissance éternelle.

RAHAL ISHAK

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail

A ma source de bonheur

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères frères et sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur

Soutien moral.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Merci d'être toujours là pour moi.

A tous les personnes qui me connaissent de près ou de loin.

BENSLIMANI CHAKIB

Résume

La production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables a connu un développement important ces dernières années en raison de son importance dans le domaine de l'énergie et des multiples domaines de son utilisation.

Dans cette étude, nous avons estimé la production d'hydrogène vert à partir de l'énergie éolienne dans quatre régions spécifiques d'Algérie : Oran, Alger, Adrar et Annaba. Les données analysées ont été obtenues à l'aide du programme TRNSYS. Nos résultats montrent une variation significative de la production d'hydrogène d'une région à l'autre, attribuée principalement aux différences de vitesse des vents locales.

Mots clés : hydrogène vert, Energie éolienne, Electrolyse de l'eau

ملخص

إنتاج الهيدروجين من مصادر الطاقة المتجددة قد شهد تطوراً كبيراً في السنوات الأخيرة نظراً لأهميته في مجال الطاقة ومجالات استخدامه المتعددة.

في هذه الدراسة، قمنا بتقدير إنتاج الهيدروجين الأخضر من طاقة الرياح في أربع مناطق محددة في الجزائر: وهران، الجزائر، أدرار وعنابة. تم الحصول على البيانات المحللة باستخدام برنامج TRANSYS. تُظهر نتائجنا تبايناً كبيراً في إنتاج الهيدروجين من منطقة إلى أخرى، وهذا راجع بشكل رئيسي إلى اختلافات في سرعة الرياح المحلية.

الكلمات المفتاحية : الهيدروجين الأخضر, طاقة الرياح, التحليل الكهربائي للماء

Abstract

Hydrogen production from renewable energy sources has seen significant development in recent years due to its importance in the energy field and the multiple areas of its use.

In this study, we estimated the production of green hydrogen from wind energy in four specific regions of Algeria: Oran, Algiers, Adrar, and Annaba. The analyzed data was obtained using the TRNSYS program. Our results show a significant variation in hydrogen production from one region to another, attributed mainly to differences in local wind speeds.

Keywords : Green hydrogen, wind energy, water electroliysis

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste de tableau	
Liste des figures	
Abréviations	
Nomenclature	
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Généralité sur l'hydrogène

1.1. Introduction	3
1.2. Caractéristique d'hydrogène	3
1.3. Production d'hydrogène	5
3.1.1. Production de l'hydrogène à partir des combustibles fossiles	6
1.3.1.1 Production de l'hydrogène à partir du gaz naturel	7
1.3.1.2 Production de l'hydrogène à partir du charbon	8
1.3.2 Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau	9
1.3.3. Production de l'hydrogène par nucléaire	10
1.3.4. Production de l'hydrogène par énergie renouvelable	11
1.3.4.1 Production de l'hydrogène à partir de la biomasse (agriculture, forêts, algues, déchets organiques)	12
1.3.4.2 Production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire thermique	14
1.4. Utilisation de L'hydrogène	15
1.4.1. Utilisations industrie	15
1.4.2. Utilisation énergétique	16
1.4.2.1. Énergie électrique	16
1.4.2.2. Carburant et transport	17
1.4.2.3. Stockage d'énergie	18
1.4.3. Utilisation en L'agriculture	18
1.5. Stockage de l'hydrogène	19
1.5.1. Stockage sous forme gazeuse	19
1.5.2. Stockage de liquides	20
1.5.3. Stockage solide	21

1.6. Transport d'hydrogène	21
1.6.1. Pipeline	22
1.6.2. Transport routier	23
1.6.3. Transport maritime	24
1.7. Les avantages et les inconvénients	25
1.7.1. Les avantage	25
1.7.2. Inconvénients	26
Conclusion	27

Chapitre 2 : Système de production d'hydrogène vert à partir de l'énergie éolienne

2.1 Introduction	29
2.2 Electrolyse de l'eau pour production l'hydrogène vert	30
2.2.1 Définition d électrolyseur	31
2.2.2 Les composant d'un électrolyseur	32
2.2.2.1 Electrode	32
2.2.2.2 Electrolyte	33
2.2.2. 3 Cellule d'électrolyse	33
2.2.3 Principe de fonctionnement	34
2.2.4 Les différentes technologies d électrolyseur	35
2.2.4.1 Electrolyseurs alcalins	35
2.2.4.2 Electrolyseurs <i>PEM</i>	36
2.2.4.3 <i>Electrolyseurs à haute température</i>	37
2.2.5 Avantages et inconvenants des différentes technologies d'électrolyse	38
2.3 Aspects thermodynamiques	38
2.4 Aspect énergétique	39
2.4 L'énergie éolienne	40
2.4.1 Potentiel éolien disponible	41
2.4.2 Système de conversion de l'énergie éolienne	41
2.5 Système de production d'hydrogène a partir de l'énergie éolienne	42
2.5.1 Description du système	43
Conclusion.....	45

Chapitre 3 : la simulation de la production d'hydrogène vert à partir de l'énergie éolienne à l'aide de logiciel TRNSYS

3.1 Introduction	47
3.2 Présentation du logiciel TRNSYS	47
3.3 Présentation du logiciel Meteonorm	48
3.4 Caractéristiques de Meteonorm	48
3.5 Système de production de l'hydrogène à partir l'énergie éolienne	49
3.6 Configuration du système de production d'hydrogène par TRNSYS	50
3.7 Potentiel éolien	51
3.7.1 Site d'Adrar	52
3.7.2 Site d'Alger	52
3.7.3 Site d'Annaba	53
3.7.4 Site d'Oran	53
3.8 Dimensionnement de système éolienne_H2	54
3.8.1 Choix de l'aérogénérateur	54
3.8.2 L'électrolyseur	55
3.8.3 Le convertisseur	55
3.9 Simulation de la production d'hydrogène	516
Conclusion	64
Conclusion générale	66
Référence	

Liste de tableau :

Tableau 1.1 : Quelques propriétés physiques d'hydrogène.....	4
Tableau 1.2 : Couleurs hydrogène selon la technologie de production, les sources d'énergie utilisées et l'empreinte carbone.....	6
Tableau 2.1 : Avantages et inconvénients des différentes technologies d'électrolyse.....	38
Tableau 3.1 : les composants du système de production.....	51
Tableau 3.2 : Caractéristiques de L'éolienne de 500kw.....	54
Tableau 3.3 : Propriétés de L'électrolyseur.....	55
Tableau 3.4 : Propriétés de convertisseur.....	55

Liste des figures

Figure 1.1 : Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde.....	6
Figure 1.2 : Réacteurs nucléaire pour la production de l'hydrogène (a) Réacteur à refroidissement au sodium liquide (b) Réacteur à gaz à haute température	11
Figure 1.3 : Mécanismes mis en jeu lors du processus de gazéification de biomasse.....	13
Figure 1.4 : Production de biomasse en aérobie	13
Figure 1.5 : Filières de synthèse de l'hydrogène par voie solaire	14
Figure 1.6 : Consommation mondiale d'hydrogène en 2022	15
Figure 1.7 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC.....	17
Figure 1.8 : Une voiture BMW iX5 qui fonctionne à l'hydrogène	18
Figure 1.9 : Les formes principales de stockage l'hydrogène	19
Figure 1.10 : Les différents types de réservoirs gazeux.....	20
Figure 1.11 : Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide	20
Figure 1.12 : Stockage de l'hydrogène à l'état solide	21
Figure 1.13 : pipeline pour le transport de hydrogene.....	22
Figure 1.14 : Camion pour le transport d'hydrogène	24
Figure 1.15 : Transporter de l'hydrogène par bateau	24
Figure 1.16 : La-catastrophe-du-hindenburg	26
Figure 2.1 : La production l'hydrogène vert.....	31
Figure 2.2 : Trois unités d'électrolyseur alcalin Enertrag de 2 MW unitaire – 1000 m3/h..	32
Figure 2.3 : Schémas des cellules électrochimiques ; a : cellule à un compartiment et deux électrodes; b: cellule à deux compartiments et deux électrodes	33
Figure 2.4 : Principe de l'électrolyse alcaline	35
Figure 2.5 : Principe schématique de l'électrolyse PEM	36
Figure 2.6 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte	37
Figure 2.7 : Parque d'énergie éolienne	40
Figure 2.8 : Les composants de la nacelle	42
Figure 2.9 : système de production d'Hydrogène.....	43
Figure 3.1 : interface de logiciel TRNSYS.....	48
Figure 3.2 : vue des stations météo algériennes disponible sur le logiciel Meteonorm	49
Figure 3.3 : Schéma de l'électrolyse de l'eau alcaline alimentée par l'énergie éolienne.....	49
Figure 3.4 : Configuration du système éolienne_H2 dans TRNSYS studio	50
Figure 3.5 : Evolution horaire de la vitesse de vent pendant un an à Oran	52
Figure 3.6 : Evolution horaire de la vitesse de vent pendant un an à Alger	52
Figure 3.7 : Evolution horaire de la vitesse de vent pendant un an à Annaba.....	53

Figure 3.8 : Evolution horaire de la vitesse de vent pendant un an à Adrar.....	53
Figure 3.9: courbe de puissance de l'éolienne de 500kW	54
Figure 3.10 : La production d'hydrogène à l'hiver sur le site de l'Adar.....	56
Figure 3.11 : La production d'hydrogène au printemps sur le site de l'Adar.....	56
Figure 3.12 : La production d'hydrogène a été sur le site de l'Adar	57
Figure 3.13 : La production d'hydrogène à l'automne sur le site de l'Adar	57
Figure 3.14: La production d'hydrogène à l'hiver sur le site d'Alger.....	58
Figure 3.15 : La production d'hydrogène au printemps sur le site d'Alger	58
Figure 3.16 : La production d'hydrogène a été sur le site d'Alger.....	59
Figure 3.17 : La production d'hydrogène à l'automne sur le site d'Alger	59
Figure 3.18 : La production d'hydrogène à l'hiver sur le site d'Annaba	60
Figure 3.19 : La production d'hydrogène au printemps sur le site d'Annaba	60
Figure 3.20 : La production d'hydrogène a été sur le site d'Annaba	61
Figure 3.21 : La production d'hydrogène à l'automne sur le site d'Annaba.....	61
Figure 3.22 : La production d'hydrogène à l'hiver sur le site d'Oran	62
Figure 3.23 : La production d'hydrogène au printemps sur le site d'Oran	62
Figure 3.24 : La production d'hydrogène a été sur le site d'Oran	63
Figure 3.25 : La production d'hydrogène à l'automne sur le site d'Oran.....	63
Figure 3.26 : Production d'hydrogène en hiver sur des sites sélectionnés	64
Figure 3.27 : Production d'hydrogène en printemps sur des sites sélectionnés	64
Figure 3.28 : Production d'hydrogène en été sur des sites sélectionnés	65
Figure 3.29 : Production d'hydrogène en l'automne sur des sites sélectionnés	65
Figure 3.30 : la production annuelle d'hydrogène.....	66

Abréviations :

SMR	Reformage du méthane à la vapeur
PAC	pile à combustible
Pem	proton exchange membrane
Pemfe	proton exchange membrane fuel cells)
WGS	Water gas shift
DC	Courant continue
MPPT	maximum power point tracking
AC	Courant alternative
CdTe	tellurure de cadmium
PR	ratio de performance
AWE	Anion exchange membranes
H ₂ O	l'eau
O	Oxygène
H	Hydrogène
PFC	Power Factor Correction
CVC	chauffage, ventilation et climatisation
IMET	Inorganic Membrane Electrolysis Technology
HER	Hydrogen evolution reaction
SOE	Solid oxide water electrolysis

Nomenclature :

E°	Constante indépendante de la concentration des ions	(V)
I	Courant	A
F	Constante de Faraday	(C.mol ⁻¹)
R	Constante molaire des gaz parfaits	(j.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
σ	Activité des espèces oxydées et réduites	(j.mol ⁻¹)
ΔG	La variation d'énergie libre	J
ΔH	Enthalpie de réaction	J
AH(T,P)	La variation d'enthalpie associée à la réaction	J/°C
AS(T,P)	La variation d'entropie associée à la réaction.	(V)
E_{cel}	La tension d'électrolyse	
η	Rendement faradique	(%)
P	La pression totale	Pa
T	Température	K
E_c	Energie cinétique	(Joules)
V	La vitesse	(m/s)
A	Surface	(m ²)
λ	La vitesse spécifique	(m/s)
Ω	La vitesse angulaire du rotor de l'éolienne	(rad/s)
C_p	Le coefficient de puissance	
V_d	Vitesse de démarrage	(m/s)
V_n	Vitesse nominale	(m/s)
V_m	Vitesse d'arrêt de la machine	(m/s)

Introduction générale

Introduction générale

Le monde assiste actuellement à une transition majeure vers le remplacement des combustibles fossiles par des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement. Ce changement est dû à plusieurs facteurs, notamment l'intérêt croissant pour le changement climatique et l'impact néfaste des émissions de gaz à effet de serre sur l'environnement et la santé publique. La dépendance continue aux combustibles fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, est l'un des principaux contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre. Par conséquent, le développement d'un système énergétique mondial durable reposant principalement sur des sources d'énergie renouvelables est devenu une nécessité urgente. Les énergies renouvelables, en particulier l'hydrogène vert, font partie des alternatives durables aux combustibles fossiles. L'hydrogène vert est produit à partir de sources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne, et est converti en énergie utilisable par le processus d'électrolyse de l'eau. L'un des principaux avantages de l'hydrogène vert est qu'il ne produit aucune émission polluante lorsqu'il est utilisé comme carburant, mais se transforme uniquement en eau pure. De nombreux pays à travers le monde ont reconnu l'importance de l'hydrogène vert et ont commencé à investir dans le développement de cette technologie et à étendre son utilisation. La compétition internationale pour l'hydrogène vert est en cours pour fournir des solutions énergétiques durables et réaliser l'indépendance énergétique. L'Algérie joue un rôle important dans ce contexte, car elle dispose de ressources riches en énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire et éolienne, qui offrent la possibilité de produire de l'hydrogène vert en grandes quantités.

Ce travail a été organisé et structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous aborderons les généralités sur l'hydrogène, ses méthodes de production, ses utilisations, ses méthodes de stockage et de transport, et enfin ses avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous examinerons l'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène vert, ainsi que ses principes de fonctionnement et ses différents types. Nous aborderons également le sujet de l'énergie éolienne.

Dans le troisième chapitre, nous effectuerons la simulation de la production d'hydrogène vert à partir de l'énergie éolienne en utilisant le logiciel TRNSYS sur les sites suivants : Annaba, Alger, Oran et Adrar.

Enfin nous présentons une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur

l'hydrogène

1.1. Introduction

Au cours des dernières années, en réponse aux préoccupations croissantes concernant l'impact environnemental de la consommation d'énergie et les inquiétudes importantes concernant la sécurité des réserves de combustibles fossiles, les services énergétiques basés sur l'hydrogène ont attiré une attention croissante. L'hydrogène, en tant que vecteur d'énergie, peut théoriquement remplacer toutes les formes d'énergie utilisées aujourd'hui et fournir des services énergétiques à tous les secteurs de l'économie. Nous commencerons ce chapitre par une description générale des caractéristiques de l'hydrogène. Pour une meilleure compréhension, il est important de noter que l'hydrogène est un transporteur d'énergie et non une source d'énergie primaire, et en tant qu'élément le plus abondant sur terre, il est essentiel d'avoir des technologies capables de le produire. C'est pourquoi nous aborderons les différentes méthodes de production de l'hydrogène. Ensuite, nous aborderons les utilisations de l'hydrogène dans plusieurs domaines différents, et enfin, nous conclurons ce chapitre en discutant des méthodes de stockage et de transport de l'hydrogène.

1.2. Caractéristique d'hydrogène

L'hydrogène est le premier élément du tableau périodique et l'élément le plus abondant dans l'univers. Cependant, l'hydrogène lui-même existe rarement sous forme libre dans l'univers. Au lieu de cela, l'hydrogène existe généralement sous forme de liaisons avec d'autres éléments. Par exemple, l'hydrogène dans l'eau (H_2O) existe sous forme de molécules liées à des atomes d'oxygène. L'hydrogène se trouve également dans de nombreux autres composés tels que les hydrocarbures, l'ammoniac et les protéines. Dans des conditions normales, l'hydrogène est un gaz incolore, inodore et insipide composé de molécules diatomiques H_2 . Un atome d'hydrogène, symbolisé par le symbole H, est constitué d'un noyau avec une charge positive et un électron. Son numéro atomique est 1 et son poids atomique est 1,00797. Il existe trois isotopes de l'hydrogène : le protium, qui est l'isotope le plus courant avec un poids de 1 et se trouve dans plus de 99,98 % de l'hydrogène naturel, le deutérium avec un poids de 2 et trouvé dans la nature à un taux estimé à environ 2 %, et le tritium de poids 3 qui est un isotope radioactif présent en petites quantités dans la nature. L'hydrogène peut également être produit artificiellement par diverses réactions nucléaires. , nous découvrirons certaines propriétés de l'hydrogène [1].

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur)	10 800 kJ/Nm ³ 119 930 kJ/kg (gaz naturel 50 020 kJ/kg) 3.00 kWh/Nm ³ 33,33 kWh/kg
PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur : inclut l'énergie de vaporisation de l'eau)	12 770 kJ/Nm ³ 141 860 kJ/kg 3,55 kWh/Nm ³ 39,41 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1,34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273K	0,08988 kg/Nm ³ (gaz naturel 0,6512 kg/Nm ³)
Densité liquide à 20,3K	70,79 kg/m ³
Chaleur spécifique (Cp)	14 266 J/kg.K (293K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg.K
Conductivité thermique du gaz	0,1897 W/(m.K)
Chaleur d'évaporation	445,4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3,92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2,1
Masse atomique	1,0079
Constante du gaz	4 124,5 J/kg.K
Température de solidification	14,01K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20,268K
Température critique	33,30K
Température d'auto inflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2 318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75 (gaz naturel 5,3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (gaz naturel 6,3-13,5)
Energie minimale d'inflammation (μJ)	20 (gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³ de gaz)	2,02 (gaz naturel 7,03)
Surpression de détonation	14,7 bars (gaz naturel 16,8 bars)
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 cm ² /s (gaz naturel 0,16)

Tableau 1.1 : Quelques propriétés physiques d'hydrogène. [1]

1.3. Production d'hydrogène

L'hydrogène n'existe pas dans la nature à l'état élémentaire, mais doit être produit à partir de sources telles que l'eau, le gaz naturel, etc. Mais dans le processus de production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en compte, qui sont :

- **Matières premières** : L'hydrogène est généralement extrait de l'eau, des hydrocarbures (par exemple méthane, méthanol, etc.) ou des deux ;
- **Énergie nécessaire à la production** : Cette énergie peut également être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolien, géothermie, etc.) ;
- **Processus de production** : Il existe de nombreux procédés utilisant l'énergie quantique comme la photolyse, l'énergie électrique comme l'électrolyse ou l'énergie thermique comme le procédé thermochimique. Pour la plupart des opérations, il en existe plusieurs types et leur nombre est relativement important. Cependant, des pertes d'énergie se produisent généralement au cours de son processus de production.

Il existe plusieurs technologies pour produire de l'hydrogène. Certaines de ces technologies ont mûri pour une production commerciale, tandis que d'autres en sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des pétroles lourds, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau font partie des procédés de production d'hydrogène au stade industriel ou manufacturier [2].

L'hydrogène produit est classé en différentes couleurs en fonction de la source d'énergie utilisée dans le processus de production, des matières premières utilisées et de la quantité d'émissions de carbone qui y sont associées (comme le montre Tableau 1.2). Par exemple, l'hydrogène vert fait référence à l'hydrogène produit à partir de l'électrolyse de l'eau à partir d'énergie électrique renouvelable telle que l'énergie solaire ou éolienne. La couleur verte symbolise la durabilité et la préservation de l'environnement.

Il est nécessaire d'évaluer différentes méthodes de production d'hydrogène en fonction de la source d'énergie utilisée et de la quantité d'émissions de carbone qui y est associée. L'hydrogène vert suscite l'intérêt de répondre aux besoins énergétiques de manière respectueuse de l'environnement et durable à long terme. Se concentrer sur le développement et l'utilisation de ces méthodes durables contribue à réduire les émissions de carbone et à améliorer la qualité de l'environnement [3].

	Couleur	Technologie	Source d'énergie ou d'électricité	Empreinte carbone ¹	Terminologie ²
Production via biomasse	Hydrogène vert	Thermolyse	Biomasse	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
	Hydrogène vert	Vaporeformage	Biométhane	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
Production via l'électricité	Hydrogène vert	Electrolyse de l'eau	Solaire, éolienne, hydroélectricité	Minimale (< 2 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène renouvelable
	Hydrogène rose		Nucléaire	Minimale (< 2 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène jaune		Réseau électrique (FR)	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
Production via les énergies fossiles	Hydrogène bleu	Vaporeformage Gazéification	Gas naturel Charbon + CCUS	Basse (< 3 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène bas-carbone
	Hydrogène turquoise	Pyrolyse	Gaz naturel	Noir de carbone (co-produit)	/
	Hydrogène gris	Vaporeformage		Elevée (~ 11 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène marron	Gazéification	Lignite	Très élevée (> 20 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné
	Hydrogène noir		Charbon bitumineux	Très élevée (> 20 kgCO ₂ /kgH ₂)	Hydrogène carboné

Tableau 1.2 : Couleurs hydrogène selon la technologie de production, les sources d'énergie utilisées et l'empreinte carbone. [3]

3.1.1. Production de l'hydrogène à partir des combustibles fossiles

Actuellement, environ 96 % de l'hydrogène est produit à partir de sources d'énergie fossiles telles que le gaz naturel et le charbon. Cependant, le problème des émissions de dioxyde de carbone générées comme sous-produit du processus de production d'hydrogène doit être résolu. Par conséquent, ce carbone doit être capté pour garantir la durabilité du processus de production sans émissions nocives. L'économie et la faisabilité de ces procédés dépendent de la comparaison des systèmes centralisés et distribués de production d'hydrogène [4].

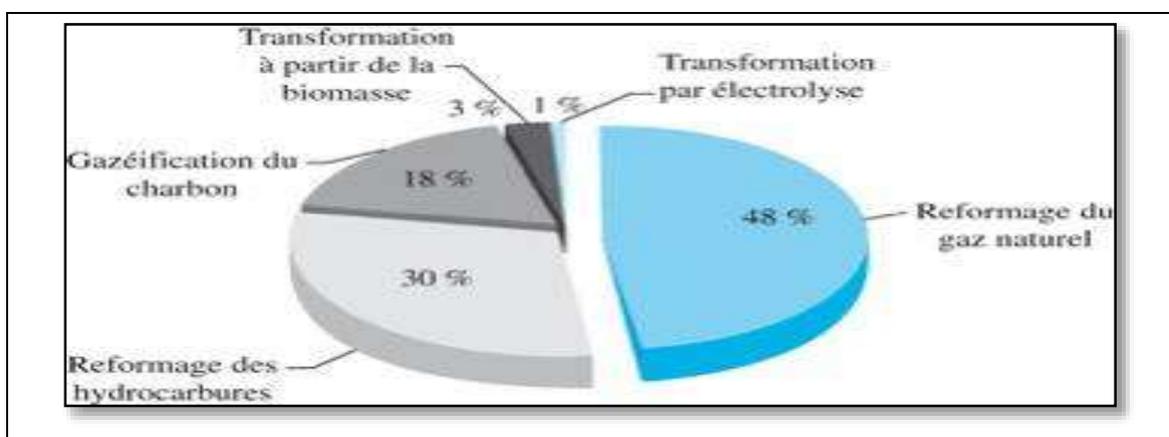


Figure 1.1 : Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde. [4]

1.3.1.1 Production de l'hydrogène à partir du gaz naturel

Le gaz naturel est la source la plus utilisée et la plus efficace pour produire de l'hydrogène, mais il faut être conscient que ce processus produit du dioxyde de carbone comme sous-produit. Par conséquent, des mesures sont nécessaires pour capter et stocker ce gaz afin de parvenir à un processus de production d'hydrogène durable et exempt d'émissions nocives. Il existe trois procédés chimiques différents qui permettent de produire de l'hydrogène à partir du gaz naturel : le méthane transformé à la vapeur d'eau, l'oxydation partielle et le reformage autothermique. La faisabilité et l'efficacité de ces procédés varient en fonction du type et de la répartition des installations utilisées pour produire de l'hydrogène, qu'ils soient centralisés ou distribués.

