

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DE SAAD DAHLEB BLIDA 1
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DES ENERGIES
RENOUVELABLES



Mémoire

**Présenté pour l'obtention de diplôme de
Master en Énergies Renouvelables**
Option : HABITAT BIOCLIMATIQUE

Thème :

*Etude Comparative des Systèmes de Production
Electrique à Energie Renouvelables avec
Stockage basé sur l'Hydrogène pour
l'Alimentation d'une Maison à Adrar*

Par : - BENDOURA Mohammed
- BOUNEGUET Messaoud

Soutenu le : 13 / 07 /2023

Soutenu devant le jury composé par :

Dr. Khelalfa Nawal Elkahina	M.C.B	USDB	Président
Dr. Hamane Aiche Lilia	M.C.B	USDB	Encadreur
Dr. Lafri Djamel	M.C.B	USDB	Examineur

2022/2023

ملخص :

اقترحنا في هذا العمل مقارنة نظامين هجينين مستقلين لتزويد الطاقة لمنزل يقع في أدرار. مبدأ الأنظمة الهجينة هو تخزين الطاقة المتجددة المنتجة بشكل زائد عن طريق إنتاج الهيدروجين عبر المحلل الكهربائي. سيتم استخدام الهيدروجين لاحقاً لإنتاج الكهرباء بفضل بطارية الاحتراق. يتكون النظام الأول من مولد الرياح. محلل كهربائي و بطارية احتراق . النظام الثاني يتكون من توربينات الرياح نظام كهروضوئي و بطارية احتراق.

أظهرت النتائج أن التكوين الأول لموقع أدرار كافٍ لأن أدرار لديها إمكانات رياح مواتية للغاية

الكلمات المفتاحية: الهيدروجين الاخضر الطاقة الكهروضوئية طاقة الرياح التحليل الكهربائي للماء بطارية الاحتراق توربينات الرياح الانتقال الطاقوي البصمة الكربونية التنمية المستدامة تخزين الطاقة المتجددة الاقتصاد الاخضر..

Résumé :

Dans ce travail nous avons proposé de comparer deux systèmes hybrides autonomes pour l'alimentation d'une maison située à Adrar. Le principe des systèmes hybrides Enr_PAC est de stocker l'énergie renouvelable produite en excès en produisant de l'hydrogène via l'électrolyseur. L'hydrogène pour être utilisé ultérieurement pour produire de l'électricité grâce à la PAC. Le premier système est constitué d'un aérogénérateur ; d'un électrolyseur et d'une PAC. Le second système est constitué d'une éolienne ; d'un système PV et d'une PAC.

Les résultats ont montré que pour le site d'Adrar la première configuration est suffisante car Adrar est dotée d'un potentiel éolien très favorable.

Mots Clés : Hydrogène vert Énergie photovoltaïque, Énergie éolienne, Électrolyse de l'eau, la pile à combustible (PAC), Éoliennes, Transition énergétique, Empreinte carbone, Développement durable, Stockage des énergies renouvelables, Économie verte,

Abstract:

In this work we proposed to compare two autonomous hybrid systems for the power supply of a house located in Adrar. The principle of Enr_PAC hybrid systems is to store renewable energy produced in excess by producing hydrogen via the electrolyze. Hydrogen to be used later to produce electricity thanks to the heat pump. The first system consists of a wind generator; an electrolyze and a heat pump. The second system consists of a wind turbine; a PV system and a heat pump.

The results showed that for the Adrar site the first configuration is sufficient because Adrar has very favorable wind potential.

Keywords: green hydrogen, photovoltaic power, wind power, Water electrolysis, the fuel cell, wind turbine, energy transition, carbon footprint, sustainable development, renewable energy storage, green economy, ...

Remerciements

Avant tous, Nous remercions en premier lieu notre dieu de nous donner la santé et la patience pour avoir terminé ce travail.

Nous remercierons très vivement Mme.Hamane et Mr.Yassine et Mr. Kouider Abdesselam, ils nous ont guidés et conseillés tout au long de ce projet.

Nous adressons nos chaleureux remerciements qui vont également aux membres du jury, Dr. Lafri Djamel, Mdm.khelalfa et Mdm. Hamane, qui ont accepté d'évaluer ce travail et ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DÉDICACES

JE DÉDIE CE TRAVAIL :

À MES TRÈS CHERS PARENTS EN
RECONNAISSANCE DE LEURS DIVERS
SACRIFICES, DE LEURS PRÉCIEUX
CONSEILS ET DE LEUR SOUTIEN MORAL

À MES CHERS FRÈRES.

À TOUTE LA FAMILLE.

À MON BINÔME.

À MES AMIS

À TOUS LES AMIS DE CITÉ 06

BENDOURA MOHAMMED...

DÉDICACES :

JE DÉDIE CE TRAVAIL À :

MES TRÈS CHERS PARENTS ET MES
CHERS FRÈRES

À TOUTE LA FAMILLE.

À MON BINÔME

À TOUS LES GENS DE DÉPARTEMENT DES
ÉNERGIES RENOUVELABLES...

À MES AMIS TOUFIK, NABIL, BASSAT,
AMINE, ISHAK, DIDINE, OUSS, ABDOU,
CHIKH, AKRAM

À TOUS LES AMIS DE CITÉ 03 ET CITÉ 06

MESSAOUD BOUNEGUET

Sommaire

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes hybrides à énergies renouvelables avec stockage basé sur l'hydrogène.	4
I.1 Introduction :	1
I.2 Historique de panneaux photovoltaïques :	2
I.3 Historique des éoliennes :	6
I.4 Historique de l'hydrogène :	9
I.5 L'état de l'art des systèmes de production de l'électricité PV-éolien-Hydrogène :	12
I.6 Conclusion :	15
Chapitre II : Étude théorique des systèmes hybrides Photovoltaïque éolien et hydrogène	16
II.1 Introduction :	17
II.2 Notions générales :	17
II.2.1 Energie solaire :	17
II.2.2 Energie éolien :	18
II.3 Présentation des systèmes de production hybrides (PV-éolien-Hydrogène) :	21
II.3.1 L'importance de l'hybridation :	22
II.3.2 Les composantes d'un système hybride :	22
Figure 2.13 : Galette solide formée d'hydrogène et de métal.	39
Chapitre III : Simulation et résultats	41
III.1 Introduction :	42
III.2 Présentation de logiciel HOMER :	42
III.3 Présentaion de système hybride :	42
III.4 Données d'entrées :	44
III.4.1 Les données du vent :	44
III.4.2 Les données solaires :	45
III.4.3 La charge électrique :	46
III.4.4 La conversion éolienne :	47
III.4.5 Le générateur photovoltaïque :	47
III.4.6 L'électrolyseur :	48
III.4.7 La pile à combustible :	48
III.4.8 Le convertisseur :	48
III.4.9 Le réservoir d'hydrogène :	48
III.5 Dimensionnement :	49
III.6 Simulation des deux configurations :	51
III.6.1 Simulation du système éolien-pile à combustible :	51
III.7 Simulation du système éolien-photovoltaïque-pile à combustible :	58
III.7.1 Production énergétique du SEH :	58
III.7.2 Comparaison entre la production des différentes sources et celle consommé par l'électrolyseur :	62
III.7.3 Comparaison entre les deux configurations étudiées :	64
III.7.3 Comparaison entre les deux configurations étudiées :	64
III.8 Conclusion :	64
Conclusion générale.	66
Références et bibliographie.	67

Liste des figures

Chapitre 1

FIGURE 1.1 : FONCTIONNEMENT DE L'HYDROGENE.	01
FIGURE 1.2 : LA VARIATION DE PRIX DE L'HYDROGENE.....	02
FIGURE 1.3 : CHARLES FRITTS	03
FIGURE 1.4 : LA PREMIERE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE AU SILICIUM EFFICACE.....	03
FIGURE 1.5 : 1958 SATELLITE VANGUARD 1.....	04
FIGURE 1.6 : L'IMMENSE PARC SOLAIRE MEXICAIN, EQUIPE DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES MOBILES, AU MILIEU DU DESERT	05
FIGURE 1.7 : PARC EOLIEN DE GROS-MORNE, EN GASPESIEA (CANADA)	06
FIGURE 1.8 : PREMIERE EOLIENNE CREEE PAR CHARLES F. BRUSH.....	07
FIGURE 1.9 : ÉOLIENNE DE POUL LA COUR	08
FIGURE 1.10 : ÉVOLUTION DES CAPACITES INSTALLEES DANS LE MONDE DE 2001 A 2016	08
FIGURE 1.11 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE CELLULE D'ELECTROLYSE DE L'EAU	09
FIGURE 1.12 : SCHEMA D'UNE VOITURE ELECTRIQUE	11
FIGURE 1.13 : RESERVOIR D'HYDROGENE	11
FIGURE 1.14 : EFFET DE LA VITESSE DE VENT SUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE	12
FIGURE 1.15 : SCHEMA DESCRIPTIF DE SYSTEME HYBRIDE PV-EOLIEN -HYDROGEN.....	14

