

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en génie mécanique,

Spécialité : Energétique.

Thème :

**Dimensionnement et simulation d'un système
hybride (Photovoltaïque-éolien) pour la
production de l'hydrogène vert**

Présenté par :

Mohammedi Mohamed

Abed Mohamed .

Soutenu le **23/06/2024** devant le jury compose de :

Ferrouk Mohamed

Umm Tizi –ouzou

President

Hani BELTAGY

Umm Tizi –ouzou

Encadrant.

Bouchneb Djalal

Sonatrach

Co-encadrant

Fouchane Sid-ali

Umm Tizi-ouzou

Examineur

Promotion 2023/2024

ملخص

يتمثل العمل الحالي في تحديد خصائص نظام الطاقة المتجددة المستخدم لإنتاج الهيدروجين الأخضر في الجزائر، ويتم هذه الخصخصة من خلال نمذجة ومحاكاة من أجل تقدير أداء النظام.

من أجل هذا قمنا بإنشاء دفتر شروط الذي يسمح بتحديد مختلف الخصائص والموصفات المصممة لهذا الغرض التي تتمثل في إنتاجية الهيدروجين الأخضر ذلك لتحديد العناصر الأساسية المكونة للنظام: المصدر الكهربائي، وخصائص أنظمة الطاقة الكهروضوئية والرياح، والمحلل الكهربائي، والتكاليف المختلفة، يتم تحليل سلسلة قيمة الهيدروجين الأخضر بداية من الإنتاج والتخزين والنقل إلى التطبيقات

كلمات مفتاحية:

المحلل الكهربائي، الهيدروجين الأخضر، مجال الطاقة الشمسية، ميدان الرياح، النظام الهجين، خلايا الوقود

Résumé

Le présent travail consiste à caractériser un système à énergies renouvelables utilisé pour la production d'hydrogène vert en Algérie, cette caractérisation est réalisée à travers une modélisation et une simulation afin d'estimer les performances du système. Un cahier des charges conçu à cet effet permet de dimensionner notre système à production d'hydrogène, le dimensionnement concerne: la source électrique, les caractéristiques des systèmes PV et éoliennes, l'électrolyseur, et les différents coûts, de plus une simulation numérique permet de déterminer les différentes performances de notre système, enfin La chaîne de valeur de l'hydrogène vert depuis la production, le stockage, le transport, jusqu'aux applications sont analysés

Mots clés: gisement solaire, gisement éolien, système hybride, pile à combustible, électrolyseur, hydrogène vert

Abstract:

The present work consists in characterizing a renewable energy system used for the production of green hydrogen in Algeria. This characterization is carried out through modeling and simulation in order to estimate the system's performance. A specification designed for this purpose is used to size our hydrogen production system. The sizing concerns: the electrical source, the characteristics of the PV and wind power systems, the electrolyzer, and the various costs; in addition, a numerical

simulation is used to determine the various performances of our system; finally, the green hydrogen value chain, from production, storage and transport to applications, is analyzed.

Key words: solar regulation, wind field, hybrid system, fuel cell, electrolyzer, green hydrogen

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude a plusieurs personnes dont le soutiens et les encouragements ont été déterminants dans la réalisation de ce mémoire

Tout d'abord, nous remercions chaleureusement notre Co-encadrant, M. Djalal Bouchneb, pour son encadrement, ses précieux conseils et son accompagnement tous au long de ce travail. Sa disponibilité et son expertise ont été atouts essentiels pour mener à bien ce projet.

Nous tenons également a remercié tout l'équipe de département d'Energie nouvelle de Sonatrach pour leur accueil, leur assistance et les ressources mises à notre disposition. Leur collaboration et leur soutien ont été grandement appréciés

Notre remerciements va également à M. Abdelhamid M'Raoui, chef de division hydrogène du CDER, pour ces conseils avisés et son continu. Sa vision et son expertise dans le domaine de l'hydrogène ont largement contribué à enrichir ce travail.

Nous souhaitons enfin exprime notre profond reconnaissance à notre encadrant, M. Hani Beltagy, pour sa supervision attentive, ses encouragements constants est ses suggestions constructives. Son engagement et sa rigueur scientifique ont été une source d'inspiration tout long de ce projet.

A tous, nous exprimons notre gratitude pour votre aide précieuse et votre soutient, sans lesquels ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ma famille qui a été une source inépuisable de soutien et d'encouragement tout au long de cette aventure académique

A ma mère, pour son amour inconditionnel, ses sacrifices et son soutien constant. Tu as toujours été mon pilier et mon inspiration.

A la mémoire de mon père

A mes sœurs, Fatima, Sabrina et Ilina, pour leur affection, leur encouragement et leur présence rassurante. Votre soutien m'a donné la force de persévérer dans les moments difficiles.

A tous mes amis et proches, pour leur amitié, leur compréhension et leur encouragements. Vous avez joué un rôle précieux dans la réalisation de ce travail

Mohammedi Mohamed

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ma famille qui a été une source inépuisable de soutien et d'encouragement tout au long de cette aventure académique

A mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant. Vous avez toujours été mes piliers et mes inspirations.

A mes sœurs, Nora et Sihem, et mon frère Slimane pour leur affection, leur encouragement et leur présence rassurante. Votre soutien m'a donné la force de persévérer dans les moments difficiles.

A tous mes amies et proches, pour leur amitié, leur compréhension et leur encouragements. Vous avez joué un rôle précieux dans la réalisation de ce travail.

Abed Mohamed

Sommaire :

Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables

Introduction générale :	1
Introduction :	2
1-Ressources énergétique renouvelable en Algérie :	3
1.1. L'énergie solaire en Algérie :	3
1.2. Energie éolienne :	3
1.3. Géothermique :	4
1.4. Biomasse :	5
1.5. Hydroélectrique :	6
2. Développement des énergies renouvelables en Algérie :	7
2.1. Les projets de développement des énergies renouvelables EnR :	7
2.2. Programme Algérien des énergies renouvelables :	7
3. Gisement solaire en Algérie :	9
4. Le rayonnement solaire :	10
4.1. Les Composantes du rayonnement solaire :	11
•.Rayonnement direct	12
•.Rayonnement diffus	12
•.Rayonnement réfléchi	12
•.Rayonnement global	12
4.2. Repérage du soleil dans le ciel :	12
4.2.1. Les coordonnées géographiques :	12
- La longitude (L)	13
- La latitude (Φ)	13

- L'altitude (Z)	13
4.2.2. Les coordonnées horaires :	13
- La déclinaison (δ).....	13
- L'angle horaire (ω).....	14
4.2.3. Les coordonnées horizontales :	14
•L'azimut solaire (a)	14
•La hauteur (h).....	15
5. Gisement éolienne en Algérie :	15
5.1. Origine de vent :	16
5.2. Mesure de vent :	17
5.3. Productions d'électricité :	18
5.4. Données sur le vent :	18
5.5. Les différents types d'éoliennes :	19
5.5.1. Les éoliennes à axe vertical :	19
5.5.2. Les éoliennes à axe horizontale :	19
6. Energie photovoltaïque :	21
6.1. Principe de fonctionnement :	21
6.2. Différents types de cellules solaires :	22
a) Cellules mono- cristallines :	22
b) Cellules poly-cristallines :	23
c) Cellules amorphes :	24
Conclusion :	25

Chapitre 2 : Notions générales sur L'hydrogène

1. Introduction :	26
-------------------------	----

2. Caractéristiques de L'hydrogène :.....	26
3. Les couleurs de l'hydrogène :	28
3.1. L'hydrogène gris :	28
3.2. L'hydrogène bleu :	29
3.3. L'hydrogène vert :	29
4. Application de l'hydrogène :.....	30
•Application stationnaire :.....	30
•Application mobiles :	31
•Application industrielles :	31
5. Transport de l'hydrogène :.....	31
5.1. Pipeline :.....	31
5.2. Navire :.....	32
5.3. Camion :	32
5.4. Rail :	33
6. Stockage de l'hydrogène :.....	34
6.1. Le stockage gazeux :	34
6.2. Stockage solide :.....	34
6.3. Stockage liquide :.....	35
7..Les différentes techniques de production de l'hydrogène vert :.....	35
7.1. L'électrolyseur de l'eau :.....	35
7.1.1. Electrolyseur alcaline :	36
7.1.2. Electrolyseur PEM :	37
7.1.3. Electrolyseur à haute température :.....	38
8. .hydrogène vert en Algérie vision 2023-2040 :	40

Conclusion :.....	40
-------------------	----

Chapitre 3 : Etude Préliminaire

3.1. Introduction :.....	41
--------------------------	----

3.2. Description du projet :.....	41
-----------------------------------	----

• Énergie renouvelable :.....	41
-------------------------------	----

• Électrolyseurs :.....	42
-------------------------	----

• Approvisionnement en eau :.....	42
-----------------------------------	----

3.3. Centrale renouvelable hybride :	42
--------------------------------------------	----

3.3.1. Système hybride (photovoltaïque et éolienne) :.....	43
------------------------------------------------------------	----

Pourquoi nous avons choisis ces deux ressources.....	43
------------------------------------------------------	----

3.4. La demande d'eau pour la production d'hydrogène vert :	44
-------------------------------------------------------------------	----

3.5. Choix de site du projet	45
------------------------------------	----

❖ Évaluation des besoins de notre projet.....	46
-----------------------------------------------	----

• L'hydrogène :	47
-----------------------	----

• Electricité :	47
-----------------------	----

• L'eau :	47
-----------------	----

Estimation de pourcentage d'électricité généré par voix photovoltaïque et éolienne :.....	48
-------------------------------------------------------------------------------------------	----

Répartition d'électricité produites par photovoltaïque et éolienne pour les trois sites (Arzew, Ouargla, Adrar).	49
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

• Électrolyseur :	52
-------------------------	----

3.6. Analyse économique du projet :.....	54
------------------------------------------	----

3.6.1. Estimation du coût d'investissement :.....	55
---------------------------------------------------	----

3.6.1.1. Coût de la source d'électricité renouvelable :	55
---------------------------------------------------------------	----

3.6.1.2. Coût de l'électrolyseur :	56
------------------------------------------	----

3.6.1.3. Coût de l'hydrogène vert :.....	57
Conclusion :.....	57

Chapitre 4 : simulation du projet étudié.

Introduction	58
2. Définition de Homer pro :	58
2.1. Extension d'hydrogène vert sous Homer pro :	58
2.2 Modèle mathématique.....	59
2.3. Le module d'hydrogène dans HOMER PRO :	60
3. Simulation sous Homer Pro :	62
3.1. Présentation du site et des ressources :	62
3.2. La ressource Solar Global Horizontal Irradiation (GHI) :	63
3.3. Ressource éolienne :	63
3.4. Ressource de la température :	64
3.5. Choix des composants :	65
4. Proposition de système :	65
4.1. Panneaux solaires photovoltaïques :	65
4.2. Éolienne :	66
4.3 La batterie :	67
4.4. Convertisseur (Onduleur) :	68
4.5. Électrolyseur :	69
4.6. Réservoir d'hydrogène :	70
4.7. La charge étudiée :	71
4.8. Grid :	72
4.9. Charge d'hydrogène (La pile à combustible) :	72

5. Résultats de simulation par logiciel Homer Pro :.....	73
5.1. Résultats techniques Pour Arzew :.....	73
5.2. L'analyse des résultats de la simulation :.....	73
5.3. Résultats techniques Pour Ouargla :.....	75
5.4. Résultats technique pour Adrar :.....	77
6. Exploitation de l'hydrogéné produite :.....	78
7. Pile à combustible :	78
7.1. Définition :	78
7.2. Fonctionnement :.....	79
7.3. Réactions chimiques :.....	79
7.4. Applications des piles à combustible :	80
Conclusion :.....	81
Conclusion générale :	82

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables

Figure.1.1 : Panneaux solaire	3
Figure.1.2 : une ferme éolienne pour produire d'électricité.....	4
Figure.1.3 : principe fonctionnement de l'énergie géothermique	5
Figure.1.4 : principe fonctionnement de production d'électricité par énergie biomasse	6
Figure.1.5 : principe fonctionnement de production d'électricité par énergie hydroélectrique	6
Figure.1.6 : Répartition de la production énergétique renouvelable en Algérie à L'horizon 2030.....	8
Figure.1.7 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale.	10
Figure.1.8 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	11
Figure.1.9 : Les composants du rayonnement solaire	11
Figure.1.10 : les coordonnées géographiques	13
Figure.1.11 : les coordonnées horaires	14
Figure.1.12 : les coordonnées horizontales	15
Figure.1.13 : L'influence de la force de Coriolis sur les courants d'air.....	17
Figure.1.14 : principe fonctionnement d'un anémomètre	17
Figure.1.15 : Transformation de l'énergie du vent.....	18
Figure.1.16 : Composants d'une éolienne à axe horizontale	20
Figure.1.17 : Fonctionnement d'un panneau solaire PV	21
Figure.1.18 : Les panneaux solaires photovoltaïques.....	21
Figure.1.19 : Schéma d'une cellule solaire	22
Figure.1.20 : Cellules mono-cristallines	23

Figure.1.21 : Cellules poly-cristallines	23
Figure.1.22 : Cellule amorphe.....	24

Chapitre 2 : Notions générales sur L'hydrogène.

Figure.2.1 : les principales couleurs d'hydrogène	28
Figure.2.2 : processus de production de l'hydrogène gris.....	29
Figure.2.3 : processus de production de l'hydrogène bleu.....	29
Figure.2.4 : processus de production de l'hydrogène vert	30
Figure.2.5 : Transport et application de l'hydrogène	33
Figure.2.6 : électrolyse de l'eau	36
Figure.2.7 : schéma de principe de l'électrolyse alcaline	37
Figure.2.8 : schéma de principe de l'électrolyse PEM	38
Figure.2.9 : Schéma d'électrolyse à haute température	39

Chapitre 3 : Etude Préliminaire.

Figure.3.1 : le plan similaire du projet	42
Figure.3.2 : Un bac d'essai qui montre un système hybride Source	44

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié.

Figure.4.1 : La charge d'hydrogène Source : capture prise de logiciel HOMER	60
Figure.4.2 : Les composants de module hydrogène Source : capture prise de logiciel HOMER	60
Figure.4.3 : Les informations sur le réformateur Source : capture prise de logiciel HOMER	60
Figure.4.4 : les informations sur l'électrolyseur, Source : capture prise de logiciel HOMER PRO	61
Figure.4.5 : Les informations sur le réservoir d'hydrogène Source : Capture prise de logiciel HOMER Pro	61

Figure.4.6 : Localisation géographique de lieu d'étude, Source : Capture prise du Google carte	62
Figure.4.7 : La ressource Solar GHI du site	63
Figure.4.8 : La ressource du vent Source	64
Figure.4.9 : La ressource de la température ambiante.....	65
Figure.4.10 : Les informations du panneau choisi	66
Figure.4.11 : Les informations de l'éolienne choisi, Source : capture prise de logiciel HOMER	67
Figure.4.12 : Les informations de batterie choisie	68
Figure.4.13 : Les informations sur le convertisseur choisi Source	69
Figure.4.14 : Les informations du l'électrolyseur choisi.....	70
Figure.4.15 : Les informations du Réservoir, Source : capture prise du logiciel.....	70
Figure.4.16 : Les informations de la charge étudiée Source	71
Figure.4.17 : données tire dans le logiciel.....	72
Figure.4.18 : la consommation d'hydrogène dans la pile.....	72
Figure.4.19 : capteur prise par le logiciel Homer pour le système proposé.....	73
Figure.4.20 : Résultats d'optimisation totaux pour le système. Source : capture prise de logiciel HOMER Pro	74
Figure.4.21 : électricité produite à partir du système hybride.....	74
Figure.4.22 : production mensuelle de l'hydrogène pour l'alimentation de la pile à combustible	75
Figure.4.23 : électricité produite à partir du système hybride.....	76
Figure.4.24 : production mensuelle de l'hydrogène pour l'alimentation de la pile à combustible	76
Figure.4.25 : électricité produite à partir du système hybride Source : capture prise de logiciel HOMER	77

Figure.4.26 : production mensuelle de l'hydrogène pour l'alimentation de la pile à combustible	77
Figure.4.27 : Fonctionnement d'une pile à combustible	79
Figure.4.28 : l'utilisation de la pile à combustible dans les voitures	80

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tableau.1.1 : La consistance du programme	8
-------------------------------------------------	---

Chapitre 2 :

Tableau.2.1 : Caractéristiques de l'hydrogène	27
-----------------------------------------------------	----

Tableau.2.2 : suivant montre les données techniques des différents types d'électrolyseurs	39
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre 3 :

Tableau.3.1 : les données de projet	46
-------------------------------------------	----

Tableau.3.2 : Différents résultats de calcul	52
----------------------------------------------------	----

Tableau.3.3 : Coût de l'électrolyseur, de l'hydrogène vert et de l'électricité	55
--------------------------------------------------------------------------------------	----

Chapitre 4 :

Tableaux.4.1 : Les caractéristiques de panneau PV Source : Données tirée du logiciel.....	66
-------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tableaux.4.2 : Les informations de l'éolienne choisi, Source : capture prise de logiciel HOMER	67
---------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tableau.4.3 : Les caractéristiques de batterie, Source : Données tirée du logiciel	68
------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tableau 4.4 : Données inséré dans le logiciel	71
-----------------------------------------------------	----

Liste des symboles et des abréviations :

TEP : (Tonnes Equivalent Pétrole).

GPL : Gaz de pétrole liquéfié.

GC : coefficient de chargaff.

CO₂ : le dioxyde de carbone.

EnR : Energies Renouvelables.

ASA : l'Agence Spatiale Allemande.

(KW /m²) : kilowatt au mètre.

L : La longitude.

Φ : La latitude.

Z : L'altitude.

δ : La déclinaison

n j : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

ω : L'angle horaire

a : L'azimut solaire

h : la hauteur

Jonction PN : l'ensemble constituant une diode, c'est-à-dire un composant.

N : silicium.

H₂ : L'hydrogène.

CSC : capture et stockage de carbone.

H₂O : l'eau.

GNL : Gaz naturel liquéfié.

PEM : proton Exchange Membrane.

O_2 : oxygène.

H_3O : hydronium.

OH^- : hydroxyde

Na^+ : sodium

$NaOH$: d'hydroxyde de sodium.

PV : photovoltaïque

USD : dollars américain

KWc : correspond à une capacité de production électrique de 1 000 watts

L'IRENA : Agence internationale pour les énergies renouvelables

KWh : 1 kWh ou kilowattheure, c'est 1000 wattheures (Wh)

GWh : Le gigawattheure (GWh) est une unité d'énergie correspondant à mille millions (1 000 000 000) de watts heure ou un million de kilowattheures

MW : le mégawatt mesure la capacité de production d'énergie d'une génératrice (1 mégawatt = 1 million de watts)

L'UE : de l'Union européenne

TWh : terawatt-heure : 1 milliard de KW-heure

GHI : global horizontal irradiation

Ah : Ampère-heure (Ah), et elle indique la quantité de courant que peut fournir une batterie au fil du temps

AC : courant alternatif

DC : courant continue

CSP : centrale solaire thermodynamique

Y_{pv} : la capacité du système PV [KW]

F_{pv} : pourcentage de dégradation

G_T : Eclairement Globale [Kw/m²]

G_T, S_{Tc} : Éclairement incident [KW/m²]

U_{hub} : la vitesse de vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne

U_{anem} : la vitesse de vent à la hauteur de l'anémomètre

Z_{hub} : La hauteur du moyeu de l'éolienne

Z_{anem} : la hauteur de l'anémomètre

α : L'exposant de la loi de puissance

Introduction générale

Introduction générale :

La transition énergétique est devenue un enjeu crucial pour les pays du monde entier, notamment pour répondre aux défis du changement climatique et de la dépendance aux énergies fossiles. L'Algérie, dotée d'un potentiel exceptionnel en énergies renouvelables, notamment le solaire et l'éolienne, a une opportunité unique de s'inscrire dans cette dynamique globale. La production d'hydrogène vert, c'est-à-dire d'hydrogène produit à partir de sources d'énergies renouvelables, représente une voie prometteuse pour diversifier le mix énergétique du pays et contribuer à la décarbonisation de l'économie, pour cette raison et pour faire face à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de se préparer à un avenir post-pétrole, l'Algérie doit exploiter ses ressources renouvelables pour produire de l'énergie propre et durable, pour cette raison notre objectif principal de notre travail est simuler la production d'hydrogène vert en Algérie en utilisant le potentiel solaire et éolien du pays, l'objectif principal est subdivisé à plusieurs sous-objectifs qui représente la méthodologie de notre travail :

Analyser les ressources renouvelables disponibles en Algérie, en mettant l'accent sur les gisements solaires et éoliens.

- Etudier les technologies photovoltaïques et éoliennes
- Présenter des notions générales sur l'hydrogène, en détaillant les techniques et les technologies disponibles.
- Elaborer une étude préliminaire sur précisant les besoins et les spécifications de notre système de production d'hydrogène vert.
- Réaliser un dimensionnement détaillé du système de production de l'hydrogène vert à l'aide de logiciel Homer pro.

Chapitre 1 :
Généralités sur les énergies
renouvelables

Introduction

L'Algérie, pays riche en ressources énergétiques, s'engage dans une transition vers les énergies renouvelables pour répondre à la demande croissante d'énergie tout en préservant l'environnement. Le programme actualisé d'énergies renouvelables vise à installer une capacité d'énergie renouvelable d'environ 22 000 MW d'ici 2030 pour le marché national, avec l'objectif stratégique d'exporter, à condition que les conditions du marché le permettent.

En outre, le programme actualisé d'efficacité énergétique vise à réaliser des économies d'énergie d'environ 63 millions de TEP d'ici 2030 dans tous les secteurs, y compris les bâtiments et l'éclairage public, les transports et l'industrie. Cet objectif sera atteint grâce à l'introduction d'un éclairage efficace, d'une isolation thermique, de chauffe-eau solaires, de carburants propres tels que le GPL, et d'équipements industriels efficaces.

En mettant en œuvre le programme d'efficacité énergétique, l'Algérie vise à réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes. Cela sera non seulement bénéfique pour l'environnement, mais contribuera également au développement durable du pays.

1-Ressources énergétique renouvelable en Algérie :

L'Algérie dispose d'un vaste potentiel en énergies renouvelables, notamment solaire, éolien, hydroélectrique et géothermique.

1.1. L'énergie solaire en Algérie :

L'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçoit annuellement sur une surface horizontale de 1m^2 soit près de 3 KWh/ m^2 au nord et dépasse 5,6 KWh/ m^2 au Grand Sud dans TAMENRASSET [1].



Figure.1.1 : Panneaux solaire.

1.2. Energie éolienne :

Les études montrent que le Sud Algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel). Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s). [1]



Figure.1.2 : une ferme éolienne pour produire d'électricité.

1.3. Géothermique :

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis d'identifier plus de deux cent (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra par exemple.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/ 100m.

- Zone de Relizane et Mascara.
- Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa.
- Zone de Guelma et Djebel El Onk. Voir (Figure.1.3) [1]

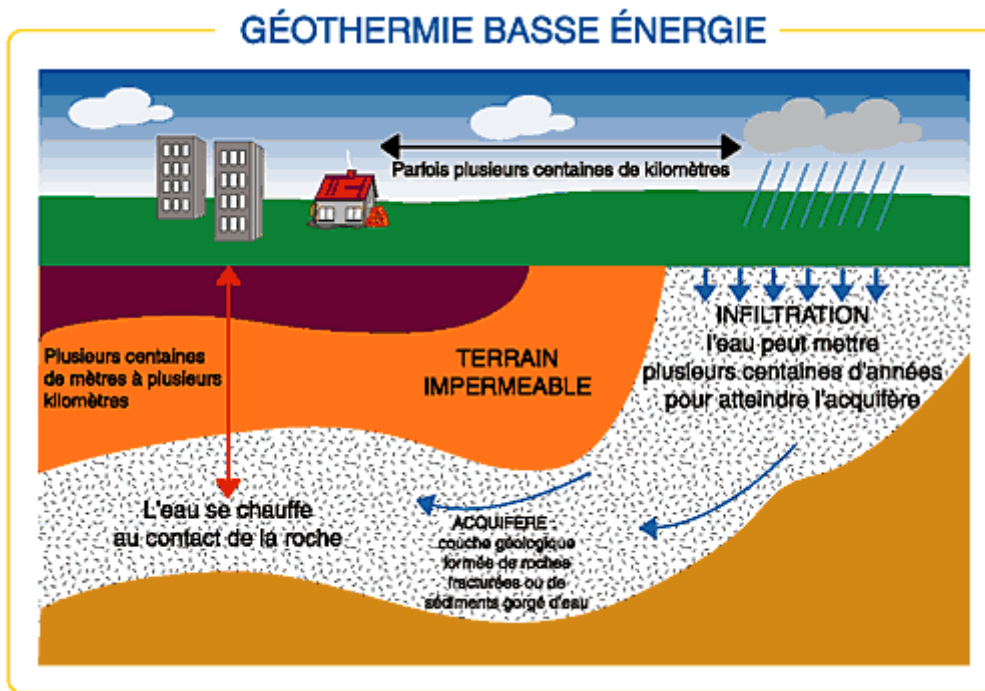


Figure.1.3 : principe fonctionnement de l'énergie géothermique.

1.4. Biomasse :

- Potentiel de la forêt :

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole).

Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%.

- Potentiel national des déchets ménagers et assimilés :

05 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de TEP/an. [1] voir (Figure.1.4)

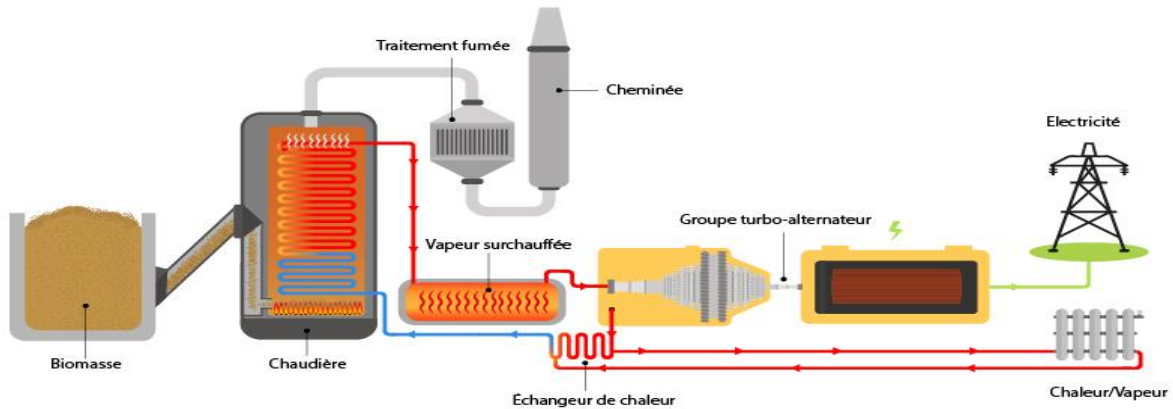


Figure.1.4 : principe fonctionnement de production d'électricité par énergie biomasse.