Le reformage à la vapeur est actuellement la technologie la plus populaire et la plus économique dans laquelle le méthane et la vapeur d'eau sont convertis en hydrogène et monoxyde de carbone dans une réaction qui nécessite de la chaleur.



Cette réaction est obtenue par combustion d'une partie du méthane provenant du gaz d'alimentation. La réaction nécessite une température comprise entre 700 et 850 degrés Celsius et une pression comprise entre 3 et 25 bars pour que la réaction se produise

Le dioxyde de carbone résultant peut également être converti en dioxyde de carbone et en hydrogène par réaction de conversion eau-gaz.



Dans le processus d'oxydation partielle du gaz naturel, l'hydrogène est produit par combustion partielle du méthane avec de l'oxygène. (Le propane et le méthanol peuvent être utilisés comme substitut au méthane.)



La réaction d'oxydation partielle étant exothermique, aucun chauffage externe du réacteur n'est nécessaire et peut être conçu de manière plus efficace. Le dioxyde de carbone résultant peut également être converti en atome d'hydrogène [4].

1.3.1.2 Production de l'hydrogène à partir du charbon

L'hydrogène est produit à partir du charbon dans un processus appelé gazéification, où le charbon est converti en gaz. Il en existe plusieurs types, notamment en lit fixe, en lit fluidisé ou à flux piégé.

En pratique, les procédés à flux restreint à haute température sont préférés pour maximiser la gazéification du carbone, évitant ainsi la formation de quantités importantes de charbon, de goudron et de phénols. Une réaction typique du processus est donnée dans l'équation (1.4), où le carbone est converti en monoxyde de carbone et en hydrogène.



Cette réaction étant endothermique, un supplément de chaleur est nécessaire, comme c'est le cas pour le reformage du méthane. Le dioxyde de carbone est converti en CO_2 et H_2 par une réaction de conversion eau-gaz, décrite dans l'équation (1.5).



La production d'hydrogène à partir du charbon est un défi commercial mature, mais il est plus complexe que la production d'hydrogène à partir de gaz naturel. De plus, le coût de production de l'hydrogène à partir du charbon est également plus élevé. Cependant, étant donné l'abondance du charbon dans différentes régions du monde et son potentiel d'utilisation comme source d'énergie, il vaut la peine d'explorer le développement de technologies propres pour produire de l'hydrogène à partir du charbon. [4].

Il est à noter que la capture et le stockage du dioxyde de carbone sont des étapes essentielles pour parvenir à une production durable d'hydrogène bleu, sans émissions polluantes. Le dioxyde de carbone est un sous-produit important de la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles, et sa capture est nécessaire pour réduire son impact sur l'environnement.

Il existe trois principales options pour capturer le dioxyde de carbone dans le processus de combustion :

1. Post-combustion : Dans cette méthode, le dioxyde de carbone est extrait des gaz d'échappement de la combustion dans les turbines à vapeur classiques ou les centrales électriques à cycle combiné (CCGT). Le procédé de l'amino est souvent utilisé à cette fin. Les

gaz d'échappement contiennent de l'azote, des oxydes d'azote, de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone et du monoxyde de carbone (CO).

2. Pré-combustion : Le dioxyde de carbone peut être capturé lors de la production d'hydrogène par divers procédés, comme mentionné précédemment.

3. Combustion à l'oxygène : Cela implique la conversion du combustible fossile en chaleur dans un processus de combustion en utilisant de l'oxygène pur comme oxydant. Les gaz d'échappement ou la vapeur d'eau sont principalement composés de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau, ce qui permet de les séparer facilement par condensation de la vapeur d'eau. Dans les systèmes de post-combustion et de combustion à l'oxygène, l'électricité est produite dans les centrales électriques à turbine à vapeur classiques et les centrales électriques à cycle combiné (CCGT). Cette électricité peut ensuite être utilisée pour l'électrolyse de l'eau afin de produire de l'hydrogène. Cependant, il est important de noter que si la capture et le stockage du dioxyde de carbone sont appliqués à des processus de conversion d'énergie relativement peu efficaces et que l'électricité est utilisée pour l'électrolyse de l'eau, le rendement global de la conversion du combustible en hydrogène ne dépassera pas 30 %. Le dioxyde de carbone capturé peut être stocké dans des formations géologiques telles que les champs pétroliers et gaziers, ainsi que dans les aquifères. Cependant, la faisabilité et la durabilité du stockage permanent du dioxyde de carbone sont des facteurs clés pour le succès des efforts de décarbonisation [4].

1.3.2 Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau

Un électrolyseur est un dispositif utilisé pour effectuer une électrolyse, un processus chimique qui sépare les composants d'une substance à l'aide d'un courant électrique. En général, il comporte deux électrodes plongées dans une solution électrolytique. Lorsque le courant passe à travers cette solution, des réactions chimiques se produisent aux électrodes, générant ainsi des produits gazeux ou d'autres produits chimiques. Dans le cas de l'électrolyse de l'eau, par exemple, l'eau est séparée en oxygène et en hydrogène. Les électrolyseurs sont utilisés dans divers domaines, notamment pour la production d'hydrogène comme carburant propre et dans des applications industrielles telles que la production de produits chimiques et le traitement des métaux.

1.3.3. Production de l'hydrogène par nucléaire

Une autre possibilité pour produire de l'hydrogène est d'utiliser l'énergie nucléaire. Ces dernières années, des réacteurs de quatrième génération ont été étudiés, considérés comme plus sûrs et permettant de réduire la consommation de combustible nucléaire et la production de déchets, ainsi que d'économiser de l'électricité et de produire de l'hydrogène. Douze pays travaillent sur cette technologie innovante, dont la France, les États-Unis, le Japon et le Royaume-Uni.

Certaines des technologies étudiées sont un réacteur refroidi avec de l'eau supercritique et un réacteur à neutrons rapides à refroidissement avec un choix sodium liquide ou alliage de plomb liquide (figure A). Un réacteur à gaz à très haute température et un réacteur à sels fondus sont également à l'étude (figure B).

Les températures élevées de cette technologie permettent à l'eau de se décomposer en hydrogène et oxygène. Quant au Japon et aux États-Unis, ils travaillent plutôt à utiliser un réacteur refroidi au sodium liquide. Toutefois, cette technologie ne sera disponible commercialement que vers 2030-2040.

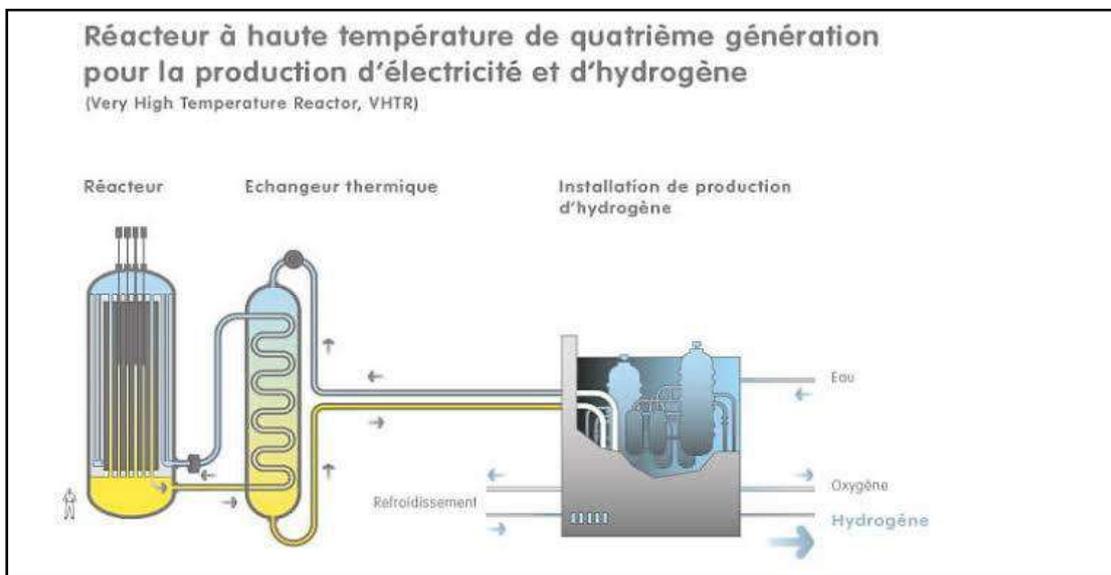
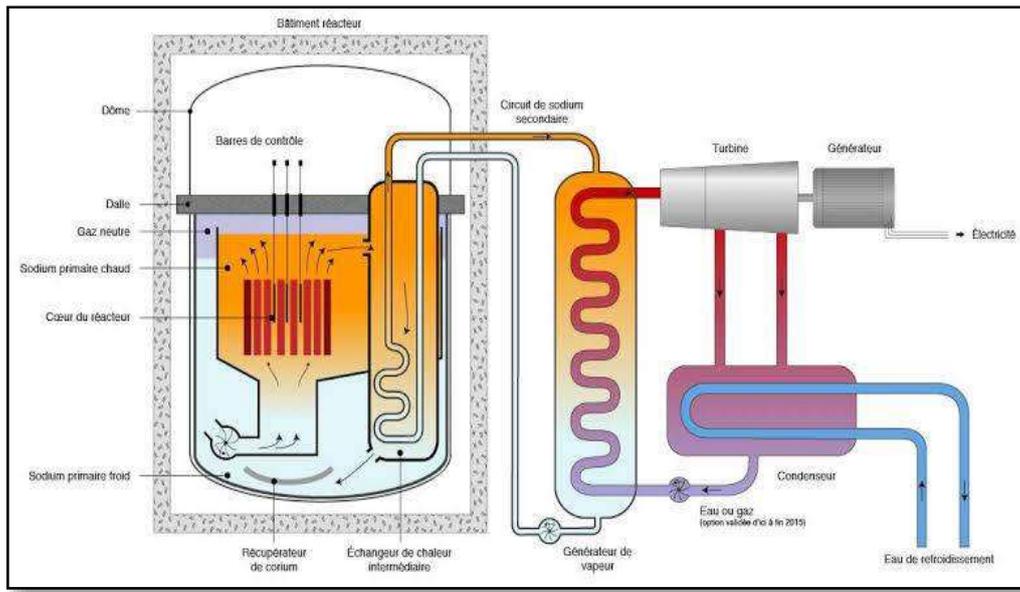


Figure 1.2 : Réacteurs nucléaires pour la production de l'hydrogène (a) Réacteur à refroidissement au sodium liquide (b) Réacteur à gaz à haute température. [6]

1.3.4. Production de l'hydrogène par énergie renouvelable

De nombreux auteurs ont convenu que ni combustibles fossiles, ni nucléaire ne peuvent satisfaire les besoins en électricité existants et ne peuvent pas fournir de l'énergie de neutralité climatique suffisante pour les voies probables pour la production d'hydrogène à long terme. La biomasse, hydraulique et géothermique même leur matière première peut être estimée avec précision, mais ils ont un potentiel limité et ils ne sont pas toujours neutres pour le climat [6].

1.3.4.1 Production de l'hydrogène à partir de la biomasse (agriculture, forêts, algues, déchets organiques)

Les procédés utilisés sont basés sur la gazéification de la biomasse de manière similaire à la production d'hydrogène à partir du charbon et comprennent la gazéification à la vapeur, la gazéification à débit restreint et des techniques plus avancées telles que la gazéification de l'eau supercritique, les cycles thermochimiques et la conversion des matières premières. Cependant, aucun de ces concepts n'a atteint le stade expérimental de la production d'hydrogène.

La conversion de la biomasse en hydrogène est un domaine de recherche et développement commun entre la production d'hydrogène et la production de biocarburants. Les technologies de gazéification et de pyrolyse sont prometteuses pour la production d'hydrogène à partir de biomasse à moyen terme. Il est nécessaire d'étudier les besoins énergétiques et d'explorer d'autres méthodes basées sur la biomasse humide.

Des matières premières non raffinées de qualité inégale sont utilisées dans la production de biomasse, et les méthodes de production varient en fonction du type de culture, de l'emplacement et des variations climatiques. La présence de carburants irréguliers rend l'innovation technologique difficile, car les carburants de mauvaise qualité nécessitent des systèmes de conversion avancés. Il est nécessaire d'améliorer la production et la préparation du carburant pour obtenir des produits plus cohérents et de haute qualité selon des normes communes. Les systèmes à grande échelle sont compatibles avec des carburants peu coûteux et de mauvaise qualité, tandis que les petites usines nécessitent une qualité et une uniformité de carburant supérieures. Cette relation et les différences particulières qui peuvent être compatibles avec chaque technologie doivent être mieux comprises [6].

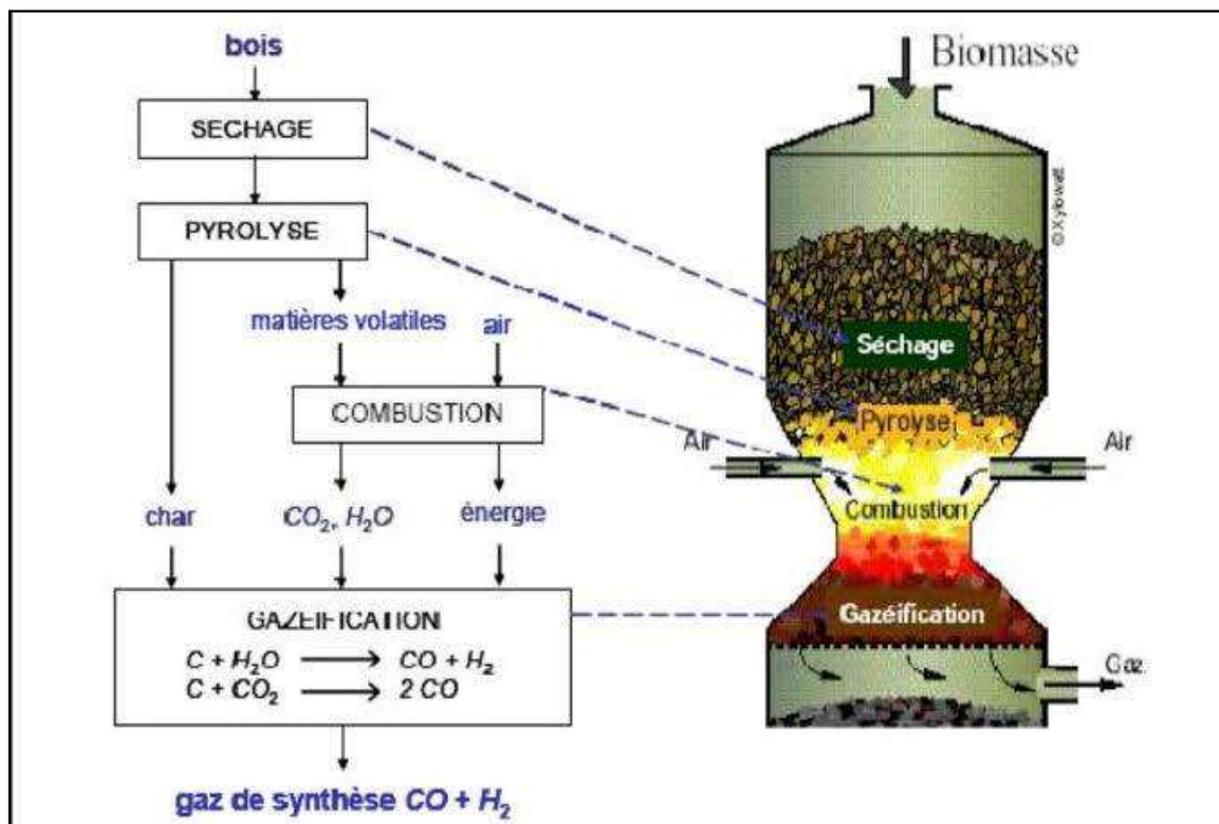


Figure 1.3 : Mécanismes mis en jeu lors du processus de gazéification de biomasse. [6]

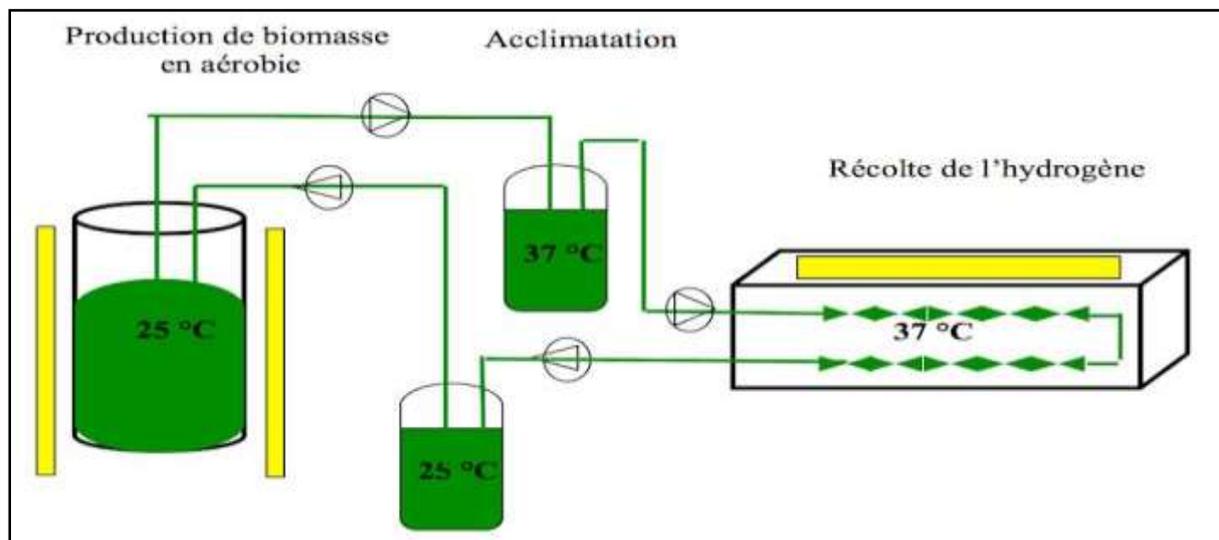


Figure 1.4 : Production de biomasse en aérobie. [6]

1.3.4.2 Production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire thermique

Les procédés de production d'hydrogène solaire font principalement appel à des procédés thermochimiques, photoélectrochimiques et électrolytiques.

Les processus thermochimiques reposent sur la conversion du rayonnement solaire en chaleur à des températures élevées allant de 200°C à 2 000°C. Grâce à son rendement supérieur à 70 %, cette chaleur primaire est convertie en énergie hydrogène. Les concentrateurs solaires peuvent être utilisés comme une alternative idéale pour les pays disposant d'abondantes ressources solaires.

Quant aux processus photoélectrochimiques, ils dépendent d'une cellule de photolyse qui, exposée à la lumière (photon), décompose l'eau en oxygène et hydrogène. Cette cellule photoélectrochimique est constituée d'une électrode photosensible placée dans un électrolyte ou de l'eau.

Le processus de photolyse est caractérisé par la technologie du secteur photovoltaïque, car il ne nécessite pas la transmission de courant électrique entre l'installation solaire photovoltaïque et les installations de production d'hydrogène, mais la conversion s'effectue directement par hydrolyse, ce qui conduit à une efficacité accrue.

Quant aux procédés d'électrolyse, ils reposent sur la séparation de l'eau en hydrogène et oxygène à l'aide d'un courant électrique continu traversant un électrolyte placé entre deux électrodes [7].

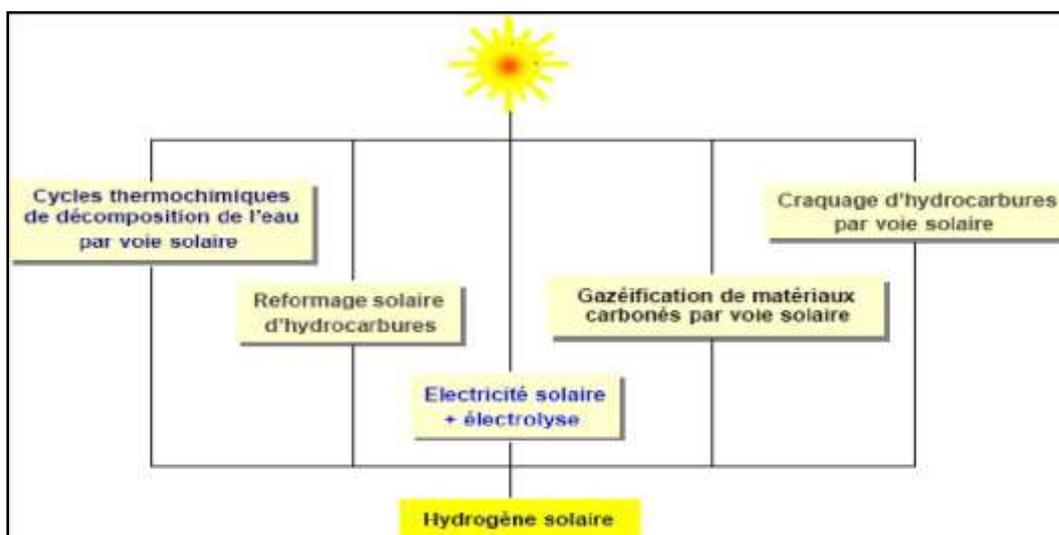


Figure 1.5 : Filières de synthèse de l'hydrogène par voie solaire. [7]

1.4. Utilisation de L'hydrogène

L'hydrogène est considéré comme une source d'énergie prometteuse et a de multiples utilisations dans de nombreux secteurs, dont l'industrie il est utilisé comme matière première dans la fabrication de l'ammoniac et du méthanol et dans les opérations de raffinage du pétrole. Il est également utilisé dans le secteur de l'énergie, des transports et même de l'agriculture, en plus de ses nombreuses autres utilisations.

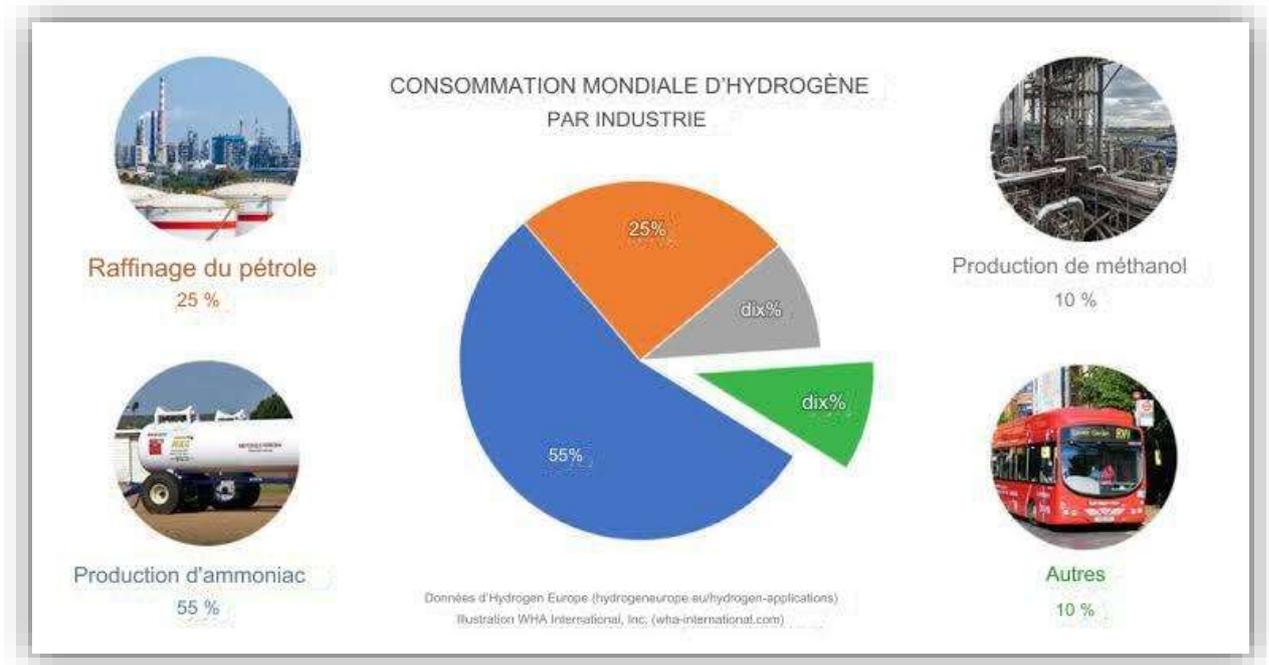


Figure. 1.6 : Consommation mondiale d'hydrogène en 2022. [7]

1.4.1. Utilisations industrie

L'hydrogène a de nombreuses utilisations dans l'industrie, en particulier dans l'industrie chimique. Plus de 55 % de l'hydrogène produit aujourd'hui est utilisé pour fabriquer de l'ammoniac, nécessaire à la fabrication d'engrais, et pour raffiner les produits pétroliers afin d'éliminer le soufre des carburants. La quantité restante est utilisée pour d'autres productions chimiques, la synthèse des plastiques, certains processus dans les industries du verre, de l'acier et du métal, ainsi que pour la fabrication de circuits imprimés électroniques. Environ 60 millions de tonnes d'hydrogène sont produites chaque année dans le monde [8].