Chapitre 2

FIGURE 2.1 : CARTE DE VENT EN ALGERIE.....	21
FIGURE 2.2 : UN PANNEAU SOLAIRE POLYCRISTALLINS DE 100 W	23
FIGURE 2.3 : UN PANNEAU SOLAIRE MONOCRISTALLIN DE DIMEL SOLAIRE	24
FIGURE 2.4 : UN PANNEAU SOLAIRE AMORPHES.....	25
FIGURE 2.5 : UN REGULATEUR DE CHARGE DE TYPE MPPT	26
FIGURE 2.6 : ONDULEUR MPPT HYBRIDE 1000W 24V INJECTION RESEAUX 230V AVEC LIMITEUR	26
FIGURE 2.7 : BRANCHEMENT DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES EN SERIE	28
FIGURE 2.8 : BRANCHEMENT DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES EN PARALLELE	28
FIGURE 2.9 : CONVERSION DE L'ENERGIE CINETIQUE DU VENT ON ENERGIE ELECTRIQUE	29
FIGURE 2.10 : EOLIEN SAVONIUS.....	31
FIGURE 2.11 : EOLIEN DARRIEUS	31
FIGURE 2.12 : SHEMA D'UNE PILE A COMBUSTIBLE.....	37
FIGURE 2.13 : GALETTE SOLIDE FORMEE D'HYDROGENE ET DE METAL	39
FIGURE 2.14 : STOCKAGE D'HYDROGENE SOUS FORME LIQUIDE	39

Chapitre 3

FIGURE 3.1 : ARCHITECTURE DES CONFIGURATIONS DE SYSTEME 1	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. 3
FIGURE 3.2 : ARCHITECTURE DES CONFIGURATIONS DE SYSTEME 2	43
FIGURE 3.3 : ÉVOLUTION DE LA VITESSE MOYENNE MENSUELLE DU VENT POUR LA RÉGION D'ADRAR À 10M DU SOL	44
FIGURE 3.4 : RAYONNEMENT HORIZONTAL GLOBAL ET INDICE DE CLARTE	45
FIGURE 3.5 : VARIATION DE LA FREQUENCE DES VITESSES DU VENT MESUREES POUR LA REGION D'ADRAR	45
FIGURE 3.6 : SIMULATION DE LA CHARGE A ALIMENTER	46
FIGURE 3.7 : CHARGE ELECTRIQUE MOYENNE HORAIRE	46
FIGURE 3.8 : COURBE DE PUISSANCE DE L'AEROGENERATEUR PGE 20 /25	49
FIGURE 3.9 : TABLEAU DES CONFIGURATIONS POSSIBLES.....	50

FIGURE 3.10 : DIMENSIONS CHOISIS PAR HOMER POUR LA CONFIGURATION 1 ET 2 RESPECTIVEMENT	50
FIGURE 3.11 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ELECTRIQUE DE L'AEROGENERATEUR, LA PILE A COMBUSTIBLE, ET LA CHARGE POUR LE MOIS DE JANVIER	51
FIGURE 3.12 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ELECTRIQUE DE L'AEROGENERATEUR, LA PILE A COMBUSTIBLE, ET LA CHARGE POUR LE MOIS DE FEVRIER	52
FIGURE 3.13 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ELECTRIQUE DE L'AEROGENERATEUR, LA PILE A COMBUSTIBLE, ET LA CHARGE POUR LE MOIS DE MAI	52
FIGURE 3.14 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ELECTRIQUE DE L'AEROGENERATEUR, LA PILE A COMBUSTIBLE, ET LA CHARGE POUR LE MOIS D'AOUT	53
FIGURE 3.15 : Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de décembre.....	53
FIGURE 3.16 : PRODUCTION HORAIRE DE L'AEROGENERATEUR ET DE LA PAC.....	54
FIGURE 3.17 : PRODUCTION ELECTRIQUE MOYENNE MENSUELLE POUR L'AEROGENERATEUR	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.5
FIGURE 3.18 : EVOLUTION DU STOCKAGE DE L'HYDROGENE EN FONCTION DE LA PRODUCTION DE L'AEROGENERATEUR	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.5
FIGURE 3.19 : COMPARAISON ENTRE LE STOCKAGE D'HYDROGENE ET LA PRODUCTION DE L'EOLIENNE POUR LE MOIS DE FEVRIER	56
FIGURE 3.20 : COMPARAISON ENTRE LE STOCKAGE D'HYDROGENE ET LA PRODUCTION DE L'EOLIENNE POUR LE MOIS DE NOVEMBRE	56
FIGURE 3.21 : COMPARAISON ENTRE L'ENERGIE EOLIENNE PRODUITE ET CELLE CONSOMMEE PAR L'ELECTROLYSEUR POUR LE MOIS DE FEVRIER	57
FIGURE 3.22 : COMPARAISON ENTRE L'ENERGIE EOLIENNE PRODUITE ET CELLE CONSOMMEE PAR L'ELECTROLYSEUR POUR LE MOIS D'AOUT	57
FIGURE 3.23 : COMPARAISON ENTRE L'ENERGIE EOLIENNE PRODUITE ET CELLE CONSOMMEE PAR L'ELECTROLYSEUR POUR LE MOIS DE NOVEMBRE...	58
FIGURE 3.24 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE, L'AEROGENERATEUR, LA PILE A COMBUSTIBLE, ET LA CHARGE POUR LE MOIS DE JANVIER, MAI, AOUT, DECEMBRE...	58
FIGURE 3.25 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE, L'AEROGENERATEUR, LA PILE A COMBUSTIBLE, ET LA CHARGE POUR LE MOIS DE MAI...	59
FIGURE 3.26 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE, L'AEROGENERATEUR, LA PILE A COMBUSTIBLE, ET LA CHARGE POUR LE MOIS D'AOUT.....	59
FIGURE 3.27 : COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE, L'AEROGENERATEUR, LA PILE A COMBUSTIBLE, ET LA CHARGE POUR LE MOIS DE DECEMBRE
FIGURE 3.28 : PRODUCTION HORAIRE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE, L'AEROGENERATEUR ET DE LA PAC.....	60
FIGURE 3.29 : PRODUCTION ELECTRIQUE MOYENNE MENSUELLE.....	61
FIGURE 3.30 : Evolution du stockage de l'hydrogène en fonction de la production du générateur photovoltaïque et l'aérogénérateur.....	62
FIGURE 3.31 : COMPARAISON ENTRE L'ENERGIE EOLIENNE ET PHOTOVOLTAÏQUE PRODUITE ET CELLE CONSOMMEE PAR L'ELECTROLYSEUR POUR LE MOIS DE FEVRIER ...	62
FIGURE 3.32 : COMPARAISON ENTRE L'ENERGIE EOLIENNE ET PHOTOVOLTAÏQUE PRODUITE ET CELLE CONSOMMEE PAR L'ELECTROLYSEUR POUR LE MOIS D'AOUT.....	63
FIGURE 3.33 : COMPARAISON ENTRE L'ENERGIE EOLIENNE ET PHOTOVOLTAÏQUE PRODUITE ET CELLE CONSOMMEE PAR L'ELECTROLYSEUR POUR LE MOIS DE NOVEMBRE	63

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Domaine d'application d'hydrogène.....	38
--	----