1.5. Hydroélectricité :

Les quantités globales tombant sur le territoire Algérien sont importantes et estimées à 65milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer. Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50barrages sont actuellement en exploitation. Voir (figure.1.5) [1]

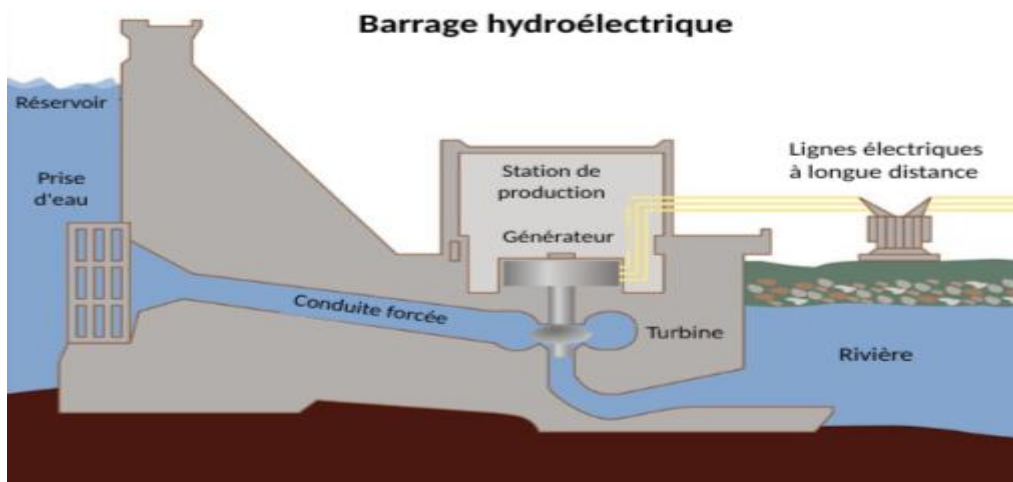


Figure.1.5 : principe fonctionnement de la production d'électricité par énergie hydroélectrique.

2. Développement des énergies renouvelables en Algérie :

La stratégie de l'Algérie pour le développement des énergies renouvelables :

La stratégie suivie par l'état Algérien vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de capitalisation des connaissances, qui permettra à terme, d'employer le génie local Algérien, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme EnR, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects.

L'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

2.1. Les projets de développement des énergies renouvelables EnR :

Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes :

- Première phase 2015 - 2020 : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.
- Deuxième phase 2021 - 2030 : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara, permettra l'installation des grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar,... et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable. [2]

2.2. Programme Algérien des énergies renouvelables :

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, [2] répartie par filière comme suit :

Tableau.1.1 : La consistance du programme. [2]

Unité : MW	1ère phase 2015-2020	2ème phase 2021-2030	Totale
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	06	10
Total	4 525	17 475	22 000

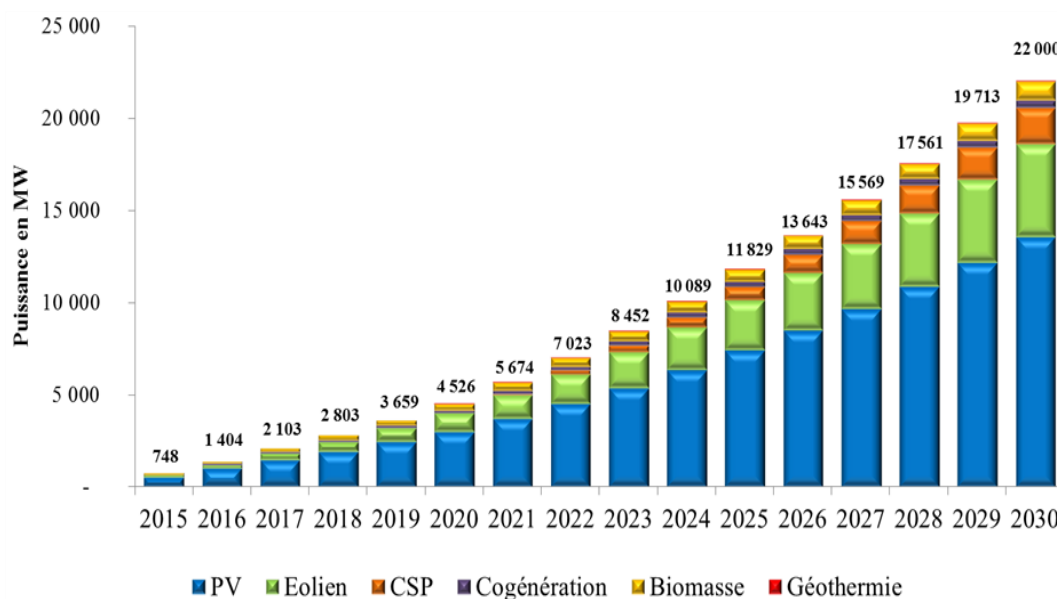


Figure.1.6 : Répartition de la production énergétique renouvelable en Algérie à L’horizon 2030.

[2]

3. Gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie possède un potentiel solaire le plus important parmi les pays de la région Nord-Africains et Moyen-Orient [3].

Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen .Le Sahara représente environ 87% de la surface globale de l'Algérie, ce qui représente la majeure partie du territoire Algérien, situé entre les latitudes 20° N et 34° N. Ainsi, La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien, de l'ordre de 3500h/an, est la plus importante au monde [4], elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j.

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande(ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

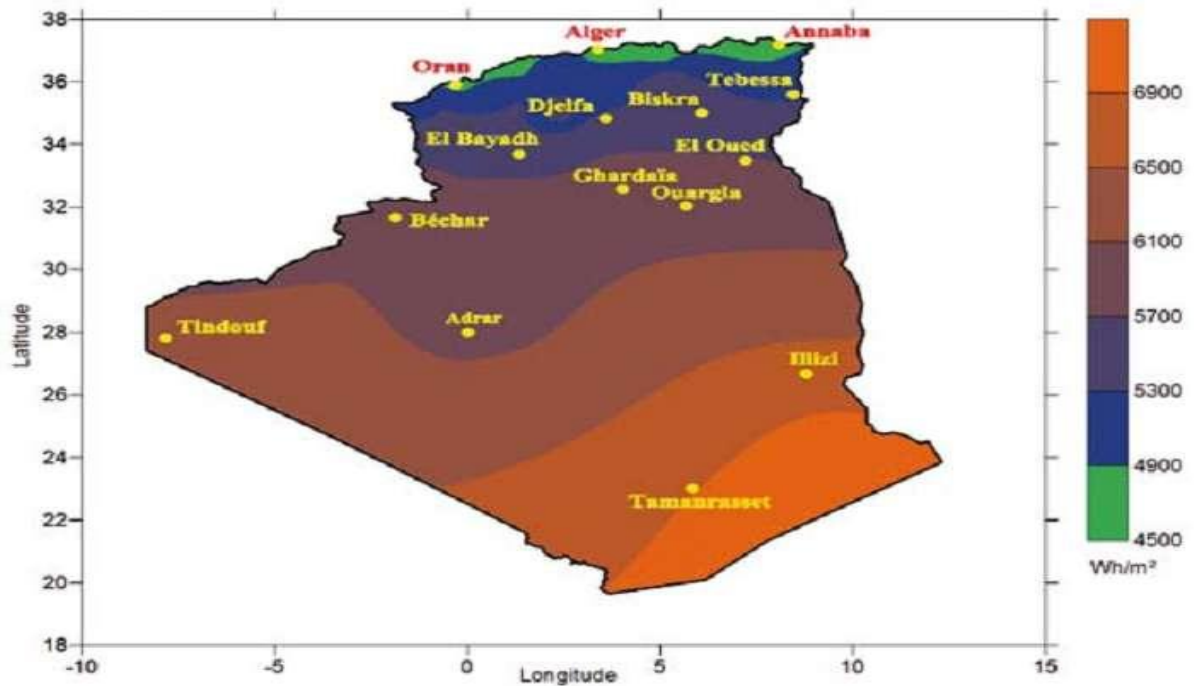


Figure.1.7 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale.

4. Le rayonnement solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 μm . (La Figure.1.9) représente la répartition spectrale du le Rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement Ainsi :

- 9 % dans la bande des ultraviolets (< 0.4 μm).
- 47 % dans la bande visible (0.4 à 0.8 μm).
- 44 % dans la bande des infrarouges (> 0.8 μm).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m^2 . La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes

qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus [5].

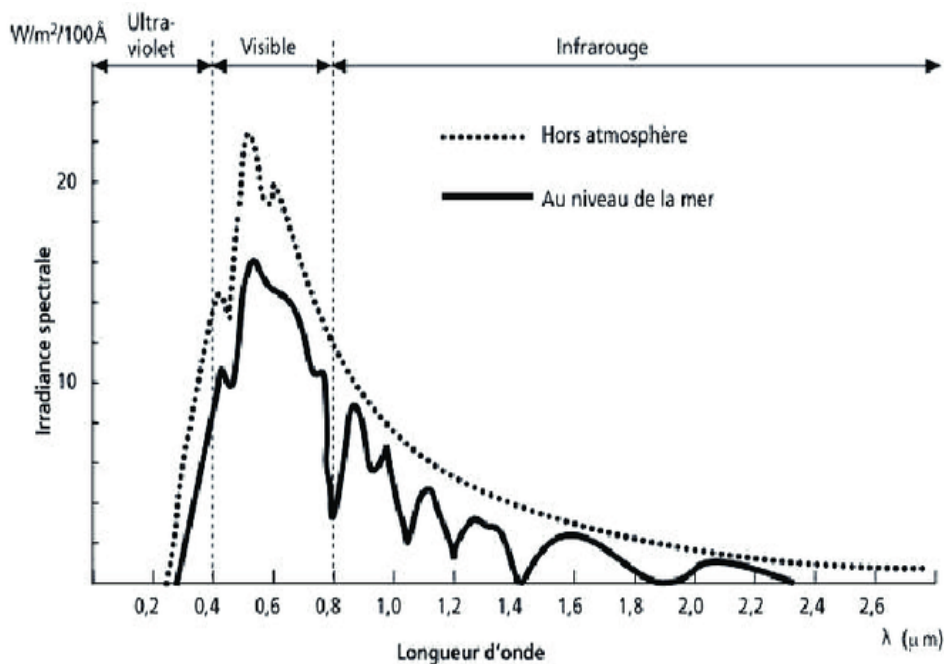


Figure.1.8 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

4.1. Les Composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire appelé également rayonnement électromagnétique émis par le soleil est grandement perturbé par l’atmosphère. Ce qui permet au sol de recevoir que les composants les plus importants et les plus actifs du rayonnement solaire total qui sont le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

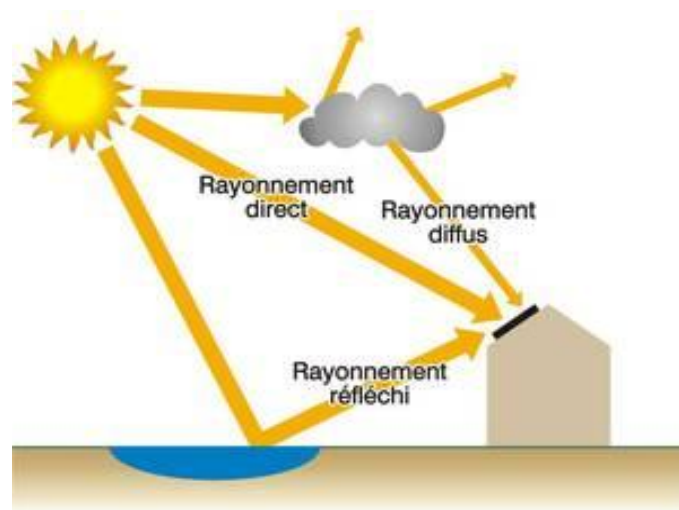


Figure.1.9 : Les composants du rayonnement solaire.

- Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

- Rayonnement diffus :

C'est le rayonnement provenant de toutes les directions à part du disque solaire

- Rayonnement réfléchi :

Appelé au même titre Albédo, c'est la capacité d'une surface à réfléchir une lumière notamment celle du soleil. Il est exprimé par un chiffre compris entre 0 et 1. Le « 1 » s'affecte à un corps qui réfléchit totalement la lumière reçue.

- Rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements direct, diffus, et reflété par le sol.

4.2. Repérage du soleil dans le ciel :

La valeur d'éclairement en un point du sol à un instant donné dépend de la position du soleil, ainsi que l'état optique de l'atmosphère, c'est pour cela il convient de formuler des définitions et des éléments essentiels pour la bonne compréhension du rayonnement solaire par le biais des méthodes de calcul du bilan de ce rayonnement en un point de la surface terrestre. La terre subit deux types de déplacement aux répercussions totalement différents. Le premier est lié au mouvement de révolution de la terre autour du soleil de périodicité annuelle, qui permet de comprendre le phénomène des saisons. Le second mouvement est lié à la rotation de la Terre sur elle-même autour de l'axe des pôles de périodicité de 24 heures, cette dernière est à l'origine de la succession des jours et des nuits. Il est bien sûr possible de déterminer de façon précise la position du soleil en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

4.2.1. Les coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre [6].

- La longitude (L) :

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré. Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

- La latitude (Φ) :

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesuré en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

- L'altitude (Z) :

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.

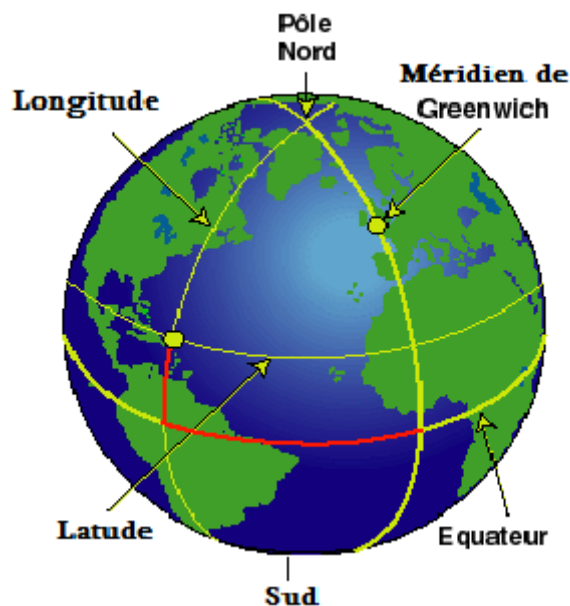


Figure.1.10 : les coordonnées géographiques.

4.2.2. Les coordonnées horaires :**- La déclinaison (δ) :**

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^\circ27'$ à $-23^\circ27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin [((284+n j)/(365))*(360)] \quad [\text{Degré}]$$

n j: Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

- L'angle horaire (ω) :

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté Positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° .

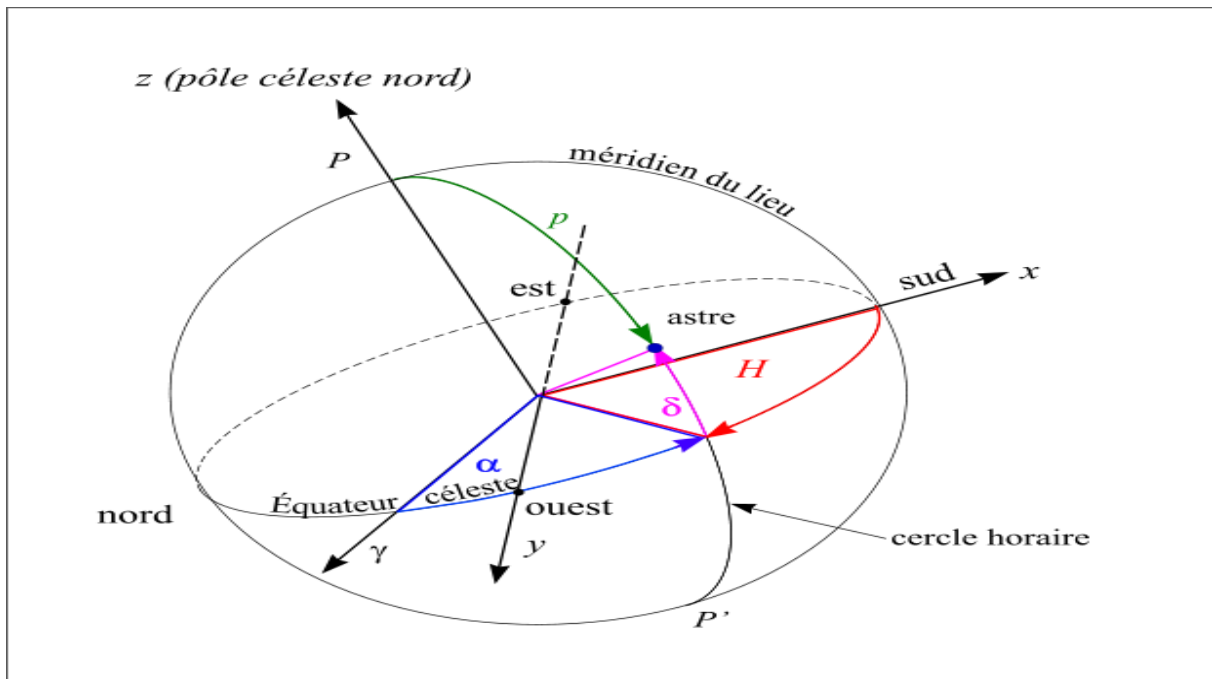


Figure.1.11 : les coordonnées horaires.

4.2.3. Les coordonnées horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- **L'azimut solaire (a) :**

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.

- **La hauteur (h) :**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir, On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$.

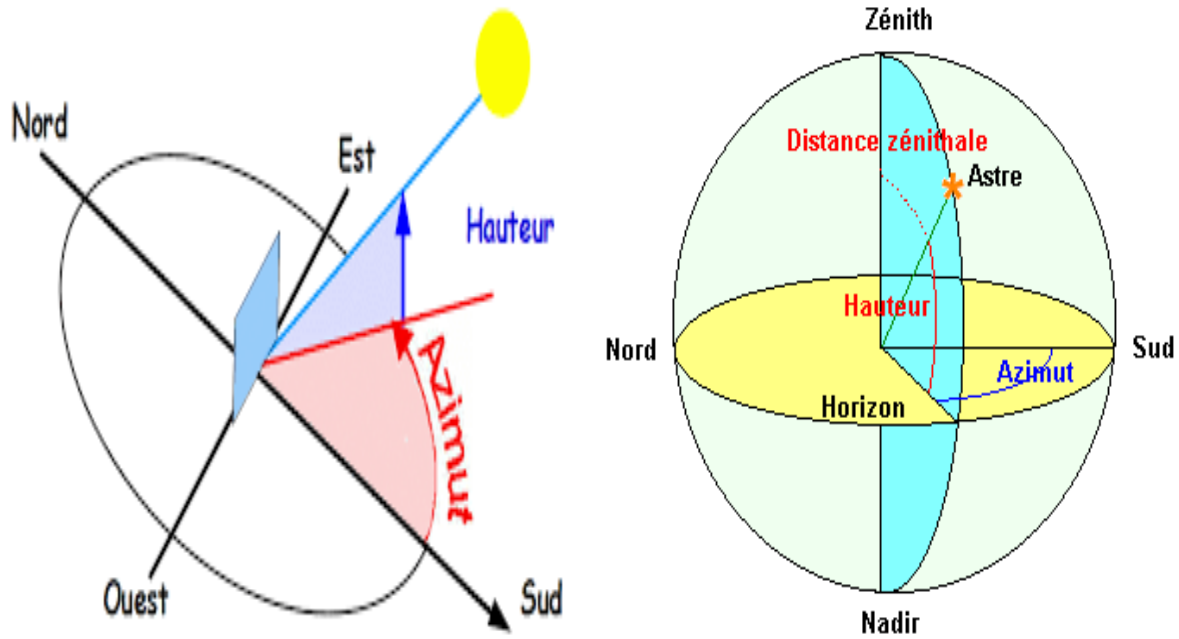


Figure.1.12 : les coordonnées horizontales.

5. Gisement éolienne en Algérie :

Grâce à son énergie cinétique, le vent constitue une ressource énergétique inépuisable, renouvelable mais fluctuante. L'installation d'une éolienne ne peut donc pas se faire d'une façon aléatoire, et l'endroit doit répondre à des critères bien définis. Généralement des études géologiques sont réalisées pour déterminer les caractéristiques des sites. Le potentiel éolien d'un site est défini comme l'énergie que l'on peut extraire d'une éolienne ou d'une multitude d'éoliennes durant une période donnée (généralement une année) de fonctionnement sur ce site. Pour évaluer la capacité du vent, il faut répartir la vitesse du vent sur le site. En outre, lors du choix de l'emplacement d'un parc éolien spécifique, d'autres paramètres doivent être pris en compte, et il est obligatoire que l'évaluation des ressources éoliennes varie à partir d'une estimation générale de l'énergie moyenne présente dans le vent sur une grande superficie [7].

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est faible. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance vient d'être installée à Adrar. Le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Energies Renouvelables, d'installer d'autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 1000 MW à moyen terme, pour atteindre les 5000 MW à l'horizon 2030. Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales. Ceci étant pour la production d'électricité, qu'en est-il de l'une des premières applications de l'énergie éolienne, [8].

Outre des revenus amoindris, la surestimation du potentiel est perçue comme un risque accru pour les investisseurs qui renoncent alors à investir dans de nouveaux projets, ou augmentent les intérêts des prêts. Tout cela nuit au développement de la filière et c'est pourquoi il est crucial d'estimer correctement la ressource éolienne des sites. [9].

5.1 Le vent :

L'atmosphère est un mélange de particules liquides ou de solides et de gaz. La composition de ce mélange est constante jusqu'à une altitude de 85 km. La méthode d'absorption de rayonnement solaire est très différente à cause de la sphère terrestre. La température d'absorption aux pôles est donc très inférieure à celle absorbée à l'équateur. Le déplacement d'une latitude à une autre crée un changement de température et des différences de densité des masses d'air, ce déplacement nommé vent [10].

Il s'établit ainsi un équilibre par transfert d'énergie vers les zones à températures extrêmes. Ces déplacements d'air subissent l'influence de la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement la direction du déplacement vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud et sont modifiés par les obstacles naturels (montagnes), les dépressions cycloniques et les orages.

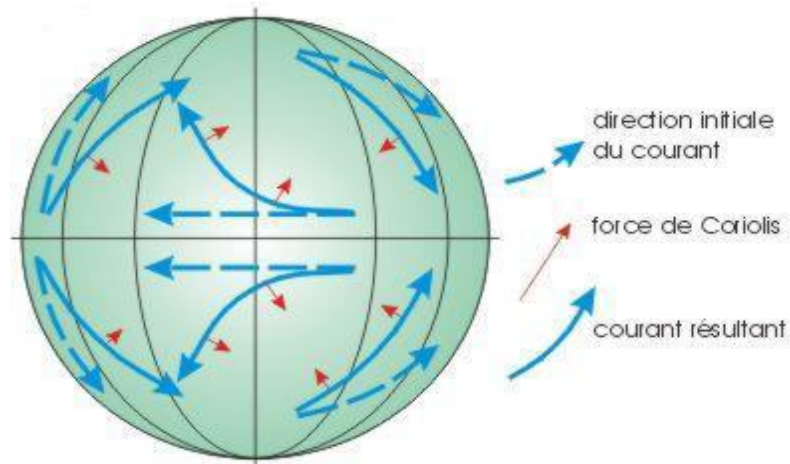


Figure.1.13 : L'influence de la force de Coriolis sur les courants d'air.

5.2. Mesure de vitesse vent :

Il faut analyser la vitesse et la direction du vent sur une échelle de temps, le mot « direction du vent » quand on en parle signifie « d'où vient le vent ». L'ouest est le vent qui souffle de l'ouest, et le nord est le vent qui souffle du nord, et sa direction est donnée à l'aide de la girouette.

La composante horizontale du mouvement de l'air en un point et un temps donné est regroupée par direction ; elle atteint également une vitesse mesurée appelée "vitesse du vent". Elle est généralement mesurée en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h).

Les données du vent provenant d'une station météorologique à proximité, peuvent aider à mieux comprendre le spectre du vent pour un site, mais pour une analyse précise, la vitesse et la direction du vent d'un site spécifique doit être mesurée à l'aide d'appareils fiables et précis tel que les anémomètres [9-10].

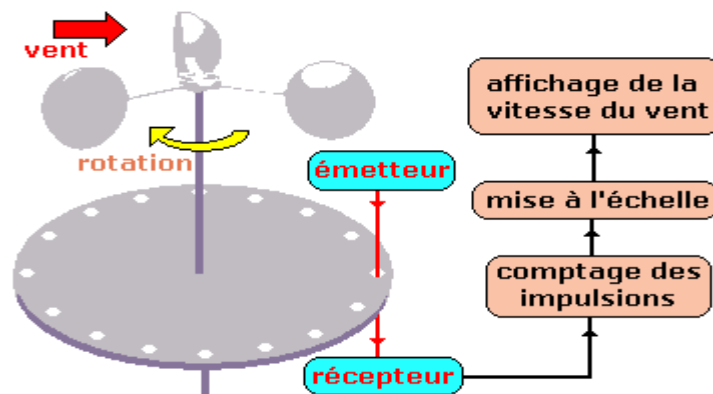


Figure.1.14 : principe fonctionnement d'un anémomètre.

5.3. Productions d'électricité :

L'énergie éolienne est générée par le vent, il convertit le mouvement du vent en énergie électrique ou mécanique.

Une éolienne est une machine utilisée pour convertir l'énergie cinétique représentée par le vent en énergie mécanique. Pour plus de clarté, nous supposons qu'il y a du vent lorsque l'air est en mouvement et donc l'air a une certaine vitesse, cette vitesse est liée à l'énergie cinétique. Le vent affecte fortement le rotor des éoliennes et le fait tourner : il produit une puissance. Cette force est transférée à un axe correspondant à une puissance. Techniquement, on a la présence d'une machine motrice [11].