Chauffage et refroidissement, deux procédés fréquemment utilisés dans l'industrie, les chaudières à hydrogène peuvent remplacer les chaudières à gaz naturel pour chauffer les

bâtiments. Cependant, l'utilisation de l'hydrogène dans les infrastructures de distribution de gaz naturel existantes se heurte à des défis liés à la compatibilité des matériaux et aux caractéristiques de combustion. Des progrès ont été réalisés dans la modification des brûleurs à gaz naturel pour s'adapter aux mélanges d'hydrogène, mais des recherches et des développements sont nécessaires avant que l'hydrogène ne devienne largement utilisable. Certaines centrales électriques prévoient d'utiliser un mélange de gaz naturel et d'hydrogène dans leurs turbines à combustion. Des études et des évaluations sont également nécessaires pour déterminer la compatibilité de l'utilisation de mélanges d'hydrogène dans les appareils de chauffage. Les réfrigérateurs à absorption peuvent également être alimentés à l'hydrogène, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre [11].

1.4.2. Utilisation énergétique

L'hydrogène est considéré comme l'un des carburants énergétiques propres et durables les plus importants. L'hydrogène est utilisé dans plusieurs applications dans ce domaine, notamment :

1.4.2.1. Énergie électrique

L'hydrogène peut être utilisé dans les piles à combustible pour produire de l'électricité de manière propre. L'hydrogène est converti en électricité et en eau uniquement lorsqu'il est utilisé dans ces cellules, réduisant ainsi les émissions de gaz nocifs.

Piles à combustibles : Les piles à combustible constituent un moyen très simple de réaliser une combustion électrochimique contrôlée de l'hydrogène et de l'oxygène, tout en produisant simultanément de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Cela se produit par une réaction chimique universellement connue, comme le montre la figure 1.7 :



Cette réaction se produit au sein d'une structure constituée principalement de deux électrodes (anode et cathode) séparées par un matériau isolant. C'est la réaction opposée à l'électrolyse de l'eau.

Cette réaction électrochimique peut se produire dans une large plage de températures. L'intermédiaire de réaction chimique impliqué varie en fonction du niveau de température spécifique et des propriétés des matériaux de l'électrolyte et de l'électrode, mais le principe général de la réaction ne change pas [9].

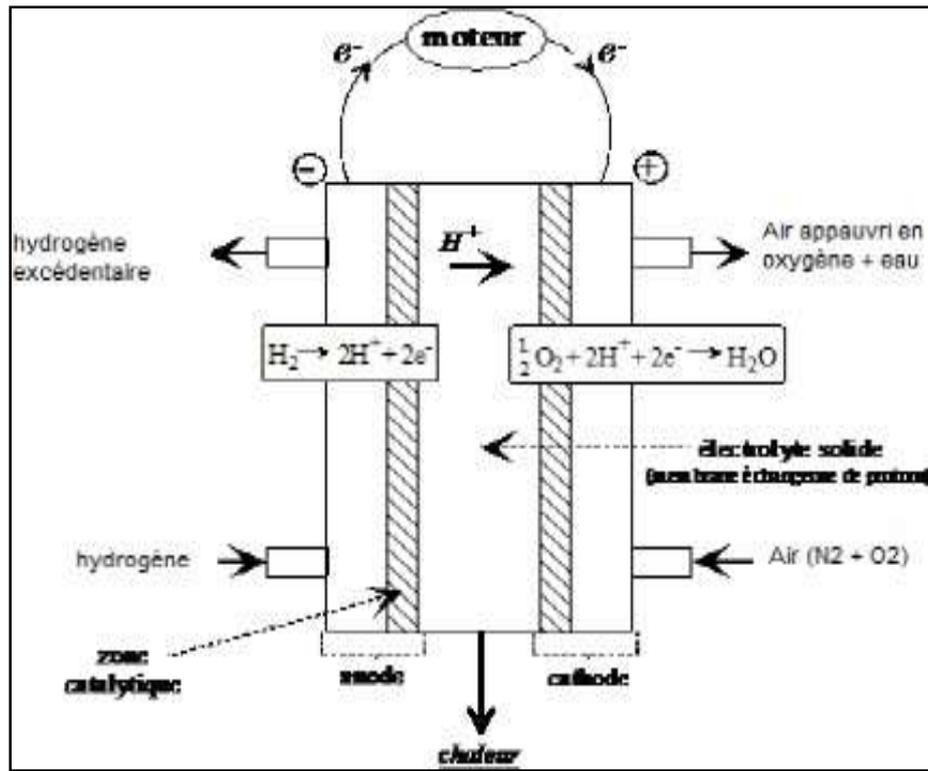


Figure 1.7 : Schéma de principe d'une pile à combustible PEMFC [9]

1.4.2.2. Carburant et transport

Les véhicules équipés de moteurs à combustion interne alimentés à l'hydrogène constituent un modèle innovant d'utilisation de l'hydrogène comme carburant alternatif. L'hydrogène est utilisé comme carburant dans ces moteurs pour obtenir plusieurs avantages environnementaux et économiques.

Les moteurs à combustion interne à hydrogène sont plus propres que les moteurs à combustion interne à combustible fossile traditionnels. Lorsque l'hydrogène est brûlé dans ces moteurs, seule de la vapeur d'eau est formée comme sous-produit, ce qui signifie qu'aucun gaz nocif ni émission de carbone n'est libéré. De plus, l'hydrogène est un carburant renouvelable et illimité, car il peut être produit à partir de sources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne. L'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans les moteurs à combustion interne nécessite certains défis techniques et infrastructurels. Par exemple, les systèmes de stockage d'hydrogène doivent être développés de manière sûre et hautement efficace, et leur utilisation nécessite une infrastructure dédiée pour fournir des stations de ravitaillement et des réseaux appropriés pour le transport et la distribution de l'hydrogène [10].



Figure 1.8 : Une voiture BMW iX5 qui fonctionne à l'hydrogène. [10]

1.4.2.3. Stockage d'énergie

L'hydrogène est utilisé dans les systèmes de stockage d'énergie, où il peut être stocké efficacement pour être utilisé ultérieurement. Et utilisez-le en cas de besoin. L'hydrogène est stocké sous forme liquide, gazeuse ou solide, c'est donc une solution à de nombreux défis dans le domaine de l'énergie, comme fournir de l'électricité pendant les périodes de forte demande ou stocker l'énergie générée à partir de sources d'énergie renouvelables pour en bénéficier lorsque les sources ne sont pas disponibles [11].

1.4.3. Utilisation en L'agriculture

La nouvelle agriculture se concentre sur l'utilisation de l'hydrogène et en fait une part importante de celui-ci. Des recherches antérieures ont montré que l'hydrogène peut affecter la croissance et le développement des cultures et d'autres organismes d'importance agricole. L'hydrogène peut également améliorer la qualité des produits agricoles et modifier positivement la composition du sol. L'agronomie de l'hydrogène est une tendance importante dans la nouvelle agriculture et repose sur la coopération de diverses disciplines. Les recherches

futures incluent la culture de l'hydrogène dans des environnements particuliers tels que les îles, les récifs coralliens, les avions et même l'espace [11].

1.5. Stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène est un enjeu majeur dans le domaine des énergies renouvelables, car il existe trois principales manières de le stocker, d'améliorer sa densité et de rendre son utilisation plus efficace sous forme liquide, gazeuse ou solide, et chacune certains d'entre eux présentent différents avantages et défis.



Figure 1.9 : Les formes principales de stockage l'hydrogène. [12]

1.5.1. Stockage sous forme gazeuse

Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse est la méthode la plus courante. Pour augmenter la densité énergétique volumétrique, l'hydrogène gazeux est comprimé sous haute pression pouvant atteindre 700 bars. Cela entraîne une perte d'énergie de 20 % lors de la compression et des exigences de sécurité strictes, ainsi que des pénalités de coûts dues à la quantité et au prix des matériaux composites nécessaires pour renforcer la structure du réservoir de stockage. Par conséquent, la recherche se concentre sur le développement de matériaux composites moins chers sans compromettre les capacités volumétriques et gravitationnelles du réservoir. Deux approches sont adoptées pour améliorer les performances de cette technologie : modifier la forme du réservoir cylindrique typique pour maximiser l'espace limité du véhicule et comprimer l'hydrogène à 77 K, la température de l'azote liquide, pour stocker plus de gaz dans le même volume. . Le choix de la gaine contact hydrogène est essentiel pour chaque type de réservoir. ; Un matériau à haute limite élastique (acier) sera privilégié. Cependant,

pour les réservoirs de types III et IV, le revêtement fait office de barrière à l'hydrogène. [12]

Type	I	II	III	IV
Schéma				
Réalisation				

Figure 1.10 : Les différents types de réservoirs gazeux [12]

1.5.2. Stockage de liquides

L'hydrogène est converti de l'état gazeux à l'état liquide en le refroidissant à une température de 20 K sous pression atmosphérique. Bien que l'hydrogène à l'état liquide ait une capacité volumétrique plus élevée qu'à l'état gazeux (70 kg/m³ contre 39 kg/m³ pour un stockage à 700 bar), le stocker à cette basse température entraîne d'inévitables pertes thermiques et une évaporation quotidienne de l'hydrogène. , cette évaporation peut être réduite à 1% par jour grâce à un système d'isolation ultra performant. Le principal inconvénient du stockage liquide est l'énergie nécessaire pour liquéfier l'hydrogène, qui représente 30 % de la capacité thermique minimale de l'hydrogène, ce qui affecte négativement l'efficacité globale du stockage de cette méthode.

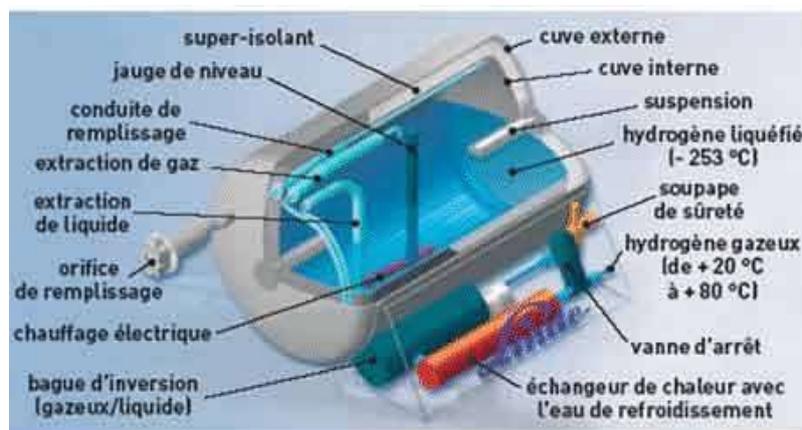


Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide.

Figure 1.11 : Schéma de structure d'un réservoir d'hydrogène liquide. [12]

1.5.3. Stockage solide

Stocker l'hydrogène sous forme solide, c'est-à-dire le conserver à l'intérieur d'une autre substance, est une direction de recherche prometteuse. Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques basées sur les mécanismes d'absorption ou de désorption de l'hydrogène par une substance.

Un exemple en est la formation de composés métalliques solides par la réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption se traduit par une réaction chimique réversible entre l'hydrogène et les atomes des substances qui composent ces substances. Les matériaux et alliages à base de magnésium sont parmi les plus prometteurs dans ce domaine.

Cependant, seule une faible quantité d'hydrogène est stockée dans ces matériaux, ce qui constitue un inconvénient actuel de cette technologie. Par exemple, les meilleurs matériaux à ce jour permettent un rapport poids d'hydrogène sur poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3 %. Avant de pouvoir envisager des applications à grande échelle, des facteurs tels que la vitesse cinétique, la température et la pression dans les cycles de charge et de décharge d'hydrogène dans ces matériaux doivent également être contrôlés [12].

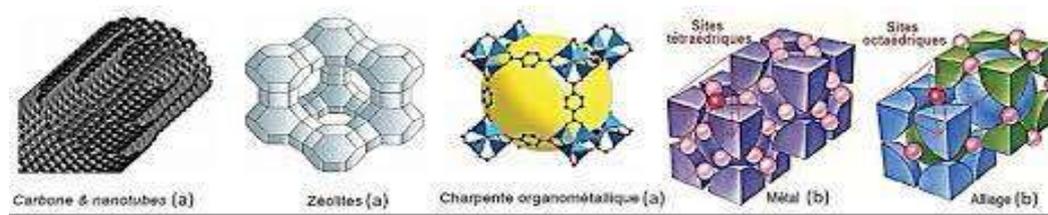


Figure 1.12 : Stockage de l'hydrogène à l'état solide [12]

1.6. Transport d'hydrogène

Le succès économique de l'hydrogène dépend en grande partie de l'émergence de systèmes de transport efficaces. Les transports jouent un rôle crucial dans la création d'un marché pour l'hydrogène dans diverses régions. Il permet le transport de l'hydrogène au sein et entre les régions. La meilleure méthode de livraison (telle que des camions compressibles, des camions de liquide cryogénique ou des gazoducs) sera sélectionnée en fonction de facteurs géographiques et des marchés locaux, tels que la

densité de population, la taille et le nombre de stations de ravitaillement, ainsi que la prévalence des véhicules à pile à combustible. Selon les experts, les principaux facteurs influençant le choix du mode de transport de l'hydrogène sont l'utilisation prévue, la quantité d'hydrogène à transporter, la densité de la demande et la distance entre le site de production et les points de livraison. Différentes méthodes de distribution d'hydrogène sont disponibles et la meilleure doit être choisie en fonction de la situation locale.

1.6.1. Pipeline

Une option possible pour le transport de l'hydrogène consiste à utiliser un réseau de pipelines reliant différents fournisseurs et consommateurs, que l'hydrogène soit sous forme liquide ou gazeuse. Les systèmes de canalisations pour l'hydrogène liquide sont techniquement réalisables, mais leur construction nécessite des investissements en capital très élevés et des exigences techniques spécifiques, ce qui les rend actuellement non viables pour la distribution d'hydrogène liquide dans les stations-service. En revanche, les systèmes de canalisations d'hydrogène comprimé nécessitent des coûts d'investissement inférieurs à ceux des systèmes de canalisations de liquides. Cependant, la construction d'un tube pour un petit nombre de stations-service pourrait ne pas être économiquement viable. La construction de pipelines nécessite une demande stable et des infrastructures importantes pour parvenir à de faibles coûts de transport. Si le tuyau est destiné à une application à petit volume, les coûts de construction du tuyau augmenteront considérablement, ce qui entraînera une augmentation des prix du carburant. Par conséquent, une analyse détaillée des coûts est nécessaire avant de décider de mettre en œuvre un système de tuyauterie.



Figure 1.13 : pipeline pour le transport de hydrogéné. [13]

1.6.2. Transport routier

Lorsqu'il s'agit de transporter l'hydrogène sous forme gazeuse, il est soumis à une forte pression pour augmenter la capacité de stockage et est transporté par camions utilisant des bouteilles à haute pression ou des remorques contenant des tubes. Lorsqu'il est transporté sous forme liquide, des réservoirs à double paroi spécialement isolés sont utilisés pour éviter l'évaporation du liquide. Les remorques à tuyaux sont une option pour transporter de l'hydrogène gazeux, car elles sont constituées de plusieurs cylindres en acier composite, placés sur un cadre de protection. Les capacités de ces remorques varient en fonction du nombre de canalisations présentes, puisqu'elles peuvent transporter entre 63 et 460 kg d'hydrogène et que les pressions de fonctionnement varient entre 20 et 60 MPa. Quant à l'hydrogène liquide, des réservoirs spécialement isolés à double paroi sont utilisés pour éviter l'évaporation du liquide. Dans certains cas, des barrières thermiques à l'azote sont utilisées pour refroidir la paroi extérieure du réservoir et réduire les pertes de chaleur excessives. Les camions-citernes peuvent transporter entre 360 et 4 300 kg d'hydrogène liquide, et les taux d'évaporation varient entre 0,3 % et 0,6 % par jour. Cependant, un défi majeur dans le transport de l'hydrogène liquide réside dans les exigences particulières en matière d'isolation, ainsi que dans les pertes de pompage et de refroidissement tout au long du trajet.

L'hydrogène peut également être distribué par chemin de fer. Les bouteilles de stockage d'hydrogène liquide cryogénique, similaires à celles utilisées dans le transport routier, sont utilisées pour le transport ferroviaire. Ces bouteilles ont une plus grande capacité et peuvent transporter jusqu'à 9 100 kg d'hydrogène. Le transport ferroviaire offre de nombreux avantages, tels qu'une plus grande capacité de chargement et une plus grande efficacité énergétique par rapport au transport routier. Il est cependant important de prendre en compte les coûts d'infrastructure et la disponibilité ferroviaire pour déterminer la faisabilité économique de ce mode de transport de l'hydrogène. L'utilisation du transport ferroviaire dans la distribution d'hydrogène nécessite une décision réfléchie accompagnée d'une analyse coûts-avantages détaillée.



Figure 1.14 : Camion pour le transport d'hydrogène. [13]

1.6.3. Transport maritime

L'hydrogène peut également être transporté à travers les océans à l'aide de navires équipés de réservoirs spéciaux et d'installations portuaires adaptées. Il convient toutefois de noter que le transport d'hydrogène gazeux par bateau n'est pas économiquement réalisable en raison de sa taille et de sa couverture. Dans le cadre du programme de recherche mondial du Global Energy Network, des évaluations détaillées ont été réalisées pour explorer la possibilité de mettre en œuvre de grands projets d'exportation d'hydrogène liquide. Ces projets visent à exploiter les avantages de l'hydrogène en tant que source d'énergie propre et renouvelable à l'échelle mondiale [13].



Figure 1.15 : Transporter de l'hydrogène par bateau. [13]

1.7. Les avantages et les inconvénients

Pour approfondir ce sujet, analysons les avantages et les inconvénients de l'hydrogène en tant que source d'énergie.

1.7.1. Les avantages :

1. Carburant à haut rendement : 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.
2. Nature non toxique, non polluante et durable : L'hydrogène est un gaz non toxique et non polluant. Lorsqu'il brûle, il se transforme en eau simple (H₂O) et ne rejette donc pas de polluants nocifs pour l'environnement ou l'air. 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.
3. Légèreté et facilité de transport : L'hydrogène est considéré comme le gaz le plus léger et présente un stockage élevés. Il peut être stocké et transporté dans des réservoirs spéciaux et utilisé dans diverses applications.
4. Sécurité d'utilisation : L'hydrogène a des limites d'explosion étroites dans l'air, ce qui augmente la sécurité de son utilisation dans les espaces ouverts. De plus, les conditions requises pour qu'une explosion se produise reposent sur une concentration élevée et sont difficiles à réaliser, ce qui renforce la sécurité de son utilisation.
5. Flexibilité de conversion : L'hydrogène peut être utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des moteurs et des appareils électriques. Il peut également être utilisé dans l'industrie des biocarburants, le stockage d'énergie et bien d'autres applications.

1.7.2. Inconvénients :

1. Abondance d'hydrogène : L'hydrogène est très abondant sur Terre sous forme atomique (lié à l'oxygène et au carbone dans de nombreux cas), mais est rare sous forme moléculaire H₂. L'hydrogène doit être produit artificiellement, ce qui nécessite le recours à des sources d'énergie et à des procédés de conversion supplémentaires. De plus, l'hydrogène a une densité énergétique volumétrique sept fois inférieure à celle du gaz naturel, ce qui signifie qu'il a besoin de plus d'espace pour stocker de grandes quantités. [14]

2. Sécurité : L'hydrogène est un gaz inodore et incolore, ce qui le rend difficile à détecter normalement en cas de fuite. De plus, l'hydrogène brûle avec une flamme invisible, ce qui augmente les risques pour la sécurité. Toutefois, des mesures de sécurité strictes peuvent être prises pour contrôler et réduire ces risques.

3. Image générale : L'hydrogène souffre d'une mauvaise image dans l'opinion publique, qui peut être injustifiée, en raison de certains incidents célèbres comme l'accident du bateau Hindenburg survenu le 6 mai 1937, qui est un célèbre accident impliquant un énorme ballon aérien appelé le bateau Hindenburg, qui utilisait l'hydrogène comme combistable. Lors du débarquement du bateau dans la ville de Lakehurst dans le New Jersey, aux États-Unis, un incendie s'est déclaré dans l'air et a fait exploser le bateau et l'a complètement détruit. Cet accident a entraîné la mort de 36 personnes.

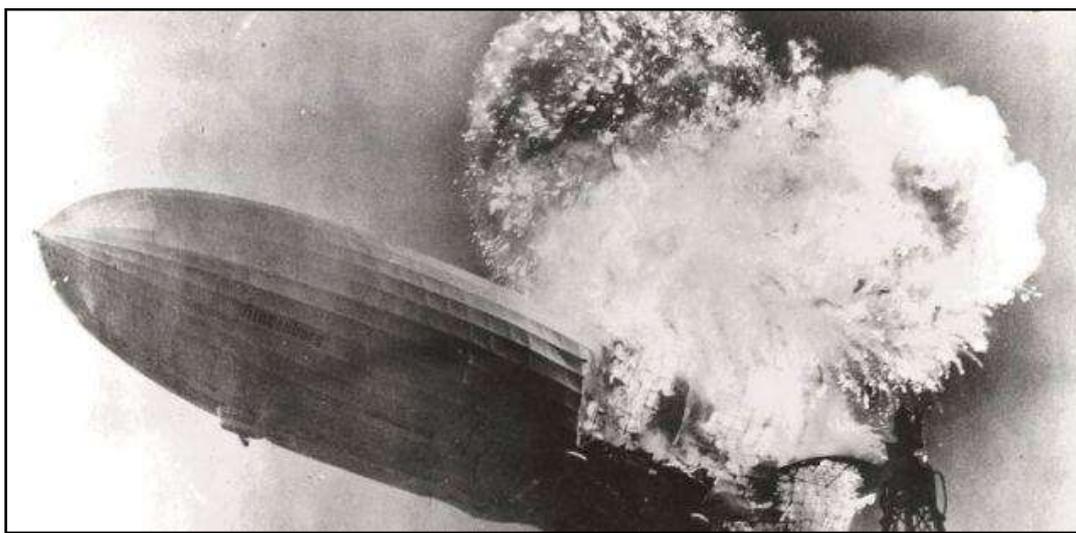


Figure 1.16 : La-catastrophe-du-hindenburg [14]

Aussi a été utilisé l'hydrogène dans la fabrication de bombes à hydrogène. Il faut cependant noter que ces incidents sont le résultat de circonstances particulières et ne sont pas représentatifs de l'efficacité et de la sécurité de l'utilisation de l'hydrogène dans ses applications modernes.

Malgré ces inconvénients, il faut comprendre que l'hydrogène est toujours considéré comme une option prometteuse en tant que source d'énergie durable. La technologie évolue et les techniques de production, de stockage et d'utilisation sûre de l'hydrogène s'améliorent, contribuant ainsi à promouvoir son adoption dans le cadre d'un avenir énergétique durable [14].

Conclusion

Dans notre travail, nous avons examiné le processus de production d'hydrogène vert en utilisant l'énergie éolienne comme source principale. L'hydrogène vert est considéré comme une forme d'énergie propre en raison de son mode de production sans émissions de carbone. Ses applications sont diverses et incluent notamment le stockage d'énergie renouvelable, le secteur des transports et l'industrie chimique.

Chapitre II
Systeme de production
d'hydrogène vert à partir de
l'énergie éolienne

2.1 Introduction

Dans le contexte actuel de transition énergétique, la production d'hydrogène par des sources renouvelables suscite un intérêt croissant. Parmi ces sources, l'énergie éolienne se distingue par son potentiel considérable et sa capacité à générer de l'électricité de manière propre et durable. Ce chapitre explore la production d'hydrogène via l'énergie éolienne, une technologie prometteuse pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

L'hydrogène, en tant que vecteur énergétique, offre une solution polyvalente pour le stockage et la distribution d'énergie renouvelable. Il peut être produit par électrolyse de l'eau, un processus qui nécessite de l'électricité pour dissocier les molécules d'eau en hydrogène et oxygène. Lorsqu'elle est alimentée par des sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie éolienne, l'électrolyse devient une méthode de production d'hydrogène sans émissions de carbone, renforçant ainsi son attrait dans la lutte contre le changement climatique.