Chapitre 3

Tableau 3.1: Caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Adrar.....	44
Tableau 3.2: Données statistiques de la vitesse du vent.....	44
Tableau 3.2: Propriétés du module photovoltaïque.....	47
Tableau 3.4: Propriétés de l'électrolyseur.....	48
Tableau 3.5: Propriétés de la PAC.....	48
Tableau 3.6: Caractéristiques des convertisseurs.....	48
Tableau 3.3: Propriétés du réservoir d'hydrogène.....	49
Taableau 3.8 : Consomation d'une maison à Adrar pendent 24 Heures.....	49
Tableau 3.4: Production du SEH.....	54
Tableau 3.5: Consommation électrique.....	54
Tableau 3.6: Production du SEH.....	61
Tableau 3.7: Consommation électrique.....	61
Tableau 3.13: Comparaison de la production mensuelle moyenne entre les deux configurations.....	64

Liste des abréviations :

CDER : Centre de développement des énergies renouvelables

SEH : système d'énergie hybride

PAC : Pile à combustible

PEM : Electrolyseurs à membrane échangeuse de protons

EHT : Electrolyseurs de la vapeur d'eau à haute température

SHER : Système Hybride à Énergies Renouvelables

α : L'azimut de soleil

δ : la déclinaison

ω : L'angle horaire

h : La hauteur du soleil

φ : la latitude

k : paramètre de forme caractérise la répartition du vent

c : paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent

V : vitesse du vent « instantanée »

E_c : énergie cinétique

m : masse du volume d'air

P_c : Puissance cinétique disponible

V : vitesse instantanée du vent

ρ : masse volumique de l'air

A : surface du système de récupération (m^2)

E_i : l'irradiation solaire journalière reçue par le champ photovoltaïque

E_{elec} : l'énergie électrique journalière potentiellement produite par l'installation photovoltaïque

P_c : la puissance crête du champ photovoltaïque

P_i : la puissance radiative dans les conditions standards de test (STC), exprimée en kW/m^2

PR : Ratio de performance de l'installation photovoltaïque

HOMER : Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources

I_{cc} : Courant de court-circuit

V_{oc} : Tension en circuit ouvert

FF : Facteur de forme

η : Rendement de conversion d'énergie

RS : Réponse spectrale

P_i : Puissance du vent

P_{disp} : Puissance disponible

P_{moy} : Puissance moyenne

$P_{\text{récu}}$: Puissance moyenne récupérable

$P_{\text{éle}}$: Puissance électrique

P_{vent} : Puissance instantanée du vent

V_m : Vitesse moyenne du vent

Π : Constante d'Archimède

R : Rayon du cercle formé par les pales

S : Surface des pales

C_p : Coefficient de puissance

Ω : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne

Introduction générale :

Le développement durable et la transition énergétique sont aujourd'hui au cœur des préoccupations mondiales. La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de promouvoir les énergies renouvelables se fait de plus en plus pressante. Dans ce contexte, les systèmes de production électrique à énergies renouvelables, combinés à des technologies de stockage innovantes, suscitent un intérêt croissant.

L'un des domaines émergents dans ce domaine est l'utilisation de l'hydrogène comme moyen de stockage de l'énergie renouvelable. L'hydrogène peut être produit à partir de diverses sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et éolienne, et stocké pour une utilisation ultérieure. Ce stockage basé sur l'hydrogène présente des avantages potentiels pour l'alimentation d'un bâtiment bioclimatique, qui vise à maximiser l'efficacité énergétique et à minimiser l'empreinte carbone.

Dans cette étude comparative, nous examinerons les différents systèmes de production électrique à énergies renouvelables avec stockage basé sur l'hydrogène pour l'alimentation d'un bâtiment bioclimatique. Nous comparerons les avantages et les inconvénients de différentes sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire et l'éolien, ainsi que les différentes technologies de stockage de l'hydrogène, telles que l'électrolyse de l'eau et le stockage sous forme de gaz comprimé.

L'objectif de ce travail est de comparer deux (2) technologies de systèmes de production d'électricité par l'éolienne et PV avec un stockage basé au l'hydrogène. Pour cela la consommation électrique sera estimée, ainsi que les potentiels solaires et éoliens du site sélectionné seront estimés. Un dimensionnement de chaque système sera proposé, enfin une comparaison des deux systèmes sera effectuée.

On a trois chapitres :

Chapitre 1 : l'état de l'art des systèmes hybrides à énergies renouvelables avec stockage basé sur l'hydrogène.

Chapitre 2 : Etude théorique des systèmes hybrides PV éolien et hydrogène.

Chapitre 3 : résultat et discussion.

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes hybrides à énergies renouvelables avec stockage basé sur l'hydrogène.

I.1 Introduction :

On sait que les problèmes environnementaux auxquels notre planète est confrontée, tels que la pollution, le réchauffement climatique et la sécheresse, en plus de certaines maladies et risques radioactifs, sont principalement causés par certaines sources d'énergie telles que les combustibles fossiles et les centrales nucléaires. Et en plus des crises politiques et économique qui affectent relations internationales entre les pays, principalement en raison de la pénurie de ressources énergétiques chaque pays ente de contrôler ces ressources.

Avec l'augmentation continue des besoins énergétiques des humains pour le chauffage, le transport et l'alimentation en électricité des villes et des usines, il est devenu nécessaire pour la communauté internationale de réfléchir à des sources d'énergies propres et renouvelables qui résolvent des problèmes, de manière à répondre aux besoins énergiques de l'humanité sans aucun effet secondaire nuisible pour l'enveniment et pour l'homme lui-même.

Et c'est ce que les conventions internationales sur l'énergie, les organisations et les activistes intéressés par l'environnement en sont venus à demander.

Le fait de passer à des sources d'énergie propres, telles que l'éolien et le solaire, donc permet de lutter non seulement contre les changements climatiques, mais aussi contre la pollution de l'air et pour la santé. [01]

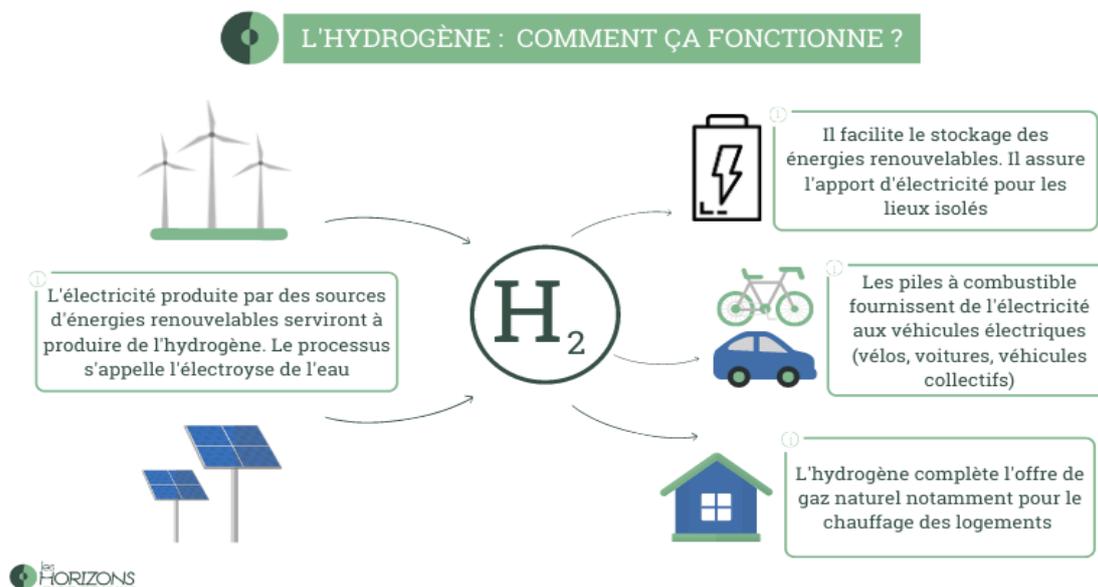


Figure 1.1 : Fonctionnement de l'hydrogène [02]

En 2020, l'UE a adopté sa stratégie sur l'hydrogène dans le cadre du pacte vert pour l'Europe. La stratégie hydrogène a été conçue selon une approche progressive et dans le but d'augmenter la part d'hydrogène de ; moins de 2% aujourd'hui jusqu'à 13-14%. [03]

En 2021, une décision a été rendue dans l'État des Pays-Bas obligeant le géant pétrolier Royal Dutch Shell à réduire ses émissions de 45% d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990. [04]