Cette énergie mécanique peut être utilisée directement. Par exemple, envisagez de faire fonctionner une pompe dans un endroit qui n'est pas alimenté par le réseau électrique ou dans un ancien moulin à vent. Cependant, ces utilisations mécaniques sont négligeables. Dans la plupart des cas, l'énergie mécanique d'un rotor d'éolienne est convertie en énergie électrique à l'aide d'un générateur. (Voir figure.1.16)

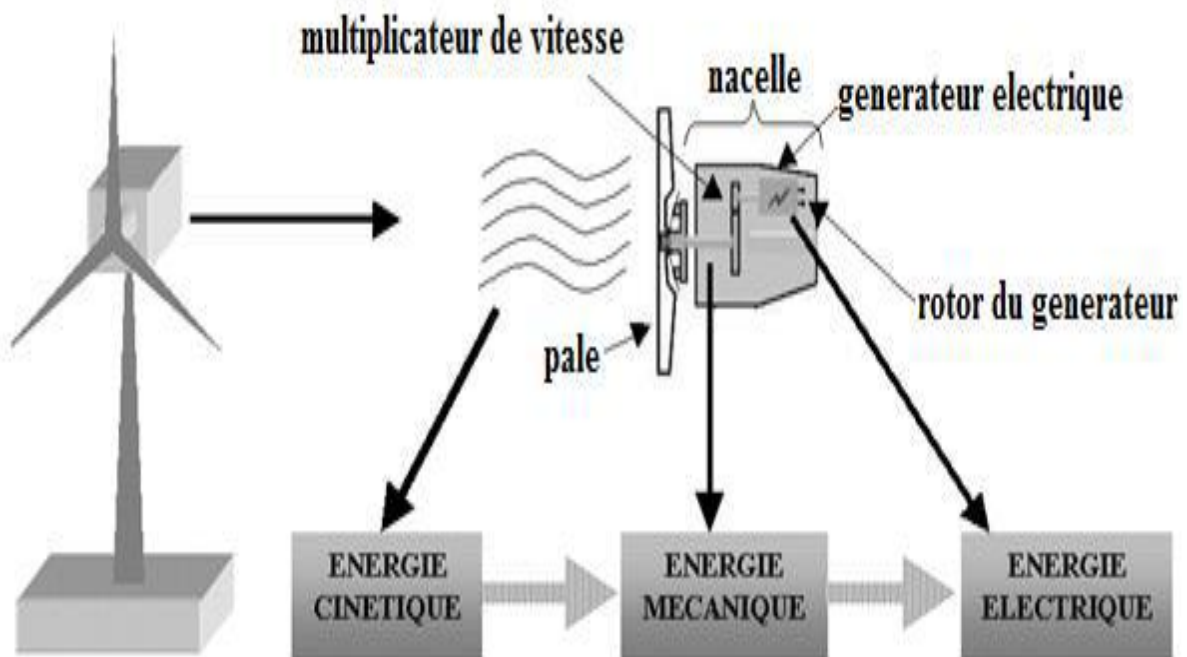


Figure1.15 : Transformation de l'énergie du vent.

5.4. Données sur le vent :

Le Sud de l'Algérie est marqué par des vitesses de vent plus élevées que le Nord, ceci est particulièrement vrai dans le Sud-ouest où les vitesses sont supérieures à 4m/s et dépassent 6m/s dans la région de l'Adrar.

En ce qui concerne le Nord, il semble que la vitesse moyenne ne soit pas très élevée. Cependant, on remarque des microclimats dans les zones côtières d'Oran, Bejaïa et Annaba, ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud. [12].

5.5. Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontale

5.5.1. Les éoliennes à axe vertical :

Ces éoliennes ont un axe de rotation à la verticale du sol et presque perpendiculaire à la direction du vent. Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine. [13].

5.5.2. Les éoliennes à axe horizontale :

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque

Parallèle à la direction du vent. La majorité des éoliennes présentes dans le marché

Appartiennent à cette catégorie [13]. Même si elles nécessitent souvent un mécanisme

D'orientation des pales, elles présentent néanmoins un rendement aérodynamique plus élevé. De plus, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût

moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Par contre, elle rend sa conception plus complexe mais aussi plus coûteuse [13].

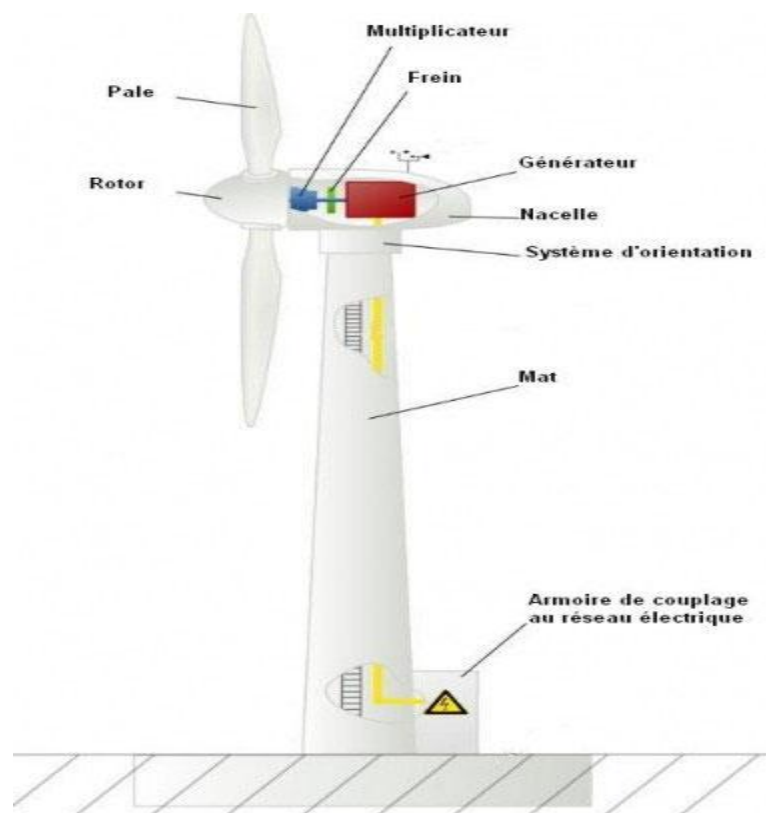


Figure.1.16 : composants d'une éolienne à axe horizontale.

6. Energie photovoltaïque

Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité.

Ces modules s'avèrent une source d'énergie électrique qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante. La majorité des modules solaires sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période.

Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

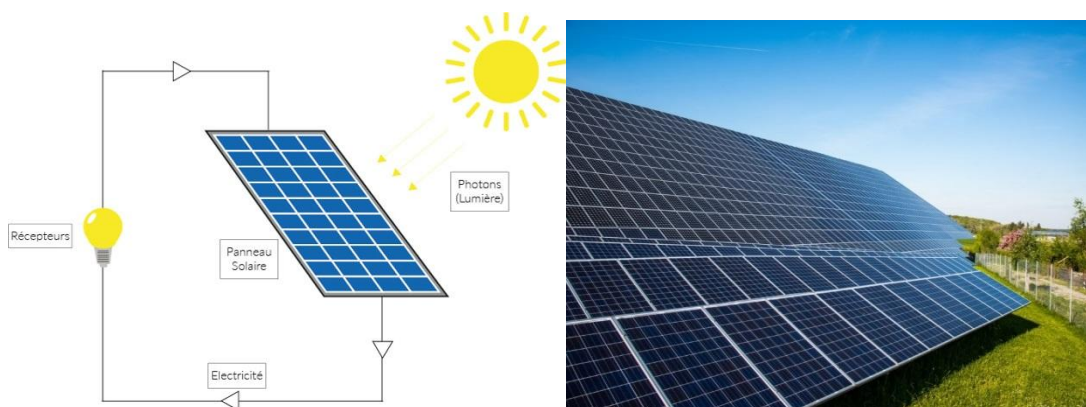


Figure1.17 : fonctionnement d'un panneau solaire PV. **Figure1.18** : Les panneaux solaires photovoltaïques.

6.1. Principe de fonctionnement :

Les cellules solaires photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction PN au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -).

Pour obtenir du silicium dopé P, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique [14]

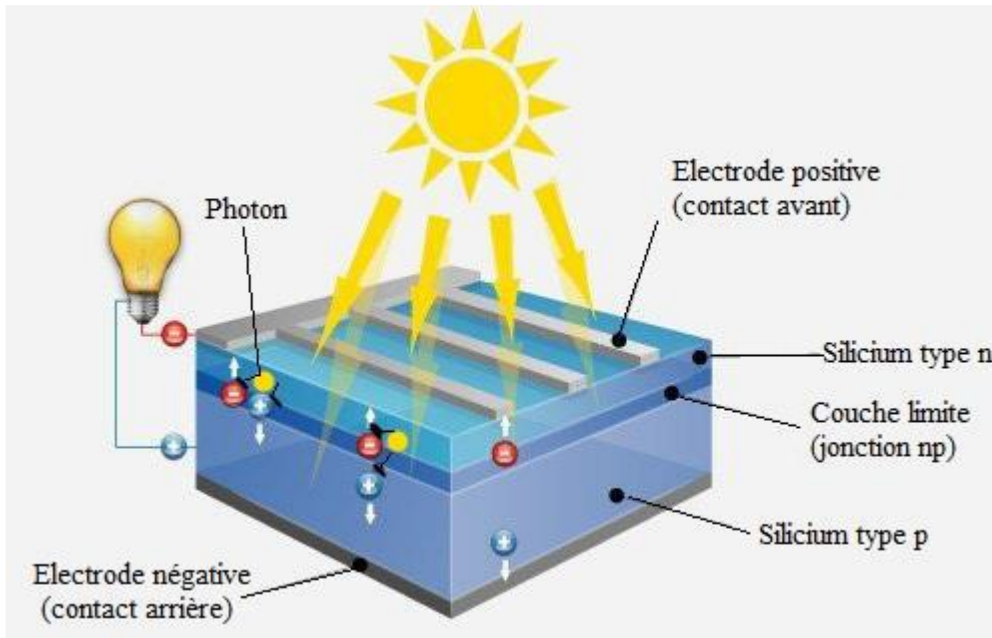


Figure.1.19 : Schéma d'une cellule solaire.

6.2. Différents types de cellules solaires :

Il existe différents types de cellules solaires photovoltaïques, et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 5 à 22% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules [14] :

a) Cellules mono- cristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- ❖ Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- ❖ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- ❖ Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).



Figure.1.20 : Cellules monocristallines.

b) Cellules poly-cristallines :

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

- ❖ Coût de production moins élevé.
- ❖ Nécessite moins d'énergie.
- ❖ Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire

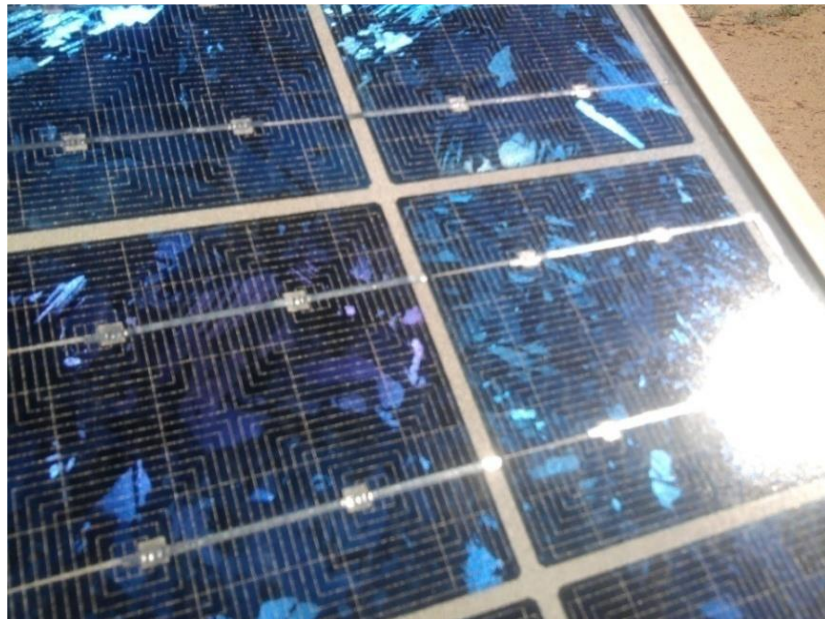


Figure.1.21 : Cellules poly-cristallines.

c) Cellules amorphes :

Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).



Figure.1.22 : Cellule amorphe.

Conclusion

Ce chapitre met en évidence le potentiel significatif des énergies renouvelables en Algérie, en particulier les ressources solaires et éoliennes. L'Algérie bénéficie d'une irradiation solaire annuelle élevée, ce qui favorise le développement du photovoltaïque avec des projets de centrales solaires et de fermes photovoltaïques en cours.

Pour l'énergie éolienne, bien que le développement soit encore naissant, des études et projets pilotes sont en place, surtout dans les régions côtières et les hauts plateaux. Ce chapitre aborde aussi les différents types d'éoliennes, à axe horizontal et vertical, et leurs applications spécifiques.

Chapitre 2 :
Notions générales sur
l'hydrogène

Etat de l'art de l'hydrogène :

1. Introduction :

L'hydrogène est considéré comme le combustible du futur, sa production est actuellement assurée principalement par reformage du gaz naturel. L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé. L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement. Certains envisagent aussi sa production grâce à l'électricité nucléaire durant les heures creuses ; c'est donc une sorte de stockage de l'énergie. Quant à son usage, il peut être soit comme combustible pour les moteurs thermiques, soit pour produire l'électricité par les piles à combustible. Ces derniers auront un rôle à jouer dans les transports futurs suite à l'épuisement du pétrole. Compte tenu des perspectives prometteuses des piles à combustibles et des moteurs thermiques à hydrogène, un système d'énergie à hydrogène peut alors être proposé comme solution de remplacement ou tout au moins complémentaire, du système d'énergie actuel. Pour rappel, le procédé électrolytique consiste à dissocier l'eau en hydrogène et en oxygène au moyen d'un courant électrique continu traversant un électrolyte disposé entre deux électrodes. Dans le but d'une meilleure production d'hydrogène, trois principaux types d'électrolyseurs font l'objet de nombreuses recherches ; les électrolyseurs alcalins, à membrane et à très haute température.

2. Caractéristiques de L'hydrogène :

L'hydrogène (H_2) est l'élément le plus simple, le plus léger et le plus abondant qui soit dans l'univers. Sa structure atomique se compose d'un proton dans son noyau et d'un électron dans son atome, il peut donc se lier à pratiquement tous les éléments tels que l'oxygène dans le cas de l'eau, le carbone dans le cas du gaz naturel, l'azote dans le cas de l'ammoniac, et d'abord à lui-même pour former la molécule de dihydrogène (H_2). De par sa nature, il n'existe pas seulement sur la Terre, mais il est aussi abondant dans les planètes et les étoiles. Il compose de 75% la masse de toute la matière dans les galaxies. A titre d'exemple, Jupiter est constitué de 99,8% d'hydrogène et d'hélium.

Tableau.2.1 : Caractéristiques de l'hydrogène [16].

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10 800Kj/Nm ³ 119 930 kJ/kg(gaz naturel 50 020 Kj/Kg) 3.00Kwh/Nm ³ 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12 770Kj/Nm ³ 141 860 Kj/Kg 3.55KWh/Nm ³ 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 273K	0.0898 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Chaleur spécifique (Cp) et (Cv) à 293K	14 266 J/kg. k / 10 300J/kg. K
Conductivité thermique du gaz	0.1897W/ (m. K)
Température de solidification	14.01K
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)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	20 (gaz naturel 290)
Surpression de détonation (mélange stœchiométrique)	14.7 bars (gaz naturel 16.8 bars)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

3. Les couleurs de l'hydrogène :

Différentes méthodes de production d'hydrogène existent en fonction du procédé sélectionné, et l'hydrogène obtenu peut être déclaré comme gris, bleu, vert, noir, etc. Toutefois, l'hydrogène n'a ni odeur ni couleur. Le fait d'attribuer une teinte à l'hydrogène est une manière imaginaire de représenter sa source, c'est-à-dire la matière et les sources d'énergie employées pendant sa production [17]. Les trois couleurs principales de l'hydrogène sont les suivantes :

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

© B. Valeur

Figure.2.1 : les principales couleurs d'hydrogène.

3.1. L'hydrogène gris :

Le terme "fossile" désigne les matières premières fossiles comme le gaz naturel, les hydrocarbures liquides ou le charbon, qui génèrent environ 11 tonnes de CO₂ pour chaque tonne d'hydrogène générée. La majorité des sources d'hydrogène actuelles sont extraites du gaz naturel à l'aide d'un processus connu sous le nom de « Reformage à la vapeur ». Cette approche nécessite une grande quantité d'énergie et génère également du dioxyde de carbone, qui peut être utilisé pour séparer les molécules d'hydrogène des molécules de carbone qui les retiennent en raison de la surchauffe de la vapeur (entre 700 et 1000 degrés Celsius) [17]. On utilise également certains catalyseurs, comme le fer ou le cuivre, afin de favoriser les réactions désirées. On peut également générer de l'hydrogène gris par la méthode de « gazéification ». Émettant un grand nombre de CO₂. Heureusement, cette technologie est rarement utilisée par les entreprises qui produisent exclusivement de l'hydrogène.



Figure 2.2 : processus de production de l'hydrogène gris.

3.2. L'hydrogène bleu :

Appelé à faible teneur en carbone est produit de la même manière que l'hydrogène gris, mais en capturant et en stockant une partie du dioxyde de carbone, ce qui génère environ 4 tonnes de dioxyde de carbone pour chaque tonne d'hydrogène produite. L'hydrogène bleu est généralement produit en stockant géologiquement du dioxyde de carbone dans des sacs de pétrole ou de gaz anciens qui sont désormais vides. D'ici 2030, cette technologie de stockage géologique, appelée "capture et stockage de carbone" ou CSC "capture et stockage de carbone dioxine", pourrait également être utilisée pour stocker près de 15% du dioxyde de carbone émis dans le monde.



Figure 2.3 : processus de production de l'hydrogène bleu.

3.3. L'hydrogène vert :

Appelé hydrogène sans carbone est produit par l'électrolyse de l'eau, en utilisant de l'électricité provenant de sources renouvelables et sans émettre de dioxyde de carbone. L'hydrogène vert peut être produit par « électrolyse de l'eau » dans ce processus, un courant électrique traverse l'eau pour le décomposer en ses molécules H₂O et extraire l'hydrogène. Lorsque l'électricité supplémentaire utilisée provient d'une source d'énergie renouvelable (hydraulique, éolienne ou solaire), tous les éléments du cycle de production ont une faible empreinte carbone. Cette technique

de production conduit donc à de très faibles émissions de gaz à effet de serre. Il représente environ 2 % [17], de la production mondiale. Son coût de production est actuellement supérieur à celui de l'hydrogène gris. Il est également possible de produire de l'hydrogène vert à partir de la biomasse, par un procédé de gazéification. Ce procédé consiste à chauffer à très haute température de la biomasse pour en extraire un gaz de synthèse, puis ultimement de l'hydrogène.

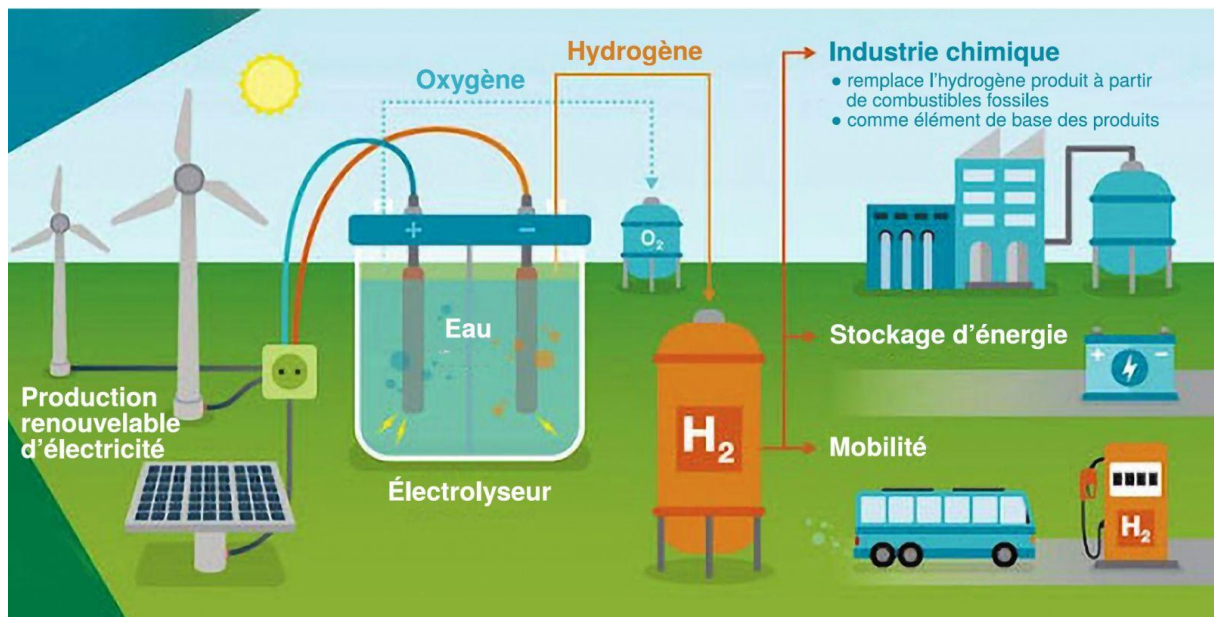


Figure.2.4 : processus de production de l'hydrogène vert.

4. Application de l'hydrogène :

L'hydrogène présente de multiples utilisations où il peut être transformé en électricité, en chaleur ou en force motrice en fonction de son utilisation finale. Il présente le bénéfice de pouvoir être stocké (un problème avec l'électricité) et de pouvoir être fabriqué sans émission de CO₂. En tant que source d'énergie, il se trouve donc ainsi.

- **Application stationnaire :**

La cogénération permettrait de stocker de l'énergie dans les bâtiments en assurant une fourniture d'électricité et de chaleur, favorisant ainsi le développement des bâtiments à énergie positive.

- **Application mobiles :**

Les véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz peuvent être alimentés par l'hydrogène. En outre, il est possible d'associer un réservoir d'hydrogène à une pile à combustible afin d'améliorer l'autonomie des véhicules électriques (électro-mobilité de deuxième génération, appelée 2G, la première concerne les véhicules électriques).

- **Application industrielles**

L'hydrogène est un composant chimique très employé dans l'industrie. Notons que l'hydrogène est déjà largement utilisé dans le domaine de l'aérospatial comme combustible pour la propulsion des fusées. [18].

5. Transport de l'hydrogène :

L'émergence de systèmes de transport de l'énergie de l'hydrogène est une partie primordiale de la réussite économique de l'hydrogène. La partie de transport jouera le rôle entraîné dans la construction d'un marché de l'hydrogène dans des territoires différents. Il facilitera le transport de l'hydrogène en base territoriale et entre les différents territoires. ont indiqué que le choix du mode le plus bas coût de livraison (camions à gaz comprimé, camions liquides cryogéniques ou gazoducs) dépend des caractéristiques géographiques et des marchés spécifiques (par exemple, la population de la ville et de rayon, densité de population, la taille et le nombre des stations de ravitaillement et la pénétration du marché des véhicules à pile à combustible). Selon de nombreux auteurs, les principaux facteurs qui influent sur le choix du mode de transport de l'hydrogène sont l'application, la quantité à transporter, la densité de la demande, et la distance entre le site de production les points de livraison [19]. Les méthodes de distribution possible sont les suivantes :

5.1. Pipeline :

On peut obtenir de l'hydrogène grâce à un réseau de distribution de pipelines qui est connecté à de nombreux fournisseurs et consommateurs. On peut réaliser cela sous deux formes : liquides et gazeux. Il est techniquement envisageable d'utiliser des systèmes de canalisation d'hydrogène liquide. Toutefois, en raison des investissements en capital élevés nécessaires pour la création de ces réseaux de

pipelines, des exigences matérielles et de la minimisation des émissions de bouillir-off, il est impossible d'envisager une solution pour la distribution de l'hydrogène liquide sur les stations-service de l'autoroute dans un avenir proche. En revanche, les systèmes de pipelines gazeux comprimés nécessitent un investissement en capital inférieur à celui des réseaux de pipelines d'hydrogène liquides [20].

5.2. Navire :

Le transport intercontinental d'hydrogène sera effectué sous forme utilisant liquides navires. A cet effet, les navires spécialisés avec des réservoirs appropriés et des installations portuaires sont conçus. Transport de l'hydrogène gazeux par bateau n'est économiquement pas réalisable puisque la quantité transportée est faible par rapport à la zone qu'il couvre sur le navire. Cependant, certains potentiels pétroliers d'hydrogène à grande échelle ont été étudiés en détail dans le cadre du programme de recherche du réseau mondial de l'énergie. En 1998, la principale conclusion d'une première étude de trois ans était qu'un navire-citerne d'une capacité de 200.000 m³ ou environ 14 millions de kg d'hydrogène liquide pourrait être construit à l'aide d'une large mesure la conception de base et les concepts en cours d'utilisation pour le transport de GNL [20].

5.3. Camion :

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

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

Il est possible de configurer une remorque tube, composée de plusieurs cylindres en acier fixés sur un cadre de protection, afin de stocker de 63 à 460 kg d'hydrogène, en fonction du nombre de tubes. Les pressions de travail varient de 20 à 60 M Pa.

On transporte l'hydrogène liquide en utilisant des réservoirs isolés à double paroi spécifiques afin d'éviter qu'il ne se chauffe. Il existe également des liquides pétroliers qui utilisent des écrans thermiques de l'azote afin de refroidir la paroi

extérieure de la cuve d'hydrogène liquide, ce qui permet de réduire au minimum le transfert de chaleur supplémentaire. Les camions-citernes ont la capacité de déplacer entre 360 et 4 300 kg d'hydrogène liquide. Le taux d'évaporation des camions est de 0,3% à 0,6% par jour. Le principal problème avec le transport d'hydrogène liquide serait les exigences d'isolation spécialisées et les pertes de pompage et ré-refroidissement de l'hydrogène liquide le long du chemin [20].