Ce chapitre vise à fournir une analyse détaillée des différentes étapes et technologies impliquées dans la production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne. Nous aborderons les principes fondamentaux de l'électrolyse, les caractéristiques et les performances des éoliennes, ainsi que les défis techniques et économiques associés à l'intégration de ces deux technologies. De plus, nous examinerons les perspectives futures et les avancées récentes qui pourraient améliorer l'efficacité et la viabilité économique de cette méthode de production d'hydrogène.

En explorant ces aspects, ce chapitre mettra en lumière les opportunités et les obstacles que représente l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'hydrogène, et contribuera à une meilleure compréhension de son rôle potentiel dans un avenir énergétique durable.

2.2 Electrolyse de l'eau pour production l'hydrogène vert

L'électrolyse se caractérise comme une technologie de transition qui a le potentiel de révolutionner le paysage énergétique et de faciliter la production d'hydrogène vert, ce qui soutient la transition vers l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. Les électrolyseurs sont la pierre angulaire de la production de ce carburant à faibles émissions. à leur capacité à diviser l'eau (H₂O) en ses éléments, les composants, l'hydrogène (H₂) et l'oxygène (O₂), sont produits à partir d'électricité renouvelable (solaire ou éolienne), ce qui conduit à une production d'hydrogène propre et durable.

L'importance de l'électrolyseur réside dans sa capacité à réaliser un processus d'analyse de l'eau efficace avec la consommation d'énergie la plus faible possible, ce qui réduit les coûts et améliore la faisabilité de la production d'hydrogène vert. Il est également considéré comme une alternative propre aux processus traditionnels de production d'hydrogène, qui peuvent dépendre de combustibles fossiles et provoquer des émissions nocives.

Production de ce carburant à faibles émissions. à leur capacité à diviser l'eau (H₂O) en ses éléments, les composants, l'hydrogène (H₂) et l'oxygène (O₂), sont produits à partir d'électricité renouvelable (solaire ou éolienne), ce qui conduit à une production d'hydrogène propre et durable.

L'importance de l'électrolyseur réside dans sa capacité à réaliser un processus d'analyse de l'eau efficace avec la consommation d'énergie la plus faible possible, ce qui réduit les coûts et améliore la faisabilité de la production d'hydrogène vert. Il est également considéré comme une alternative propre aux processus traditionnels de production d'hydrogène, qui peuvent dépendre de combustibles fossiles et provoquer des émissions nocives.

L'efficacité et le coût du processus d'électrolyse sont l'un des principaux défis de la production d'hydrogène vert. Son coût est estimé à environ 6 dollars par kilogramme, il est donc deux à trois fois plus cher que l'hydrogène bleu et la forme d'hydrogène la plus chère à produire. Produire, selon un rapport de décembre 2020 publié par l'Agence internationale des énergies renouvelables. Cependant, son coût devrait diminuer au cours des prochaines années à mesure que la technologie d'électrolyse s'améliore et que la portée de cette technologie s'étend aux niveaux de production industrielle, atteint la compétitivité financière et concurrence efficacement les méthodes traditionnelles de production d'hydrogène qui reposent sur des combustibles fossiles.

Par conséquent, nous devons nous concentrer sur le renforcement de la recherche et de l'innovation dans le domaine des technologies électrolytiques et sur l'amélioration de leur efficacité. En développant des technologies nouvelles et innovantes, nous pouvons réaliser des progrès significatifs dans la conversion de l'eau en hydrogène plus efficacement et à moindre coût. En y parvenant, nous pouvons réduire les coûts et rendre l'hydrogène vert plus attractif et plus compétitif sur le marché de l'énergie [15].

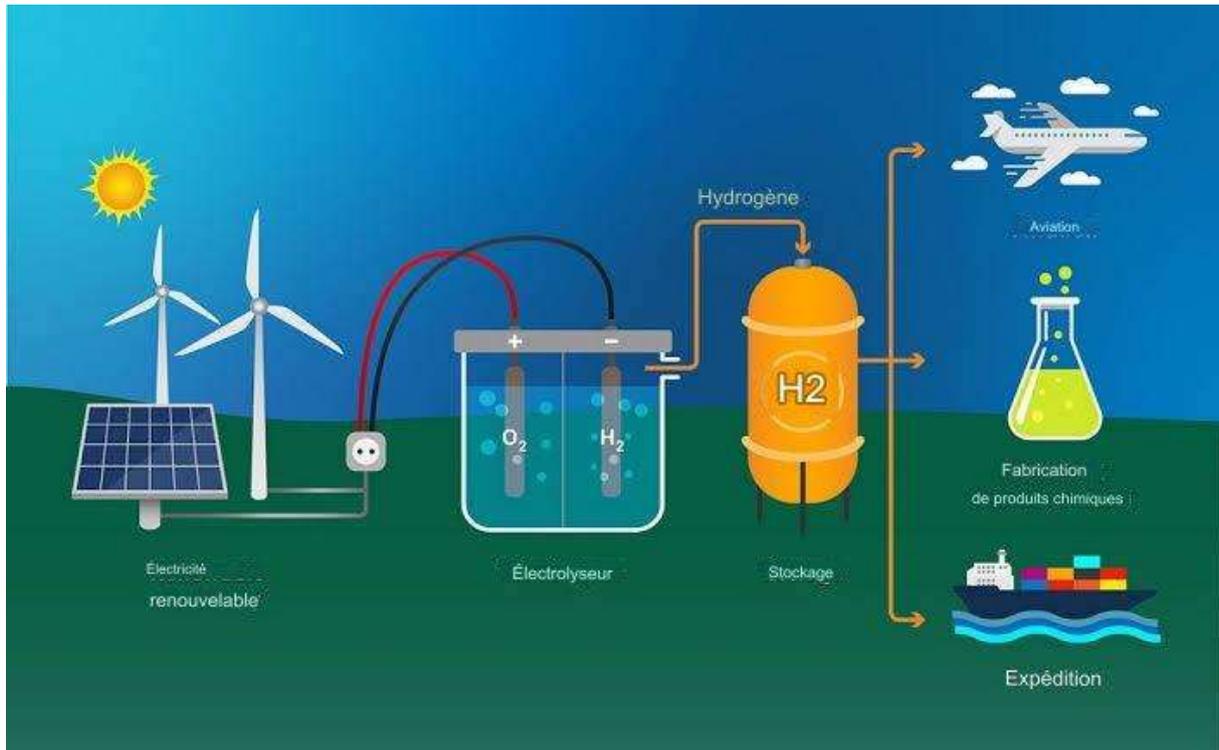


Figure 2.1 : La production l'hydrogène vert [15].

2.2.1 Définition d électrolyseur

An électrolyseur est un appareil qui utilise l'électricité pour diviser l'eau ou d'autres composants en leurs éléments constitutifs par électrolyse. L'électrolyse est une réaction chimique dans laquelle un courant électrique traverse une substance, l'amenant à se décomposer en ses composants de base.

Dans le cas de l'électrolyse de l'eau, un électrolyseur utilise un courant électrique pour diviser les molécules d'eau en gaz hydrogène et oxygène. L'hydrogène gazeux peut être stocké sous forme de gaz comprimé ou liquéfié. L'oxygène créé est relâché dans l'air ou capturé et stocké pour alimenter d'autres procédés industriels [16].



Figure 2.2 : Trois unités d'électrolyseur alcalin Enertrag de 2 MW unitaire – 1000 m³/h [16].

2.2.2 Les composant d'un électrolyseur

La forme de base d'une unité d'électrolyseur contient une cellule électrolytique avec deux électrodes - une cathode (charge négative) et une anode (charge positive) - et une membrane. Un système d'électrolyseur contient les empilements de cellules d'électrolyseur, les pompes, les événements, les réservoirs de stockage, une alimentation électrique, un séparateur et d'autres composants de fonctionnement [16].

2.2.2.1 Electrode

Une électrode est un système électrochimique composé d'un conducteur principalement électronique (métal ou composé métallique, conducteur ou semi-conducteur) en contact avec un conducteur ionique ou électrolyte (sel dissous dans l'eau). La zone où se produit le transfert de charges entre les deux types de conducteurs est appelée interface. Dans cette étude, l'électrode examinée est constituée d'un alliage métallique en contact avec une solution aqueuse (électrolyte) [16].

2.2.2.2 Electrolyte

Un électrolyte est une substance qui, une fois dissoutes dans l'eau, forme des ions et permet le passage d'un courant électrique. Les substances en questions peuvent être des sels, des acides ou des bases. Il existe des électrolytes liquides et solides. Les électrolytes liquides sont les électrolytes aqueux dans lesquels les ions proviennent d'un sel soluble. Les électrolytes solides sont des cristaux dans lesquels certains ions sont mobiles ou des polymères comme ceux utilisés dans les membranes échangeuses d'ions [15].

2.2.2.3 Cellule d'électrolyse

Avant d'aborder la notion de cellule d'électrolyse, il est essentiel de comprendre ce qu'est une chaîne ou cellule électrochimique. Une chaîne ou cellule électrochimique est formée par l'association d'au moins deux électrodes, reliées par au moins une solution d'électrolyte. Certaines cellules électrochimiques sont conçues pour être traversées par un courant électrique.

Une telle chaîne peut comporter un seul compartiment contenant deux électrodes plongées dans une même solution ou deux compartiments séparés par un poreux, un verre fritté, un diaphragme ou une membrane perméable aux ions (voir Figure 2.3) [17].

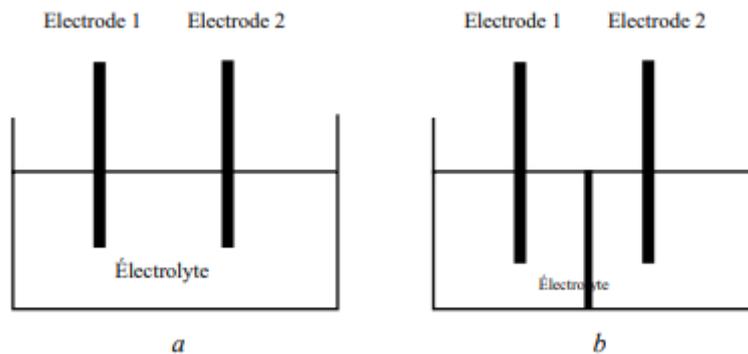


Figure 2.3 : Schémas des cellules électrochimiques ; a : cellule à un compartiment et deux électrodes; b: cellule à deux compartiments et deux électrodes [17].

2.2.3 Principe de fonctionnement [17]

Un électrolyseur fonctionne en utilisant une source d'alimentation électrique pour provoquer une réaction chimique non spontanée dans une solution ou un liquide contenant des ions libres (électrolyte). Lorsque le courant électrique passe à travers l'électrolyte, les ions positifs migrent vers la cathode (électrode négative) où ils subissent une réduction (gain d'électrons), tandis que les ions négatifs se dirigent vers l'anode (électrode positive) où ils subissent une oxydation (perte d'électrons). Par exemple, dans l'électrolyse de l'eau, l'électricité décompose l'eau en hydrogène et oxygène gazeux. Ce processus est utilisé dans diverses applications industrielles, telles que la production d'hydrogène, le raffinage des métaux, et la fabrication de produits chimiques.

– Réactions à l'Anode et à la Cathode

- **À l'Anode (électrode positive) :**

- Les ions négatifs de l'électrolyte migrent vers l'anode.
- Ces ions subissent une oxydation (perte d'électrons).
- Par exemple, dans l'électrolyse de l'eau : $2\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

- **À la Cathode (électrode négative) :**

- Les ions positifs de l'électrolyte migrent vers la cathode.
- Ces ions subissent une réduction (gain d'électrons).
- Par exemple, dans l'électrolyse de l'eau : $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

– Flux d'Ions et d'Électrons

- Les ions positifs se dirigent vers la cathode et acceptent des électrons.
- Les ions négatifs se dirigent vers l'anode et cèdent des électrons.
- Le courant électrique fourni par la source d'alimentation permet ce transfert d'électrons et d'ions, provoquant ainsi les réactions chimiques.

2.2.4 Les différentes technologies d'électrolyseur

À ce jour, trois types d'électrolyse sont en développement qui passent du stade de recherche en laboratoire à celui de commercialisation. Chaque type est caractérisé par l'électrolyte utilisé, ce qui affecte principalement l'efficacité et la praticité du processus [20].

2.2.4.1 Electrolyseurs alcalins

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique ainsi que pour la production de nombreux composés chimiques, dont le chlore. Ce type d'analyse profite des avancées de l'industrie dans ce domaine. Dans un électrolyseur alcalin, une solution aqueuse contenant de l'hydroxyde de potassium (KOH) est utilisée comme électrolyte. La présence d'ions hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+) assure la conduction ionique dans la cellule. Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites comme suit :

A l'anode : $2 \text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^-$

A la cathode : $2 \text{H}_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$

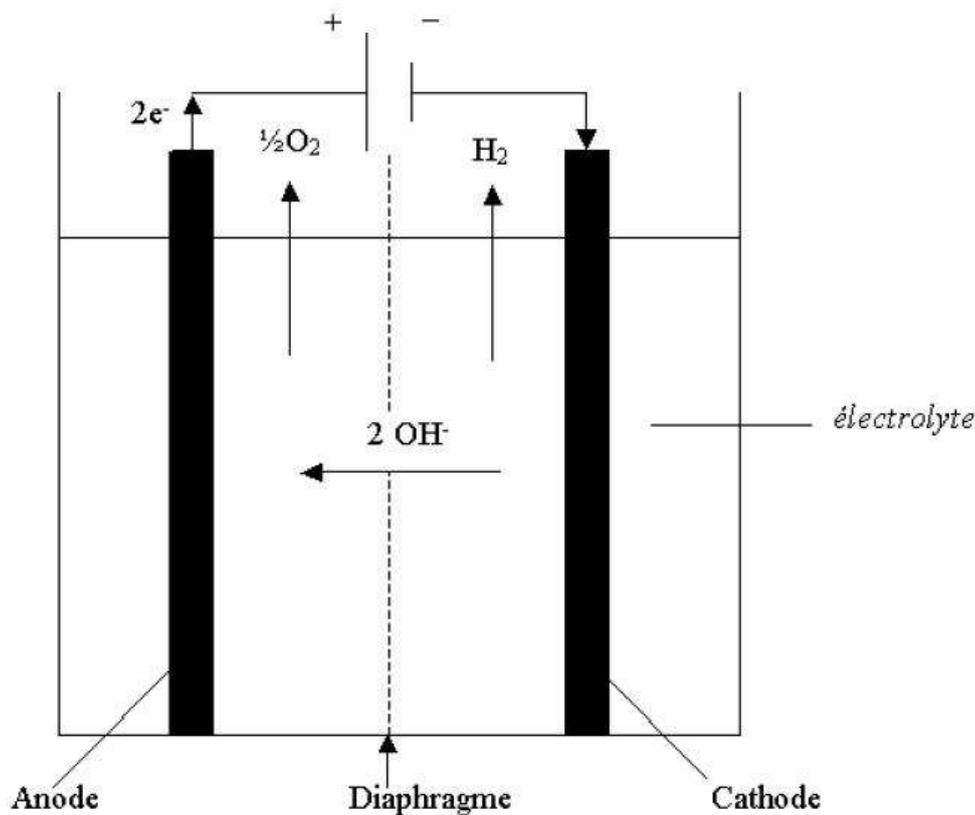


Figure 2.4 : Principe de l'électrolyse alcaline[17].

2.2.4.2 Electrolyseurs PEM

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (membrane échangeuse de protons) repose sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est la présence d'un électrolyte solide constitué d'une membrane polymère. Cette membrane permet la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet en même temps la séparation des gaz produits tels que (H_2 et O_2), selon les réactions ci-dessous :

Les performances d'un électrolyseur PEM dépendent principalement des propriétés de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants restent aujourd'hui la base fondamentale du progrès dans le domaine de l'électrolyse PEM.

Le principe de fonctionnement de l'électrolyseur PEM est décrit schématiquement dans la figure ci-jointe [17].

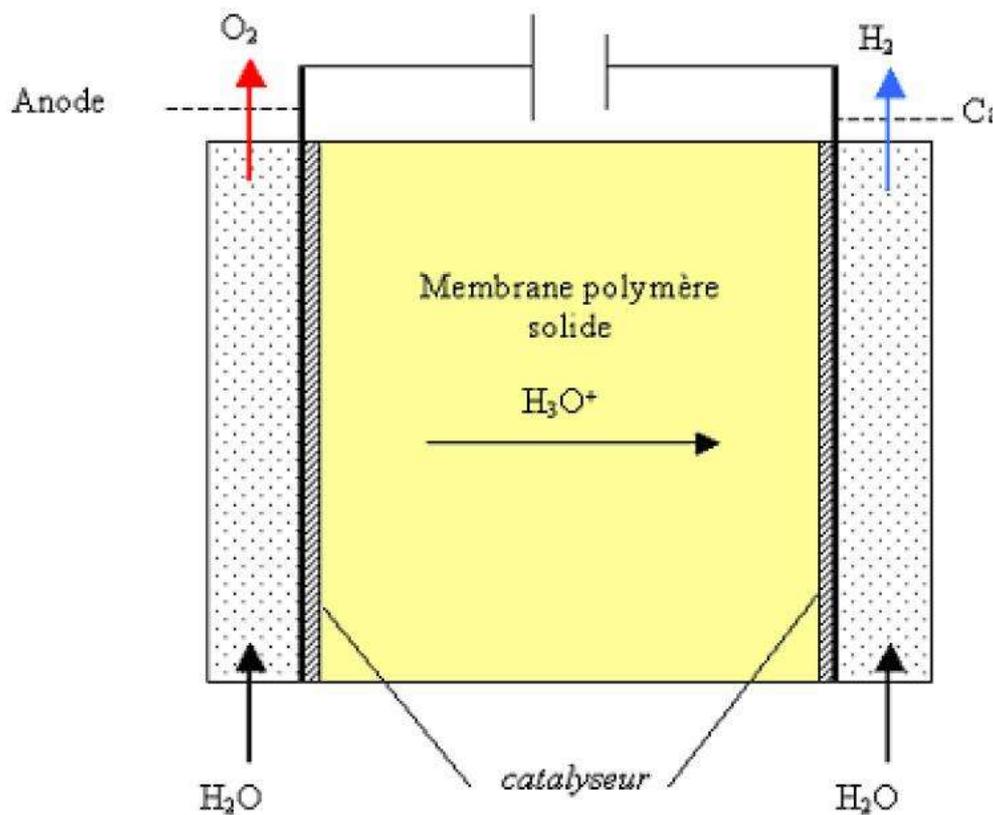


Figure 2.5 : Principe schématique de l'électrolyse PEM

2.2.4.3 Electrolyseurs à haute température [18]

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la réaction de décomposition des molécules d'eau en vapeur sur la cathode. Cette réaction dépend de la nature de l'électrosolvant, car elle peut soit conduire des protons, soit conduire des ions super oxydes. Les réactions impliquées dans les électrodes sont décrites ci-dessous selon le type d'électrolyte :

Conductivité ionique de l'électrolyte du super oxyde :

Sur l'anode : $2 O_2^- \rightarrow O_2 + 4 e^-$

Sur la cathode : $2 H_2O + 4 e^- \rightarrow 2 O_2^- + 2 H_2$

Conduction protonique électrolytique :

Sur l'anode : $2 H_2O \rightarrow 4 H^+ + O_2 + 4 e^-$

Sur la cathode : $4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2$

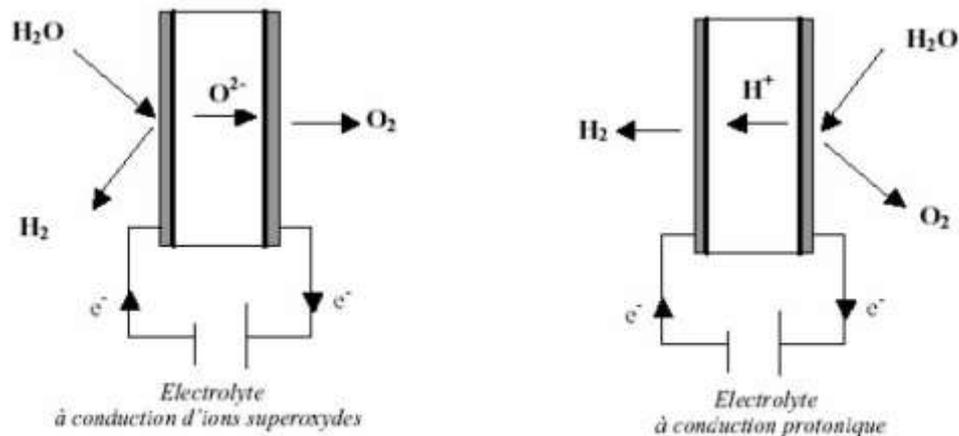


Figure III-8 : principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.

Figure 2.6 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte [22].

2.2.5 Avantages et inconvénients des différentes technologies d'électrolyse

Le tableau suivant résume les principaux avantages et inconvénients des différentes technologies de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau [18].

	Electrolyse alcaline	Electrolyse PEM	Electrolyse à haute température
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie mature - Catalyseur non noble - Stack au niveau du MW 	<ul style="list-style-type: none"> - Réponse rapide aux variations de charge - Compacité du système (fonctionnement à fortes densités de courant) - Haute pureté des gaz produits - Durabilité - Fonctionnement à haute pression 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement électrique élevé - Diminution des coûts d'électricité nécessaire - Fonctionnement à haute pression - Catalyseur non noble - Compacité du système (fonctionnement à fortes densités de courant)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Faibles densités de courant - Faible pureté des gaz à cause de la perméation à travers le diaphragme - Systèmes non compacts à cause de l'utilisation d'un électrolyte liquide - Faibles pressions de fonctionnement - Délai de réponse lors de variations de régime 	<ul style="list-style-type: none"> - Environnement très oxydant qui limite l'éventail de matériaux potentiellement utilisables - Coût des catalyseurs (métaux nobles), de l'électrolyte solide, des plaques bipolaires et des collecteurs de courant en titane - Stack inférieur au MW 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement à l'échelle du laboratoire - Durabilité

Tableau 2: Comparatif des technologies de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Tableau 2.1 : Avantages et inconvénients des différentes technologies d'électrolyse [20].

2.3 Aspects thermodynamiques [19]

La quantité minimale d'énergie électrique (nFE) à fournir à la cellule pour dissocier une mole d'eau est égale à la variation d'enthalpie libre (ΔrG , variation d'énergie libre de Gibbs) associée à la réaction de dissociation Eq.2.1:

$$\Delta rG - nFE = 0 \text{ ou } \Delta rG > 0 \quad (2.1)$$

Avec :

- n : nombre d'électrons échangés dans le processus électrochimique
- F : constante de Faraday (96485 C mol⁻¹)

- E : tension thermodynamique minimale à appliquer à la cellule
- $\Delta_r G$: variation d'enthalpie libre associée à la réaction de dissociation Eq.2.

La variation d'enthalpie $\Delta_r G$ libre est fonction de la température T et de la pression totale P du système :

$$\Delta_r G (T,P) = \Delta_r H (T,P) - T\Delta_r S (T,P) > 0 \quad (2.2)$$

$\Delta_r H$, et $\Delta_r S$, désignent respectivement les variations d'enthalpie et d'entropie associées à la réaction de dissociation Eq.2. Celle-ci requiert donc de la part du milieu extérieur (le générateur électrique) une énergie électrique $\Delta_r G$ (en J mol⁻¹) et une quantité de chaleur $\Delta_r S$, en J mol).