Et en novembre 2022, le vingt-septième Sommet des Nations Unies sur le climat s'est tenu en Égypte, et l'un de ses résultats les plus importants a été le lancement d'un projet de production de carburant vert dans la zone économique du canal de Suez. [05]

L'hydrogène peut être généré par électrolyse en utilisant l'électricité renouvelable excédentaire pendant les heures de pointe de production. Une fois produit, l'hydrogène peut être utilisé dans des piles à combustible stationnaires pour la production d'électricité ou stocké sous forme de gaz comprimé, de liquide cryogénique ou d'une grande variété de composés d'hydrures faiblement liés pour une utilisation à plus long terme. Lorsque le soleil se couche et que l'énergie renouvelable cesse d'entrer, les opérateurs de réseau peuvent allumer les générateurs d'hydrogène et garder les lumières allumées jusqu'à ce que l'approvisionnement en énergie se rétablisse le matin. [06]

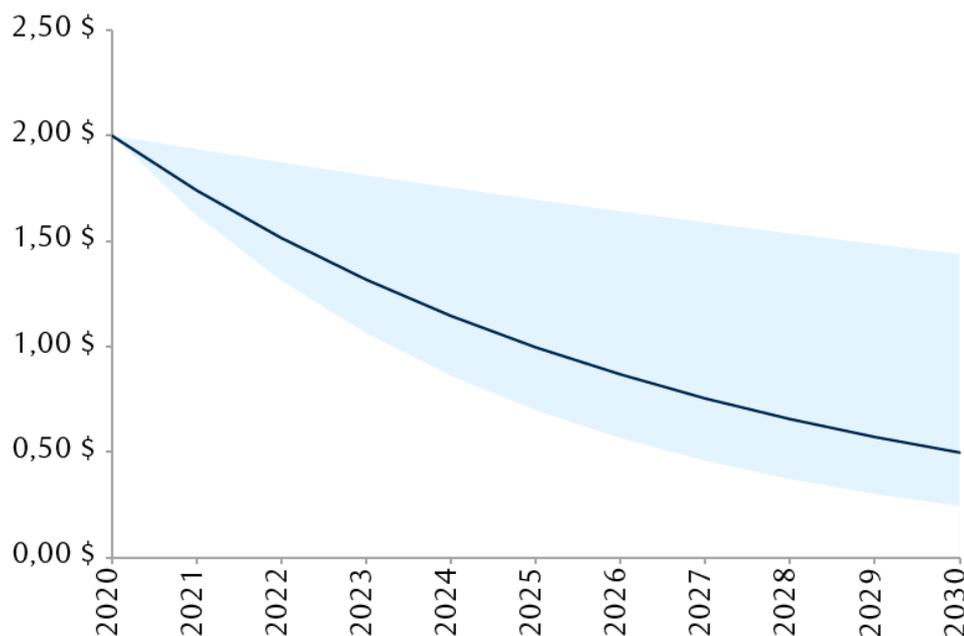


Figure 1.2 : La variation de prix de l'hydrogène [07]

I.2 Historique de panneaux photovoltaïques :

Dans l'antique : Le système le plus ancien est la parabole solaire. Étudiée par le grec Diocles (240 à 180 avant JC), certaines sources affirment qu'on s'en servait pour allumer le feu des jeux olympiques antiques. Archimède (287 à 212 avant JC) est connu pour avoir mis le feu aux navires de l'armée romaine à Syracuse avec des lentilles concentrant la lumière du Soleil. Bien que certaines personnes disent que ceci n'est qu'une légende, d'autres affirment que Léonard de Vinci dit s'en être inspiré pour l'un de ses nombreux concepts. Par ailleurs le poète Aristophane fait mention de la lentille solaire dans l'un de ses textes.

En 1839 : le physicien français Alexander-Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque qui désigne la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique dans les semi-conducteurs.

En 1883 : L'inventeur américain Charles Fritts construit le premier dispositif photovoltaïque en utilisant des couches minces de sélénium recouvertes d'une fine couche d'or pour former une cellule solaire. [08]



Figure 1.3 : Charles Fritts 1958. [09]

En 1954 : Les physiciens américains Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson présentent la première cellule photovoltaïque au silicium efficace, qui alimente des appareils électriques domestiques, avec un rendement de conversion d'environ 6%.



Figure 1.4 : la première cellule photovoltaïque au silicium efficace. [10]

En 1958 : Vanguard 1 est le premier satellite alimenté en énergie par des panneaux photovoltaïques. [11]



Figure 1.5 : 1958 satellites Vanguard 1 [12]

En 1960 : l'usage du photovoltaïque pour les satellites se généralise. Embarqués à bord des lanceurs puis déployés en orbite autour de la terre, les panneaux photovoltaïques démontrent leur robustesse et leur fiabilité.

En 1970 : les panneaux photovoltaïques se développent sur des applications terrestres et maritimes. Ils permettent de fournir de l'énergie à des sites isolés qui ne sont pas desservis par un réseau électrique comme les balises en pleine mer ou les relais de télécommunication en plein désert. Les panneaux photovoltaïques sont utilisés dans les conditions les plus extrêmes. En mer, ils sont exposés aux tempêtes et à la corrosion saline. Dans les déserts, ils subissent des températures extrêmes et des cycles thermiques très exigeants avec des nuits très froides suivies de fortes chaleurs le jour.

En 1974 : Le premier bâtiment alimenté uniquement par l'énergie solaire voit le jour à Albuquerque au Nouveau Mexique. Ce qui semblait impensable est devenu une réalité : l'énergie solaire peut répondre à l'intégralité des besoins énergétiques d'un bâtiment.

En 1997 : près la signature des accords de Kyoto, des réflexions sont menées dans les grands pays développés pour trouver des solutions concrètes au problème d'émission de gaz à effet de serre. Il s'agit notamment de réduire notre consommation aux énergies fossiles. Le solaire photovoltaïque est identifié comme l'une des technologies les plus prometteuses.

En 2000 : Afin de compenser son coût encore élevé, des mécanismes d'incitations financières sont mis en place au Japon et en Allemagne puis progressivement dans la plupart des grands pays développés.

2006 : Ces incitations passent souvent par le principe du « tarif d'achat » : l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est achetée à un prix fixe et supérieur à celui du marché pendant une durée suffisante pour assurer la rentabilité de l'investissement. C'est le début du développement du solaire raccordé au réseau. En France, après un premier dispositif insuffisamment incitatif, les « tarifs d'achat » sont revalorisés à un niveau qui permet le décollage du marché.

Depuis 2012 : le solaire photovoltaïque devient compétitif région après région. Si dans un premier temps, seules les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement et d'un prix de l'électricité élevé, comme la Californie ou l'Italie, étaient concernées, ce sont aujourd'hui toutes les régions du monde qui connaissent un développement du photovoltaïque pour produire une électricité propre, moins chère, au plus près du lieu de consommation et par le consommateur lui-même.

En 2018 : Au beau milieu du désert, dans l'Etat de Coahuila, au nord du Mexique, se trouve le plus grand parc à énergie solaire du continent. 2,3 millions de panneaux photovoltaïques y sont disposés sur le sable. Cet immense projet, porté par le groupe italien Enel, a nécessité 650 millions de dollars. Il s'inscrit dans la volonté du gouvernement de générer 43 % de la production énergétique du pays en énergies propres, d'ici 2024.