5.4. Rail :

On peut également distribuer l'hydrogène à travers des voies ferrées. Le transport ferroviaire utilise des réservoirs cryogéniques cylindriques tels que ceux utilisés pour le camionnage. Ils possèdent des capacités plus élevées et peuvent transporter jusqu'à 9,100 kg d'hydrogène, avec un taux d'évaporation estimé à 0,2% par jour. Cependant, compte tenu de la distance entre l'infrastructure ferroviaire et les stations-service, ainsi que des coûts de transport élevés associés au train, il est peu probable que cela devienne une alternative pour la distribution de l'hydrogène [20].

La figure ci-dessous illustre les différentes techniques de production, de transport et d'application de l'hydrogène :

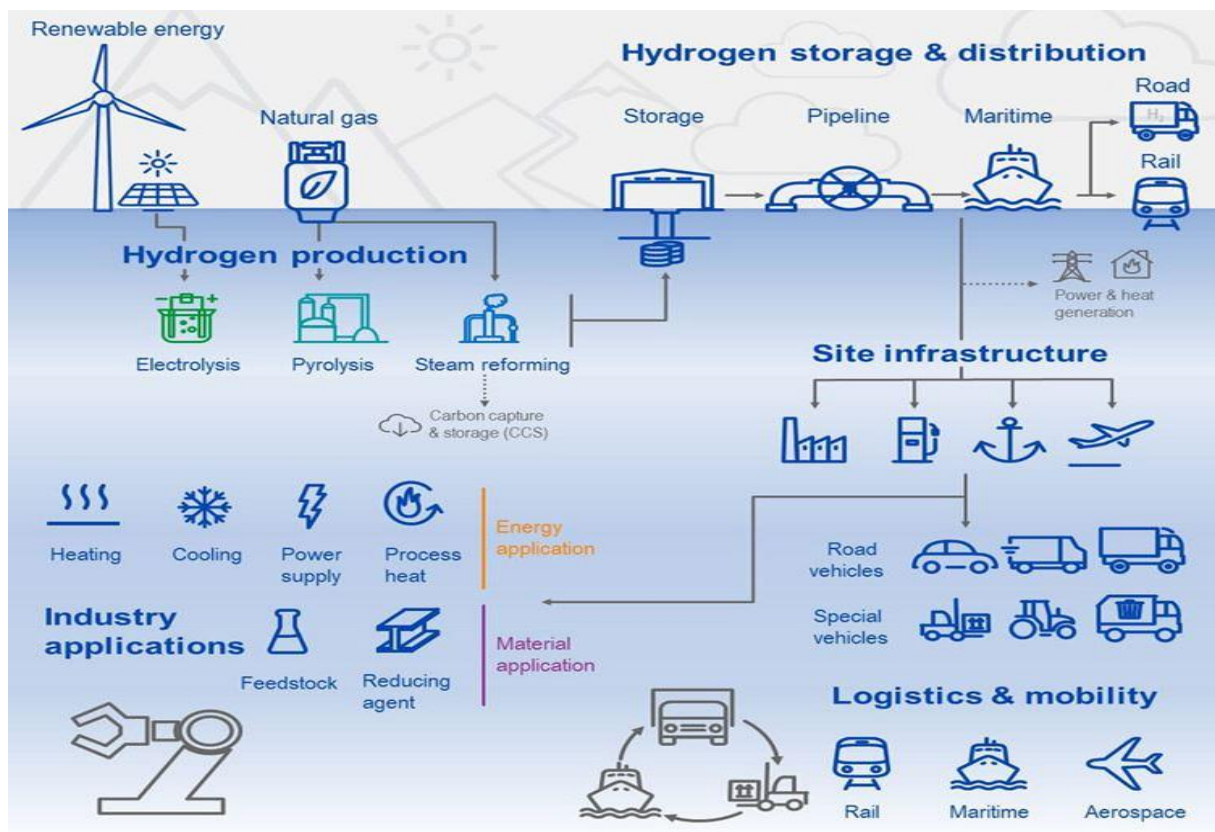


Figure.2.5 : Transport et application de l'hydrogène

6. Stockage de l'hydrogène :

6.1. Le stockage gazeux

Le stockage gazeux est la méthode la plus utilisée qui consiste à conserver l'hydrogène sous forme gazeuse. Afin d'accroître sa densité d'énergie volumétrique, on comprime le gaz d'hydrogène à une pression élevée, pouvant atteindre 700 bars. D'un côté, cela entraîne une diminution d'énergie de 20% lors de la compression et des exigences de sécurité stricte, et d'un autre côté, cela entraîne des pénalités financières liées à la quantité et au prix du matériau composite à utiliser pour stabiliser la structure du réservoir de stockage. Ainsi, les études se focalisent sur l'élaboration de matériaux composites plus abordables tout en préservant les capacités volumétriques et gravimétriques du réservoir. Deux approches sont suivies pour améliorer les performances de cette technique : l'adaptation de la forme du réservoir généralement cylindrique afin d'exploiter au maximum l'espace restreint dans le véhicule, et la compression de l'hydrogène à 77 K, température de l'azote liquide, permettant ainsi de stocker plus de gaz dans le même volume [20].

6.2. Stockage solide :

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

La création d'hydrures métalliques solides est un exemple de réaction entre l'hydrogène et certains alliages métalliques. La combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes constituant ces matériaux est responsable de cette absorption. Les composés à base de magnésium et les alanates sont considérés comme les matériaux les plus prometteurs.

La capacité de stockage d'hydrogène dans ces matériaux est limitée, ce qui constitue actuellement le désavantage de cette technologie. Effectivement, les matériaux les plus avancés permettent actuellement d'obtenir un rapport entre le poids d'hydrogène et le poids total du réservoir d'environ 2 à 3%.

6.3. Stockage liquide :

En le refroidissant à une température de 20 K sous pression atmosphérique, l'hydrogène est converti de son état gazeux en liquide. Même si l'hydrogène à cet état présente une capacité volumétrique supérieure à celle de l'hydrogène gazeux (70 kg/m^3) par rapport à 39 kg/m^3 pour le stockage à 700 bars), le stockage à cette température basse entraîne des pertes thermiques inévitables et une évaporation quotidienne de l'hydrogène stocké, réduite à 1% par jour pour un système super-isolé. Le principal désavantage du stockage liquide réside dans la nécessité d'énergie pour la liquéfaction d'hydrogène, qui représente 30% de son pouvoir calorifique inférieur, ce qui a un impact considérable sur le rendement global de ce mode de stockage [21].

7. Les différentes techniques de production de l'hydrogène vert :

7.1. L'électrolyseur de l'eau :

Si l'électrolyseur de l'eau est aujourd'hui le procédé de production d'hydrogène le plus souvent mis en œuvre après le vaporeformage, sa part, de 4% dans le monde et 1% en France, reste, modeste. C'est que le coût de l'hydrogène produit fluctue entre 5 et 10 euros par kilogramme, en fonction de la taille de l'installation et du prix de l'électricité qui l'alimente. Toutefois, sous réserve d'utiliser de l'électricité d'origine renouvelable ou nucléaire, l'électrolyse de l'eau présente l'avantage décisif de l'absence d'émission de gaz à effet de serre. Comme depuis la fin du XVIIIe siècle, l'électrolyse de l'eau permet de dissocier chimiquement la molécule H_2O en oxygène (O_2) et hydrogène (H_2), sous l'influence d'un courant électrique continu circulant entre deux électrodes. Depuis sa découverte, ce procédé a fait l'objet de nombreux développements conduisant à trois technologies principales, en fonction du type d'électrolyte, liquide ou solide, séparant les deux électrodes. Il s'agit des électrolyseurs de type alcalin, à membrane à échange de proton (PEM) et à électrolyte céramique solide [22].

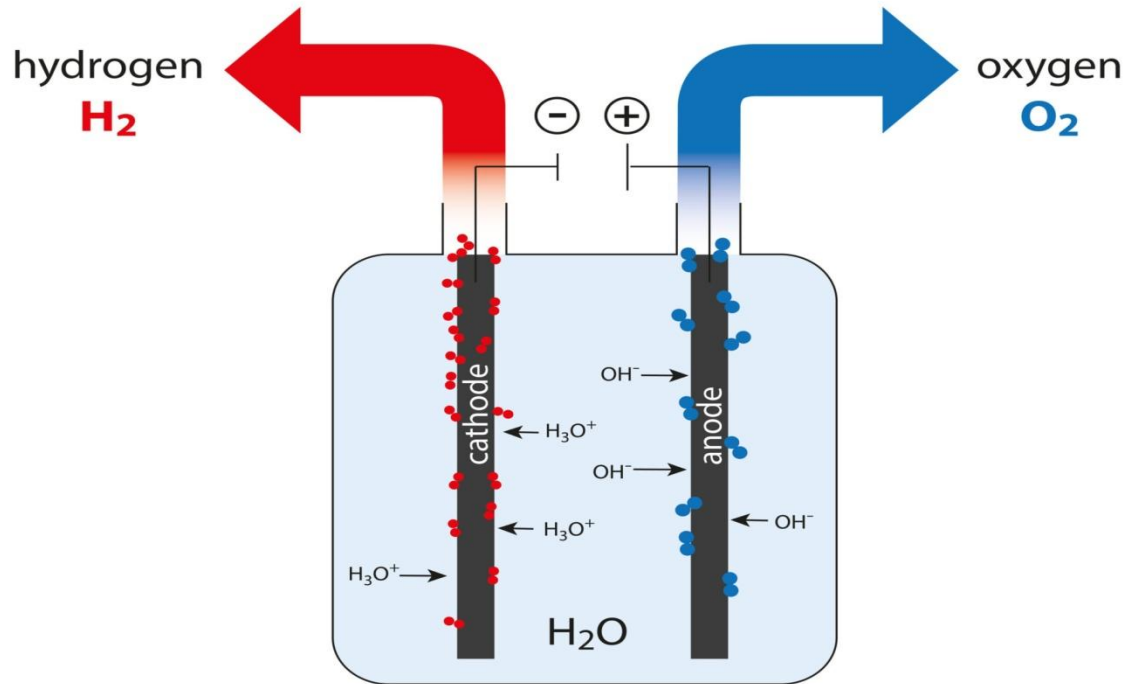
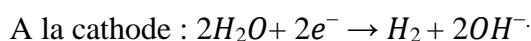
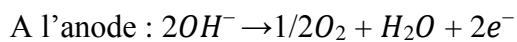


Figure.2.6 : électrolyse de l'eau.

7.1.1. Electrolyseur alcaline :

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore.

Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle. L'électrolyseur choisi est à technologie Alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium ($NaOH$). La conduction Ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH^-) et sodium (Na^+). Les réactions anodiques et Cathodiques sont décrites ci-dessous :



Le principe de l'électrolyse alcaline est décrit schématiquement par la Figure suivante :

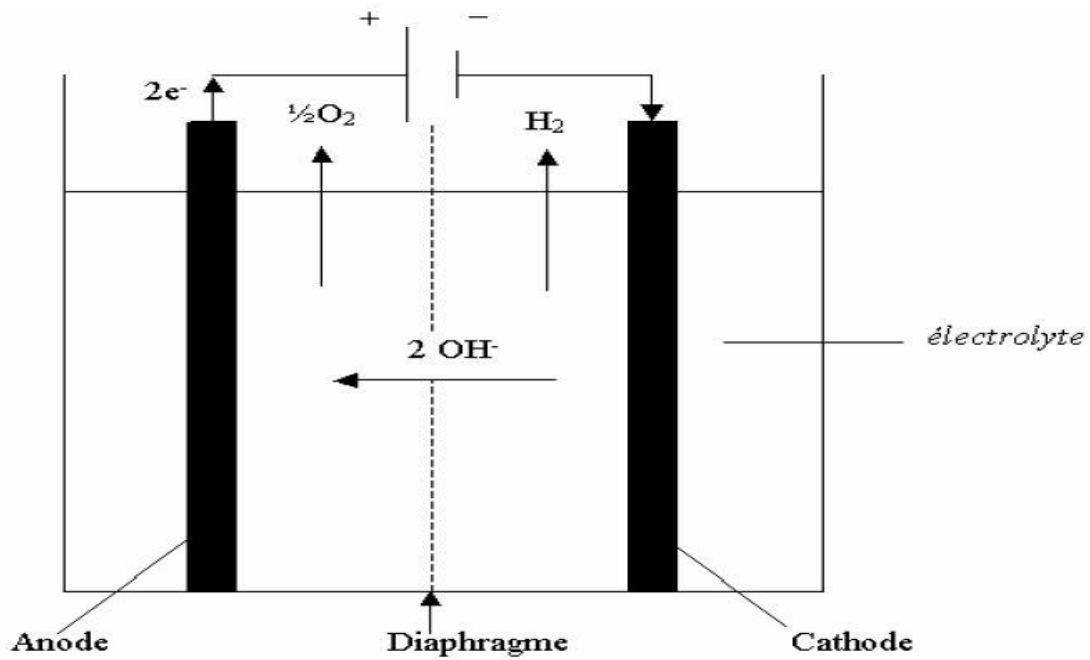
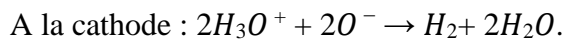
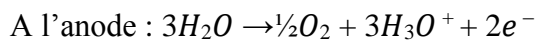


Figure.2.7 : schéma de principe de l'électrolyse alcaline

7.1.2. Electrolyseur PEM :

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2), selon les réactions ci-dessous :



Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la figure suivante :

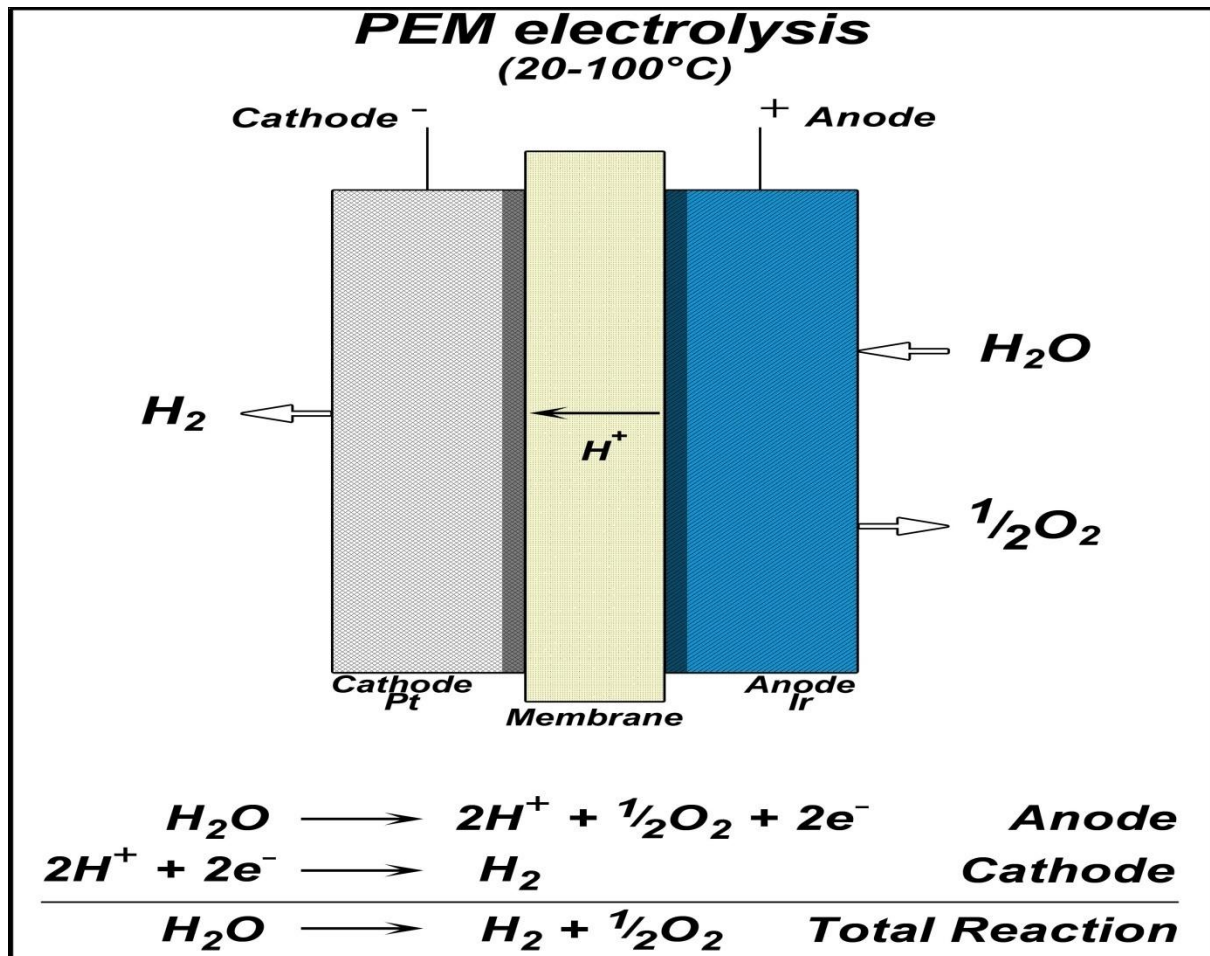
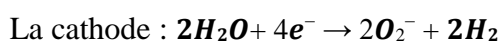
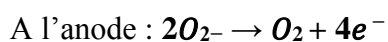


Figure.2.8 : schéma de principe de l'électrolyse PEM.

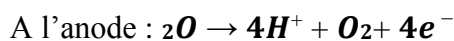
7.1.3. Electrolyseur à haute température :

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions super oxydes O_2^- . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte :

Electrolyte à conduction d'ions super oxydes :



Electrolyte à conduction protonique :



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

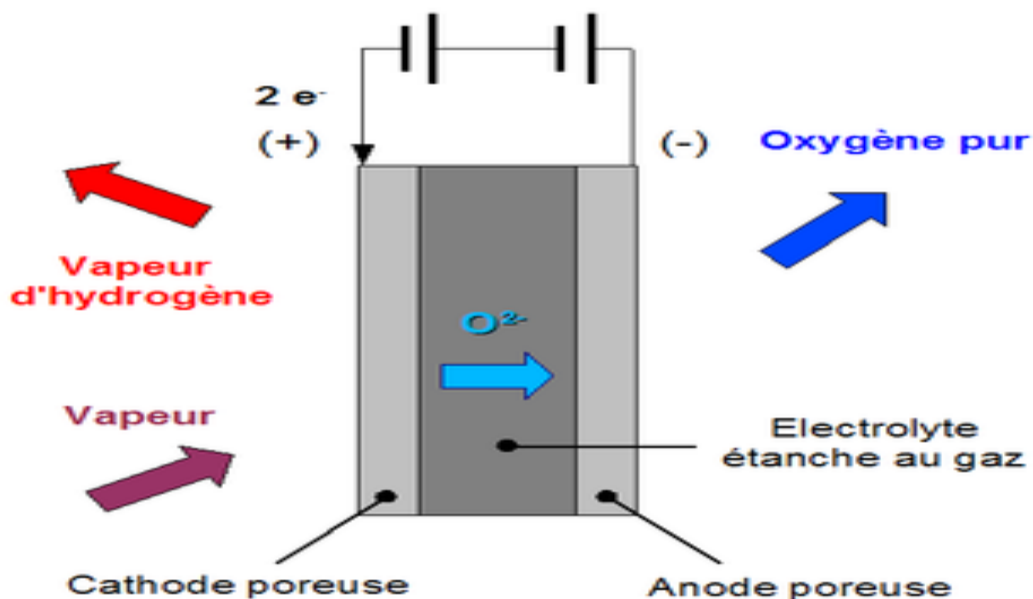


Figure.2.9 : Schéma d'électrolyse à haute température.

Le tableau.2.2 : suivant montre les données techniques des différents types d'électrolyseurs [23] :

Type	Température de fonctionnement	Pression de fonctionnement	Consommation électrique de H ₂ (KWh/Nm ³)	Rendement énergétique %	Etat de marché
PEM	80-100	1-70	6	80-90	Développement
Alcaline	50-100	3-30	4-5	75-90	Commercialisé
Haute température	800-1000	-	3-3,5	80-90	Recherche

8. hydrogène vert en Algérie vision 2023-2040 :

L'Algérie ambitionne de devenir un leader régional et international dans le domaine de la production et la commercialisation de l'hydrogène renouvelable et propre et de ses dérivés. Elle aspire, à cet effet, de tirer profit de son potentiel technique de production d'hydrogène et de ses avantages comparatifs pour produire et exporter entre 30 à 40 TWH sous forme d'hydrogène gazeux, liquide et/ ou ses dérivés. Ces quantités sont destinées pour approvisionner le marché européen à hauteur de 10% environ de ses besoins, à l'horizon 2040. A ce titre, et avec un prix de vente très compétitif de cette molécule d'hydrogène, l'Algérie pourrait attirer environ 10 milliards de dollars par an. A cela s'ajoute environ 10 TWH d'hydrogène propre (bleu) qui seront produits pour satisfaire les besoins du marché national.

Pour atteindre cet objectif, l'Algérie s'attèlera dans un premier temps, à réaliser des projets pilotes de 2 MW à 50 MW de capacité d'électrolyse lui permettant de tester différentes technologies de production et d'utilisation d'hydrogène et ses dérivés et d'évaluer différents « business model ».

Ensuite, elle mettra l'accent sur les applications les plus avantageuses et les plus adaptées au contexte énergétique national ainsi que sur les mécanismes de financement les plus appropriés. Cela permettra d'atteindre, à moyen et long termes, des coûts de production très compétitifs et d'exporter de l'hydrogène et/ou ses dérivés vers l'Europe en particulier [24].

Conclusion

En conclusion, ce chapitre sur l'état de l'art de l'hydrogène met en lumière les avancées technologiques et les défis associés à cette source d'énergie prometteuse. Il explore les méthodes de production, notamment l'électrolyse de l'eau, aussi les différents types des électrolyseurs ainsi que les applications potentielles de l'hydrogène dans divers secteurs tels que le transport, l'industrie et le stockage d'énergie. Malgré les défis techniques, économiques et infrastructurels, l'hydrogène représente une voie cruciale vers une transition énergétique plus propre et durable.

Chapitre 3 :
Etude préliminaire

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre on va établir un cahier de charge dans lequel on va faire une étude préliminaire de notre projet ou un calcul de pré dimensionnement sera effectué. Ce calcul va servir à la connaissance des différentes parties de notre projet :

- Choix du site de projet.
- Dimensionnement des systèmes PV et éolien.
- Détermination des besoins en énergie électriques.
- La répartition de la production électrique.
- Détermination des besoins en énergie électrique nécessaire pour avoir la quantité de l'hydrogène requise pour 10 litre de l'eau.
- Evaluation du coût.

3.2. Description du projet :

L'Algérie, dotée de ressources abondantes en énergie solaire et éolienne, se trouve dans une position privilégiée pour propulser le développement de projets d'hydrogène vert. Exprimant un vif intérêt pour cette source énergétique, le pays envisage de basculer vers une économie axée sur l'hydrogène. Des initiatives pilotes sont en gestation pour explorer les technologies de production d'hydrogène vert et évaluer leur viabilité sur le territoire. Notre ambition est claire : diversifier notre mix énergétique, réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et stimuler une économie plus écologique. L'Algérie bénéficie également d'une infrastructure gazière bien établie, facilitant ainsi la distribution et l'utilisation de l'hydrogène dans divers secteurs.

Dans le cadre de notre étude approfondie, nous détaillerons les étapes nécessaires à la mise en place d'une production d'hydrogène vert en Algérie. Pour mener à bien notre projet, nous aurons besoin des éléments suivants :

- **Énergie renouvelable** : Optant pour une approche respectueuse de l'environnement, nous nous tournerons vers l'énergie solaire et éolienne pour alimenter notre processus de production d'hydrogène vert. Nous devons donc développer des installations de centrales hybrides ainsi que des parcs solaires et éoliens.

- **Électrolyseurs** : La sélection minutieuse des électrolyseurs sera cruciale pour notre projet. Leur acquisition et leur installation nécessiteront des investissements substantiels afin d'assurer un fonctionnement optimal.
- **Approvisionnement en eau** : Bien que notre pays soit principalement aride, garantir un approvisionnement adéquat en eau est indispensable pour soutenir la production d'hydrogène vert par électrolyse.



Figure.3.1 : le plan similaire du projet.

3.3. Centrale renouvelable hybride :

Une centrale renouvelable hybride est une installation de production d'électricité qui combine plusieurs sources d'énergie renouvelable pour générer de l'électricité de manière plus fiable et efficace. Ces centrales peuvent intégrer différentes technologies, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, biomasse, géothermique, etc., en fonction des ressources disponibles localement et des besoins énergétiques.

L'objectif principal d'une centrale renouvelable hybride est d'exploiter les avantages complémentaires des différentes sources d'énergie pour maximiser la production d'électricité tout en minimisant les fluctuations de production associées à chaque source individuelle. Par exemple, lorsque les conditions météorologiques ne sont pas favorables pour l'énergie solaire, la production éolienne peut compenser cette baisse, et vice versa.

En intégrant plusieurs sources d'énergie renouvelable dans une centrale hybride, on peut également améliorer la stabilité du réseau électrique, réduire les coûts de stockage d'énergie et augmenter l'efficacité globale du système. Ces centrales sont souvent utilisées dans les zones éloignées, les communautés isolées, ou dans les réseaux électriques où l'accès à une seule source d'énergie renouvelable est limité.

Une centrale renouvelable hybride est une solution polyvalente et durable pour la production d'électricité, qui tire parti des différentes sources d'énergie renouvelable disponibles pour répondre aux besoins énergétiques de manière plus fiable et efficace.

3.3.1. Système hybride (photovoltaïque et éolienne) :

Pourquoi nous avons choisis ces deux ressources

La comparaison des systèmes montre que les coûts les plus bas sont ceux des systèmes centralisés de production d'hydrogène vert situés à proximité des meilleures zones géographiques disposant de bonnes ressources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne. L'analyse montre également que la majeure partie des coûts est constituée par les coûts de production d'électricité par le photovoltaïque ou l'éolien, tandis que les coûts de transport de l'hydrogène ou de l'eau sont en revanche moins élevés

Quelques données technico-économiques [17] :

- **Photovoltaïque :**

- Coût total pour une installation en 2030 : 686 USD / KWc

- Opération et maintenance : 16 USD / KWc / an

- **Eolien sur terre :**

- Coût total pour une installation en 2030 : 1226 USD / kW

- Opération et maintenance : 21 USD / kW / an

Quelques données technico-économiques.