La tension thermodynamique d'électrolyse E s'exprime alors :

$$E(T, P) = \frac{\Delta_r G(T, P)}{nF} \quad (2.3)$$

La tension enthalpique ou thermoneutre V de décomposition de l'eau correspond au Fonctionnement isotherme de l'électrolyseur. Elle est définie par :

$$V(T, P) = \frac{\Delta_r H^0(T, P)}{nF} \quad (2.4)$$

Thermodynamiquement, dans les conditions standard de température et de pression

(T°= 298 et =101,3), l'eau est liquide, H2 et O2 sont gazeux :

$$\Delta_r G^0(H_2O) = 237,22 \text{ kJ mol}^{-1} \Rightarrow E^0 = \frac{\Delta_r G^0(H_2O)}{2F} = 1,2293 \text{ V} \approx 1,23 \text{ V} \quad (2.5)$$

$$\Delta_r H^0(H_2O) = 285,840 \text{ kJ mol}^{-1} \Rightarrow V^0 = \frac{\Delta_r H^0(H_2O)}{2F} = 1,4813 \text{ V} \approx 1,48 \text{ V} \quad (2.6)$$

$$\Delta_r S^0(H_2O) = 163,15 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1} \quad (2.7)$$

2.4 Aspect énergétique [19]

L'aspect énergétique du processus d'électrolyse d'eau couvre le calcul de rendement de production de la cellule d'électrolyse. Le rendement de la production d'hydrogène au cours du processus d'électrolyse peut être calculé selon l'Eq. 19 65 :

$$\eta(\%) = \frac{V_{H_2r}}{V_{H_2l}} \times 100 \quad (2.8)$$

En utilisant la loi de Faraday, le volume idéal de l'hydrogène est calculé selon l'Eq. 2.9 :

$$V_{H_2 i} = \frac{I \times V_M \times t}{2F} \quad (2.9)$$

Où I est le courant (Amps) traversant la cellule pendant une période t , V_M , est le volume molaire du gaz dans des conditions standards (298,15 K et 1 atm) et F le nombre de Faraday (96 485 C.mol⁻¹). En outre, pour simplifier les calculs, l'hydrogène a été supposé comme un gaz parfait. Par conséquent, dans des conditions standards, le volume réel V_{H_2} sera calculé, en fonction du volume mesuré $V_{H_2 m}$ pratiquement et la température de la cellule d'électrolyse, selon l'équation suivante :

$$V_{H_2 r} = V_{H_2 \text{ mesuré}} \frac{T_{\text{standard}}}{T_{\text{mesure}}} \quad (2.10)$$

2.4 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable obtenue à partir du vent. Elle est générée par la conversion de l'énergie cinétique du vent en une forme d'énergie utilisable, généralement de l'électricité, à l'aide de turbines éoliennes. Ces turbines captent l'énergie cinétique du vent et la transforment en mouvement rotatif, qui est ensuite converti en électricité grâce à un générateur. L'énergie éolienne est considérée comme propre et durable car elle n'émet pas de polluants atmosphériques ni de gaz à effet de serre lors de la production d'électricité. Elle contribue ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la transition vers une économie plus respectueuse de l'environnement [22].



Figure 2.7 : Parc de l'énergie éolienne à Gansu en chine [20].

2.4.1 Potentiel éolien disponible [21]

La puissance cinétique du vent peut être exprimée par l'équation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V^3 \quad (2.11)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air (Kg / m³)

V : la vitesse de vent (m / s)

R : la longueur d'une pale (m)

En pratique, une éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance cinétique du vent P_v . Ainsi, un coefficient de puissance $C_p(\lambda)$, qui représente le rendement aérodynamique, est défini. Ce coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ s'écrit, en fonction de la puissance aérodynamique apparaissant sur l'arbre de la turbine P_{eol} et la puissance cinétique du vent P_v , de la manière suivante :

$$C_p(\lambda) = \frac{P_{eol}}{P_v} \quad (2.12)$$

où λ est la vitesse relative de l'éolienne. Elle est définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales $R\Omega$ et la vitesse du vent v comme suit :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (2.13)$$

Où Ω est la vitesse mécanique de la turbine (rad/s). À partir de (3.1) et (3.2), l'expression de la puissance aérodynamique de l'éolienne P_{eol} est déduite comme suit :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda) \quad (2.14)$$

Enfin, le couple mécanique C_m sur l'arbre de la turbine peut être calculé comme suit :

$$C_m = \frac{P_{eol}}{\Omega} \quad (2.15)$$

2.4.2 Système de conversion de l'énergie éolienne :

Un système typique de conversion de l'énergie éolienne comprend une turbine, une génératrice triphasée, un dispositif d'interconnexion et un système de contrôle. Les turbines peuvent être à axe vertical ou horizontal, la plupart des modèles modernes ayant un axe horizontal avec deux ou trois pales. La nacelle d'une éolienne classique contient ces

composantes. Les turbines peuvent être à vitesse constante ou variable, ces dernières étant plus efficaces mais nécessitant un convertisseur électronique de puissance. Les fabricants utilisent souvent un démultiplicateur entre le rotor et la génératrice. Une configuration à entraînement direct, sans démultiplicateur, offre une grande fiabilité et nécessite moins de maintenance, ce qui peut réduire les coûts. De nombreux concepteurs adoptent cette configuration pour leurs nouvelles turbines [17].

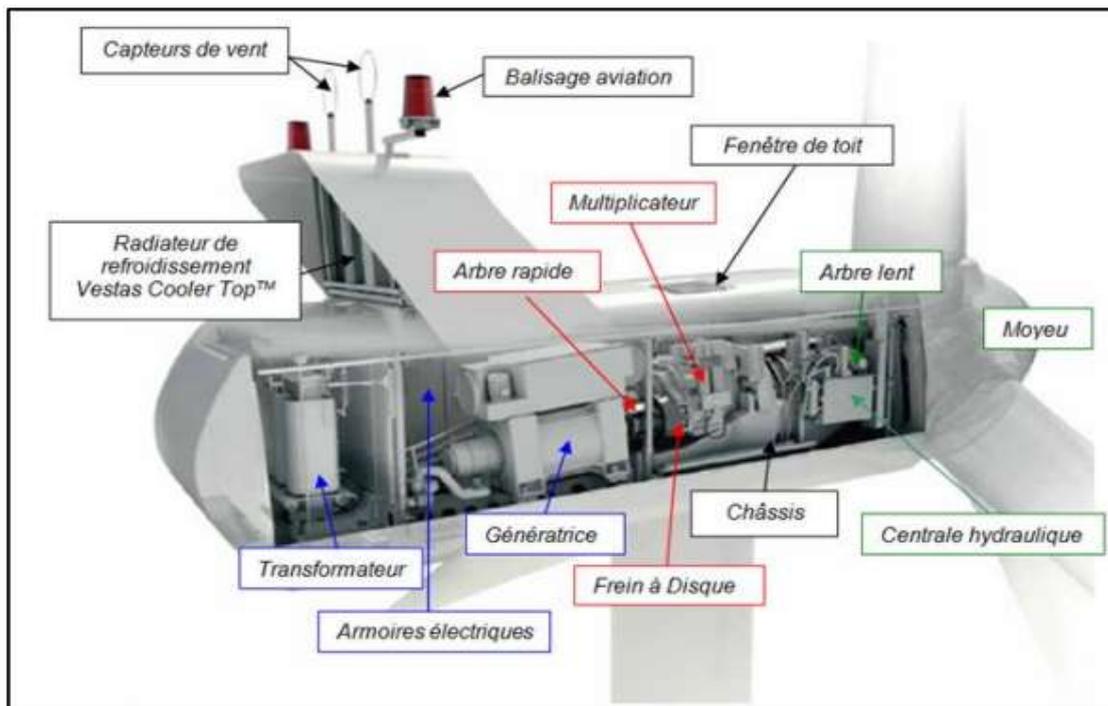


Figure 2.8 : Les composants de la nacelle [17].

2.5 Système de production d'hydrogène a partir de l'énergie éolienne

Dans cette étude, nous proposons d'examiner un système de production d'hydrogène qui utilise l'énergie du vent, qui est une énergie renouvelable et propre. La force du vent tourne d'abord le rotor de l'éolienne, ce qui actionne un générateur proche. Lorsque le vent est suffisamment fort, le générateur produit de l'électricité qui est ensuite injectée dans un électrolyseur alcalin. Pour obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux à partir de l'eau liquide, il faut utiliser de l'électricité pour convertir un composé chimique (l'eau) en d'autres composés chimiques (H₂ et O₂) [24].

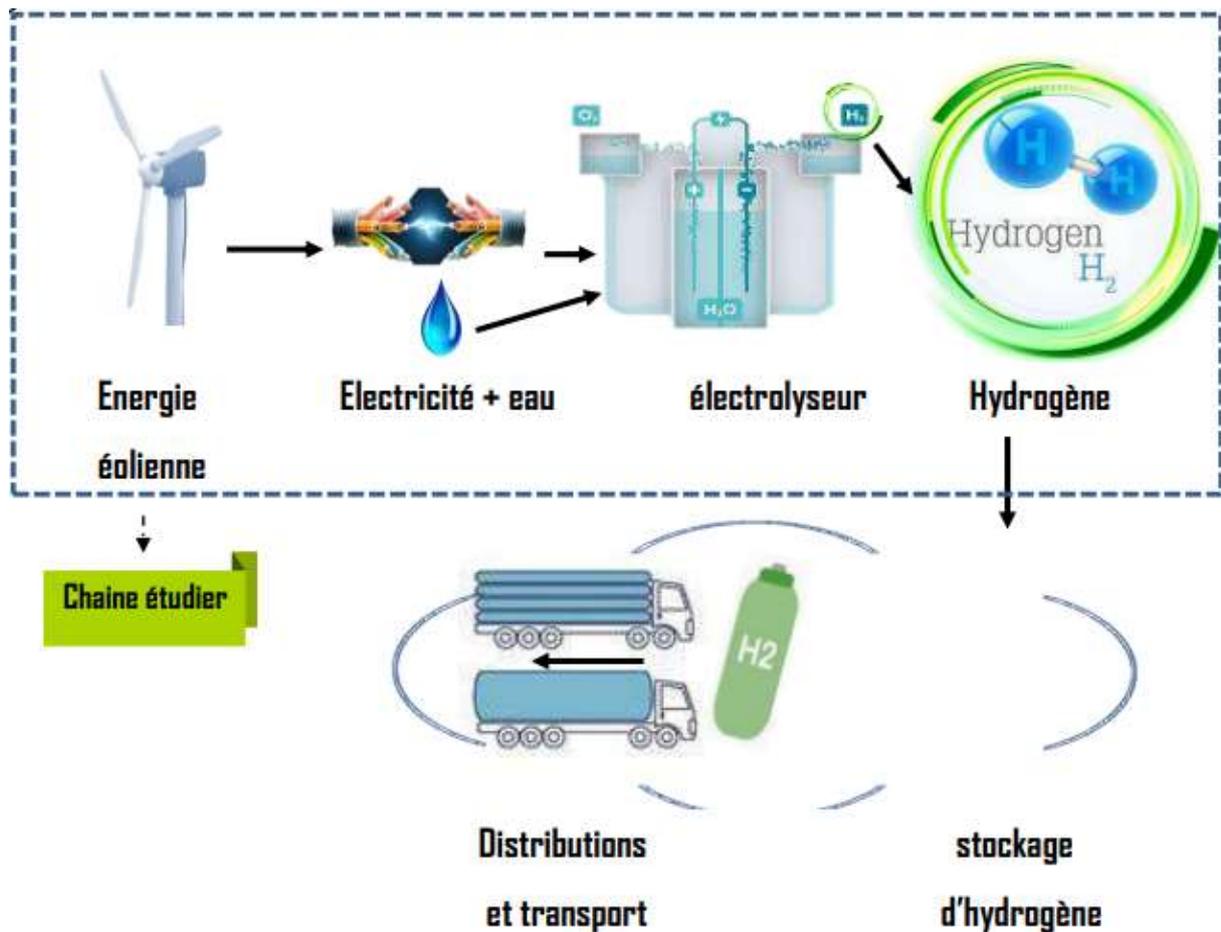


Figure 2.9 : système de production d'Hydrogène[17].

2.5.1 Description du système [23]

Notre système se compose de deux parties importantes : l'énergie éolienne et l'électrolyseur d'eau

Dans un système éolienne-électrolyseur, les éoliennes jouent un rôle clé en fournissant l'électricité nécessaire pour le processus d'électrolyse de l'eau.

- **Production d'électricité** : Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.
- **Alimentation de l'électrolyseur** : L'électricité générée est utilisée pour alimenter l'électrolyseur, qui décompose l'eau en hydrogène et oxygène.
- **Stockage d'énergie** : L'hydrogène produit peut être stocké pour une utilisation ultérieure, permettant de gérer les périodes de faible production éolienne.

- **Stabilisation du réseau** : En utilisant les surplus d'électricité éolienne pour produire de l'hydrogène, le système aide à stabiliser le réseau électrique et à éviter les pertes d'énergie.
- **Réduction des émissions** : Ce processus permet de produire de l'hydrogène sans émissions de CO₂, contribuant à la lutte contre le changement climatique.

Electrolyseur d'eau (alcaline) :

Est réalisée généralement à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25% en masse à 80°C jusqu'à 40% à 160°C). La potasse est préférée à la soude, essentiellement pour des raisons de conductivité supérieure. L'électrolyse alcaline est proposée en modules de petite ou moyenne capacité (0,5- 800 Nm³ /h d'hydrogène). Certaines technologies d'électrolyseurs fonctionnent directement sous pression. Les modules de petite capacité opèrent typiquement de 3 à 30 bars. Les électrolyseurs commerciaux comportent plusieurs cellules; de telles cellules peuvent être placées de différentes manières (en série ou en parallèle) du moment que la configuration interne (composants) ne varie pas d'une cellule à l'autre. Les principales composantes sont :

- Les électrodes: l'anode est composée généralement de nickel (Ni), de cobalt (Co) et d'acier (Fe). La cathode est généralement composée de nickel (Ni) avec du charbon de platine activé comme catalyseur (C-Pt).
- L'électrolyte: une solution alcaline utilise normalement de l'hydroxyde de potassium (KOH) avec une concentration sur poids entre 25 et 35w.t% .
- La membrane: l'oxyde de nickel (NiO) et le Zirfon sont généralement utilisés comme membrane. Les premiers électrolyseurs alcalins qui ont été fabriqués utilisaient des tissus d'amiante comme séparateur.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné en détail le système que nous avons choisi d'étudier, lequel se compose d'un électrolyseur alcaline fonctionnant avec de l'énergie éolienne.

Nous avons présenté l'aspect théorique de l'énergie éolienne ainsi que le principe théorique et pratique de l'électrolyse de l'eau.

Chapitre III
La simulation de la
production d'hydrogène vert
à partir de l'énergie éolienne
à l'aide de logiciel TRNSYS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons le programme TRNSYS, qui nous permettra d'estimer la production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne. Le calcul et la comparaison de la production d'hydrogène seront effectués dans trois régions du Nord, à savoir Oran, Annaba et Alger ainsi que la région d'Adrar dans le sud.

Nous utiliserons le logiciel Meteonorm pour obtenir les données de vitesse du vent, que nous exposerons également dans ce chapitre.

3.2 Présentation du logiciel TRNSYS [25]

TRNSYS (Transient System Simulation Tool) est un outil puissant et polyvalent pour la simulation des systèmes énergétiques. Sa modularité, sa capacité de simulation dynamique, sa convivialité et sa bibliothèque étendue de composants en font un choix populaire parmi les ingénieurs, les architectes et les chercheurs travaillant dans le domaine de l'énergie.

Dans le domaine des énergies renouvelables, Trnsys est largement utilisé pour analyser la viabilité et la performance des systèmes de production d'énergie verte, tels que les panneaux solaires photovoltaïques et thermiques, les éoliennes, et d'autres technologies. Il aide les chercheurs et les concepteurs à comprendre comment ces systèmes interagissent avec leur environnement et comment ils peuvent être intégrés de manière optimale dans les infrastructures existantes.

Trnsys est également utile dans l'étude des systèmes de stockage d'énergie, offrant la possibilité de modéliser différentes technologies de stockage et d'évaluer leur efficacité et leur rentabilité. Cette capacité est cruciale alors que les systèmes de stockage jouent un rôle de plus en plus important dans la transition vers des sources d'énergie renouvelable.

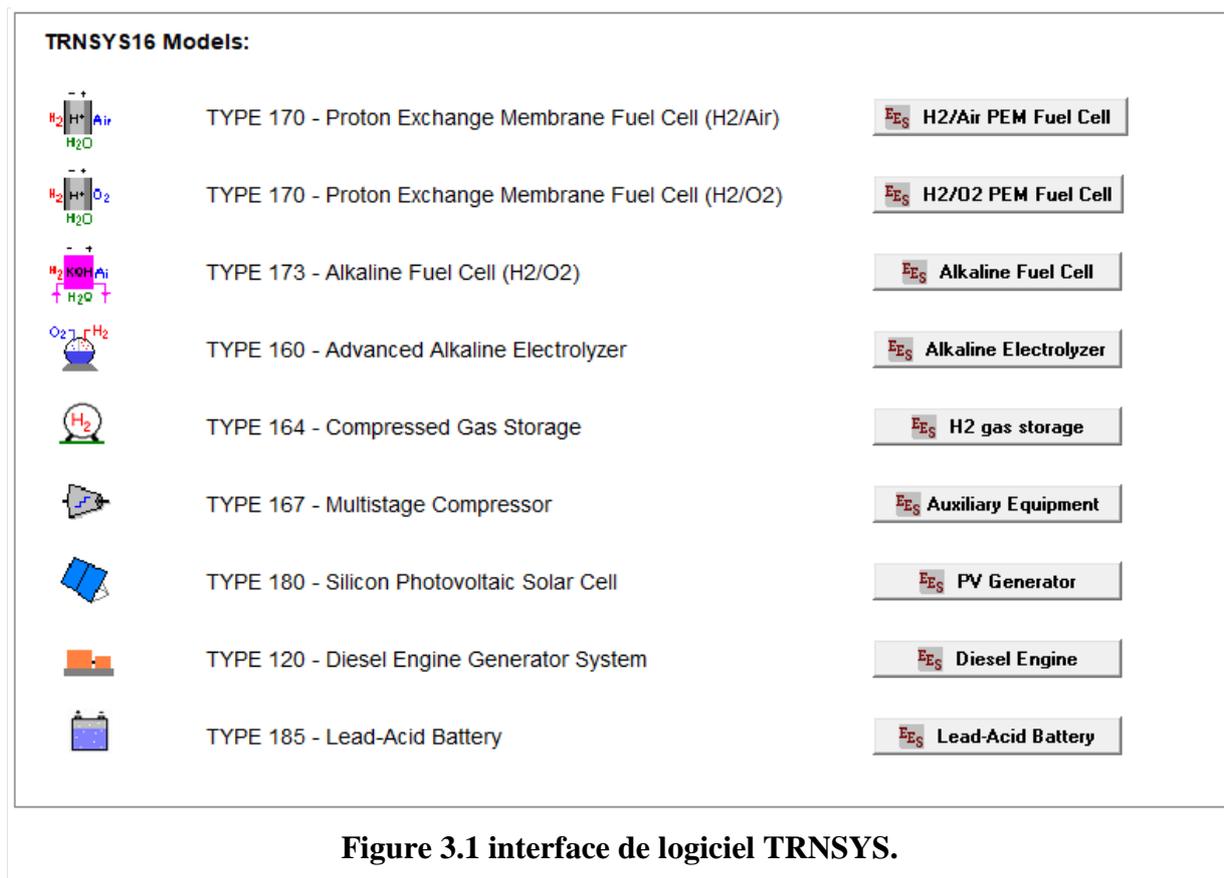


Figure 3.1 interface de logiciel TRNSYS.

3.3 Présentation du logiciel Meteonorm

Meteonorm est un logiciel qui fournit des données météorologiques et des outils de calcul sophistiqués pour une variété d'applications, y compris la conception de bâtiments, l'ingénierie solaire, l'agriculture et la gestion de l'eau [reference]. Il est utilisé par des professionnels du monde entier pour prendre des décisions éclairées sur la façon dont le climat affecte leurs projets.

3.4 Caractéristiques de Meteonorm

Meteonorm contient :

- Plus de 30 paramètres météorologiques, y compris le rayonnement solaire, la température, les précipitations, l'humidité et le vent
- Séries chronologiques historiques et futures
- Plus de 36 formats d'exportation différents
- Interface utilisateur facile à utiliser
- Disponible en plusieurs langues

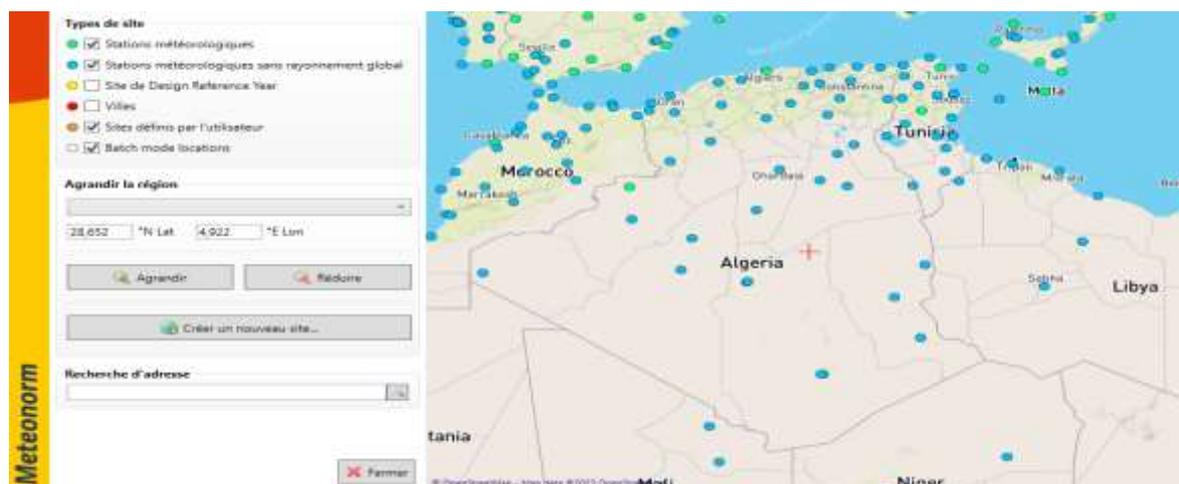


Figure 3.2 : vue des stations météo algériennes disponible sur le logiciel Meteonorm.

3.5 Système de production de l'hydrogène à partir l'énergie éolienne

Ce système innovant exploite l'énergie du vent pour produire de l'hydrogène propre. Il se compose de trois éléments essentiels:

1. **Éolienne:** Cette turbine capture l'énergie cinétique du vent et la convertit en électricité.
2. **Convertisseur AC/DC :** Ce composant adapte l'électricité produite par l'éolienne aux besoins spécifiques de l'électrolyseur, garantissant une production d'hydrogène optimale.
3. **Électrolyseur:** Ce dispositif utilise l'électricité fournie par l'éolienne pour séparer l'eau en ses deux composants : l'hydrogène et l'oxygène

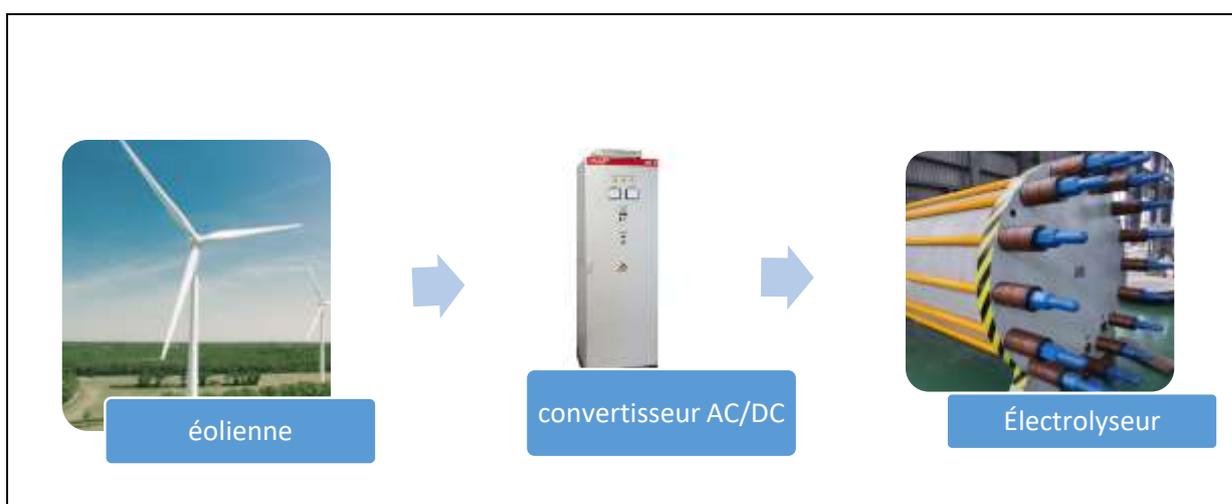


Figure3.3 : Schéma de l'électrolyse de l'eau alcaline alimentée par l'énergie éolienne.

3.6 Configuration du système de production d'hydrogène par TRNSYS

La figure 3.4 représente la configuration de notre système par le logiciel TRNSYS. Le type 109TMY2 est la composante qui permet la lecture du fichier de données météorologique.

Le type 100a (Controls) permet de manager les différents systèmes. L'énergie est convertie à partir de TYPE 175 le composant qui représente le convertisseur de puissance. L'hydrogène est produit via le TYPE 160 qui est un modèle d'un électrolyseur alcalin de technologie avancée..

Le TYPE90 représente l'éolienne, les variables et les résultats de la simulation sont affichées via le TYPE 65C.