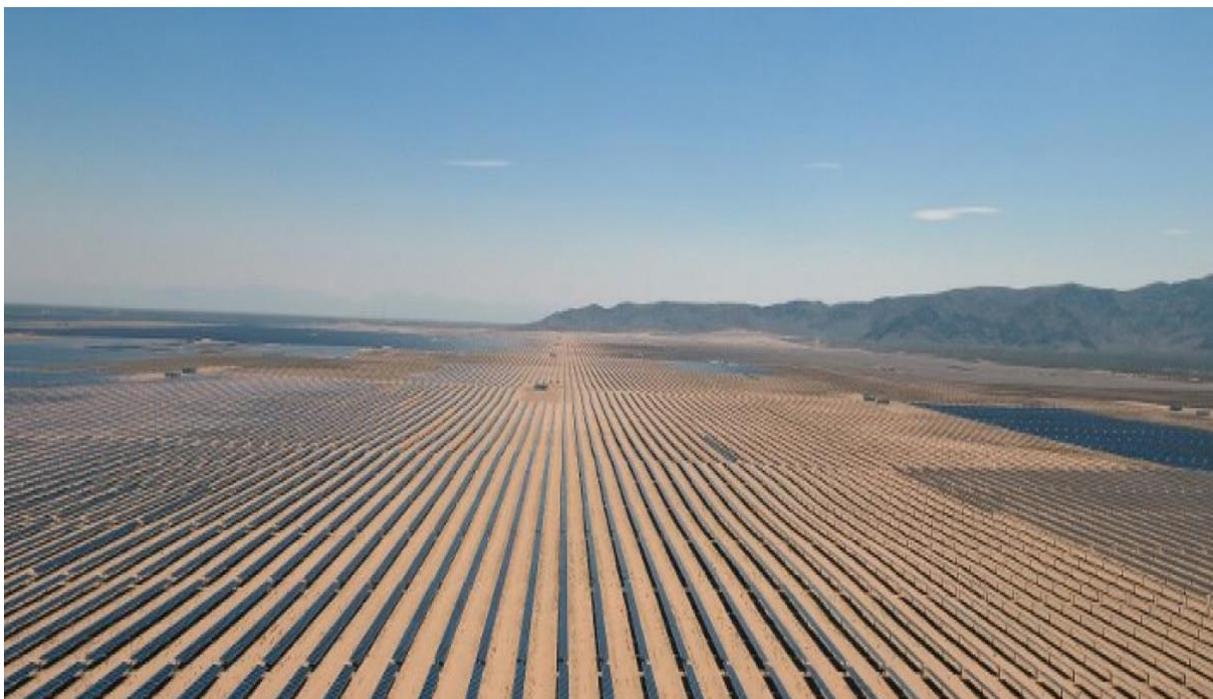


Figure 1.6 : L'immense parc solaire mexicain, équipé de panneaux photovoltaïques mobiles, au milieu du désert. [13]

I.3 Historique des éoliennes :

Dans l'antique : Depuis que les premiers marins ont posé leurs voiles sur les poteaux de leurs bateaux, le vent a commencé à utiliser une énergie qui a balayé la mer et les a propulsés dans leurs voyages. Il y a environ deux mille ans, les humains ont commencé à utiliser des moulins éoliens pour moudre le grain et pomper l'eau. La propagation des moulins à vent ne s'est pas limitée à des endroits limités, mais s'est étendue à toutes les civilisations anciennes comme Peresia et Egypte, adjacentes aux rivières et dans les champs, et même dans les endroits arides du Midwest américain et des bords australiens, pour pomper de l'eau aux troupeaux de bétail.



Figure 1.7 : Parc éolien de Gros-Morne, en Gaspésie (Canada)[14]

Cependant, à partir de la fin du XIXe siècle, il y a eu un changement majeur dans l'exploitation de l'énergie éolienne, la transformant de la simple énergie cinétique en énergie électrique qui peut être stockée et transportée sur de longues distances et pour une utilisation dans tous les domaines qui dépendent de l'électricité.

Moyen âge : Alors que la technologie des éoliennes fut perdue durant l'âge sombre, elle réapparut au moyen âge, tout d'abord dans les pays musulmans, ensuite en Angleterre, puis en France. Son activité principale reste l'agriculture.

En 1887 : le premier moulin à vent à produire de l'énergie électrique a été érigé en Écosse, construit par le professeur James Blythe de l'Institut Anderson. Le moulin mesurait 10 mètres de haut, ses pales de ventilateur étaient en tissu et il fonctionnait pour charger les batteries

développées par le Français Camille Alphonse Faure pour éclairer une cabane qui est entrée dans l'histoire comme la première maison à être éclairée par l'électricité éolienne.

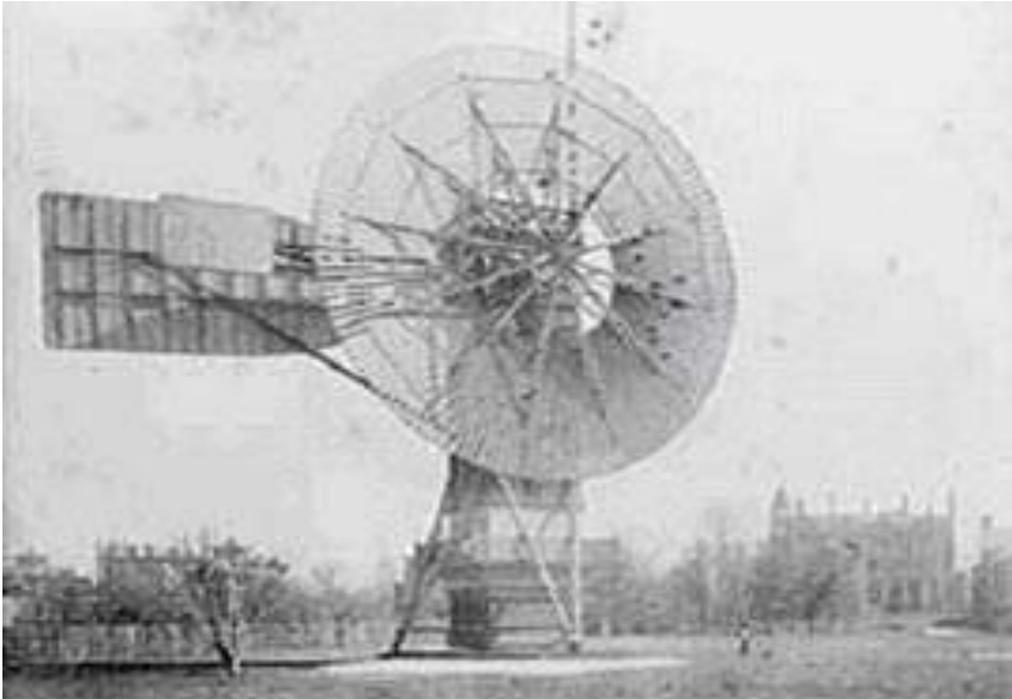


Figure 1.8 : Première éolienne créée par Charles F. Brush [15]

En 1888 : à Cleveland (Etats-Unis), Charles Brush a créé un moulin à vent électrique plus grand, qui a été utilisé pour produire de l'électricité jusqu'en 1900. Il a été érigé sur un poteau de 18 mètres de haut avec un diamètre de matras de 17 mètres et une capacité de 12 kilowatts, a chargé les batteries à l'électricité et a éclairé les blessés.

En 1890 : Seulement deux ans après l'exploit de BRUSH, le Danois Paul LACOUR invente et construit la première éolienne industrielle. Elle fournira de l'électricité pour la fabrication d'hydrogène par électrolyse. L'hydrogène produit fut utilisé pour alimenter des lampes à gaz.

En 1908 : Paul LA COUR Construit une deuxième éolienne, la Lykkegard, il en vendra 72 exemplaires. 1910 – 1957 : La technologie de l'éolienne fut abandonnée avec l'arrivée des centrales à Charbon et à pétrole et enfin à la fission de l'uranium. De nombreuses expériences ont été réalisées par la France à partir de 1950, mais sans résultats concluants.



Figure 1.9 : Éolienne de Poul La cour [16]

En 1957 : Johannes Juul qui conçoit sa turbine de Gedser d'une puissance de 200 kW. Ce modèle qui est le premier à produire du courant alternatif a largement inspiré la conception des éoliennes actuelles.

En 2014 : l'énergie éolienne représentait 4% de la production mondiale d'électricité par divers moyens, et ce pourcentage augmente très rapidement.