Un système hybride photovoltaïque et éolien combine à la fois des panneaux solaires photovoltaïques et des turbines éoliennes pour générer de l'électricité. Ces systèmes sont conçus pour tirer parti des avantages des deux sources d'énergie renouvelable,

en les utilisant de manière complémentaire pour maximiser la production d'électricité.

Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité, tandis que les turbines éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en électricité. En combinant ces deux sources, un système hybride peut fonctionner de manière plus constante et stable, car il peut produire de l'électricité même lorsque les conditions météorologiques ne sont pas idéales pour l'une des sources (par exemple, lorsqu'il y a peu de soleil mais beaucoup de vent, ou vice versa).

En outre, les systèmes hybrides peuvent souvent être plus efficaces sur le plan énergétique et économique que les systèmes individuels, car ils permettent d'utiliser les infrastructures et les ressources existantes de manière plus optimale. Ces systèmes sont souvent utilisés pour alimenter des installations hors réseau, des communautés éloignées ou des sites isolés où l'accès à l'électricité est limité ou coûteux.



Figure.3.2 : Un bac d'essai qui montre un système hybride Source.

3.4. La demande d'eau pour la production d'hydrogène vert :

Dans le processus de production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau, l'utilisation d'eau purifiée de haute qualité est cruciale. Les cellules d'électrolyse nécessitent un approvisionnement en eau déminéralisée. Bien que la demande totale en eau pour la production d'hydrogène soit relativement modeste, les grandes installations peuvent représenter une consommation significative d'eau douce à

l'échelle locale, ce qui pose un défi dans les régions confrontées à des contraintes hydriques.

Cependant, l'exploitation de l'eau de mer pourrait constituer une alternative viable dans les zones côtières

En tenant compte des besoins en eau, estimés à environ 10 litres d'eau pour produire 1 kg d'hydrogène, la production annuelle nécessiterait 10 millions de mètres cubes d'eau, alimentés par des usines de dessalement implantées dans les régions côtières. En Algérie, diverses unités de traitement de l'eau sont déjà opérationnelles pour fournir de l'eau potable aux populations et pour le traitement des eaux usées.

3.5. Choix de site du projet :

Notre proposition porte sur la région d'Arzew, une localité idéale pour l'implantation d'une infrastructure de production d'hydrogène vert. Arzew, située dans l'ouest du pays, offre un environnement propice à l'exploitation des énergies renouvelables, notamment grâce à son potentiel éolien et solaire. Les conditions géographiques et météorologiques de cette région favorisent la création d'une centrale hybride combinant l'énergie éolienne et photovoltaïque.

Arzew est dotée de vastes étendues propices à l'installation d'éoliennes, bénéficiant de vents forts et réguliers. De plus, son climat ensoleillé offre un potentiel solaire important, offrant ainsi une source supplémentaire d'énergie renouvelable. En combinant ces deux sources d'énergie, il serait envisageable de construire une centrale hybride pour produire de l'électricité de manière efficace et durable.

Par ailleurs, la proximité de la côte offre également la possibilité de recourir au dessalement de l'eau de mer, une étape cruciale dans le processus de production d'hydrogène vert. En exploitant les ressources en eau souterraine de la région, il serait ainsi possible d'assurer l'approvisionnement nécessaire à la production durable d'hydrogène vert.

En somme, la région d'Arzew présente tous les atouts nécessaires pour devenir un pôle majeur de production d'hydrogène vert, grâce à son potentiel éolien et solaire, ainsi qu'à la disponibilité des ressources en eau souterraine et en eau de mer pour le dessalement.

✚ Évaluation des besoins de notre projet :

Pour produire un kilogramme d'hydrogène (H_2), plusieurs paramètres doivent être pris en compte. Initialement, il est crucial de noter que la production d'1 kg d'hydrogène nécessite l'utilisation de 60 kWh d'électricité, provenant exclusivement de sources renouvelables. De plus, un approvisionnement en eau de 10 litres, équivalent à 0,01 m³, est requis pour le processus. Ces valeurs sont fondées sur notre choix spécifique d'électrolyseur PEM, lequel demande environ 5 minutes pour produire 1 kg d'hydrogène.

Tableau.3.1 : les données de projet [17].

Quantité d' H_2 à produire	1kg
Quantité de l'eau	10 litres
Quantité d'électricité nécessaire	60 KWh
Le temps nécessaire	5 minutes
Fonctionnement d'heure par jour	8 heures
Technologie d'électrolyseur	PEM
Technologie de panneau photovoltaïque	Monocristalline
Technologie d'éolienne	Axe horizontale

- { 76% d'énergie solaire correspond à 45 KWh
- { 24 % d'énergie éolienne correspond à 15 KWh

Répartition d'électricité produites par photovoltaïque et éolienne pour le premier site :

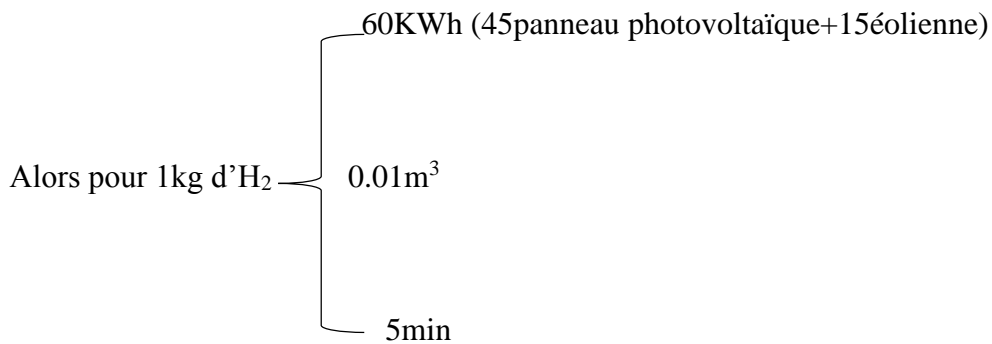
$$5760 \text{ KWh} \longrightarrow 100\%$$

$$x \longrightarrow 76\% \quad x = (5760 \times 76) / 100$$

$$\mathbf{x = 4377 \text{ KWh}}$$

La puissance des panneaux $45 \text{ KWh} / 1 \text{ h} = 45 \text{ KW}$. On a choisi un panneau de puissance $4377 \times (45 / 4377) = \mathbf{45}$.

La puissance des éoliennes $15 \text{ KWh} / 1 \text{ h} = 15 \text{ KW}$ on a choisi une éolienne de puissance $10 \text{ KW} \times (15 / 10) = \mathbf{15}$



❖ Pour le deuxième site (BRN Ouargla) :

Dans le site d'Ouargla on a pris un pourcentage d'électricité généré par la voix photovoltaïque plus élevé au pourcentage du premier site (Arzew) à cause de gisement solaire très élevés, en plus il y a une centrale de 10MW et une autre qui va être construite

Alors 87 % d'énergie solaire et 13% énergie éolienne. Les calculs doivent toujours être effectués pour obtenir 1 kg d'hydrogène, en utilisant une quantité d'électricité renouvelable de 60 KWh provenant de sources solaires et éoliennes. Les 60 KWh représentent la totalité de l'électricité nécessaire qui représente 100%.

$$100\% \longrightarrow 60\text{KWh}$$

$$87\% \longrightarrow x \quad x = (87 \cdot 60) / 100$$

$$x = 52\text{KWh}$$

$\left\{ \begin{array}{l} 87\% \text{ d'énergie solaire égale } 52\text{KWh.} \\ 13\% \text{ d'énergie éolienne égale } 8\text{KWh.} \end{array} \right.$

Répartition d'électricité produites par vois photovoltaïque et éolienne pour le deuxième site :

$$5760 \text{ KWh} \longrightarrow 100\%$$

$$x \longrightarrow 87\% \quad x = (5760 \times 87) / 100$$

$$x = 5011\text{KWh.}$$

La puissance des panneaux $52\text{KWh}/1\text{h}=52\text{KW}$, on a choisi un panneau de puissance $5011 \times (52/5011) = 52$.

La puissance des éoliennes $8\text{KWh}/1\text{h}=8\text{KW}$, on a choisi une éolienne de puissance $10\text{KWh} \times (8/10) = 8$

Alors pour 1kg d' H_2

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \text{ KWh (52 panneaux photovoltaïque+8éolienne)} \\ 0.01 \text{ m}^3 \\ 5 \text{ min} \end{array} \right.$$

❖ **Pour le troisième site d'Adrar :**

Nous avons choisi le site d'Adrar car il possède un potentiel important des gisements d'éolienne et solaire.

$$100\% \longrightarrow 60\text{KWh}$$

$$50\% \longrightarrow x \quad x = (60 \cdot 50) / 100$$

$$x = 30\text{KWh}$$

Alors 50 % énergie solaire et 50 % énergie éolienne. Les calculs doivent toujours être effectués pour obtenir 1 kg d'hydrogène, en utilisant une quantité d'électricité renouvelable de 60 kWh provenant de sources solaires et éoliennes. Les 60 kWh représentent la totalité de l'électricité nécessaire qui représente 100%.

100% —————> 60 kWh

50% —————> x $x = (50 \times 60) / 100$

x = 30 kWh.

50% d'énergie solaire égale 30KWh

 50% d'énergie éolienne égale 30KWh

Répartition d'électricité produites par photovoltaïque et éolienne pour le troisième site :

5760 kWh —————> 100%

x —————> 50% $x = (5760 \times 50) / 100$

x = 2880 kWh.

La puissance des panneaux $30 \text{ kWh} / 1 \text{ h} = 30 \text{ kW}$ on a choisi un panneau de puissance $2880 \times (30 \text{ kW} / 2880) = 30$.

La puissance des éoliennes $30 \text{ kWh} / 1 \text{ h} = 30 \text{ kW}$ on a choisi une éolienne de puissance $10 \text{ kWh} \times (30 / 10) = 30$.

60 kWh (30 panneaux photovoltaïque+30 éolienne)

 0.01 m³

 5 min

Tableau.3.2 : Différents résultats de calcul.

Sites	Arzew	Ouargla	Adrar
Nombre de panneaux PV	45	52	30
Nombre d'éolienne	15	8	30
Puissance PV [KW]	4377	5011	2880
Puissance Wind [KW]	1383	749	2880
Pourcentage PV [%]	76	87	50
Pourcentage Wind [%]	24	13	50
Energie produite par vois PV pour 1 kg de H ₂ [KWh]	45	52	30
Energie produite par vois éolienne pour 1 kg de H ₂ [KWh]	15	8	30

➤ **Électrolyseur :**

Actuellement, la production et l'installation des électrolyseurs constituent le principal obstacle au développement d'une économie basée sur l'hydrogène. Pour donner un aperçu, une usine d'électrolyse d'une capacité de 50 MW peut produire environ 25 tonnes d'hydrogène par jour selon les dernières études européennes de 2022. L'électrolyseur PEM nécessite 5760 KWh d'électricité par jour pour produire 96kg d'hydrogène, en fonctionnant pendant 8 heures.

Pour une journée (24h) → fonctionne 8h

Pour une année (8760h) → fonctionne 2920h

8h → 5760 KWh

2920 h → x $x = (5760 \times 2920) / 8$

$$x = 2\ 102\ 400\text{KWh}$$

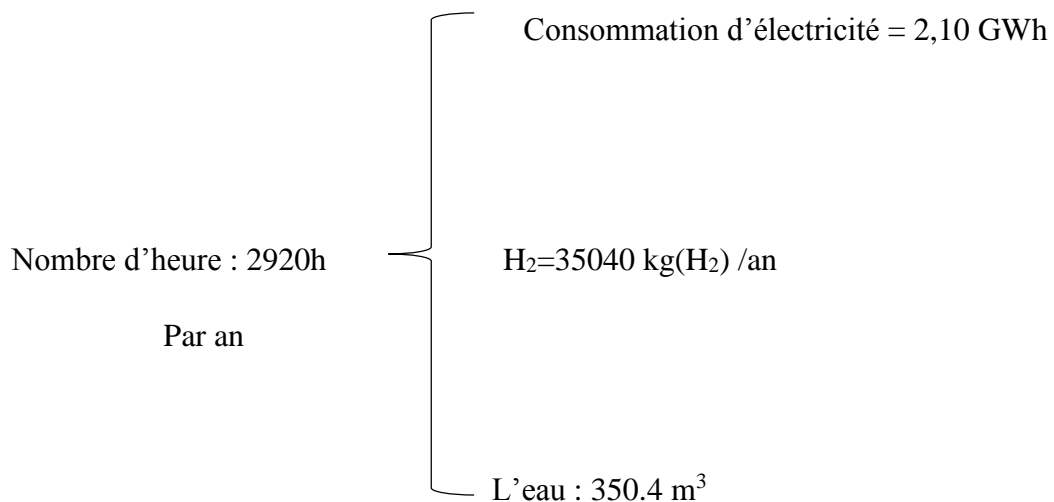
Pour une année de fonctionnement, l'électrolyseur PEM nécessite 2.1024 GWh d'électricité renouvelable pour produire de l'hydrogène. Cela est basé sur une utilisation quotidienne de 8 heures :

$$\begin{aligned}
 8\text{h} &\longrightarrow 96 \text{ kg} \\
 2920\text{h} &\longrightarrow x \qquad x = (2920 \times 96) / 8 \\
 &\qquad \qquad \qquad \mathbf{x = 35040 \text{kg}(\text{H}_2)}
 \end{aligned}$$

En utilisant un électrolyseur PEM qui nécessite 0.01 m³ d'eau pour produire 1 kg d'H₂, la production annuelle de l'électrolyseur atteint 35040 kg. Par conséquent, le besoin en eau pour une année est de 350.4 m³.

$$\begin{aligned}
 1\text{kg}(\text{H}_2) &\longrightarrow 10 \text{ L} \\
 35040\text{Kg} &\longrightarrow x \qquad x = (35040 * 10) / 1 \\
 &\qquad \qquad \qquad \mathbf{x = 350.4 \text{m}^3}
 \end{aligned}$$

On résume pour un seul électrolyseur :



Actuellement la puissance des unités d'électrolyse disponible sur le marché pour une application industrielle varie d'environ 1MW à environ 17,5 MW [17].

On sait qu'une usine d'électrolyse d'une capacité de 50MW peut produire environ 25 tonnes d'hydrogène par jour. En considérant la capacité d'un électrolyseur PEM de 10 MW, cette usine serait équipée de 5 électrolyseurs PEM.

La production annuelle d'une seule usine équipée de 5 électrolyseurs PEM d'une capacité totale de 10 MW serait d'environ 9125 tonnes d'hydrogène :

$$\begin{aligned} 1 \text{ jour} &\longrightarrow 25 \text{ tonnes (H}_2\text{)} \\ 365 \text{ jour} &\longrightarrow x \quad x = (365 \times 25) / 1 \end{aligned}$$

$$x = 9125 \text{ tonnes (H}_2\text{)}$$

L'objectif de notre étude est de produire 10 millions de tonnes d'hydrogène d'ici 2030. En se basant sur ces calculs, il est possible d'évaluer les mesures requises pour atteindre cette cible ambitieuse.

3.6. Analyse économique du projet :

. Les paramètres utilisés pour estimer les coûts de notre projet sont :

- Investissements initiaux : Nous devons évaluer les coûts d'investissement nécessaires pour acquérir et installer les équipements essentiels à la production d'hydrogène vert. Cela englobe une variété d'éléments, allant des électrolyseurs aux dispositifs de stockage, en passant par les systèmes de purification.
- Frais d'exploitation : Cela inclut l'énergie requise pour faire fonctionner les électrolyseurs, les coûts de maintenance des équipements, les dépenses liées aux matières premières telles que l'eau et l'électricité, ainsi que les coûts de gestion de l'installation.
- Analyse de marché : Cruciale pour comprendre la demande anticipée, évaluer la concurrence existante et identifier les opportunités de croissance. Une telle analyse éclaire la rentabilité et la durabilité à moyen et long termes du projet.
- Soutiens financiers et incitations fiscales : Il est essentiel d'examiner attentivement les subventions gouvernementales et les avantages fiscaux disponibles. Ces soutiens peuvent considérablement alléger les charges initiales et augmenter la rentabilité du projet.
- Défis et incertitudes : Nous devons examiner de près les obstacles et les incertitudes entourant le projet. Ces défis peuvent inclure des fluctuations des tarifs énergétiques, des coûts de production dépassant les estimations, des problèmes technologiques imprévus ou des changements réglementaires.

En menant une analyse économique approfondie, nous pourrions déterminer la viabilité financière de notre projet.

3.6.1. Estimation du coût d'investissement :

La transition vers la production d'hydrogène vert à des prix compétitifs repose sur trois piliers fondamentaux : l'électricité renouvelable, l'installation des électrolyseurs et la gestion des besoins en eau. Dans cette perspective, l'Algérie bénéficie d'un avantage significatif grâce à son potentiel solaire exceptionnel et à ses capacités éoliennes développées, lui permettant de générer de l'électricité verte à un coût compétitif. Néanmoins, des défis subsistent en ce qui concerne les électrolyseurs et l'approvisionnement en eau. La menace croissante du stress hydrique, exacerbée par le changement climatique, souligne l'urgence d'adopter des solutions durables.

Face à une demande projetée de 10 millions de tonnes d'hydrogène de l'Union européenne, notre objectif est de maintenir une part de marché similaire à celle du gaz, soit 10%, dans les besoins en hydrogène de l'UE d'ici 2030. Cela implique une capacité de production et d'exportation d'environ 1 million de tonnes d'hydrogène par an. Pour atteindre cette cible ambitieuse, l'exploration de l'acheminement de l'hydrogène sous forme gazeuse à travers les gazoducs existants est envisagée.

Dans notre stratégie, nous nous engageons à produire un million de tonnes d'hydrogène vert afin de satisfaire 10 % des besoins du marché européen. Cette transition vers l'hydrogène vert représente une opportunité prometteuse pour l'Algérie, lui permettant de capitaliser sur ses ressources naturelles renouvelables pour diversifier son économie et renforcer sa position sur le marché international de l'énergie.

3.6.1.1. Coût de la source d'électricité renouvelable :

Tableau.3.3 : Coût de l'électrolyseur, de l'hydrogène vert et de l'électricité. [17]

Electrolyseur (PEM)	650 USD/KW
Hydrogène vert	5-6 euros par kilogramme pour H ₂ vert.
électricité	35 USD/MWh

Entamons notre analyse pour la production d'un kilogramme d'hydrogène vert. Il est primordial de noter qu'il faut 60 kWh d'électricité pour générer 1 kg d'hydrogène.

Cette électricité est issue d'un système hybride combinant des panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes. Notre choix d'électrolyseur pour ce projet permet de produire 1 kg d'hydrogène toutes les 5 minutes, nécessitant ainsi 60 kWh d'électricité à chaque cycle. Imaginons qu'il fonctionne pendant 8 heures par jour, totalisant une consommation de 5,760 MWh. Sur une année entière, cette consommation atteindrait donc 2,10 GWh, avec une opération sur 2920 heures.

Pour évaluer le coût de l'électricité, notons que le prix d'1 kWh est de 32.24 euro. Ainsi, en effectuant les calculs, nous obtenons un coût d'électricité de 185.7024 euros par jour, et un coût annuel de 67 781.376 euros pour un seul électrolyseur avec une capacité maximale de 10 MW. Il est crucial de souligner que ces chiffres peuvent varier selon les tarifs de l'électricité et les performances spécifiques de l'électrolyseur utilisé. De plus, d'autres facteurs comme les coûts d'exploitation et de maintenance de l'équipement doivent être pris en compte. Ces données nous permettent d'évaluer le coût énergétique de la production d'hydrogène vert, un élément essentiel de notre étude technico-économique.

3.6.1.2. Coût de l'électrolyseur :

Actuellement, le défi majeur pour ériger une économie fondée sur l'hydrogène réside dans la conception et la mise en place des électrolyseurs. Les données les plus récentes de 2022 en Europe estiment qu'une usine d'hydrogène vert de pointe, à l'échelle gigawatt, nécessiterait un investissement total de 598.81 euros par kilowatt pour l'électrolyse de l'eau [17]. En tenant compte des frais d'installation et de conception supplémentaires, le coût global d'une usine d'électrolyse industrielle à grande échelle, équipée de la technologie PEM, culminerait à 598.81 euros par kilowatt.

Bien que les frais relatifs aux électrolyseurs puissent sembler prohibitifs, des injections financières dans ce domaine sont promises à une réduction significative des prix d'ici 2030. Avec les économies d'échelle anticipées, le coût d'investissement des électrolyseurs devrait fléchir à environ 598.81 euros par kilowatt d'ici 2030.

Sur le marché européen, les tarifs pour les électrolyseurs PEM de haute capacité fluctuent entre 500 et 1000 euros par kilowatt installé. Ces montants peuvent varier selon la complexité du système, les technologies utilisées, les options d'expansion de la production, les coûts des matériaux et des composants, ainsi que la compétitivité

du marché. Il est donc crucial de prendre en compte ces paramètres lors de l'évaluation des coûts des électrolyseurs PEM de haute capacité sur le marché européen.

3.6.1.3. Coût de l'hydrogène vert :

La production d'hydrogène vert, provenant de sources d'énergie renouvelable, est généralement 5 et 6 euros par kilogramme [17]. Toutefois, d'autres estimations peuvent être plus élevées. Comparé à l'hydrogène gris et bleu, l'hydrogène vert est souvent plus onéreux, mais lorsqu'il se positionne dans la fourchette inférieure, il peut rivaliser avec l'hydrogène bleu. Deux facteurs principaux influencent le coût de l'hydrogène vert : le coût initial de l'électrolyseur et le prix de l'électricité.

Dans nos calculs, en prenant une moyenne de 6 euros par kilogramme pour l'hydrogène vert [17], et en supposant que l'électrolyseur fonctionne pendant 8 heures par jour, il produirait 96 kg d'hydrogène vert, générant ainsi un revenu quotidien de 576 euros. Sur une année entière, la production atteindrait 35040 kg, correspondant à un revenu annuel de 210 240 euros.

Conclusion :

Ce cahier des charges a défini les exigences et les spécifications nécessaires pour assurer le succès de ce projet ambitieux. En mettant en place des centrales hybrides pour la production l'électricité par énergie renouvelable, en sélectionnant des électrolyseurs performants, en garantissant un approvisionnement adéquat en eau, et en développant une infrastructure de distribution et de stockage efficace, nous jetons les bases d'une production d'hydrogène vert viable et durable.

Chapitre 4 :
Simulation du projet étudié.

Introduction

Dans ce chapitre, nous explorerons les principaux aspects de l'outil de modélisation utilisé pour caractériser notre système, pour ce faire nous avons utilisé HOMER Pro, en mettant l'accent sur l'importance de données précises et complètes pour obtenir des résultats fiables. Nous examinerons également les différentes catégories de données nécessaires, les sources d'informations disponibles et les meilleures pratiques pour garantir une modélisation précise et efficace.

Pour se faire une simulation numérique sera réalisée sur différents sites Algériens à savoir : Arzew, Adrar, Ghardaïa pour voir le comportement de ses systèmes en Algérie, et caractériser les différents composant de ses usines (système PV-Eolienne_Electrolyseur)

2. Description de Homer pro :

HOMER Pro est un logiciel de simulation utilisé pour concevoir et analyser des systèmes d'énergie renouvelable, notamment dans le domaine des micro-réseaux. Il permet aux utilisateurs de modéliser divers composants tels que les panneaux solaires, les éoliennes, les batteries et les générateurs diesel pour optimiser la conception et le fonctionnement des systèmes d'alimentation autonomes ou connectés au réseau. Avec HOMER Pro, les utilisateurs peuvent évaluer la faisabilité de différentes configurations, évaluer les performances économiques et prendre des décisions éclairées sur les projets d'énergie renouvelable.

HOMER Pro utilise principalement le langage de programmation C# pour son développement. C# est un langage de programmation orienté objet développé par Microsoft, largement utilisé pour créer des applications Windows, y compris des logiciels professionnels et des outils de modélisation comme HOMER Pro

2.1. Extension d'hydrogène vert sous Homer pro :

HOMER Pro Hydrogène est une extension du logiciel HOMER Pro qui permet de modéliser et d'analyser les systèmes énergétiques intégrant la technologie de l'hydrogène. Cette extension permet aux utilisateurs de concevoir des systèmes énergétiques hybrides complexes qui intègrent des sources d'énergie renouvelable telles que le solaire et l'éolien, des systèmes de stockage d'hydrogène et des piles à combustible à hydrogène.

Avec HOMER Pro Hydrogène, les utilisateurs peuvent évaluer les performances et la rentabilité de ces systèmes, en tenant compte des coûts et des caractéristiques spécifiques à l'hydrogène, tels que les coûts de production, de stockage et de distribution. Cela permet d'explorer des solutions énergétiques innovantes et durables qui contribuent à la transition vers une économie basée sur l'hydrogène

2.2 Modèle mathématique :

Homer utilise dans son modèle pour estimer la source électrique, les équations ci-dessous :

- **Photovoltaïque :**

$$P_{pv} : Y_{pv} f_{pv} \frac{G_T}{G_{T,STC}}$$

Y_{pv} : la capacité du système PV [KW]

f_{pv} : pourcentage de dégradation

G_T : Eclairage Globale [Kw/m²]

G_T, S_{TC} : Éclairage incident [1KW/m²]

- **Pour éolienne :**

$$U_{hub} : U_{anem} * (Z_{hub}/Z_{anem})^\alpha$$

U_{hub} : la vitesse de vent à la hauteur du moyeu de l'éolienne

U_{anem} : la vitesse de vent à la hauteur de l'anémomètre

Z_{hub} : La hauteur du moyeu de l'éolienne

Z_{anem} : la hauteur de l'anémomètre

α : L'exposant de la loi de puissance

- **Electrolyseur :**

Le pouvoir calorifique supérieur de l'hydrogène est 142 MJ/Kg, ce qui équivaut à 39.4 KWh/kg.