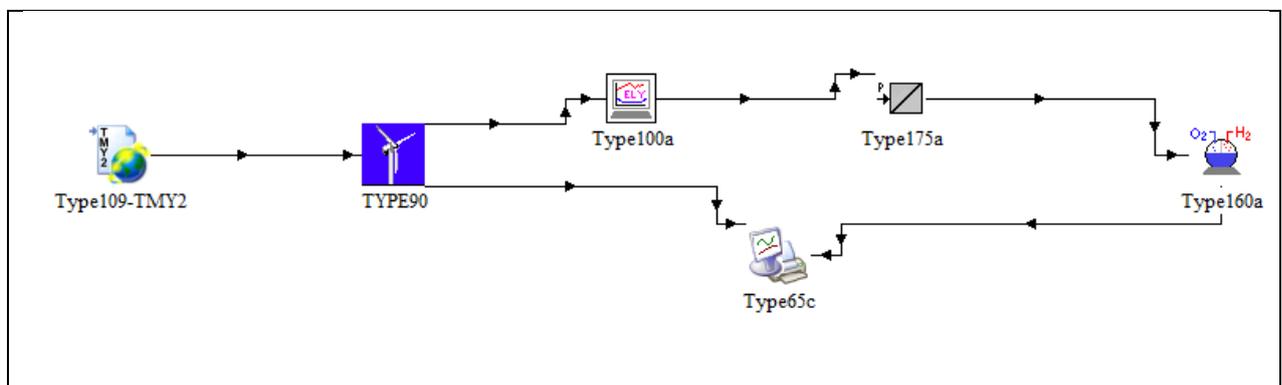


Figure 3.4 : Configuration du système éolienne_H2 dans TRNSYS studio.

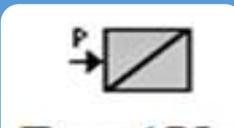
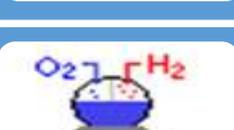
 Type109-User	Ce module permet de lire des fichiers météo au format tmy2
 TYPE90	C'est un modèle mathématique pour un système de conversion d'énergie éolienne. Le modèle calcule la puissance de sortie d'un WECS en fonction d'une caractéristique de puissance par rapport à la vitesse du vent.
 Type105a	Ce module détermine la puissance de l'électrolyseur pour répondre à une charge donnée. Les puissances maximales (classées) et minimales (loading) pour l'électrolyseur est pris en compte.
 Type175a	C'est un modèle mathématique pour une unité de conditionnement de puissance. Le modèle est basé sur des courbes d'efficacité empiriques pour les convertisseurs électriques (DC/DC) ou les onduleurs (DC/AC ou AC/DC).
 Type160a	Le modèle repose sur une combinaison de principes théoriques de thermodynamique, de transfert de chaleur et de relations électrochimiques empiriques. Il intègre également un modèle thermique. Une équation courant-tension dépendante de la température est utilisée.
 Type65c	Ce modèle permet de tracer n'importe quelle courbe en choisissant le nombre de variables, l'échelle etc

Tableau 3.1 : les composants du système de production

3.7.1 Potentiel éolien

Les données de vitesse du vent de 2013-2023 des sites sélectionnés seront utilisées pour la simulation de notre système de production éolienne-H₂.

3.7.1.1 Site d'Adrar

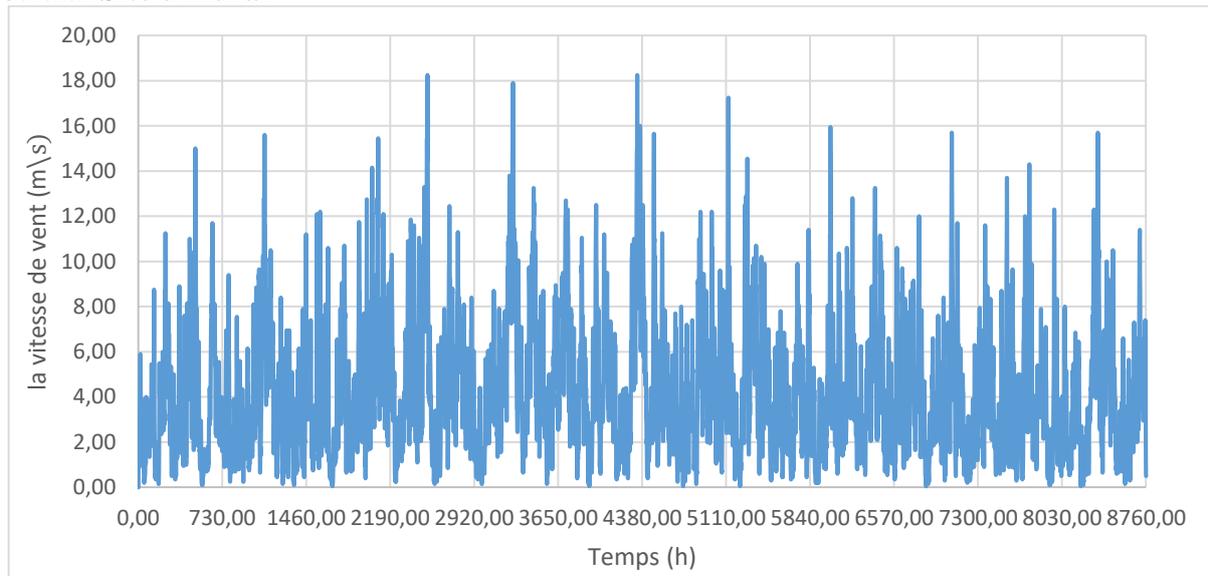


Figure 3.5 : Evolution horaire de la vitesse de vent pendant un an à Adrar.

La figure 3.5 illustre comment la vitesse du vent évolue chaque heure pendant un an à Adrar. On observe une fluctuation constante tout au long de cette période, avec deux pics de vitesse égale à 18,20 m/s, ainsi qu'un pic à 18 m/s. En moyenne, la vitesse oscille autour de 8 m/s.

3.7.1.2 Site d'Alger

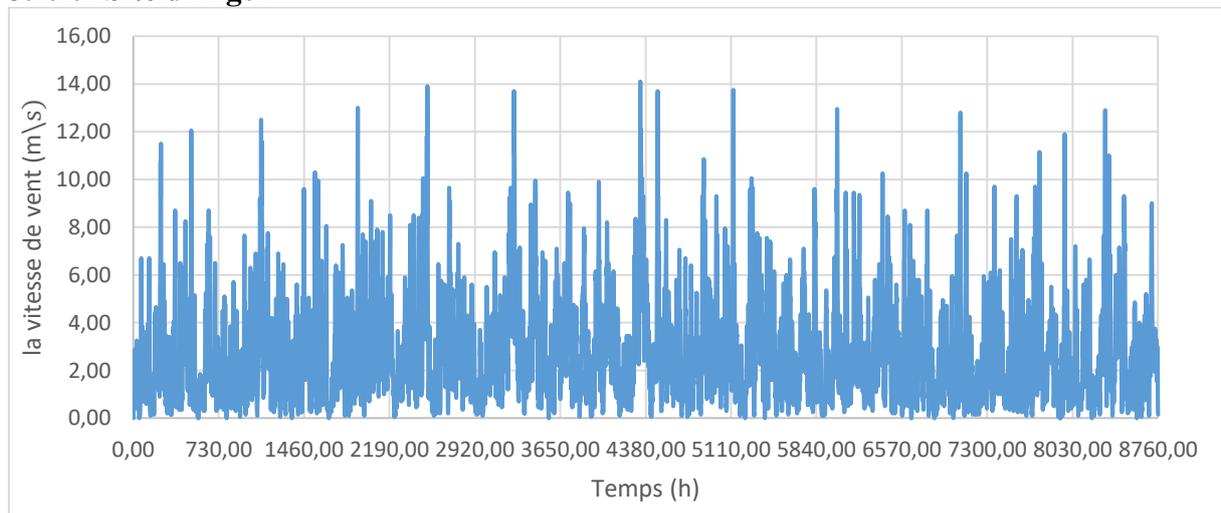


Figure 3.6 : Evolution horaire de la vitesse de vent pendant un an à Alger.

À Alger, la vitesse du vent varie toutes les heures d'après ce graphique 3.6, et cela pendant une année entière. Cette variation est constante, avec un pic de 14,10 m/s. En moyenne, le vent souffle à une vitesse d'environ 9,53 m/s.

3.7.1.3 Site d'Annaba

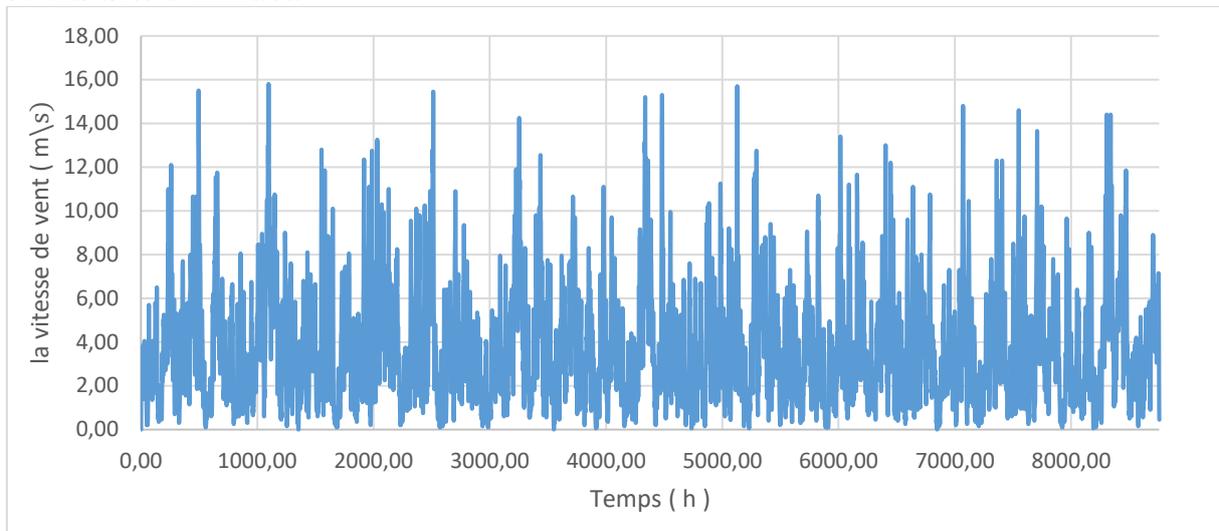


Figure 3.7 : Evolution horaire de la vitesse de vent pendant un an à Annaba.

Ce graphique 3.7 présente la variation horaire de la vitesse du vent à Annaba sur une année. On y constate une fluctuation permanente, avec une vitesse maximale de 15,90 m/s. La vitesse moyenne du vent s'élève approximativement à 10,04 m/s.

3.7.1.4 Site d'Oran

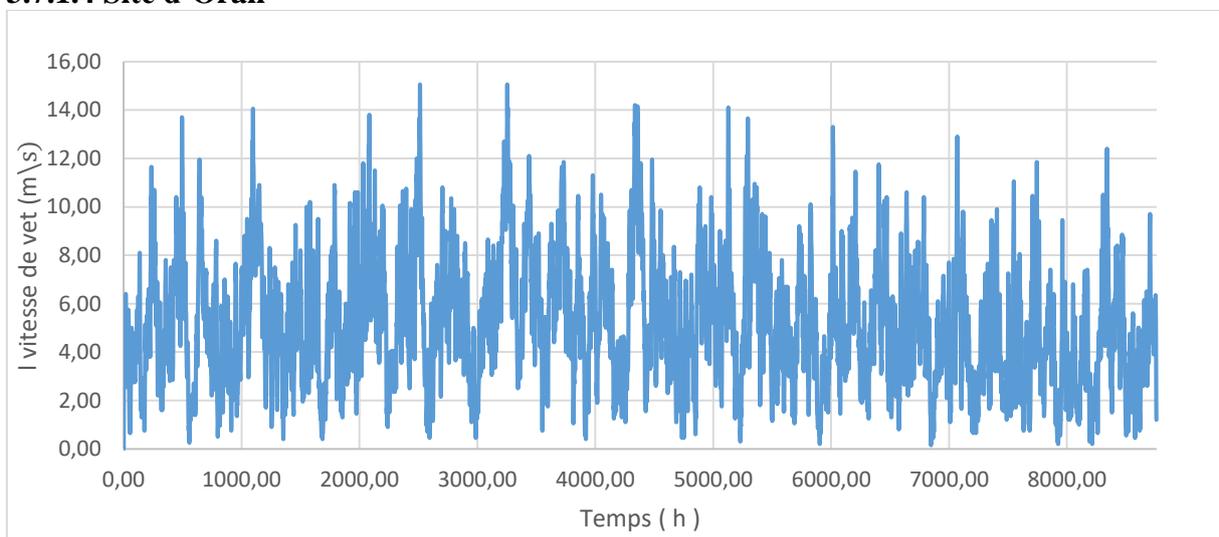


Figure 3.8 : Evolution horaire de la vitesse de vent pendant un an à Oran.

La figure 3.8 illustre comment la vitesse du vent évolue chaque heure pendant un an à Oran. On observe une fluctuation constante tout au long de cette période, avec deux pics de vitesse égale à 15 m/s, ainsi qu'un pic à 15,20 m/s. En moyenne, la vitesse oscille autour de 10,46 m/s.

3.8 Dimensionnement de système éolienne_H2

3.8.1 Choix de l'aérogénérateur :

Nous avons choisi pour le système éolien une puissance nominale de 500 kW et une puissance crête de 500 kW.

Tableau 3.2 : Caractéristiques de L'éolienne de 500kW.

Enecron E40 /500
Puissance nominale 500 KW
Vitesse de démarrage 2.5 m/s
Diamètre du rotor 40 m
Nombre de pales 3
Vitesse du rotor (Max) 34 tours / minute

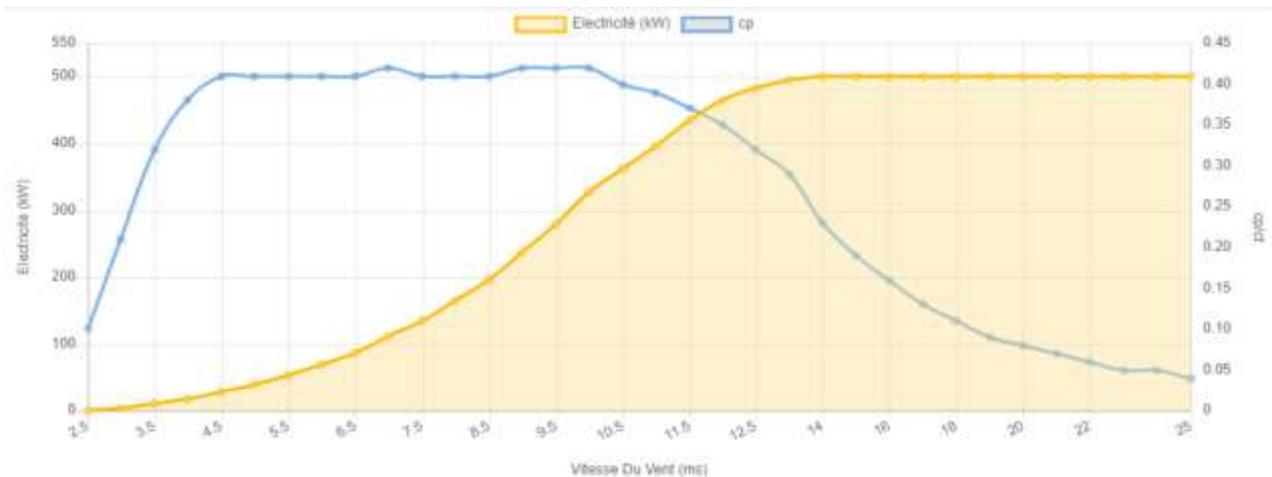


Figure 3.9 : courbe de puissance de l'éolienne de 500kW.

3.8.2 L'électrolyseur :

L'électrolyseur sert à produire de l'hydrogène grâce à l'énergie éolienne.

Pour notre système l'électrolyseur choisi porte les caractéristiques suivantes :

Propriétés	Valeurs
Type	Alcalin
Nombre de cellule	200
Nombre de stacke	1
Puissance	500 KW
Rendement	85 %
Mode de fonctionnement	CC

Tableau 3.3 : Propriétés de L'électrolyseur.

3.8.3 Le convertisseur :

Les caractéristiques suivantes sont présentes pour le convertisseur compatible avec notre système:

Propriétés	Valeurs
Puissance	500 KW
Rendement CA / CC	80 %
Rendement CC / CC	80%

Tableau 3.4 : Propriétés de convertisseur.

3.9 Simulation de la production d'hydrogène

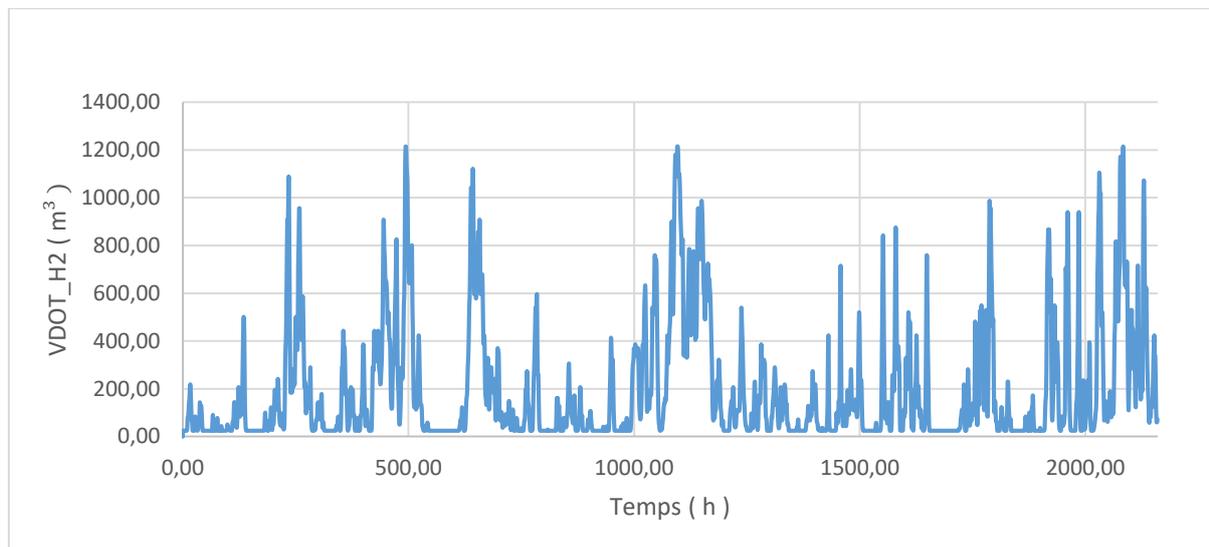


Figure 3.10 : La production horaire d'hydrogène en hiver sur le site de l'Adrar

La courbe 3.10 illustre la production d'hydrogène pendant l'hiver dans la région de l'Adrar, mettant en évidence des variations. Trois pics maximaux égaux de 1260 m^3 sont observés, suivis d'un pic de 1100 m^3 tandis que les autres valeurs fluctuent entre 900 m^3 et 100 m^3 .

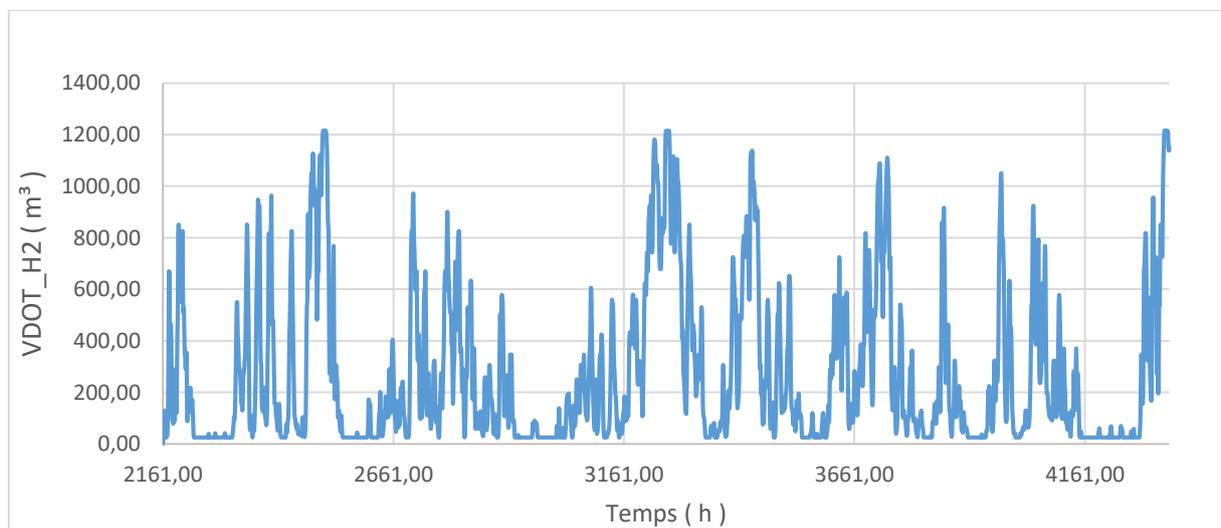


Figure 3.11 : La production horaire d'hydrogène au printemps sur le site de l'Adrar

La courbe 3.11 montre la production d'hydrogène printemps dans la région de l'Adrar, révélant des variations. Trois pics maximums égaux de 1210 m^3 sont observés, suivis d'un pic de 1190 m^3 , tandis que les autres valeurs oscillent entre 1170 m^3 et 100 m^3 .

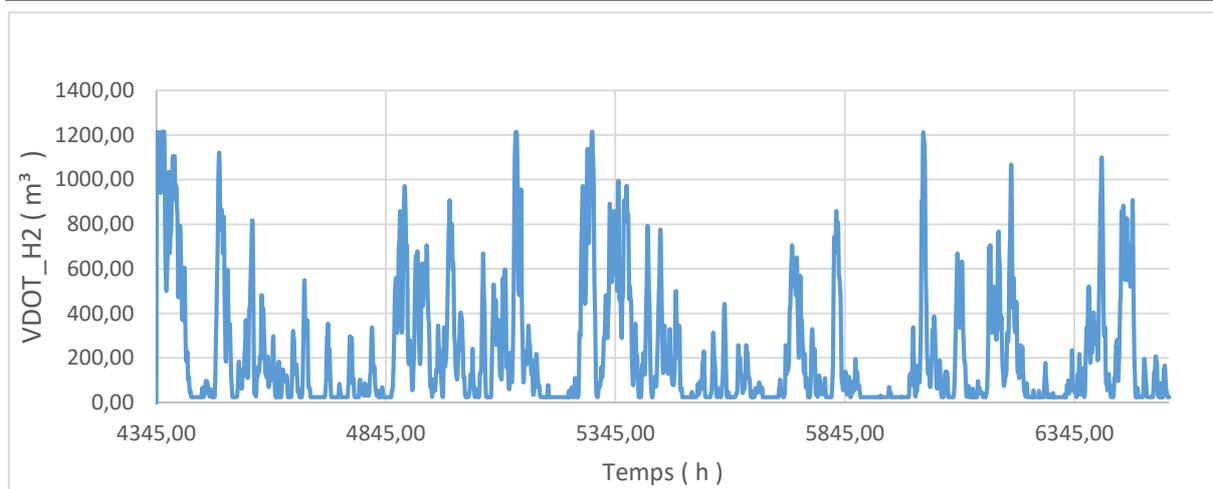


Figure 3.12 : La production horaire d'hydrogène en été sur le site de l'Adar

Les variations de la production d'hydrogène en été dans la région de l'Adrar sont illustrées par la courbe 3.12. On peut observer quatre pics maximums égaux de 1210 m³, suivis d'un pic de 1140 m³, tandis que les autres valeurs varient entre 1100 m³ et 100 m³.