Évolution des capacités éoliennes installées dans le monde depuis 2001

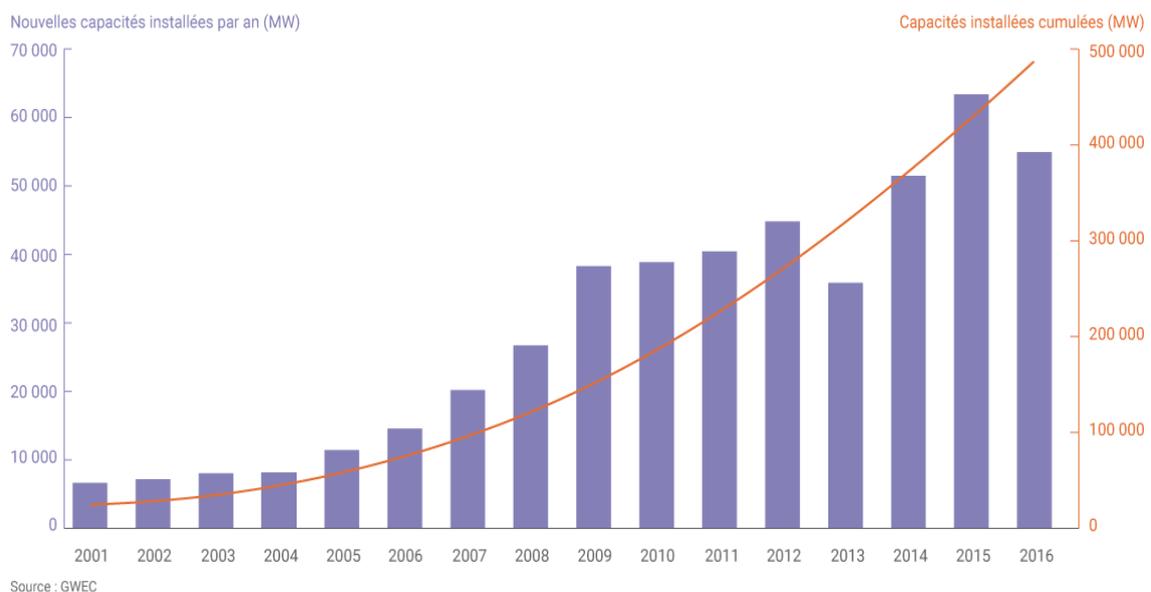


Figure 1.10 : Évolution des capacités installées dans le monde de 2001 à 2016. [17]

I.4 Historique de l'hydrogène :

L'hydrogène est considéré comme étant le combustible du futur qui viendra après le pétrole. Son abondance (dans le gaz naturel, dans l'eau...), son critère non polluant (na dégage que de l'eau après combustion) lui permettent réellement d'être parmi les énergies du futur.

La production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau est bien connue, mais elle ne peut être rentable sur le plan économique que si l'électricité nécessaire est d'origine renouvelable (solaire, éolien...). [18]

Au XVI siècle, Pacelse a remarqué lors de l'action des acides sur le fer le dégagement "d'un air inflammable". C'est à H. Cavendish, que revient l'honneur de l'avoir isolé en 1766. Quant à J. Watt et coll, en 1781, en se servant de l'eudiomètre, ils ont montré que sa combustion donne naissance à l'eau.

En 1888 : Le premier brevet concernant l'électrolyse de l'eau est déposé par Latchinoff, conseiller d'Etat à Saint-Petersbourg, dans les principaux pays d'Europe Il avait déjà notamment le principe du diaphragme et de l'électrolyse sous pression.

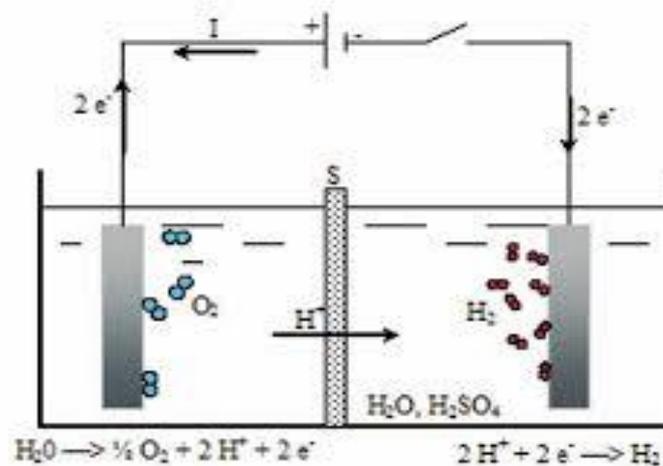


Figure 1. 11 : Schéma de principe d'une cellule d'électrolyse de l'eau. [19]

En 1889 : Hermann Nernst découvre la formule de Nernst, on adéduit la célèbre échelle de pH ainsi que, par Haber, la tension théorique de décomposition de l'eau (1.23 volts).

En 1890 : Le deuxième brevet concernant l'électrolyse est déposé par le commandant Charles Renard sur des cellules cylindriques mono polaires de 3.5m de hauteur, de 300 mm de diamètre, avec des électrodes de fer, de puissance unitaire 0.81kW (2,7 V sous 300A).

En 1892 : Le troisième brevet concernant l'électrolyse est déposé par l'Italien P. Garuti qui utiliser les électrolyseurs à eau pour récupérer l'énergie disponible en heure creuse. Ils agiraient comme régulateurs.

En 1899 : Brevet d'un électrolyseur à eau de type (filtre-presse) (modèle Schmitt 1899) ; (modèle Oerlikon). Après cession à un industriel, le modèle connaît un succès commercial rapide, vendant 400 appareils (puissance 2 à 38 kW) en 20 ans.

En 1900 : Six installations fonctionnent en Europe (Italie, Belgique, France, Suisse, et Lucerne) du modèle d'électrolyseur de (4m³/heure pour celle de Lucerne en Suisse), principalement pour alimenter les besoins de la soudure oxyhydrique.

En 1912 : Première grande installation de cellules mono polaires : 200 cellules (1 MW à 2200 A et 1.5 MW à 3000 A) à L'Angleterre notamment pour répondre aux besoins du développement de l'hydrogénation des corps gras. Ils vendront au total 205MW de ces mêmes modèles entre 1922 et 1972.

Années 1920 : Développement de l'électrolyseur Pechkranz, qui va évincer le modèle Oerlikon. Les plus gros modèles peuvent avoir une puissance maximale de 875 kW.

En 1924 : Mecke a montré que l'hydrogène est un mélange de deux variétés allotropiques d'un genre spécial, l'ortho et le para hydrogène, cette allotropie repose sur le fait que les deux noyaux de la molécule tournent dans le même sens suivant la forme ortho et dans le sens contraire selon la forme para. Au-delà d'une température de - 100 °C, les 3/4 de l'hydrogène sont constitués par la forme ortho. Au point d'ébullition, la forme para est stable. A une température de 1100°C, elle se transforme instantanément en la forme ortho.

En 1926 : La compagnie française de l'azote (COFAZ) ayant installé.

1926-1927 : 176 MW Pechkranz sont installés.

En 1927 : La société Norks-Hydro installe 120 MW d'électrolyseurs Pechkranz à Vemork en Norvège.

En 1948 : La société suisse Lonza ayant une longue expérience de l'électrolyse de l'eau en tant qu'utilisatrice (ammoniac, pierres synthétiques), décide de construire ses propres électrolyseurs.

En 1956 : Lonza construit un électrolyseur de 660 cellules, 12 m de long. [20]

Depuis 1960 : Pratt et Whitney (devenu United Technologies Corporation) commencent à la fabrication de piles alcalines de type Bacon pour les missions lunaires APOLLO, et maintenant pour les navettes spatiales.

En 1985 : construction d'une centrale PAFC de 1 MW à Milan (Italie).

En 1989 : développement de PAFC de 25 kW par KT1 aux Pays-Bas réalisation de MCFC de quelques kW. [21]

En 1999 : La société Royal Dutch/Shell s'engage pour l'avenir de l'hydrogène en créant une division hydrogène. Les premières stations de ravitaillement en hydrogène d'Europe ont été ouvertes dans les villes allemandes de Hambourg et de Munich.

En 2000 : B. Power Systems présente la première pile à combustible PEM prête pour la production au monde pour les applications automobiles au Salon de l'auto de Détroit.