Ainsi un électrolyseur qui consomme

60 KWh d'électricité pour produire un kilogramme de l'hydrogène a un rendement de 39.4 KWh/Kg divisé par 60 KWh/Kg ce qui 66 %

2.3. Le module d'hydrogène dans HOMER PRO :

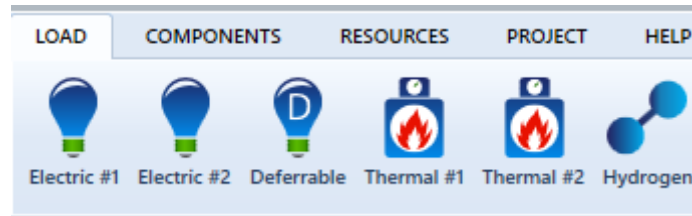


Figure.4.1 : La charge d'hydrogène Source : capture prise de logiciel HOMER

Cette image illustre les différents blocs existants sur la page de démarrage du logiciel

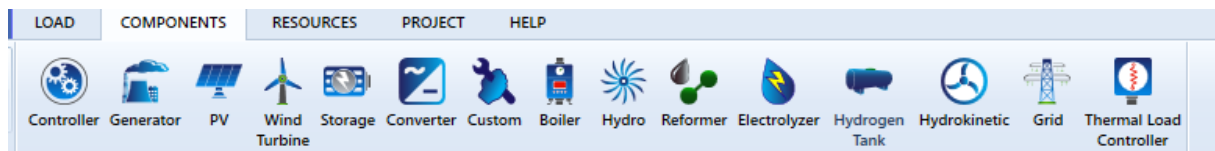


Figure.4.2 : Les composants de module hydrogène Source : capture prise de logiciel HOMER

Cette image illustre les différents systèmes à sélectionner pour réaliser l'étude : PV, Eolienne, Hybride

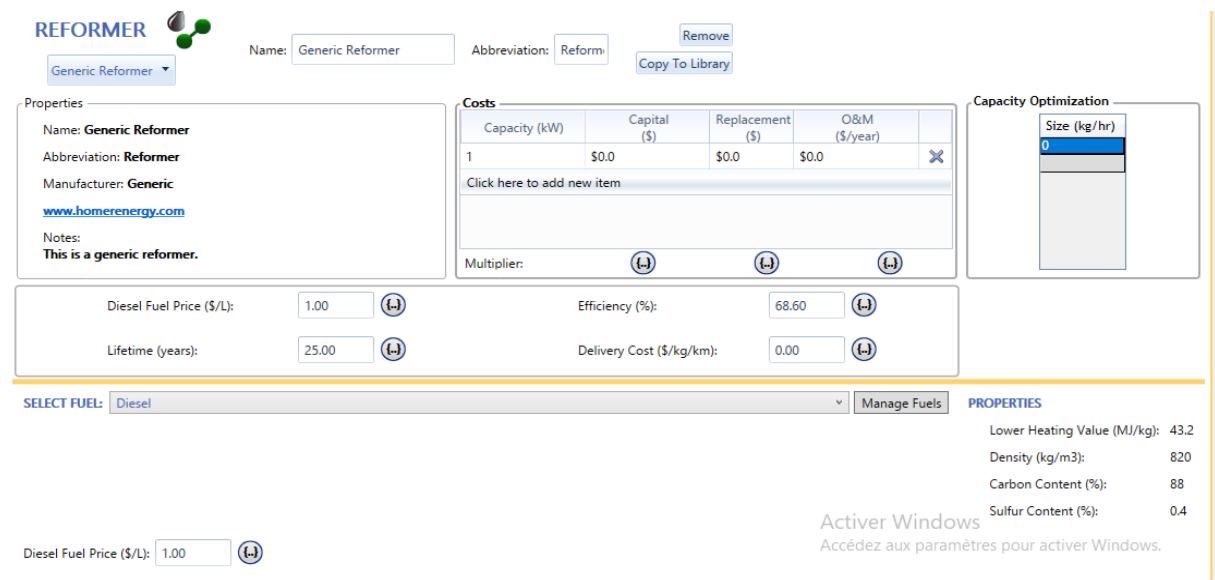


Figure.4.3 : Les informations sur le réformateur Source : capture prise de logiciel HOMER

Cette image illustre le type d'hydrogène produit : vert ou gris, Il permet aussi de gérer les carburants du reformer

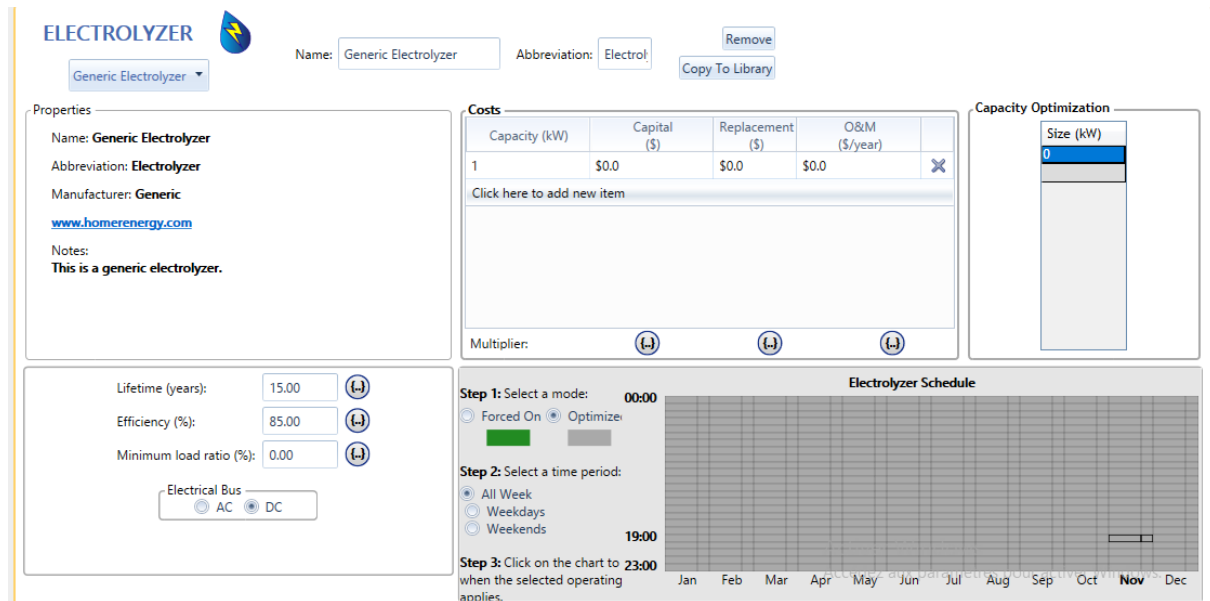


Figure.4.4 : les informations sur l'électrolyseur, Source : capture prise de logiciel HOMER PRO

Cette image permet de définir les caractéristiques de l'électrolyseur à savoir : la capacité et le coût

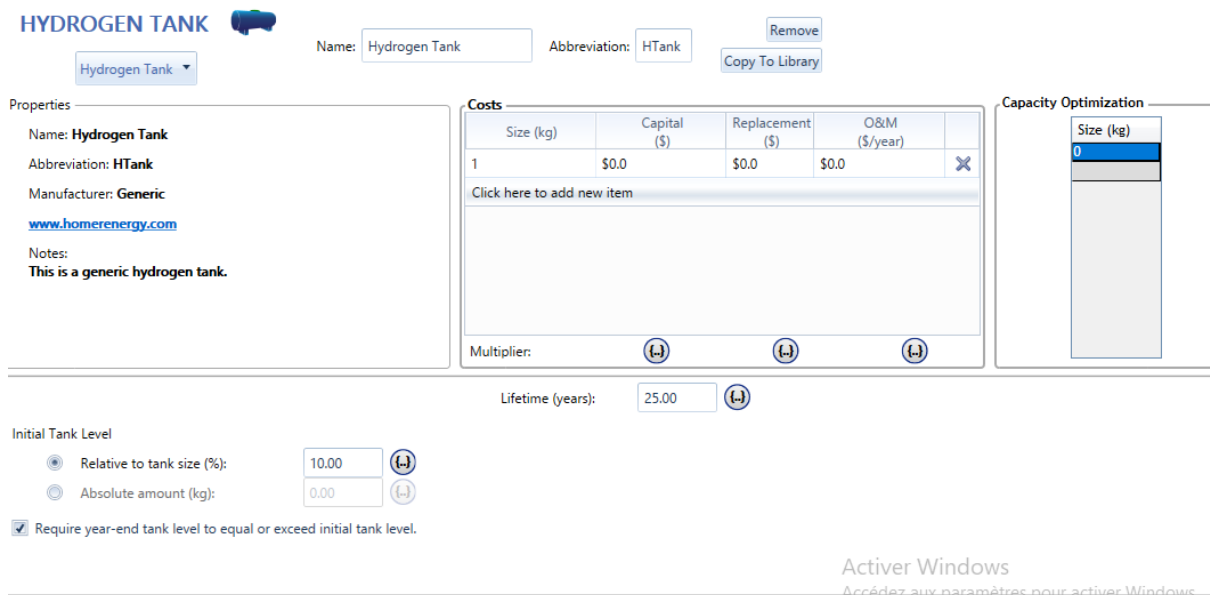


Figure.4.5 : Les informations sur le réservoir d'hydrogène Source : Capture prise de logiciel HOMER Pro

Cette image permet de définir les caractéristiques de stockage à savoir : la capacité de stockage et le coût

3. Simulation sous Homer Pro

Les étapes utilisées pour le dimensionnement et la simulation par HOMER Pro :

3.1. Présentation du site et des ressources :

Afin de localiser notre projet, nous avons introduit les coordonnées géographiques du site de projet (latitude, longitude, et Altitude), à l'aide de ces coordonnées Homer sélectionne le fichier météo qui contient les différents données météorologiques du site considéré, il est à noter que ce dernier utilise des données satellitaires avec une moyenne de 10 ans (l'éclairement globale, la température ambiante, l'humidité,.....).



Figure.4.6 : Localisation géographique de lieu d'étude, Source : Capture prise du Google carte

3.2. La ressource Solar Global Horizontal Irradiation (GHI) :

Pour l'application photovoltaïque il faut définir la ressource solaire, pour notre cas nous avons pris l'éclairement horizontale sur un plan incline.

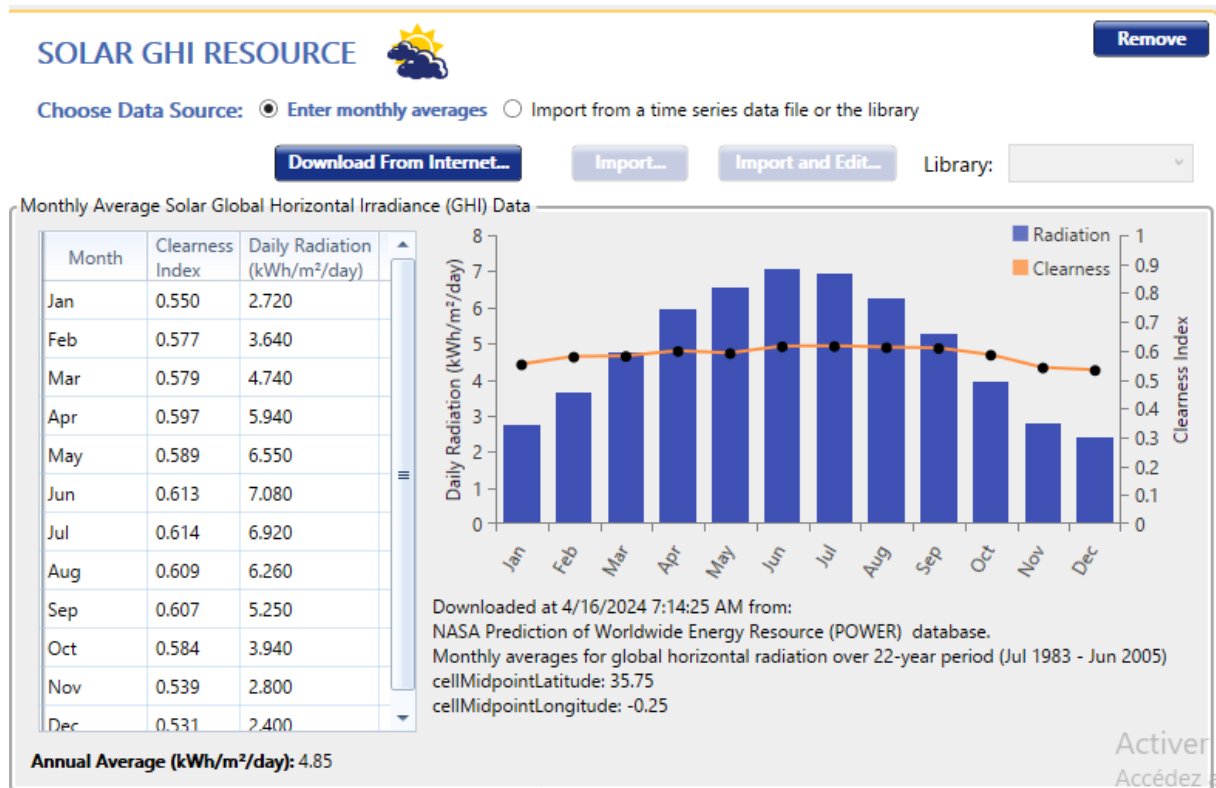


Figure.4.7 : La ressource Solar GHI du site

3.3. Ressource éolienne :

Pour l'application éolienne il faut définir les données du vent, pour notre cas nous avons pris la vitesse du vent pour caractériser notre site

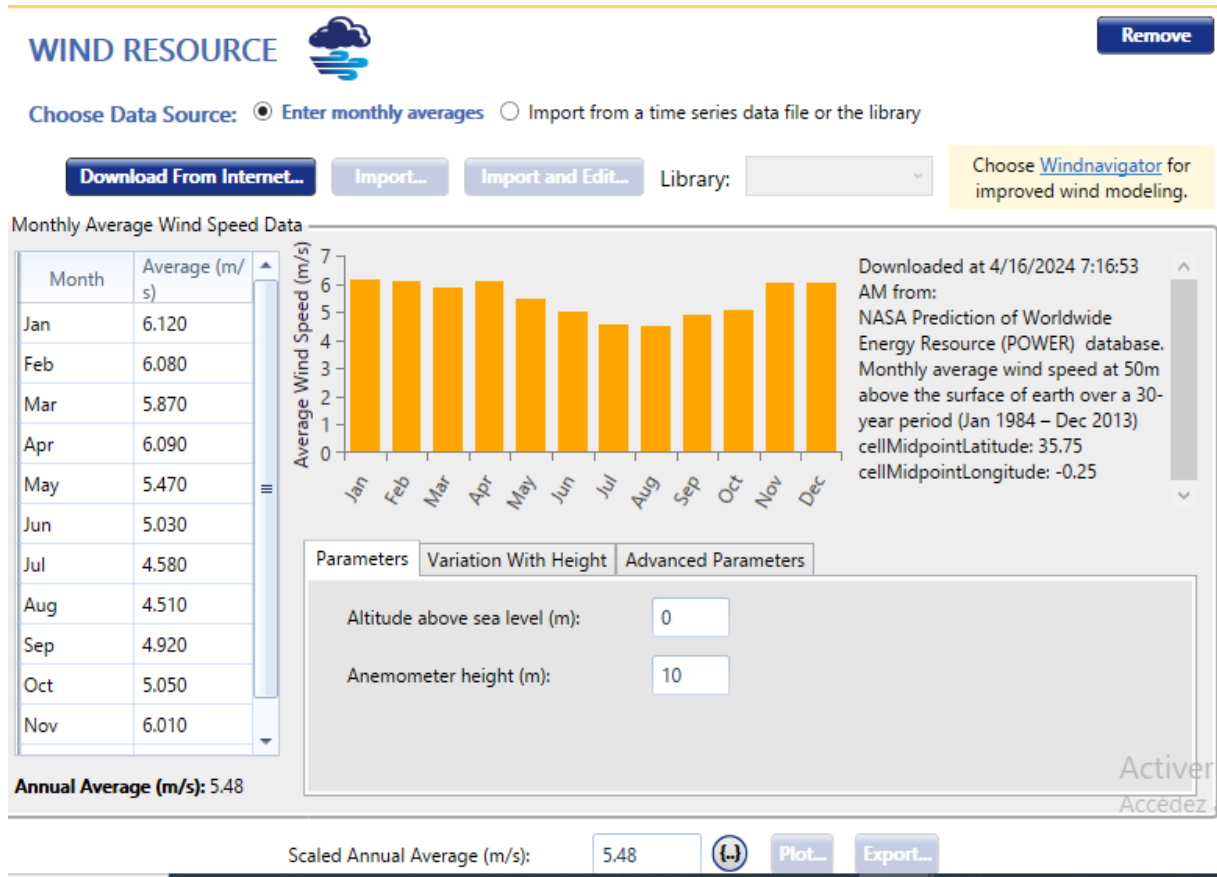


Figure.4.8 : La ressource du vent Source

3.4. Resource de la température :

Comme les performances des systèmes PV diminue avec l'augmentation de la température, le site du projet ne doit pas avoir des températures qui ne dépassent pas les 27°C

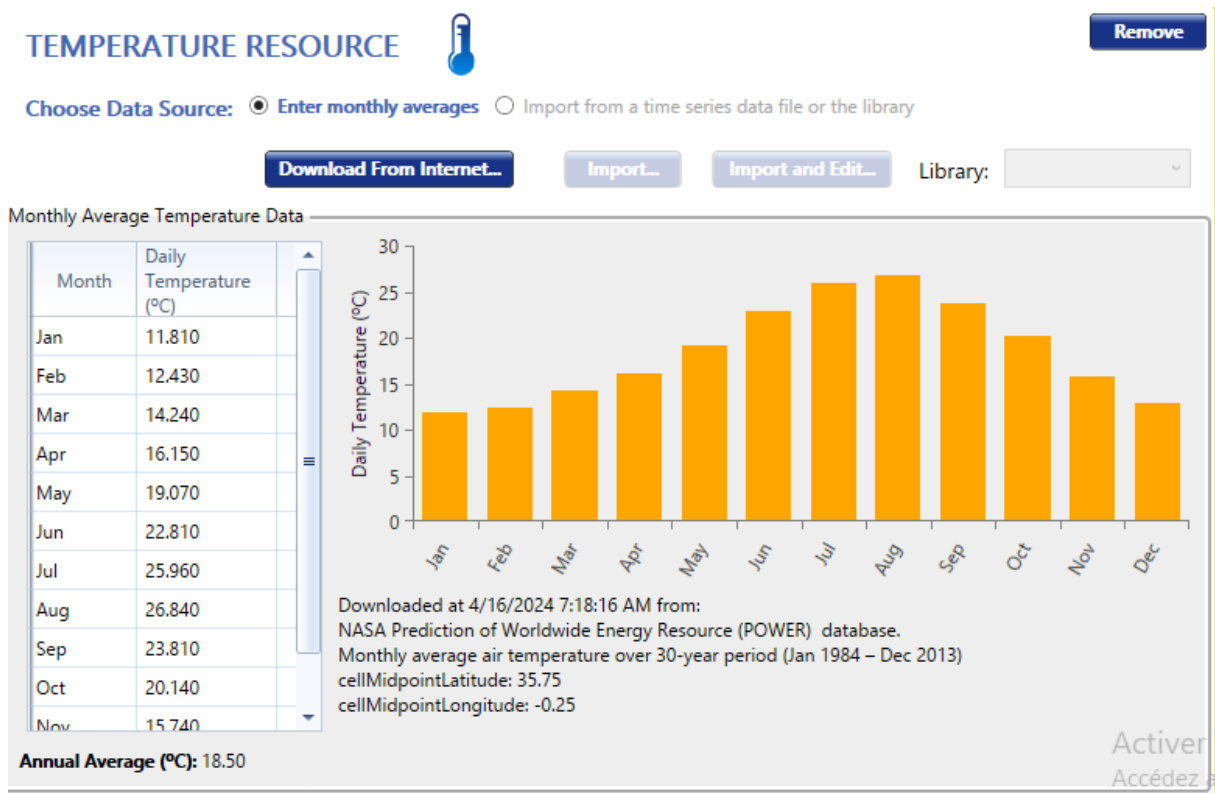


Figure.4.9 : La ressource de la température ambiante

3.5. Choix des composants :

Cette partie permet de choisir le type d'application désirée : applications PV, éolienne ou bien hybride



4. Proposition de système :

4.1. Panneaux solaires photovoltaïques :

Les panneaux solaires PV choisis pour notre étude sont de marque **Geniric flat plate PV** où leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 4.1 et la figure 4.10

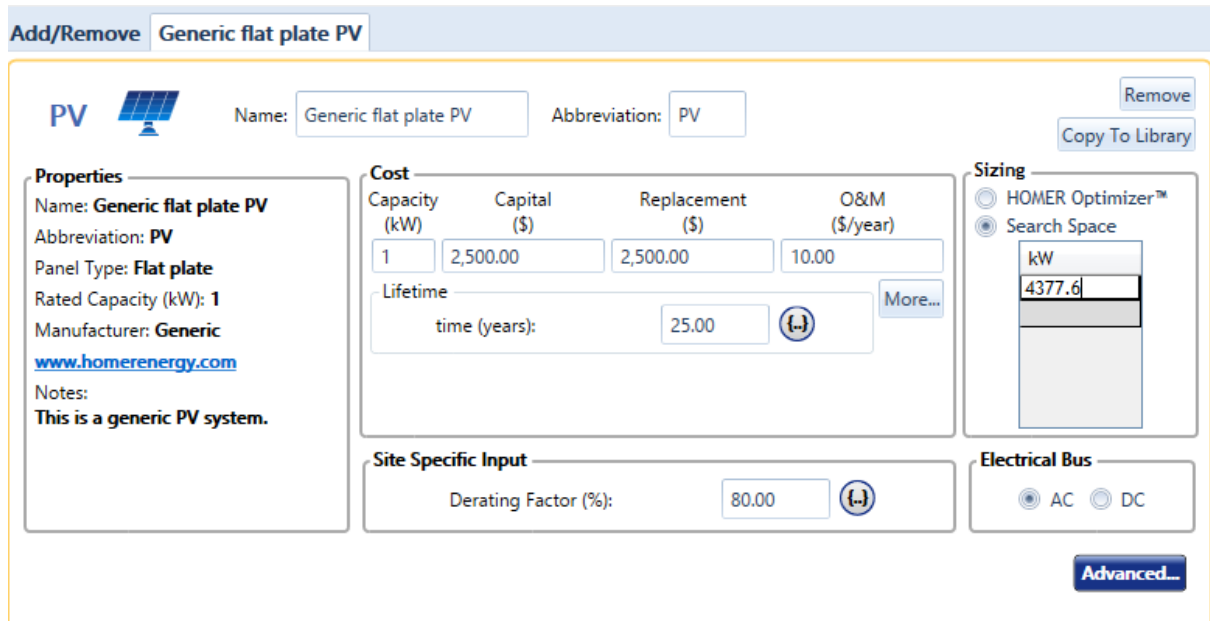


Figure.4.10 : Les informations du panneau choisi

Cette image illustre les différentes caractéristiques du panneau PV choisis, où leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 4.1 et la figure 4.10

Tableaux.4.1 : Les caractéristiques de panneau PV Source : Données tirée du logiciel

Paramètres	Unîtes	Valeur
Cout de remplacement	\$	2.500
Cout d’exploitation	\$/ans	10
Température de fonctionnement	°C	27
Coefficient de température	°C	-0.45
Facteur de déclasserment	%	80
Efficacité	%	13

4.2.Éolienne :

Une éolienne de la marque Generic 10 kW a été utilisée dans cette étude, ou cette dernière a été couplée avec le système PV, les caractéristiques de de cette dernière sont présentées dans le tableau 4.2 et la figure 4.11

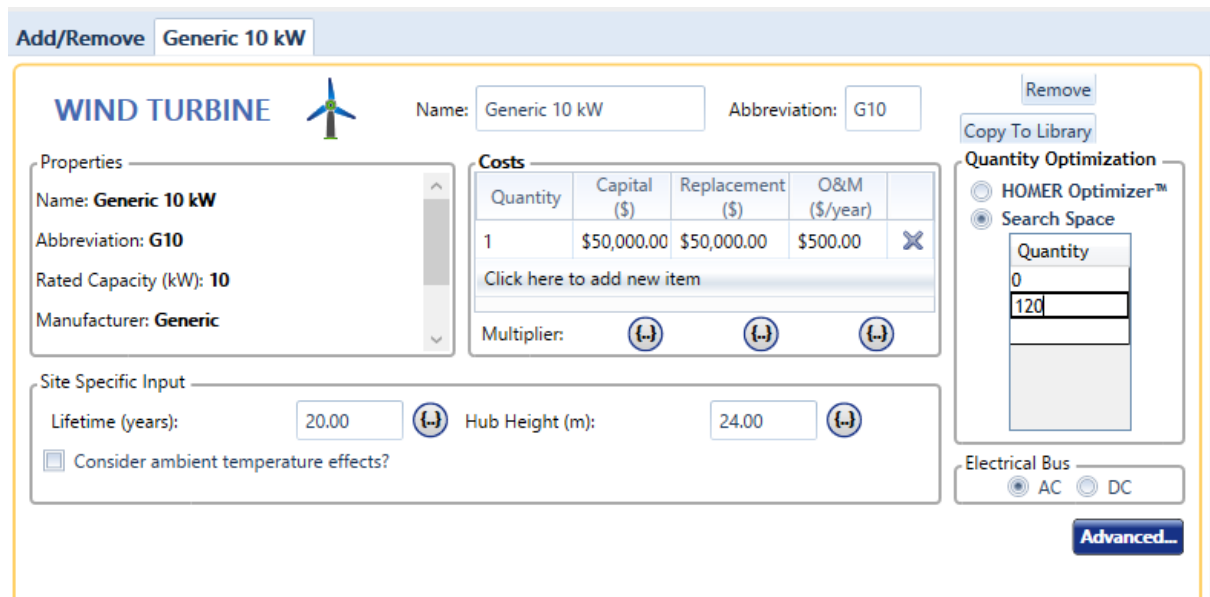


Figure.4.11 : Les informations de l'éolienne choisi, Source : capture prise de logiciel HOMER

Tableaux.4.2 : Les informations de l'éolienne choisi, Source : capture prise de logiciel HOMER.