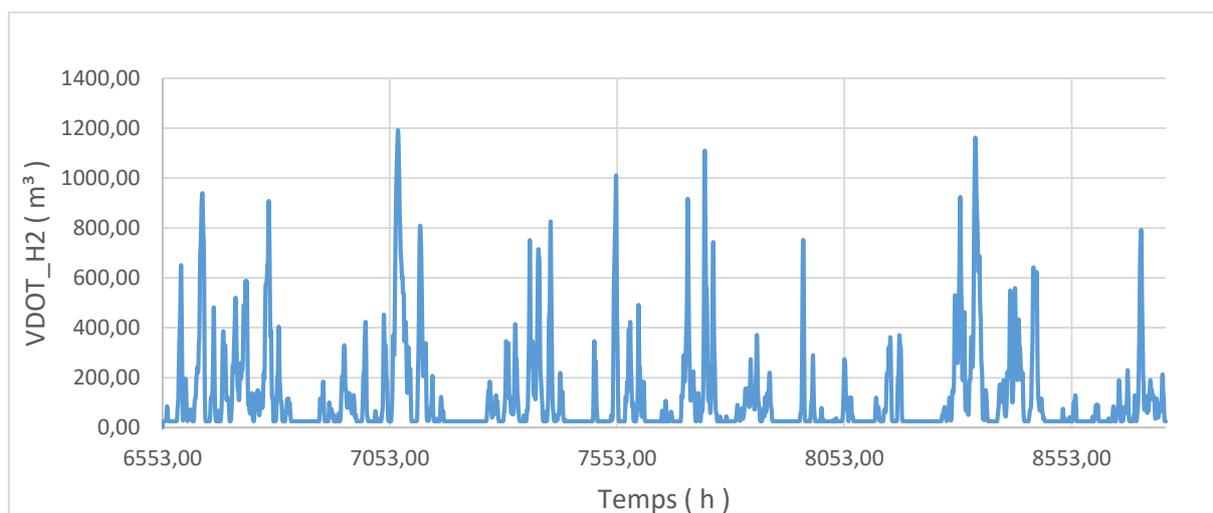


Figure 3.13 : La production horaire d'hydrogène en l'automne sur le site de l'Adar

La courbe 3.13 représente la quantité d'hydrogène produite en fonction de temps au cours de la saison d'automne, car on remarque un changement dans la quantité d'hydrogène produite, puisque la plus grande quantité au cours de cette saison est de 1200m³, suivie de 1100m³.

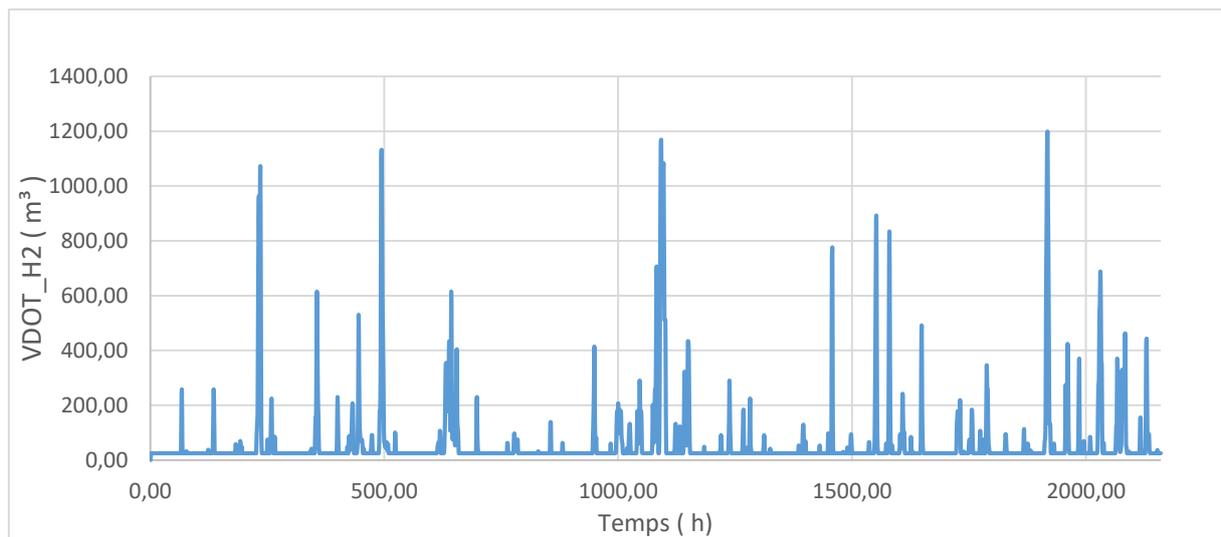


Figure 3.14 : La production horaire d'hydrogène à l'hiver sur le site d'Alger

La courbe 3.14 représente la quantité d'hydrogène produite en fonction de temps pendant l'hiver dans la région d'Alger, car on remarque un changement dans la quantité d'hydrogène produite, puisque la plus grande quantité au cours de cette saison est de 1200 m³, suivie de 1180 m³, tandis que les autres valeurs varient entre 1160 m³ et 80 m³.

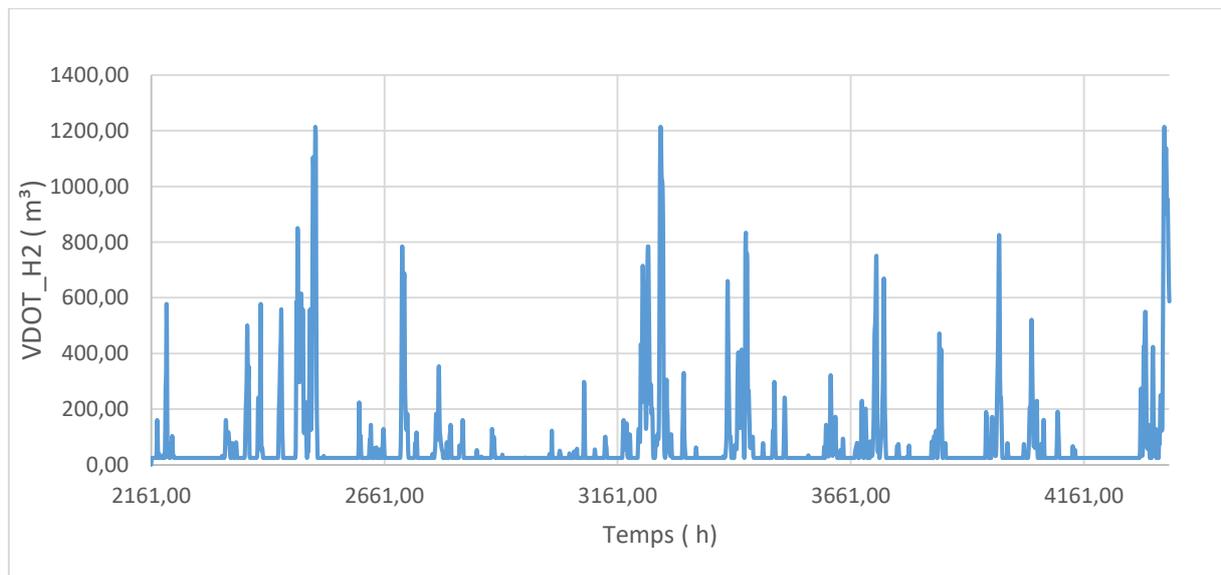


Figure 3.15 : La production horaire d'hydrogène au printemps sur le site d'Alger

La production d'hydrogène au printemps dans la région d'Alger est illustrée par la courbe 3.15, qui révèle des fluctuations. On observe trois pics maximums équivalents de 1200 m³, suivis d'un pic de 880 m³, tandis que les autres valeurs varient entre 850 m³ et 80 m³.

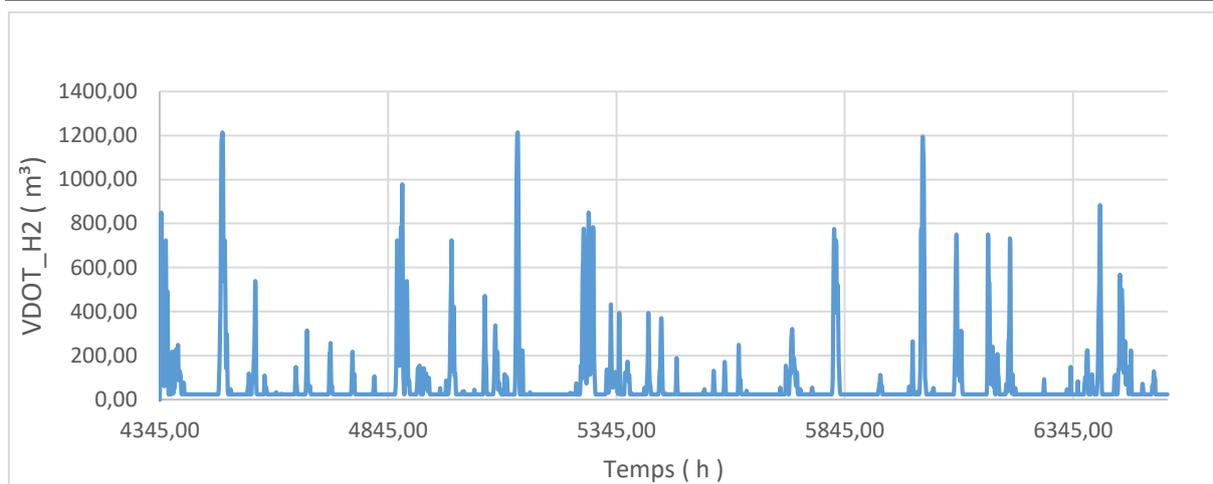


Figure 3.16 : La production horaire d'hydrogène en été sur le site d'Alger

La courbe 3.16 présente les fluctuations de la production d'hydrogène en été dans la région d'Alger. Trois pics maximums égaux de 1200 m³ sont observés, suivis d'un pic de 960 m³, tandis que les autres valeurs sont variées entre 880 m³ et 50 m³.

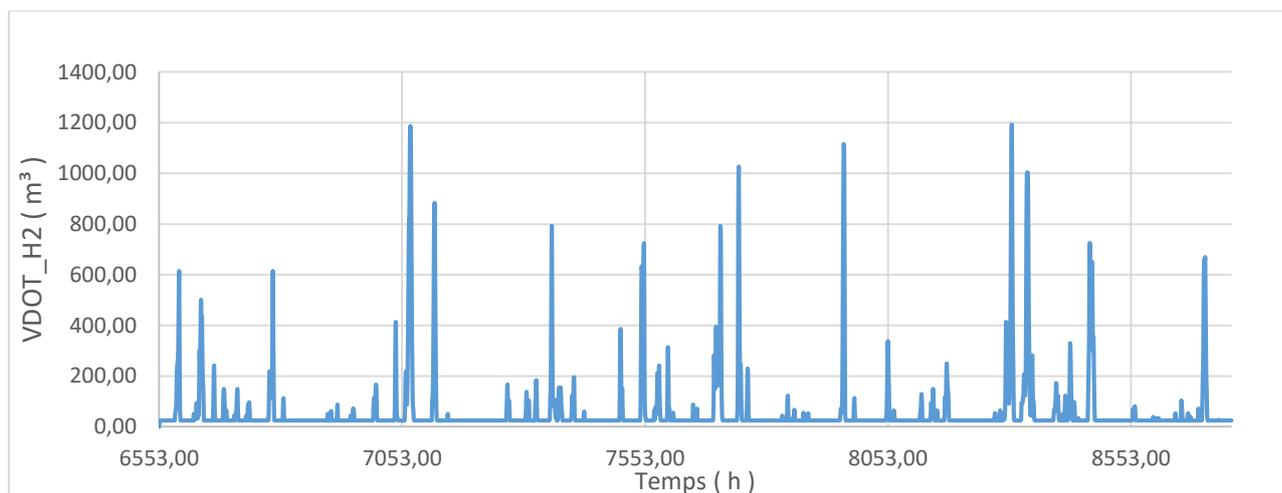


Figure 3.17 : La production horaire d'hydrogène en l'automne sur le site d'Alger

La courbe 3.17 illustre la production d'hydrogène en fonction du temps pendant la saison d'automne dans la région d'Alger, car on observe une variation dans la quantité d'hydrogène produite, avec une plus grande quantité de 1200 m³ pendant cette saison, suivie de 1100 m³.

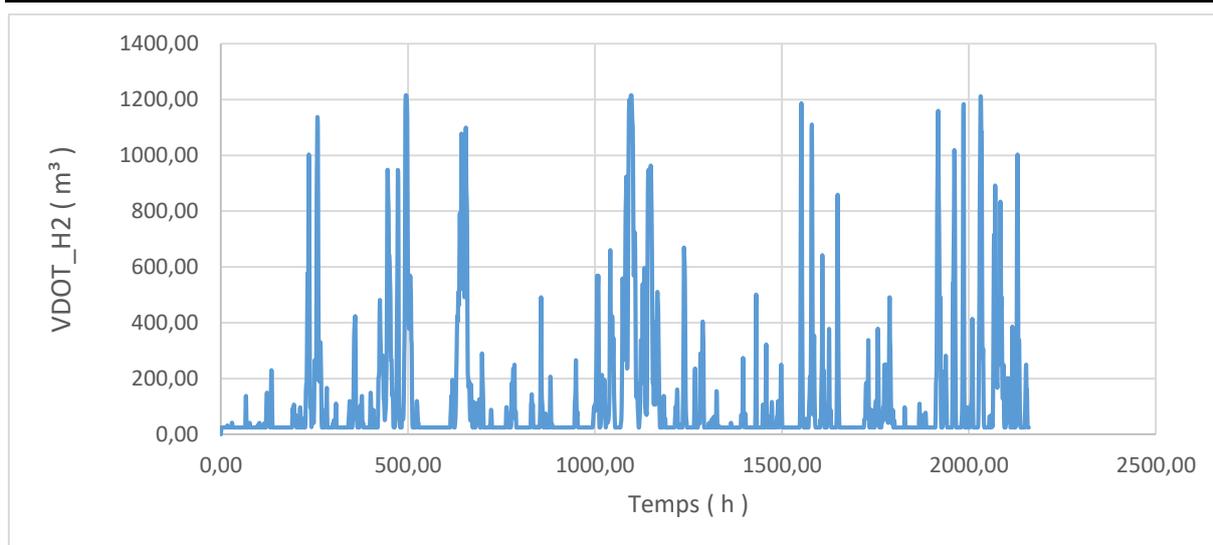


Figure 3.18 : La production horaire d'hydrogène à l'hiver sur le site d'Annaba

La courbe 3.18 représente la quantité d'hydrogène produite en fonction de temps pendant l'hiver dans la région de Annaba, car on remarque un changement dans la quantité d'hydrogène produite, puisque la plus grande quantité au cours de cette saison est de 1220m³, suivie de 1180 m³, tandis que les autres valeurs varient entre 1000 m³ et 80 m³.

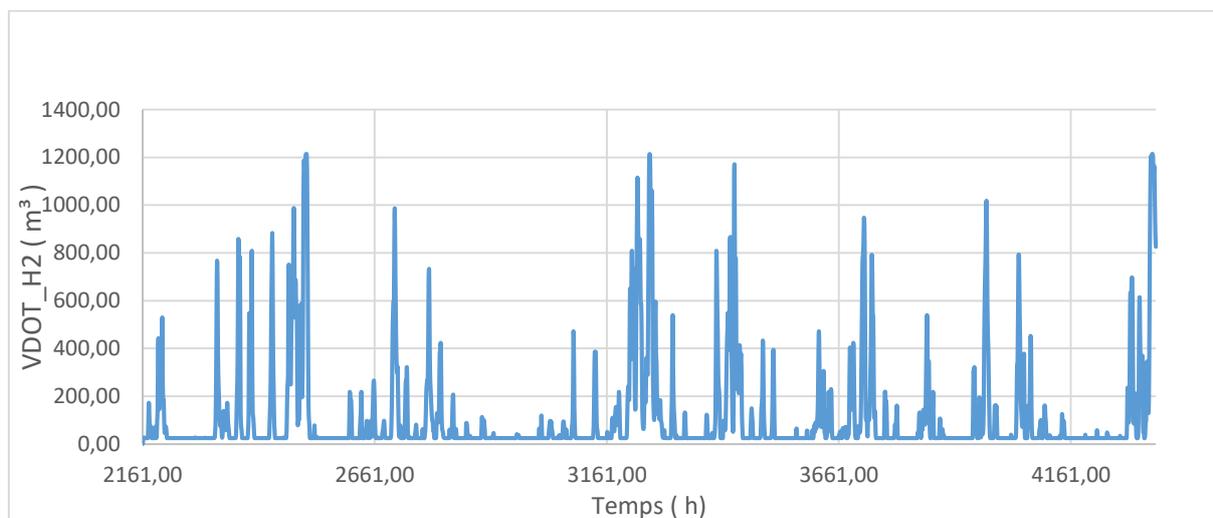


Figure 3.19 : La production horaire d'hydrogène au printemps sur le site d'Annaba

La production d'hydrogène au printemps dans la région d'Annaba est illustrée par la courbe 3.19, qui révèle des fluctuations. On observe trois pics maximums équivalents de 1210 m³, suivis d'un pic de 1170 m³, tandis que les autres valeurs varient entre 950 m³ et 50 m³.

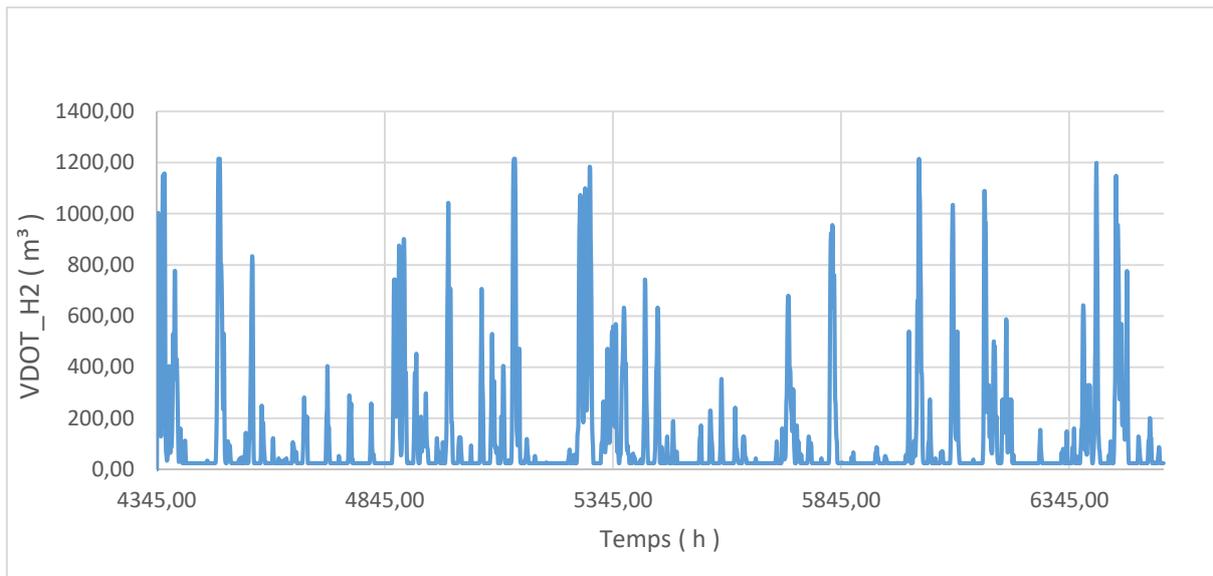


Figure 3.20 : La production horaire d'hydrogène en été sur le site d'Annaba

La courbe 3.20 présentent les fluctuations de la production d'hydrogène en été dans la région d'Annaba. Trois pics maximums égaux de 1200 m³ sont observés, suivis deux pic de 1190 m³, tandis que les autres valeurs sont varié entre 1150 m³ et 50 m³.

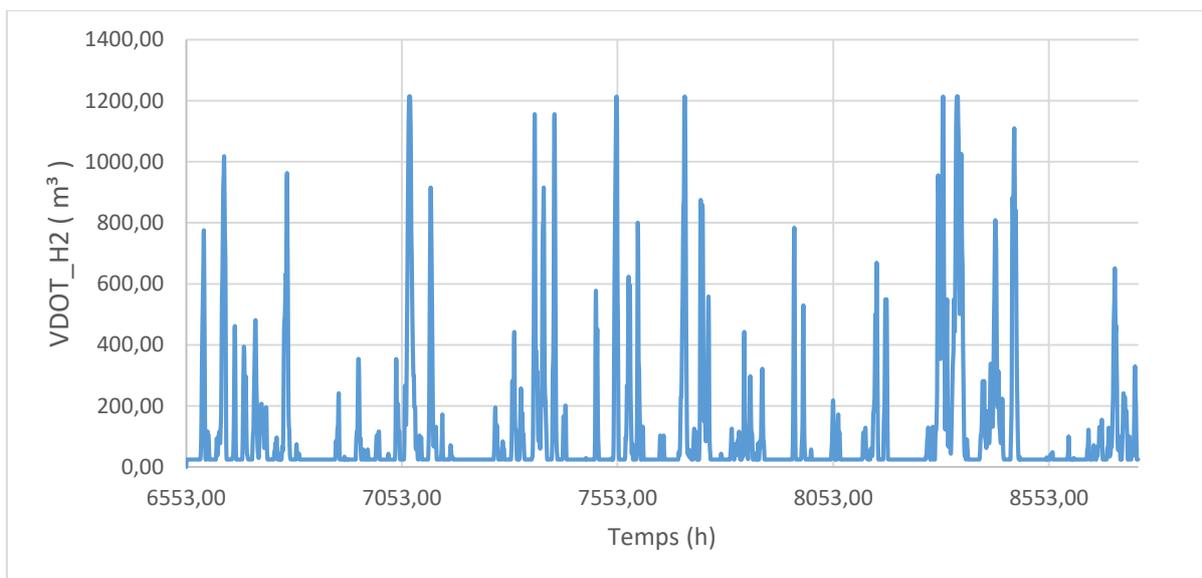


Figure 3.21 : La production horaire d'hydrogène en l'automne sur le site d'Annaba

La courbe 3.21 illustre la production d'hydrogène en fonction du temps pendant la saison d'automne dans la région de Annaba, car on observe une variation dans la quantité d'hydrogène produite, avec une plus grande quantité de 1220 m³ pendant cette saison, suivie de 1200 m³.

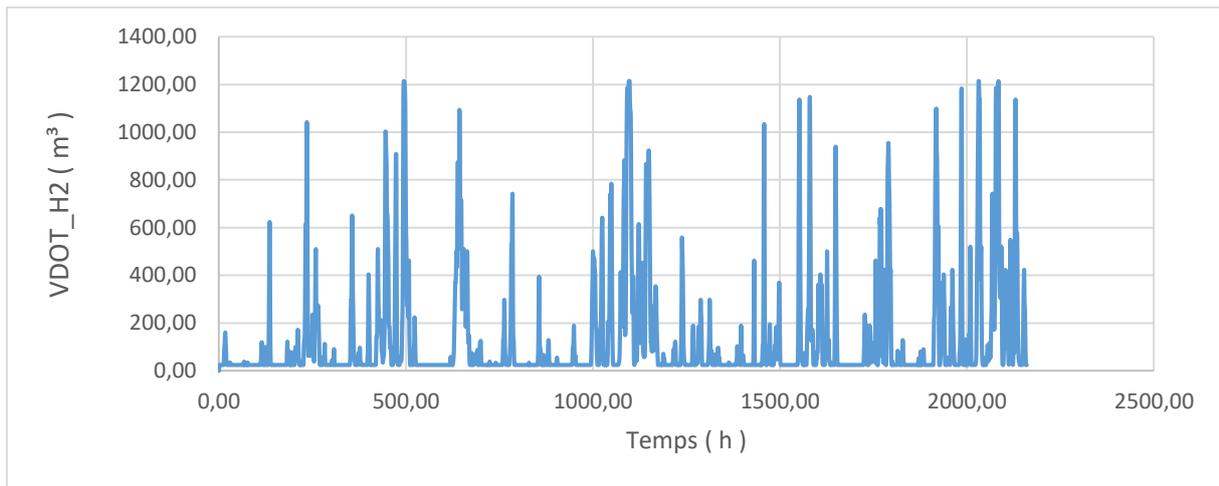


Figure 3.22 : La production horaire d'hydrogène à l'hiver sur le site d'Oran

La courbe 3.22 illustre la quantité d'hydrogène produite au fil du temps pendant l'hiver dans la région d'Oran. On observe une variation de la production, avec un pic atteignant 1210 m^3 , suivi d'une valeur de 1180 m^3 . Les autres quantités oscillent entre 1100 m^3 et 50 m^3 .