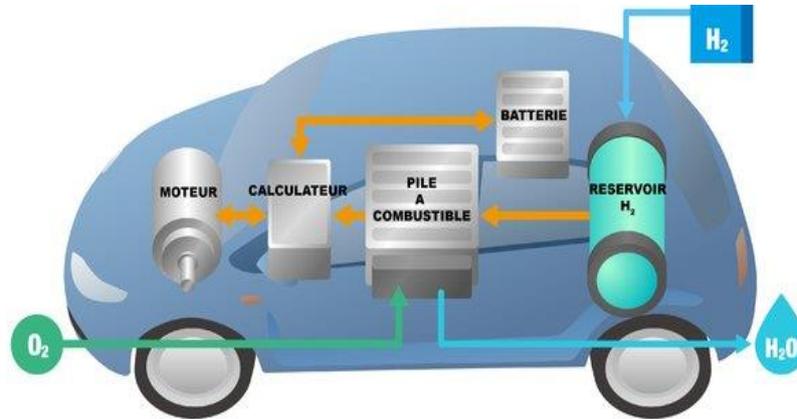


Figure 1.12 : schéma d'une voiture électrique. [22]

En 2003 : Le président George W. Bush a annoncé dans son discours sur l'état de l'Union une initiative de 1,2 milliard de dollars américains sur l'hydrogène pour développer la technologie des piles à combustible à hydrogène commercialement viables, de sorte que « la première voiture conduite par un enfant né aujourd'hui pourrait être alimentée par des piles à combustible

En Juillet 2022 : Shell annonce la construction de la plus grande usine d'hydrogène renouvelable d'Europe pour une mise en service prévue en 2025. [23]



Figure 1.13 : Réservoir d'hydrogène. [24]

I.5 L'état de l'art des systèmes de production de l'électricité PV-éolien-Hydrogène :

Il y'a plusieurs d'études qui sont fait sur les systèmes de production d'électricité par l'énergie solaire et l'énergie éolien avec un stockage basé sur l'hydrogène. :

En 2007 : L. Aiche. Hamane, M. Hamane M. Belhamel (CDER), ont publié un article sur Estimation de la production d'hydrogène à partir de différentes tailles d'éoliennes dans le sud de l'Algérie. Dans cet article L. Aiche. Hamane proposé un système qui alimenter l'électrolyse à partir de l'énergie éolien pour la production d'hydrogène.

Les éléments de ce système sont :

- Des aérogénérateurs.
- Un convertisseur AC/DC.
- Des électrolyseurs de type alcalin qui consomment $5 \text{ KW/Nm}^3 \text{ h}^{-1}$.

La simulation et le dimensionnement sont par les logiciels : MATLAB et TRANSYS.

Les résultats sont :

- La production annuelle d'hydrogène augmente lorsque la vitesse du vent augmente.
- La production plus élevée est dans le site d'Adrar.
- La répartition de la vitesse du vent Weibull, ainsi que les caractéristiques de l'éolienne peut faire la différence dans la production de l'hydrogène. [25]

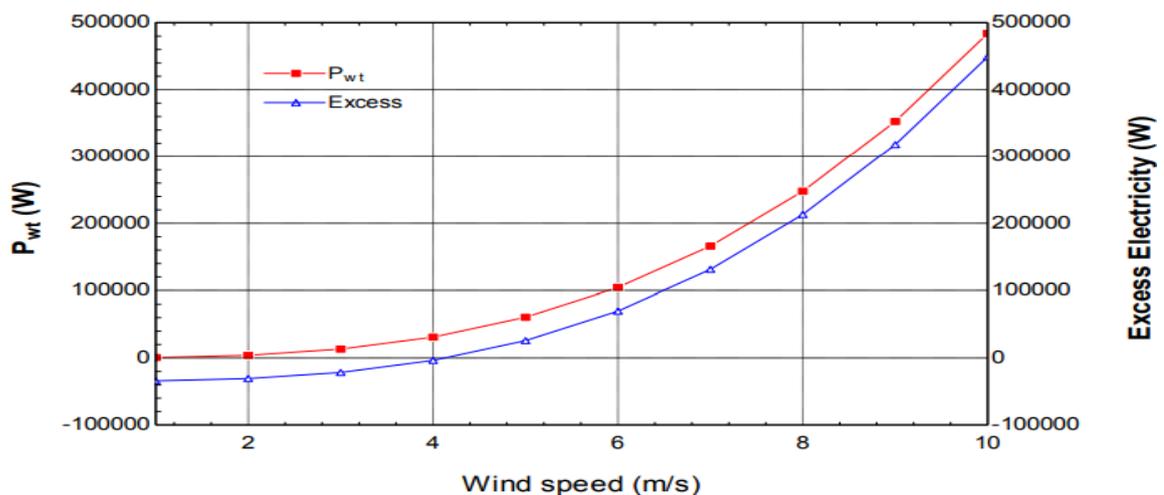


Figure 1.14: Effet de la vitesse de vent sur la production d'électricité. [26]

En 2008 : D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, et C. Elmasides (De la Grèce), ont publié un article sur les stratégies de gestion de l'énergie pour un système électrique

autonome utilisant des sources d'énergie renouvelables et le stockage de l'hydrogène, au but d'utilisera plus tard par la pile à combustible.

Le système est composé de :

- Des panneaux photovoltaïques de puissance nominale de 5 KW_c.
- Trois aérogénérateurs de puissance totale de 3 KW_c.
- Un électrolyseur de type PEM de puissance de 4.2 KW_c.
- Des bouteilles de stockage sous moyenne pression d'un volume totale de 6 m³.
- Une pile à combustible de puissance de 4 KW.
- Un accumulateur plomb-acide de capacité totale de 3000 Ah à 48 V.
- Une charge de 1KW.

La simulation est faite pendant quatre mois et basé sur les données moyenne horaire, et les résultats sont :

- Le rendement des PMS3 a été jugé insatisfaisant pour le système à l'étude, car les cycles et le temps de l'accumulateur étaient trop élevés, tandis que l'inventaire moyen d'hydrogène était assez faible
- PMS1 a entraîné une réduction du temps de fonctionnement pour tous les sous-systèmes et un inventaire moyen d'hydrogène plus élevé que dans PMS2.
- L'utilisation de l'accumulateur pour le fonctionnement de l'électrolyseur en cas de faible surplus d'énergie RES dans PMS2 est considérée comme un avantage. [27]

En 2014 : Sanchez et autres, ont fait une optimisation technico-économique basée sur un algorithme d'intelligence en essaim pour un système d'énergie éolienne-photovoltaïque-hydrogène autonome dans la région sud-est du Mexique. Au but de trouvé des tailles optimales pour l'éolienne et le champ photovoltaïque et la pile à combustible.

La simulation est faite à l'aide de de l'algorithme PSO dans MATLAB.

Comme des résultats ils trouvent :

- Une puissance de 4 KW pour l'éolienne, et de 3.06 KW pour le champ photovoltaïque, et de 3 KW pour la PAC.
- Un coût annualisé total de 3654,8 \$ US pour une durée de vie de l'usine de 20 ans.
- Un coût de l'énergie (COE) de 0,55 \$ US/kWh. [28]

En 2014 : ArashKhalilnejad (université de Case Western Reserve) et Gholam H. Riahy (université de Amirkabir de Technologie), ont fait une étude des performances d'un système hybride éolien-PV dans le but d'optimiser la production et le stockage à l'aide d'un

électrolyseur alcalin avancé de 10 KW puis le stocké pour une semaine. Les configurations utilisant sont :

- Système Eolien (A).
- Système Photovoltaïque (B).
- Système Hybride Eolien-PV (C).

Le dimensionnement de cette installation est fait par le logiciel MATLAB.

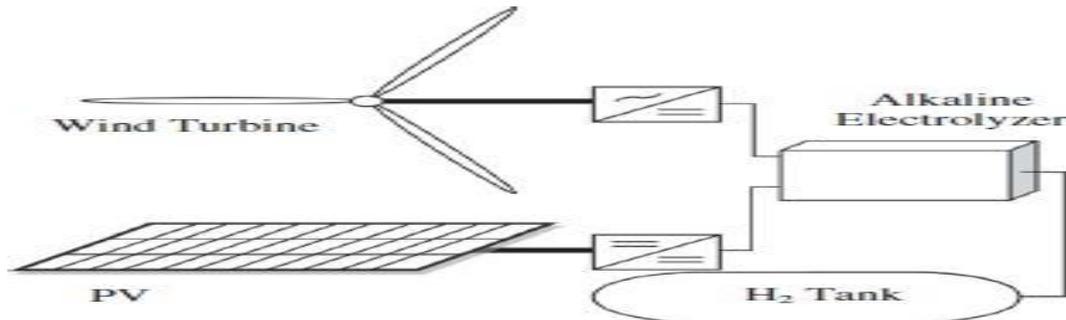


Figure 1.15 : Schéma descriptif de Système hybride PV-éolien -hydrogène.[29]

Les résultats sont :

- Le système (C) c'est le plus efficace.
- La contribution photovoltaïque est faible par rapport à l'éolien.
- Si la vitesse de vent faible, le système hybride reste plus fiable qu'un system photovoltaïque ou éolien. [30]

En 2016 : Pei-Hsing Huang, Jenn-Kun Kuo, et Zong-Dain Wu. (Universités de Taiwan), ont publié un article sur une étude de l'application de petites éoliennes et d'un système photovoltaïque pour faciliter la production d'hydrogène par l'électrolyse.