Paramétrés	Unité	Valeur
Coût en capital et de remplacement	\$	50.000.00
Coût d'exploitation et D'entretien	\$/ans	500.00
Diamètre du rotor	M	8
Puissance nominale	Watts	10000
Vitesse du vent de coupure	m/s	3
Vitesse nominale du vent	m/s	10

4.3 La batterie :

Lorsque la puissance générée par l'éolienne et le PV dans un système hybride est supérieure à la demande de charge, l'énergie excédentaire sera stockée dans les batteries et fournira de l'électricité pendant le temps. Le modèle de batterie utilisé dans ce système est SAFT Intensium Max plus 20M ESSU [ASM] :

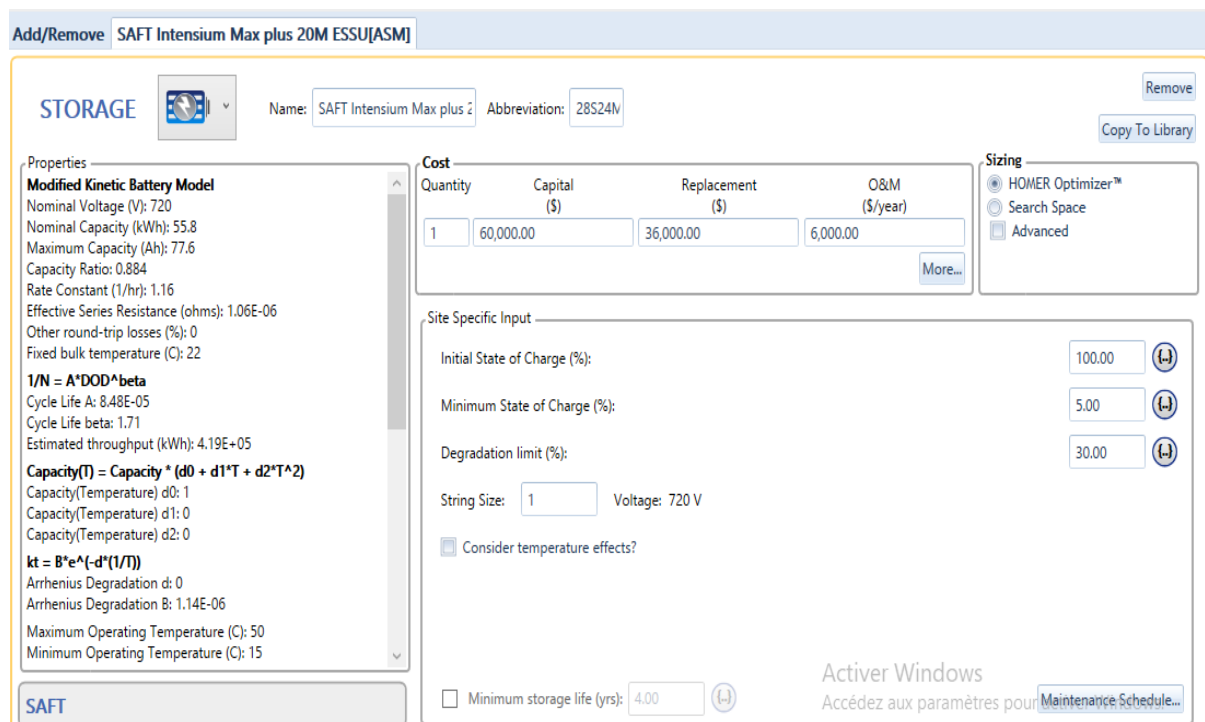


Figure.4.12 : Les informations de batterie choisie,

Tableau.4.3 : Les caractéristiques de batterie, Source : Données tirée du logiciel

Paramètres	Unité	Valeur
Tension nominale	Volt	720
Capacité nominale	KWh	55.8
Efficacité aller-retour	%	30
Capacité maximale	Ah	77.6

4.4. Convertisseur (Onduleur) :

Logiciel Homer Pro se compose à la fois de générateurs AC et DC. Un convertisseur est donc nécessaire pour maintenir le flux d'énergie entre les composants AC et DC. Un convertisseur Fronius Symo 24.0 3 480 a été choisi pour le système. Les différentes caractéristiques de notre onduleur sont présentées dans la figure ci-dessous :

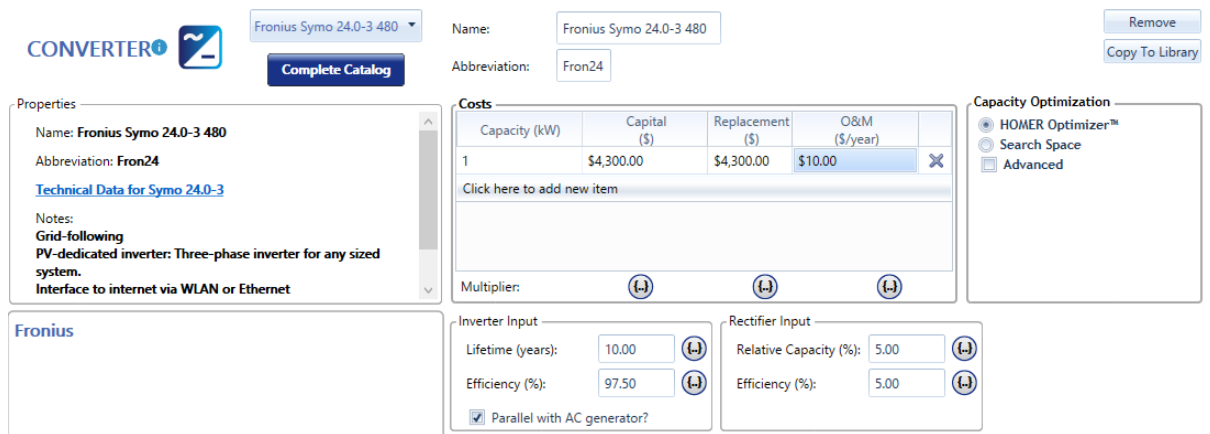


Figure.4.13 : Les informations sur le convertisseur choisi.

4.5. Électrolyseur :

HOMER Pro nous permet d'analyser les performances de l'électrolyseur, notamment le rendement global, les pertes d'énergie, les coûts associés à la consommation électrique et à la production d'hydrogène, ainsi que l'impact de différentes conditions de fonctionnement sur les performances globales du système. (La durée de vie est de 25 ans, et l'efficacité considérée est de 85%. Et le taux de charge minimal est de 15%.

Comme la puissance de notre usine pour notre projet est 50 MW, cela nécessite 5 électrolyseurs de 10 MW chacun, et selon les électrolyseurs disponibles sur le marché qui ont une puissance varie d'environ 1 MW à environ 17.5 MW, pour cette raison nous avons limité notre simulation à 4.6 MW, cette valeur a été obtenue en multipliant 5760 qui représente notre besoin journalier fois 0.8 qui est le rendement de l'électrolyseur, les détails du calcul sont illustré dans la figure ci-dessous.

ELECTROLYZER

Name: Generic Electrolyzer Abbreviation: Electrol Remove Copy To Library

Properties

Name: **Generic Electrolyzer**
 Abbreviation: **Electrolyzer**
 Manufacturer: **Generic**
www.homerenergy.com
 Notes: **This is a generic electrolyzer.**

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$300.00	\$300.00	\$15.00

Click here to add new item

Multiplier: [-] [+] [+]

Capacity Optimization

Size (kW): 4608

Electrolyzer Schedule

Step 1: Select a mode: 00:00
 Forced On Optimize

Step 2: Select a time period:
 All Week
 Weekdays
 Weekends

Step 3: Click on the chart to 23:00 when the selected operating applies.

Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec

Figure.4.14 : Les informations de l'électrolyseur choisi,

4.6. Réservoir d'hydrogène :

On a utilisé le réservoir d'hydrogène pour évaluer la faisabilité et la fiabilité économique de l'intégration du stockage d'hydrogène dans notre système énergétique. Cela nous permet d'optimiser la conception, le fonctionnement et la dimension du réservoir d'hydrogène, conduisant ainsi à des systèmes énergétiques à base d'hydrogène efficaces et fiable

HYDROGEN TANK

Name: Hydrogen Tank Abbreviation: HTank Remove Copy To Library

Properties

Name: **Hydrogen Tank**
 Abbreviation: **HTank**
 Manufacturer: **Generic**
www.homerenergy.com
 Notes: **This is a generic hydrogen tank.**

Costs

Size (kg)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$400.00	\$400.00	\$25.00

Click here to add new item

Multiplier: [-] [+] [+]

Capacity Optimization

Size (kg): 5000

Lifetime (years): 25.00 [-] [+]

Initial Tank Level

Relative to tank size (%): 10.00 [-] [+]
 Absolute amount (kg): 0.00 [-] [+]

Require year-end tank level to equal or exceed initial tank level.

Figure.4.15 : Les informations du Réservoir, Source : capture prise du logiciel

L'image ci-dessus fournis les différentes caractéristiques de notre réservoir de stockage, ce dernier permet d'assurer une continuité de fonctionnement de notre système.

4.7. La charge étudiée :

La charge électrique est un élément essentiel dans la modélisation et l'optimisation des systèmes énergétiques dans le logiciel HOMER Pro. Il représente la demande électrique d'un système ou d'un ensemble de charges connectées au réseau. On choisit une consommation journalière d'électricité de 5760KWh avec une charge parasite de 720KW pour la durée de 9h à 16h, cette dernière représente la consommation horaire.

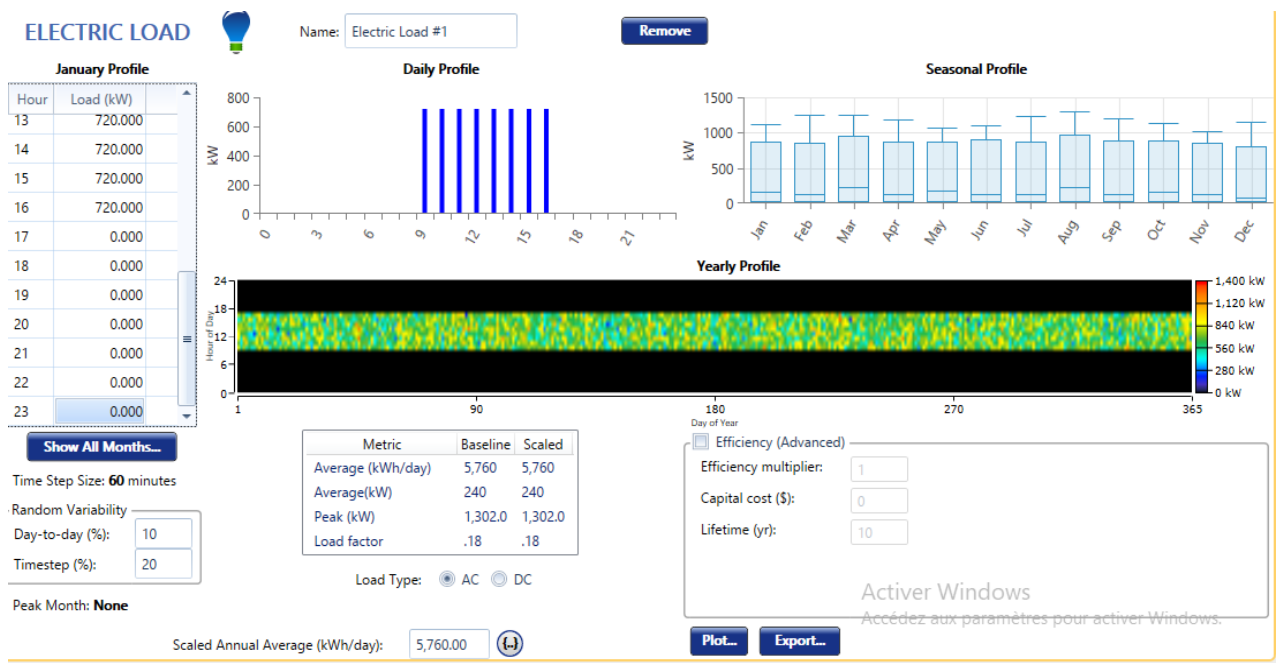


Figure.4.16 : Les informations de la charge étudiée Source

Tableau4.4 : Données inséré dans le logiciel

Heure	La charge (KW)	Heure	La charge (KW)
9	720	13	720
10	720	14	720
11	720	15	720
12	720	16	720

4.8. Grid :

Grid fait référence au réseau électrique principal auquel une microgrille peut être connectée ou isolée, permettant ainsi aux utilisateurs de modéliser les interactions entre la micro grille et le réseau électrique.

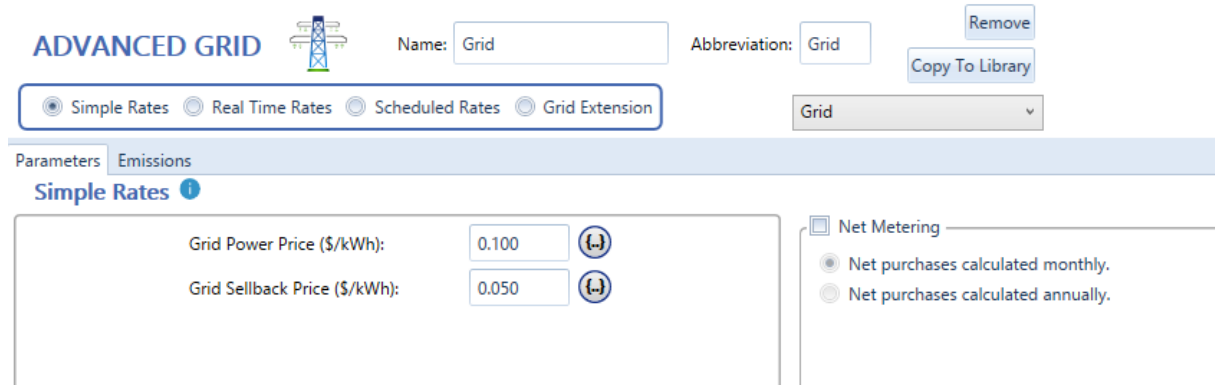


Figure.4.17 : données tire dans le logiciel

4.9. Charge d'hydrogéné (La pile à combustible) :

"Hydrogène load" dans HOMER Pro fait référence à la charge électrique alimentée par une pile à combustible à hydrogène dans le système énergétique modélisé. Cela inclut la consommation d'électricité par des équipements tels que des véhicules électriques à hydrogène ou des appareils électriques alimentés par une pile à combustible



Figure.4.18 : la consommation d'hydrogène dans la pile

5. Résultats de simulation par logiciel Homer Pro

5.1. Résultats techniques Pour Arzew :

Après avoir dimensionné notre système à production d'hydrogène, nous avons enfin obtenus le modèle définitif adapté pour le site d'Arzew (Figure.4.18)

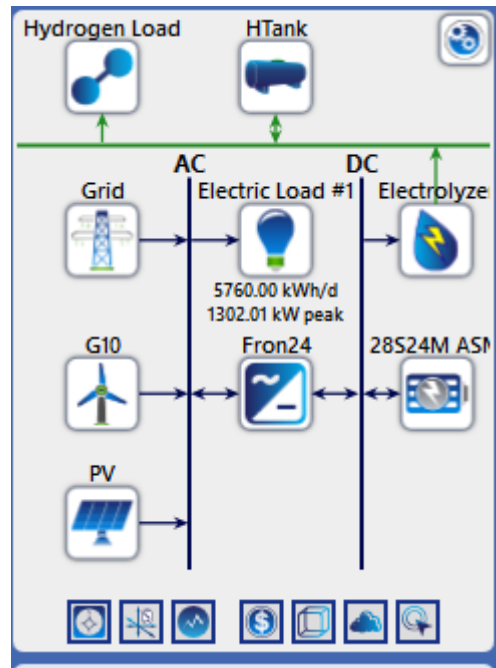


Figure.4.19 : capteur prise par le logiciel Homer pour le système proposé.

Le modèle définitif contient la partie PV d'une énergie égale à 4377 kWh, couplé avec le système éolien d'une énergie égale à 1383 kWh, l'électricité produite est utilisée pour alimenter l'électrolyseur qui contient 0.96 m³ de H₂O pour produire une quantité d'hydrogène de 96 kg, Le modèle définitif contient également une partie d'hydrogène produite qui va être envoyé vers le stockage, et l'autre partie vers l'exploitation.

5.2. L'analyse des résultats de la simulation :

Après avoir validé le modèle, il faut effectuer un calcul d'optimisation afin d'obtenir les paramètres optimaux qui donnent une meilleur configuration qui notre système désiré (figure 4.20).

Architecture										Cost				System		PV
PV (kW)	G10	28S24M ASM	Grid (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Fron24 (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Capital Cost (\$)	Proc (kW)	
4,378			999,999	4,000	5,000	1,181	CC	\$25.7M	\$0.532	\$501,499	\$19.2M	97.1	0	10,944,000	7.02	
4,378	1		999,999	4,000	5,000	1,181	CC	\$25.8M	\$0.535	\$507,383	\$19.3M	97.1	0	10,944,000	7.02	
4,378	120		999,999	4,000	5,000	712	CC	\$28.1M	\$0.355	\$377,269	\$23.2M	99.3	0	10,944,000	7.02	
4,378	120	1	999,999	4,000	5,000	712	CC	\$28.2M	\$0.357	\$383,154	\$23.3M	99.3	0	10,944,000	7.02	

Figure.4.20 : Résultats d'optimisation totaux pour le système. Source : capture prise de logiciel HOMER Pro

La figure ci-dessous représente la production électrique mensuelle par le système hybride avec un petit pourcentage produit par le Grid, les résultats obtenus sont conforme avec ceux trouvés dans le cahier des charges, où la valeur de la production par le système PV atteint son max au mois d’Avril avec une valeur de 795 MWh, la répartition de l’énergie électrique produite par les deux systèmes est presque la même avec celle trouvé dans le cahier de charge, ce qui donne un bon aperçu pour notre modélisation.

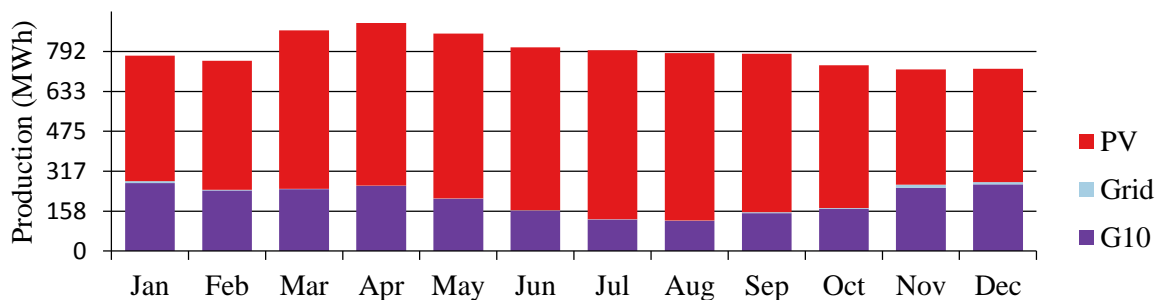


Figure.4.21 : électricité produite à partir du système hybride

Une fois nous avons la quantité d’électricité produite par la source renouvelable (PV+éolienne), elle est introduite dans notre électrolyseur qui contient de l’eau pour produire de l’hydrogène, les résultats obtenus dans la simulation montrent que la quantité de H₂ produite par notre système est très significative, ou les valeurs sont

presque conformes avec la production électrique, avec une valeurs de 11000 kg pour le mois d'Avril ,ce qui donne un excellent aperçu pour les système de production d'hydrogène vert.

La figure ci-dessous représente la production mensuelle d'hydrogène

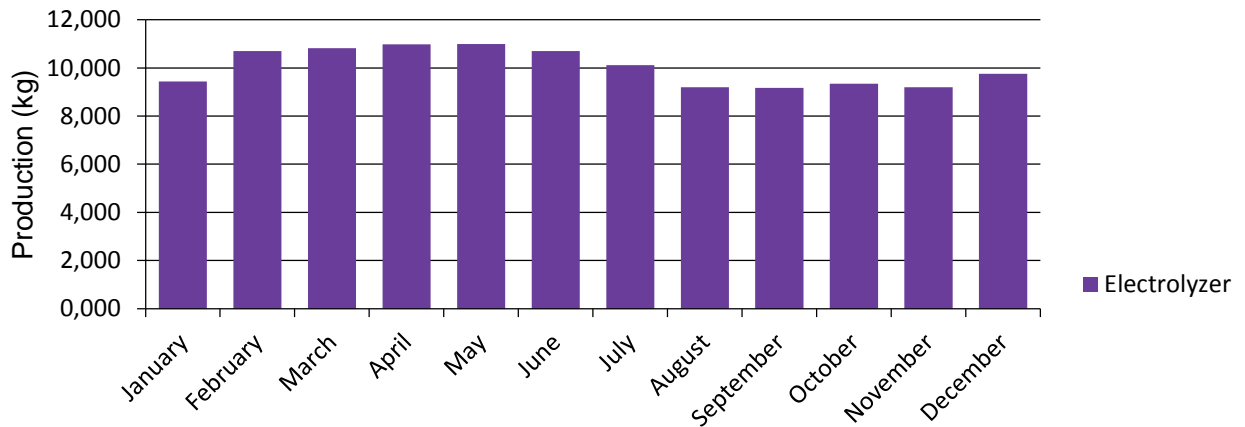


Figure.4.22 : production mensuelle de l'hydrogène pour l'alimentation de la pile à combustible.

5.3. Résultats techniques Pour Ouargla :

La figure ci-dessous représente la production électrique mensuelle par le système hybride avec un petit pourcentage produit par le Grid, les résultats obtenus sont conforme avec ceux trouvés dans le cahier des charges, où la valeur de la production par le système PV atteint son max au mois d'Aout avec une valeur de 1000 MWh, la répartition de l'énergie électrique produite par les deux systèmes est presque la même avec celle trouvé dans le cahier de charge. On remarque que la production électrique est toujours élevée dans les mois de la saison estivale cela est dû à l'effet que la durée de jour ainsi que la durée d'ensoleillement à l'intensité du rayonnement solaire

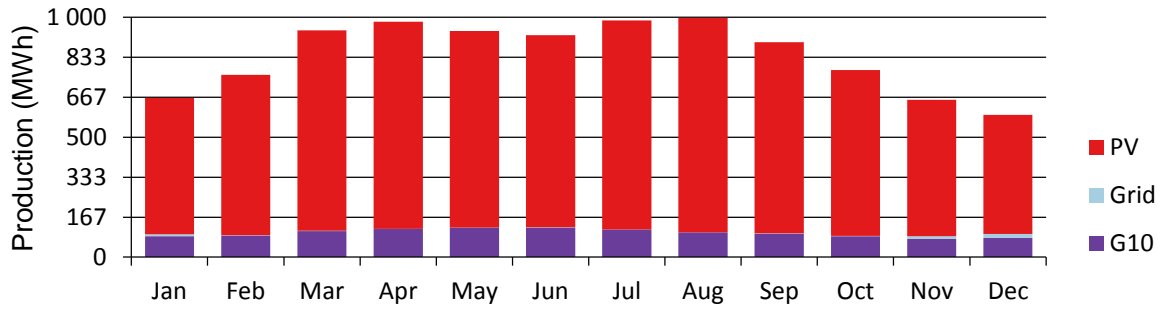


Figure.4.23 : électricité produite à partir du système hybride

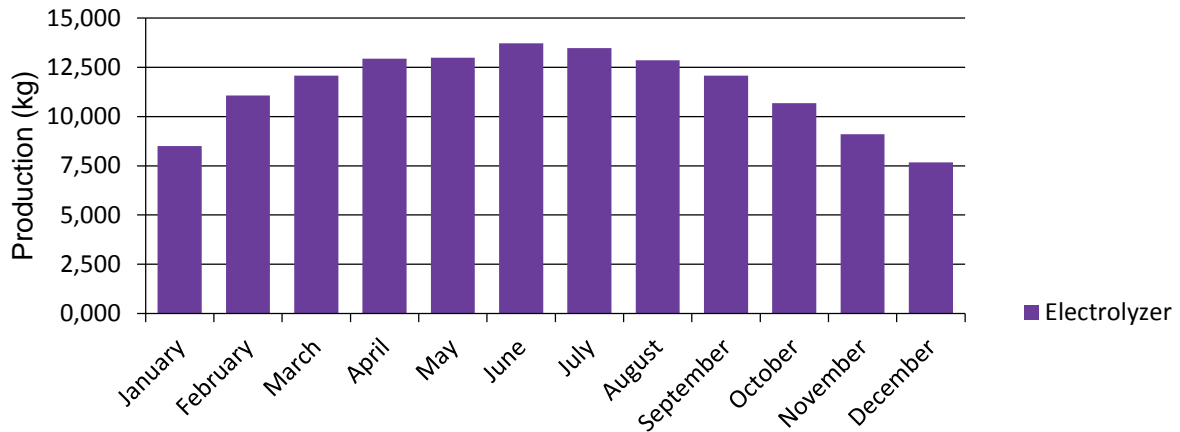


Figure.4.24 : production mensuelle de l’hydrogène pour l’alimentation de la pile à combustible.

D’après les résultats obtenu pour le site de Ouargla, on remarque que la production de l’hydrogène est très élevée par rapport au site d’Arzew, cela est dû à une production électrique importante où il atteint son maximum aux mois de Juin, Juillet avec des valeurs de 13000 kg et 12700 kg respectivement cela s’explique par le fait que ces mois son caractérisés par une durée de jour importante avec une intensité du rayonnement solaire importante aussi, ces deux paramètres donnent une production électrique importante qui va certainement influencer sur la production de H₂, à partir de ces résultats on constate que le site de Ouargla est beaucoup plus favorable par rapport au site d’Arziw.