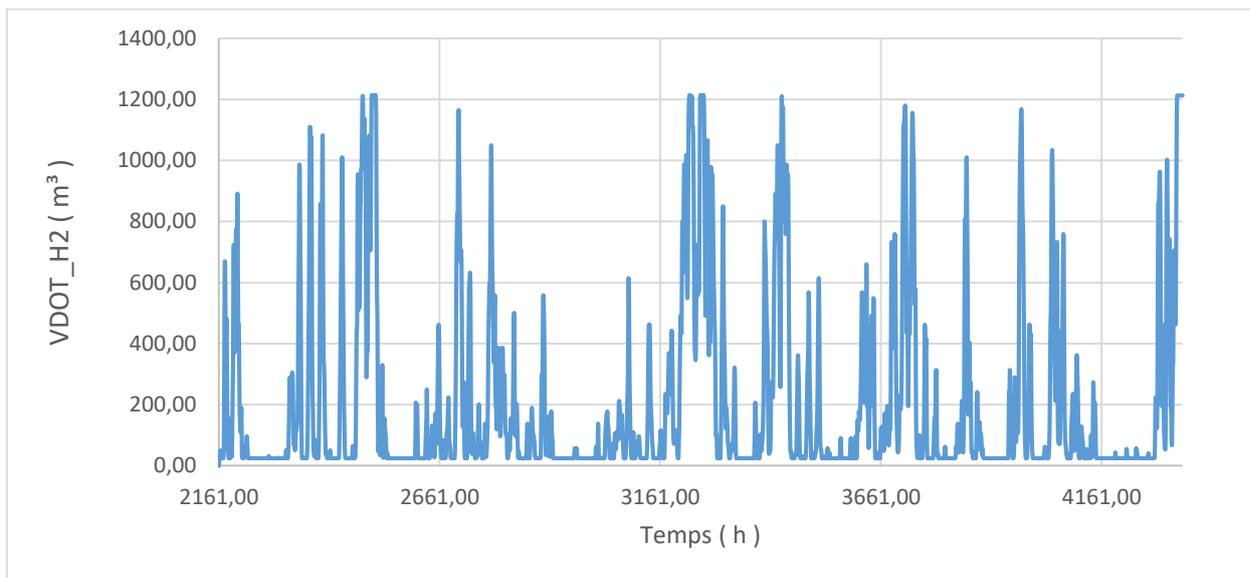


Figure 3.23 : La production horaire d'hydrogène au printemps sur le site d'Oran

La courbe 3.23 illustrant la production d'hydrogène au printemps dans la région d'Oran montre des fluctuations. On y distingue quatre pics maximaux atteignant chacun 1200 m^3 , suivis d'un pic de 1190 m^3 . Les autres valeurs varient entre 950 m^3 et 50 m^3 .

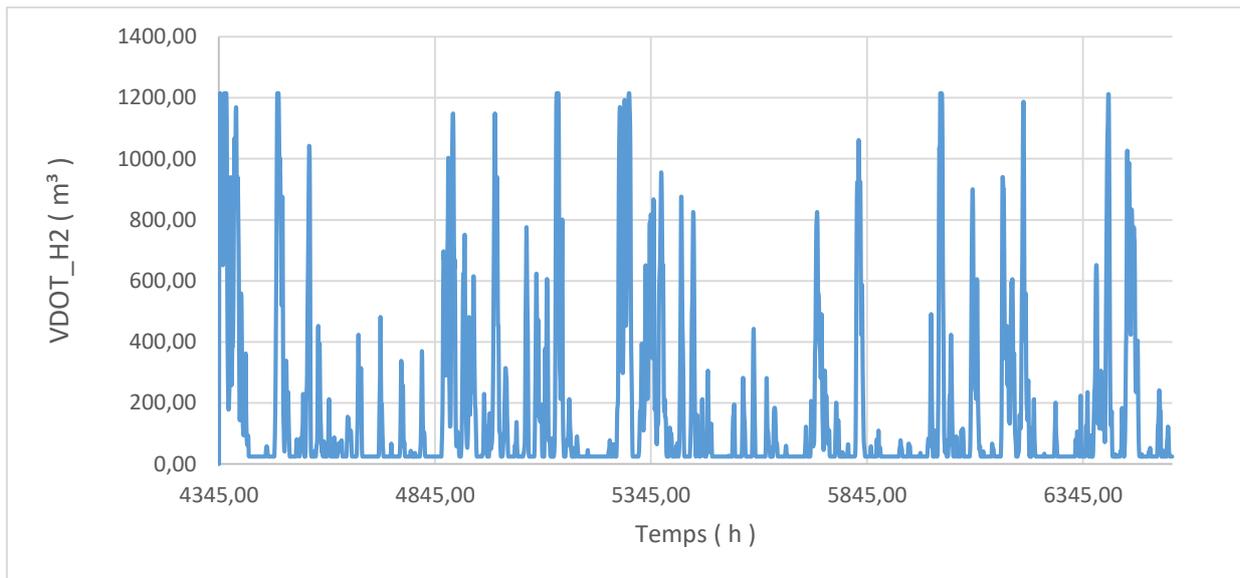


Figure 3.24 : La production horaire d'hydrogène en été sur le site d'Oran

La courbe 3.24 montrent les fluctuations de la production d'hydrogène en été dans la région d'Oran. On observe quatre pics maximaux égaux de 1200 m³, suivis de deux pics de 1190 m³, tandis que les autres valeurs varient entre 1180 m³ et 50 m³.

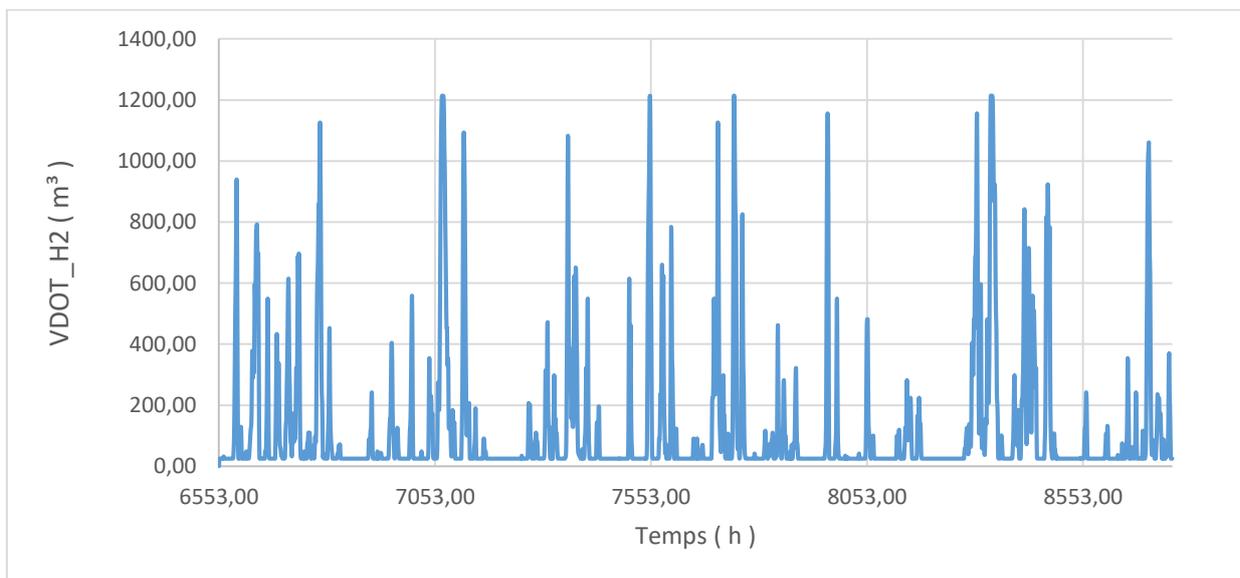


Figure 3.25 : La production horaire d'hydrogène en l'automne sur le site d'Oran

La courbe 3.25 illustre la production d'hydrogène au fil du temps pendant l'automne dans la région d'Oran. On observe des variations, avec un pic maximal de 1200 m³, suivi d'une valeur de 1180 m³.

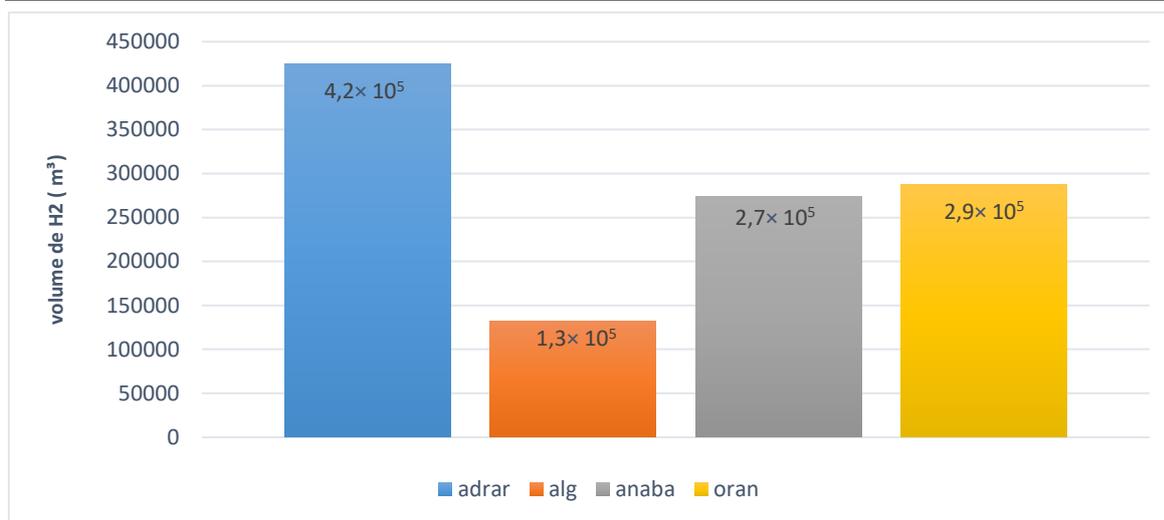


Figure 3.26 : Production d'hydrogène en hiver sur des sites sélectionnés

La figure 3.26 montre le volume d'hydrogène produite grâce à l'énergie éolienne à différents endroits pendant l'hiver. Nous avons constaté que la production d'hydrogène la plus importante se situait à Adrar, suivie par Oran, puis à Annaba, tandis que la production la plus faible était à Alger.

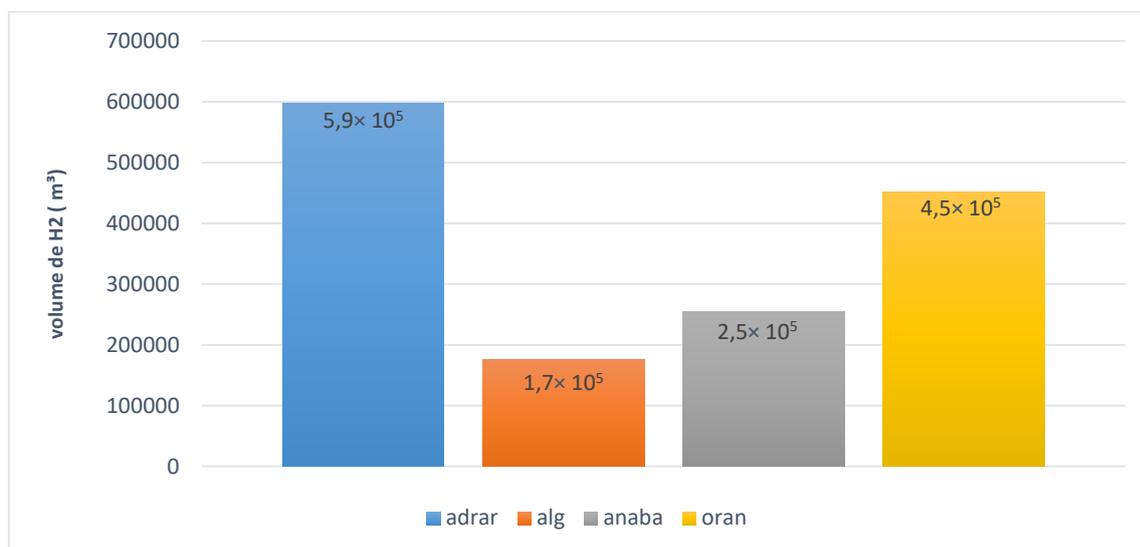


Figure 3.27 : Production d'hydrogène en printemps sur des sites sélectionnés

La figure 3.27 montre le volume d'hydrogène produite grâce à l'énergie éolienne à différents endroits pendant printemps. Nous avons constaté que la production d'hydrogène la plus importante se situait à Adrar, suivie par Oran, puis à Annaba, tandis que la production la plus faible était à Alger.

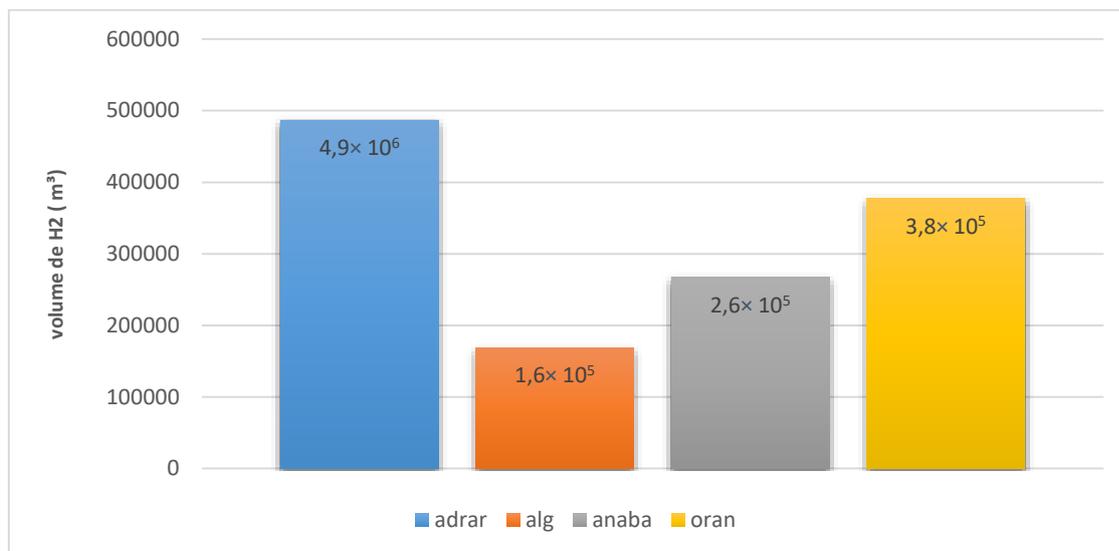


Figure 3.28 : Production d'hydrogène en été sur des sites sélectionnés

La figure 3.28 montre le volume d'hydrogène produite grâce à l'énergie éolienne à différents endroits pendant été. Nous avons constaté que la production d'hydrogène la plus importante se situait à Adrar, suivie par Oran, puis à Annaba, tandis que la production la plus faible était à Alger.

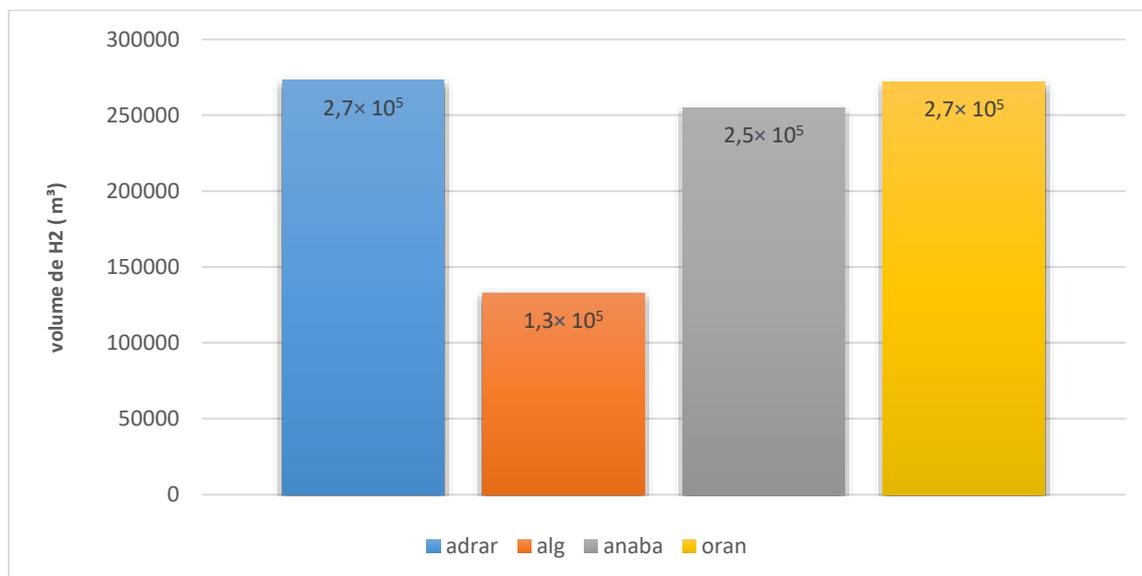


Figure 3.29 : Production d'hydrogène en l'automne sur des sites sélectionnés

La figure 3.29 montre le volume d'hydrogène produite grâce à l'énergie éolienne à différents endroits pendant l'hiver. Nous avons constaté que la production d'hydrogène la plus importante

se situait à Adrar, suivie par Oran, puis à Annaba, tandis que la production la plus faible était à Alger.

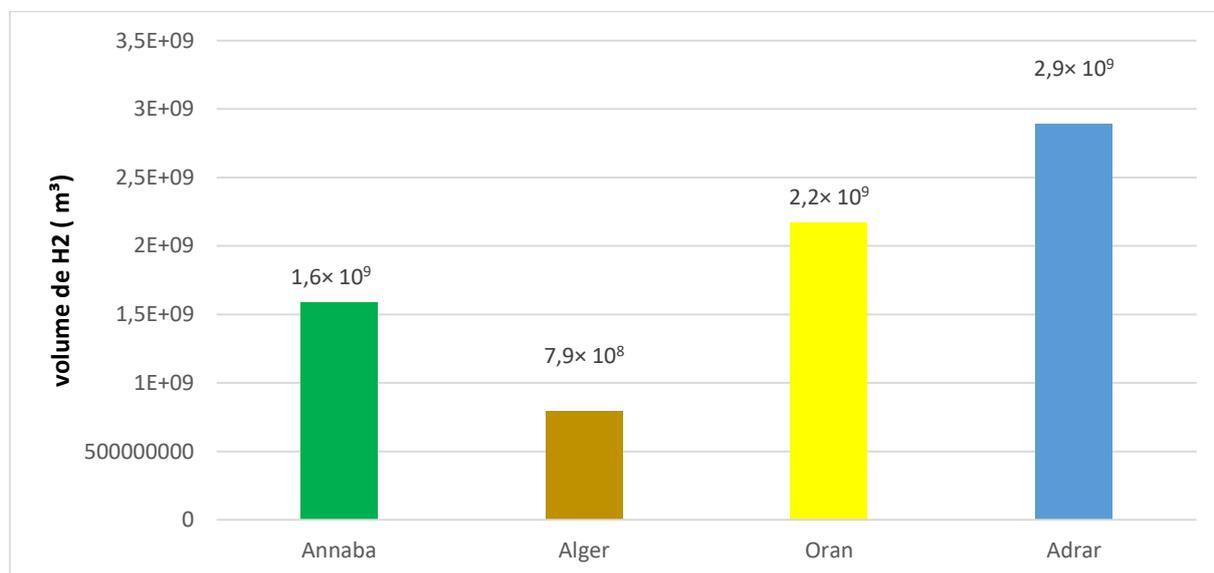


Figure 3.30 : la production annuelle d'hydrogène.

La figure 3.30 illustre la production annuelle d'hydrogène grâce à l'énergie éolienne dans différents endroits. Nous avons constaté que la production d'hydrogène la plus importante se trouvait à Adrar, suivie par Oran, puis en Annaba, tandis que la production la plus faible était dans Alger

Conclusion :

Dans notre travail nous avons traité la production d'hydrogène vert à partir de l'énergie éolienne dans trois régions du Nord, à savoir Oran, Annaba et Algérie et régions on sud Adrar.

Grace à cette étude, Nous avons constaté que la production d'hydrogène la plus importante se trouvait à Adrar, suivie par Oran, puis en Annaba, tandis que la production la plus faible était à Alger.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié un système de production d'hydrogène par électrolyseur de l'eau à partir de l'énergie éolienne. Nous avons choisi les zones suivantes : Oran, Algérie, Adrar et Annaba, afin de mener cette étude.

Au cours de ce travail d'étude, nous avons abordé les points suivants :

1. La Détermination du potentiel éolien des sites sélectionnés : Nous avons analysé les données de vitesse du vent pour évaluer le gisement éolien de chaque site. Il est intéressant de noter que le site d'Adrar présente un potentiel éolien significatif, avec un pic de vitesse 18,20 (m/s).
2. Le dimensionnement du système éolien-électrolyseur : Nous avons sélectionné une éolienne de 500KW afin de produire l'électricité nécessaire pour le fonctionnement de notre électrolyseur constitué de un stack.
3. Estimation de la production d'hydrogène : Nous avons évalué la quantité d'hydrogène produite par ce système.

En analysant les résultats, nous avons constaté que la production d'hydrogène était la plus élevée dans la région d'Adrar, suivie par Oran, Annaba, puis l'ensemble de l'Algérie.

Liste des références

Référence :

- [1] Lubitz, W., & Tumas, W. (2007). Hydrogen: an overview. *Chemical reviews*, 107(10), 3900-3903
- [2] Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847-3869.
- [3] Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, 291, 117294.
- [4] Jonchère, J. P. (2003). Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles. Mémento sur l'hydrogène (fiche 3.1. 1) <http://www.afh2.org/uploads/memento/Fiche>, 203(1).
- [5] Bouziane, A. S., & Ouled Haddar, D. Modélisation prospective sur la durabilité des systèmes énergétiques hydrogène (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA,).
- [6] Harouadi, F., Mahmah, B., Belhamel, M., Chader, S., M'raoui, A., & Etievant, C. (2007). Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro-maghrébin Partie I: Phase d'étude d'opportunité et de faisabilité. *Journal of Renewable Energies*, 10(2), 181-190.
- [7] Mezouar, F. E. (2012). Contribution à la production d'hydrogène par le solaire thermique (Doctoral dissertation, Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés).
- [8] Th. Alleau, Les piles à combustible, Mémento de l'Hydrogène, FICHE 5.2.1, AFH2, 2008.
- [9] Wróbel, K., Wróbel, J., Tokarz, W., Lach, J., Podsadni, K., & Czerwiński, A. (2022). Hydrogen internal combustion engine vehicles: a review. *Energies*, 15(23), 8937.
- [10] KOVAČ, Ankica, PARANOS, Matej, et MARCIUŠ, Doria. Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no 16, p. 10016-10035.
- [11] Joubert, J. M., Cuevas, F., Latroche, M., & Percheron-Guégan, A. (2005). Stockage de l'hydrogène et risques. *L'HYDROGÈNE, FUTUR VECTEUR ENERGÉTIQUE?*, 27.
- [12] DELPY, A., VAUCHY, T., BARBIER, E., BERNADOY, C., LACOURTE, P. Î., COURGNEAU, C., ... & Antoine, L. I. Transport de l'Hydrogène.

- [13] Darras, C. (2010). Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène: applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H) (Doctoral dissertation, Université Pascal Paoli).
- [14] Lenoble*, B. (2005). L'aéroplane et le ballon vus par le journal: Technique aérienne et imaginaire médiatique en France (de 1906 au début des années 1920). *Hypothèses*, (1), 209-220
- [15] Kumar, S. Shiva, and Hankwon Lim. "An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production." *Energy reports* 8 (2022): 13793-13813.
- [16] Yaaqoub, D. (2023). Etude de la production d'hydrogène par le procédé d'électrolyse de l'eau alcaline (Doctoral dissertation, university center of Abdalhafid boussouf-MILA).
- [17] Rozain, C. (2013). Développement de nouveaux matériaux d'électrodes pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- [18] Sara, S. O. U. A. L., Florent, B. D., & Kévin, G. A. U. L. T. (2022). Étude de la fiabilité, de la durabilité et de la sécurité des électrolyseurs alcalins et à membrane échangeuse de protons
- [19] Rabih, S. (2008). Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques (Doctoral dissertation)
- [20] EMBARKI Ala Eddine, B. E. N. Modélisation D'électrolyseur Proton Exchange Membrane (PEM)
- [21] L. Aiche-Hamane, 2015, « *contribution à l'estimation du potentiel d'hydrogène produit par l'énergie éolienne* », Thèse de doctorat, Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, p 49, 50,53,56-60, 114-117, 135-137.
- [22] L.Aiche- Hamane, M.Belhamel, B.Benyoucef, M.Hamane, décembre, 2010, "*Study of hydrogen production from wind power in Algeria*", 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010 Parallel Sessions Book 3: Hydrogen Production Technologies – Part 2, p17-21, Detlef Stolten, Thomas Grube (Ed), Forschungszentrum Jülich GmbH.
- [23] Babatunde olateju, Amit kumar, Marc Secanell, 2016, "*A techno-economic assessment of large scale wind-hydrogen production with energy storage in Western Canada*", International journal of Hydrogen Energy.

[24] L. Aiche-Hamane, M. Belhamel, B. Benyoucef and M.Hamane, 2009, “*Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia*”, International journal of hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 4947-**4952**.

[25] TRNSYS 16 Documentation.