• 5.4. Résultats technique pour Adrar :

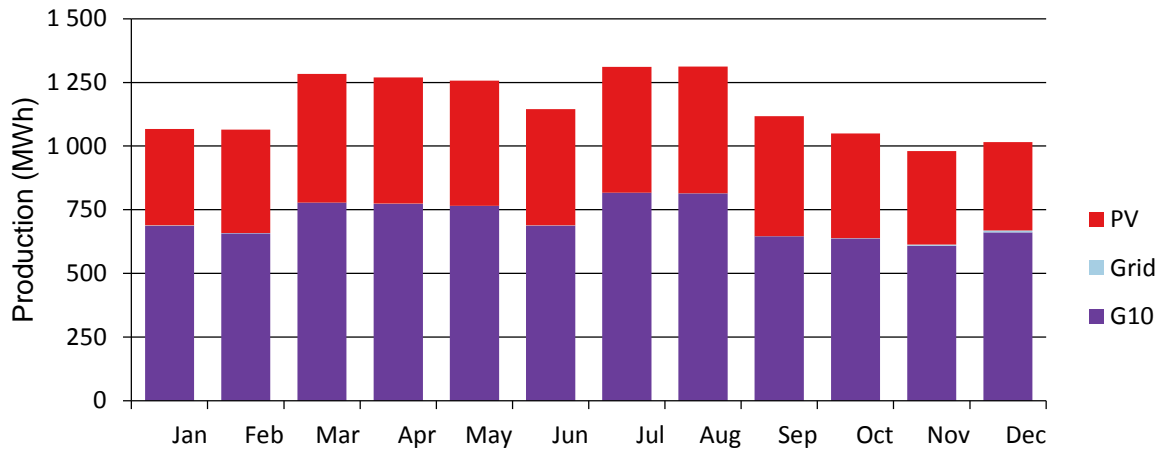


Figure.4.25 : électricité produite à partir du système hybride Source : capture prise de logiciel HOMER

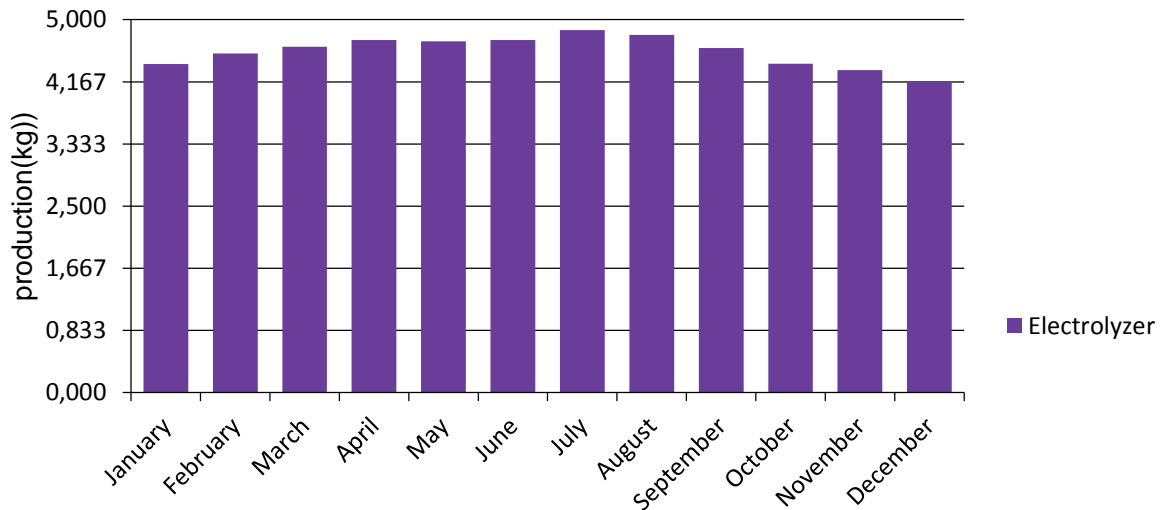


Figure.4.26 : production mensuelle de l’hydrogène pour l’alimentation de la pile a combustible.

D’après les résultats obtenus pour le site d’Adrar où nous avons changé les répartitions des deux sources PV et éolienne (50% pour le PV et 50% pour l’éolienne), ce choix a été fait car le site d’Adrar possède un gisement éolien

important, cela est bien apparent dans le Programme Algérienne des EnR, où une ferme éolienne de 10MW a été installé dans ce dernier.

Les résultats obtenus montrent que le site d'Adrar est défavorable car il y'a un déséquilibre entre la production électrique et la production d'hydrogène, cela s'explique par le fait que le logiciel Homer optimise la répartition des deux sources, donc comme les fichiers météorologiques utilisent des données satellitaires et Adrar est caractérisé par un potentiel éolienne important, alors l'optimisation a donné une production électrique importante pour l'éolien (70 % et 30 %), ce qui contradictoire au valeurs déclarées au début

Alors, une contradiction a été enregistrée entre le modelé proposé et le fichier météo, pour cette raison nous avons constaté que le site d'Adrar est défavorable, et nous avons retenu pour notre projet les deux sites Arzew et Ouargla.

6. Exploitation de l'hydrogéné produite :

Une fois nous avons produite de l'hydrogène dans les deux retenu donc ce dernier doit être utilisé dans diverse application :

Alimenter une pile à combustible pour faire fonctionner :

- Différents moyens de transport : Véhicules électriques, trains, vélos, bateaux,
- Les appareille stationnaire

7. Pile à combustible :

7.1. Définition :

La pile à combustible met en jeu la réaction d'oxydoréduction entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, de l'électricité et de la chaleur. Elle transforme une énergie chimique en énergie électrique. Donc la pile à combustible est un appareil qui permet de convertir l'énergie chimique d'un combustible et d'un oxydant en énergie électrique. Elle fonctionne sur le mode inverse de l'électrolyse de l'eau. Son architecture est similaire à celle d'une batterie. Pour le bon fonctionnement de la pile, des accessoires lui sont associés. Ils ont pour objectif d'alimenter cette dernière en hydrogène et en air, d'évacuer l'eau formée à partir de la réaction de l'hydrogène avec l'oxygène, et d'assurer le refroidissement. À cela

s'ajoute un système de supervision permettant de coordonner l'ensemble des accessoires [26].

7.2. Fonctionnement :

L'hydrogène H₂ alimente le côté anode (électrode négative) : ses atomes sont dissociés en électrons et en protons. Les protons traversent la membrane, tandis que les électrons circulent de l'anode vers la cathode (électrode positive) par les électrodes et le circuit électrique extérieur dans lequel une partie de leur énergie potentielle est convertie en travail utile. L'oxygène O₂ (pur ou de l'air) alimente le côté cathode et se combine aux protons qui ont traversé la membrane et aux électrons venant du circuit électrique pour donner de l'eau (Figure.4.27). Cette eau issue de la réaction électrochimique doit être évacuée, souvent par un débit d'air en excès. La pile à combustible constitue donc un dispositif de transformation de matière et de conversion d'énergie fortement hétérogène [26].

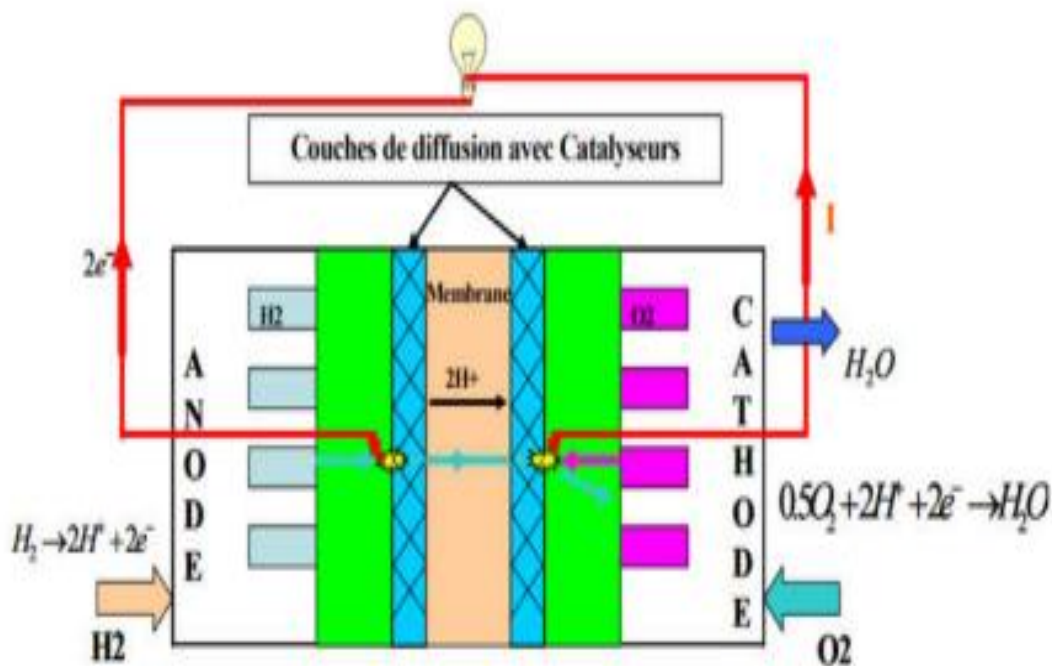
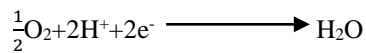


Figure.4.27 : Fonctionnement d'une pile à combustible.

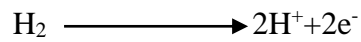
7.3. Réactions chimiques :

Le résultat net des réactions simultanées au sein de ce dispositif de conversion électrochimique est une production d'eau accompagnée de production d'électricité à courant continu et de chaleur suivant les réactions [26] :

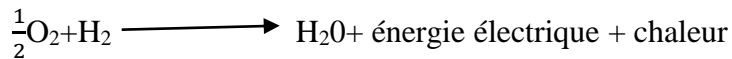
A la cathode (électrode positive), réduction de l'oxygène



A l'anode (électrode négative), oxydation de l'hydrogène



La réaction d'oxydoréduction totale s'écrit



Les électrodes génèrent du courant tant qu'elles sont approvisionnées en combustible.

7.4. Applications des piles à combustible :

La pile à combustible est utilisée pour remplacer les piles et batteries actuelles. En effet, au niveau énergétique, une PEMFC stocke 3 fois plus d'énergie qu'une batterie standard. On remarque aussi qu'elle a une bonne autonomie, une durée de vie plus longue mais surtout qu'elle ne se décharge pas en dehors de l'utilisation. [26] :

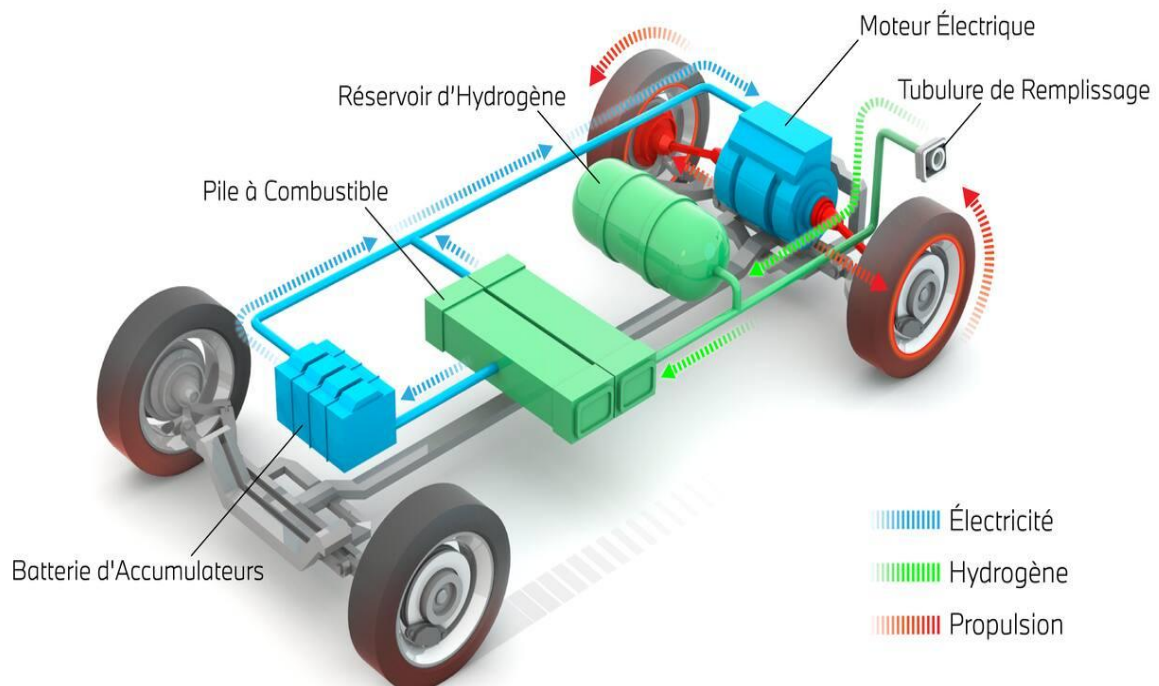


Figure.4.28 : l'utilisation de la pile à combustible dans les voitures

Conclusion

D'après les résultats obtenus dans ce chapitre on peut constater que la production de l'hydrogène vert est beaucoup mieux par rapport aux autres types de production (gris, Bleu...)

- L'utilisation des énergies renouvelable pour la production de l'hydrogène représente une solution prometteuse qui est considérée comme une excellente alternative aux autres types de productions, cela est bien apparent dans les résultats trouvés où une grande quantité d'électricité est produite par ce système, cela donne aussi une grande quantité d'hydrogène produite
- Parmi les sites étudiés dans notre étude on a retenu les sites d'Arzew et Ouargla, le premier est en cours de réalisation, le deuxième dans le future proche selon le programme Algérien des énergies renouvelable.

Malgré une technologie se peaufinant de jours en jours, l'hydrogène reste pour l'instant bien supérieur en terme d'autonomie et de temps de recharge comparé à l'électrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif d'analyser les potentialités et les applications des énergies renouvelables en Algérie, en mettant un accent particulier sur les ressources solaires et éoliennes, ainsi que sur l'état de l'art de l'hydrogène comme vecteur énergétique prometteur. La démarche adoptée dans cette étude a suivi un plan méthodique et structuré, réparti en quatre chapitres distincts mais interconnectés.

Dans le premier chapitre, nous avons examiné les généralités sur les énergies renouvelables en Algérie, en soulignant les vastes gisements solaires et éoliens du pays. Nous avons également décrit les différents types d'éoliennes et les systèmes photovoltaïques, mettant en évidence leurs avantages spécifiques et leurs domaines d'application.

Le deuxième chapitre s'est focalisé sur les notions générales sur l'hydrogène, nous avons exploré les avancées technologiques actuelles, les défis et les opportunités liés à la production et à l'utilisation de l'hydrogène vert. Cette analyse a révélé le potentiel de l'hydrogène pour contribuer à une transition énergétique durable en Algérie.

Dans le troisième chapitre, nous avons élaboré une étude préliminaire détaillée, définissant les besoins et les spécifications de notre système énergétique. Cette étape cruciale a permis de cadrer le projet et de préparer les bases pour un dimensionnement précis.

Le quatrième chapitre a été consacré à la simulation du système à l'aide du logiciel Homer Pro. Nous avons utilisé cet outil pour optimiser notre conception, en prenant en compte divers paramètres techniques et économiques. Cette modélisation nous a permis de proposer une solution énergétique efficace et réaliste.

Les résultats obtenus et les analyses effectuées dans ce mémoire montrent que l'Algérie dispose d'un potentiel considérable pour le développement des énergies renouvelables. La mise en œuvre de solutions solaires et éoliennes, combinée à l'exploitation de l'hydrogène, pourrait positionner le pays comme un leader régional dans la transition énergétique.

On peut constater que la production de hydrogène vert par voie photovoltaïque-éolienne peut représenter une excellente alternative aux autres systèmes de

Conclusion générale

production (hydrogène gris, hydrogène bleu), cela est bien apparent que ça soit dans les résultats obtenus dans le cahier des charges au bien les résultats de la simulation. Ce vecteur énergétique est considéré comme une solution prometteuse des défis énergétique notamment en Algérie, d'une part satisfaire la demande en énergie électrique d'autres part protéger notre environnement.

Perspectives

Pour les perspectives futures, il serait pertinent de poursuivre les recherches sur l'optimisation des technologies de production d'hydrogène et d'explorer davantage les synergies entre les différentes sources d'énergie renouvelable, par exemple étudier la faisabilité d'un système de production de l'hydrogène vert par voie thermique (central solaire thermodynamique) pour les comparer avec les systèmes de production de hydrogène vert actuel. Une approche intégrée et systémique sera essentielle pour maximiser l'efficacité et la durabilité des solutions énergétiques envisagées.

En somme, ce mémoire ouvre des voies prometteuses pour un avenir énergétique plus propre et plus durable en Algérie, en tirant parti de ses ressources naturelles abondantes et en s'appuyant sur des technologies innovantes et éprouvées.

Référence bibliographique

Référence bibliographique :

- [1] Hebri Assia, Le programme des énergies renouvelables en Algérie Vers une efficacité énergétique d'ici 2030. Maître de Conférence Faculté des sciences Economiques, Commerciales et des Sciences de Gestion Université de Mascara
- [2] energy.gov.dz - Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie Consulté le 15/02/2024
- [3] Mr. FERKOUS Khaled caractérisation et évaluation de rayonnement solaire pour le site de GHARDIA université de DJELFA ,2021
- [4]M.E.M-Brahimi,"Situation des énergies renouvelables en Algérie», Conférence sur la maitrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie, 2001.
- [5] BELHADJ Mohammed. « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2008.
- [6] Mr S. NACER, chapitre3 gisement solaire et capture solaire, université IBN KHALDOUN Tiaret ,2016.
- [7] KEBIR Mohammed, "Etude et analyse des données météorologiques en particulier le vent dans la région d'Adrar" Mémoire de Master, Université Abou BekrBelkaïd-Tlemcen 2011
- [8] O. Guerri, 'L'Energie Eolienne en Algérie : Un bref aperçu', Bulletin des Energies Renouvelables, N° 21, Centre de Développement des Energies Renouvelables, 2011.
- [9] B. Jourdiar, 'Ressource Eolienne en France Métropolitaine : Méthodes d'Evaluationdu Potentiel, Variabilité et Tendances', Climatologie, Ecole Doctorale Polytechnique, 2015. <tel-01238226>
- [10] A. BELGUIDOUM. Les aspects technologiques des éoliennes et leur utilisation dans la Production d'énergie dans les zones arides Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider De Biskra, (2013).
- [11] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr> visite le 20/03/2024

- [12] BOUDIA S M M. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie, thèse de doctorat, Université de Tlemcen Algérie, 2013
- [13] Sathyajith Mathew; Wind energy fundamentals, resource analysis and economics. Springer, New York (2006).
- [14] Bernard EQUER, "Energie solaire photovoltaïque"jeune 2005
- [15] B. Flèche, D. Delagnes, " Energie solaire photovoltaïque " *STI ELT Approche générale*
- [16] Mémento de l'hydrogène, fiche1.2. Les données de base physico-chimiques sur L'hydrogéné ; révision de avril 2011 ; source : afh2.
- [17] Stefan.D : "Étude exploratoire sur le potentiel du Power to X (hydrogène vert) pour l'Algérie" Thèse consulte le 23/03/2024.
- [18] <http://www.connaissancedesenergies.org/>.,Consulté le 12/03/2024.
- [19] HananeDagdougui. Thèse, Decision support systems for sustainable renewable. Energy systems and hydrogen logistics: modelling, control and risk Analysis, décembre 2011.
- [20] Mustafa tasaltin. Economic and Environmental Supply of Hydrogen Fuels in Comparison with Conventional Fuels, march2008.
- [21] Mahabhour.Optimisation des transferts de chaleur dans un système de stockage D'hydrogène à base d'alanate de sodium ; avril 2012
- [22] M^{elle} EIBAHRI Fatima Etude, dimensionnement et simulation d'un système de production et de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque université d'ADRAR, 1 juin 2016.
- [23] M^{elle} Achab NASSIRA, contribution à l'étude technico-économique et évaluation comportemental de système photovoltaïque-électrolyseur-PAC et reformeur-PAC université ORAN, 01 juillet 2013.

[24] Stratégie Nationale de Développement de l'Hydrogène en Algérie, septembre 2023.

[25] le marché PV en Algérie ,2022 ,Frank Renken Enrgie, GIZ, Partenariat Energétique Algéro-Allemand, Ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMWi).

[26] Notes de cours, B. Azoui, Master Energies renouvelables/stockage UB2MB, 2020/2021.

Annexes

1.2.2.1.3 Electrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste en la dissociation électrochimique de l'eau en hydrogène et en oxygène, à l'aide d'un courant continu circulant entre deux électrodes (l'anode et la cathode) et d'ions circulant dans un électrolyte (liquide ou solide).

La réaction globale est la suivante : $H_2O + \text{électricité} \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2 + \text{chaleur}$

L'hydrogène est produit à la cathode, tandis que l'oxygène est produit à l'anode.

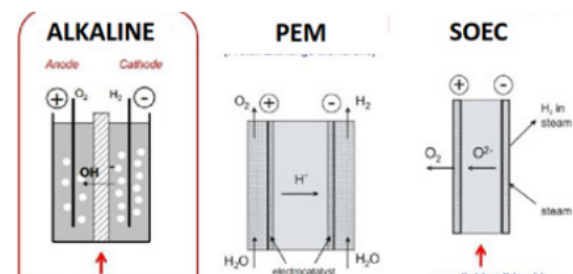
En théorie il faut 9 kg d'eau pure pour produire 1 kg d'hydrogène et 8 kg d'oxygène. En pratique, 10 à 11 kg d'eau pure par kg d'hydrogène sont nécessaires, en fonction de la technologie d'électrolyse utilisée, une partie de l'eau excédentaire pouvant être récupérée sous forme d'effluents liquides (nécessitant un traitement avant recyclage).

En théorie il faut 33.3 kWh d'électricité pour produire 1 kg d'hydrogène ; en pratique, environ 50 à 60 kWh par kg d'hydrogène sont nécessaires.

à cause de la non-idéalité du processus d'électrolyse (cette énergie supplémentaire se retrouve dans la chaleur à évacuer). De plus, à cause de la dégradation des cellules d'électrolyse, la consommation électrique augmente d'environ 1 % par 8000 heures de fonctionnement, entraînant généralement la nécessité du remplacement de l'électrolyseur après une dizaine d'année.

Les trois types principaux d'électrolyse de l'eau (alcaline, PEM et SOEC) sont illustrés sur la figure 8 suivante :

L'électrolyse alcaline utilise un électrolyte liquide (hydroxyde de potassium 25-30%) au sein duquel circulent des ions OH⁻.



L'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM) utilise un électrolyte solide au sein duquel circulent des ions H⁺.

L'électrolyse à oxyde solide (SOEC) utilise un électrolyte solide au sein duquel circulent des ions O²⁻.

Note : en plus des trois types principaux d'électrolyse décrits précédemment, un autre type d'électrolyse à membrane échangeuse d'anions (AEM) est également en cours de développement.

Les principaux avantages et inconvénients des trois types principaux d'électrolyse sont listés dans le tableau ci-après :

Type d'électrolyse	Avantages principaux	Inconvénients principaux
Alcaline	Technologie la plus mature Coût le moins élevé Possibilité de travailler à une pression	Utilisation de KOH Encombrement plus important Moins bon comporte-
PEM	Pas de KOH Encombrement moins important Meilleur comportement dynamique Possibilité de travailler à une pression opératoire élevée	Technologie un peu moins mature Utilisation de métaux nobles Coût plus élevé Durée de vie plus faible / moins bien connue
SOEC	Meilleur rendement	Technologie en cours de développement Haute température Basse pression opératoire Coût très élevé

Tableau n° 2: Avantages et inconvénients principaux des différents types d'électrolyse

Actuellement, l'électrolyse alcaline est toujours considérée comme étant la plus mature pour une application industrielle, étant donné son existence depuis le début du 20^e siècle, cependant l'électrolyse PEM rattrape progressivement son retard, et de nombreux fournisseurs proposent

cellules d'électrolyse, et une « unité » d'électrolyse peut être composée d'un ou plusieurs électrolyseurs.

Actuellement la puissance des unités d'électrolyse disponibles sur le marché pour une application industrielle varie d'environ 1 MW à environ 17.5 MW.

Pour une usine d'électrolyse de 100 MW (équivalent à environ 20000 Nm³/h ou 1800 kg/h d'hydrogène, et utilisant une superficie d'environ 5000 m² ¹⁰), il faudrait donc de 6 à 100 unités d'électrolyse ; l'augmentation de la capacité unitaire des électrolyseurs constitue donc un défi important pour le développement de la production d'hydrogène vert par électrolyse à grande échelle.

En plus des électrolyseurs, une série d'équipements sont nécessaires au fonctionnement d'une usine d'électrolyse, comme illustré sur la figure 9 suivante (configuration typique d'un électrolyseur alcalin) :

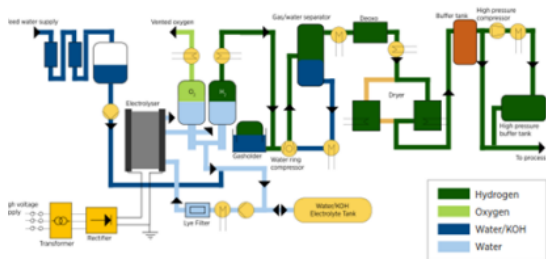


Figure n°9 - Configuration typique d'un électrolyseur alcalin¹¹

Production d'eau pure : se référer au chapitre précédent

Equipements électriques : transformateur haute tension → basse tension, habituellement (environ 400 V) puis redresseur (courant alternatif → courant continu)

Système de gestion du KOH

Système de refroidissement de l'électrolyseur

Séparation et rejet de l'oxygène

Séparation, lavage et récupération de l'hydrogène

Purification de l'hydrogène (si requis, en fonction de l'utilisation de l'hydrogène en aval ;

en général déjà supérieur à 99.5 %v/v sur base sèche) :

- Elimination de l'oxygène résiduel par combustion catalytique
- Séchage
- Compression de l'hydrogène : se référer au chapitre suivant

Note : la configuration d'un électrolyseur de type PEM est un peu moins complexe, car il n'y a pas de système de gestion du KOH.

Quelques données technico-économiques sur l'électrolyse de l'eau :

Technologie	2020			2021		
	Alcaline	PEM	SOEC	Alcaline	PEM	SOEC
Pression opératoire (en bar abs)	< 30	< 70	< 10	> 70	> 70	> 20
Consomma- tion électrique totale (en kWh / kg H ₂)	50 à 78	50 à 83	45 à 55	< 45	< 45	< 40
Durée de vie (en millier d'heures)	60	50-80	< 20	100	100-120	80
Coût électrolyseur (en USD / kW)	270	400	> 2000	< 100	< 100	< 200
Coût total (en USD / kW)	500 à 1000	700 à 1400	-	< 200	< 200	< 300

Tableau n°3: Quelques données technico-économiques relatives à l'électrolyse de l'eau¹²

Quelques chiffres clés à propos du comportement dynamique des électrolyseurs :

- Plage de fonctionnement : de 5-10 à 100-125 %
- Temps de démarrage à froid : quelques dizaines de minutes
- Temps de démarrage à chaud : quelques secondes à quelques minutes
- Augmentation / diminution de puissance : de 50