Dans cette étude les auteurs proposent une amélioration d'un système modulaire décentralisé hybrides photovoltaïque-petites éoliennes, pour alimenter une électrolyse qui sera produire une quantité d'hydrogène de 25 Kg dans les plus brefs délais, à 49.2. [31]

En 2020 : Wei Li et autres ingénieurs de la Chine et Hong Kong. Ont proposé une nouvelle approche probabiliste pour optimiser le système d'énergie renouvelable hybride éolien-photovoltaïque autonome. [32]

En 2022 : A. Okunlola, M. Davis, et A. Kumar (Canada), publient une élaboration d'un cadre d'évaluation pour déterminer le potentiel technique de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne et solaire. [33]

I.6 Conclusion :

En conclusion, l'état de l'art des systèmes hybrides photovoltaïques, éoliens et hydrogène offre des perspectives prometteuses pour répondre aux défis énergétiques actuels et futurs. Ces systèmes combinent différentes sources d'énergie renouvelables pour assurer une production d'électricité stable et continue, tout en permettant le stockage à long terme de l'énergie sous forme d'hydrogène.

Chapitre II : Étude théorique des systèmes hybrides Photovoltaïque éolien et hydrogène

II.1 Introduction :

Ce chapitre vise à explorer les composants des systèmes hybrides photovoltaïques et éoliens avec stockage basé sur l'hydrogène. Nous examinerons en détail les différents éléments qui composent ces systèmes, en mettant l'accent sur leur fonctionnement, leur interconnexion et leurs performances.

Tout d'abord, nous présenterons les composants de base d'un système hybride, à savoir les panneaux solaires photovoltaïques et les éoliennes. Nous discuterons de leurs caractéristiques techniques, de leurs performances individuelles et de leurs avantages spécifiques dans le contexte de l'intégration hybride. Comprendre le fonctionnement de ces sources d'énergie renouvelable est essentiel pour appréhender la manière synergique.

Ensuite, nous aborderons le stockage de l'énergie sous forme d'hydrogène, qui constitue l'un des éléments des systèmes hybrides étudiés. Nous examinerons les différentes technologies de production d'hydrogène, telles que l'électrolyse de l'eau.

Enfin, nous examinerons les dispositifs de conversion de l'énergie, tel que les piles à combustible et les électrolyseurs, qui permettent de convertir l'hydrogène en électricité, et nous explorons les principes de fonctionnement de ces dispositifs, leurs rendements énergétiques et leur intégration dans les systèmes hybrides.

II.2 Notions générales :

II.2.1 Energie solaire :

II.2.1.1 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux côtés d'une jonction semi-conductrice sous l'action d'une radiation lumineuse. L'effet photovoltaïque repose sur trois principes dont l'action conjugué de manière quasi-simultanée :

- Absorption du maximum possible du flux lumineux (photons).
- La conversion des photons ainsi absorbés en charges électriques libres.
- La collecte de ces charges dans un circuit électrique extérieur.

II.2.1.2 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2 micron) à l'infrarouge lointain (2,5 microns), avec une majorité dans le visible (0,3 micron-violet- à 0,8 micron-rouge-) autour d'un pic à 0,45 micron. L'énergie totale portée par ce rayonnement est de près de 1 360 W/m² dans l'espace, au voisinage de la Terre, et de 1 000 W/m² au niveau de la Terre, du fait de l'absorption dans l'atmosphère.

II.2.1.3 Les angles :

La latitude (φ) : est une mesure angulaire s'étendant de 0° à l'équateur à 90° aux pôles (-90° au sud à 90° au nord).

La longitude (λ) : est une mesure angulaire sur 360° par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de -180° vers l'ouest, à $+180^\circ$ vers l'est.

La déclinaison (δ) : La déclinaison est égale à l'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction Terre-Soleil. Elle peut être estimée par :

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + J) \right] \quad 2.1$$

L'angle horaire (ω) : Est égal à 15deg/heure . Il est compté négativement le matin L'Angle horaire aux lever (ou coucher du soleil) est donné par :

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \quad 2.2$$

La hauteur du soleil (h) : Est égale à l'angle formé par la direction du soleil et le plan horizontal. Elle est donnée par :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad 2.3$$

L'azimut du soleil (a) : Est égale à l'angle formé par la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

Elle est donnée par :

$$\sin(a) = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad 2.4$$

II.2.1.4 Cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et elle dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique.

II.2.2 Energie éolien :

L'énergie éolienne est une énergie indirecte du soleil. Contrairement à l'énergie solaire elle n'est pas uniformément distribuée sur la planète. Dans le monde et particulièrement dans certains pays ventés (Danemark, Allemagne, Chine, Espagne, ...) c'est Technologie en pleine expansion.

II.2.2.1 Cause du vent :

Les différences de pression qu'on note sur le globe terrestre sont dues à un réchauffement différentiel entre deux points. Cette différence est la force qui déplace l'air. Si la Terre ne tournait pas sur son axe, la circulation serait donc directe entre les centres de haute et de basse pression. Cependant, cette rotation dévie l'air dans la direction perpendiculaire au déplacement par rapport à un observateur au sol.

II.2.2.2 Les paramètres du vent :

✓ Distribution de Weibull :

On rappelle que la fonction de répartition $F(v)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur v et que la densité de probabilité $f(v)$ est la dérivée de :

$$fV = \frac{dF(V)}{d(V)} \quad 2.5$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de répartition Weibull à deux paramètres c et k s'écrit :

$$f(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad 2.6$$

En utilisant la relation donnée par l'équation, il résulte la fonction de la densité de probabilité

$$f(V) = \left(\frac{k}{V}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^k \quad 2.7$$

Avec :

- k paramètre de forme caractérise la répartition du vent,
- c paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses)
- V vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).

II.2.2.3 La vitesse du vent :

La vitesse du vent, en un point donné de l'espace, présente donc de fortes variations plus ou moins irrégulières d'amplitudes et de fréquences différentes. La vitesse longitudinale instantanée du vent reflète la nature turbulente du vent. Elle se décompose en une partie moyenne et en une partie fluctuante (ou turbulente), aléatoire :

$$u = \bar{u} + ui' \quad 2.8$$

II.2.2.4 Caractéristiques de vent :

$$\text{Energie cinétique du vent : } E_C = \frac{1}{2} mv^2 \quad 2.9$$

Avec :

- E_c : énergie cinétique (en joules)
- m : masse du volume d'air (en kg)

Puissance théoriquement récupérable Pour une éolienne balayant une section S , la puissance cinétique potentielle sera :

$$P_c = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad 2.10$$

Avec :

- P_c : Puissance cinétique disponible (en Watts)
- V : vitesse instantanée du vent (en m/s)
- ρ : masse volumique de l'air (environ : 1,23 kg/m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)
- A : surface du système de récupération (m²)

Puissance récupérable : D'après l'analyse de Betz, la puissance maximum récupérable est donnée par :

$$P_{u,max} = \frac{16}{7} P_c = \frac{8}{27} A \rho V^3 \quad 2.11$$

Potentiels : Le potentiel éolien d'un site est donné par la moyenne du potentiel instantané. En considérant la distribution de Weibull, il vient :

-Potentiel Disponible :

$$\overline{P_c} = \frac{1}{2} A \rho \overline{V^3} = \frac{1}{2} A \rho C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad 2.12$$

Potentiel Maximum utilisable :

$$P_{u,max} = 0.286 d^2 \overline{V^3} = 0.286 d^2 C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad 2.13$$

II.2.2.5 Potentiel du vent en Algérie : [34]

Les cartes des vents de l'Algérie, estimées à 10 m du sol et à 25 m du sol sont présentées sur la figure et. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s.

On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara).

Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune).

On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour d'Oran, Tiaret, In Aménas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s. Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni-Abbes présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (< 3 m/s).

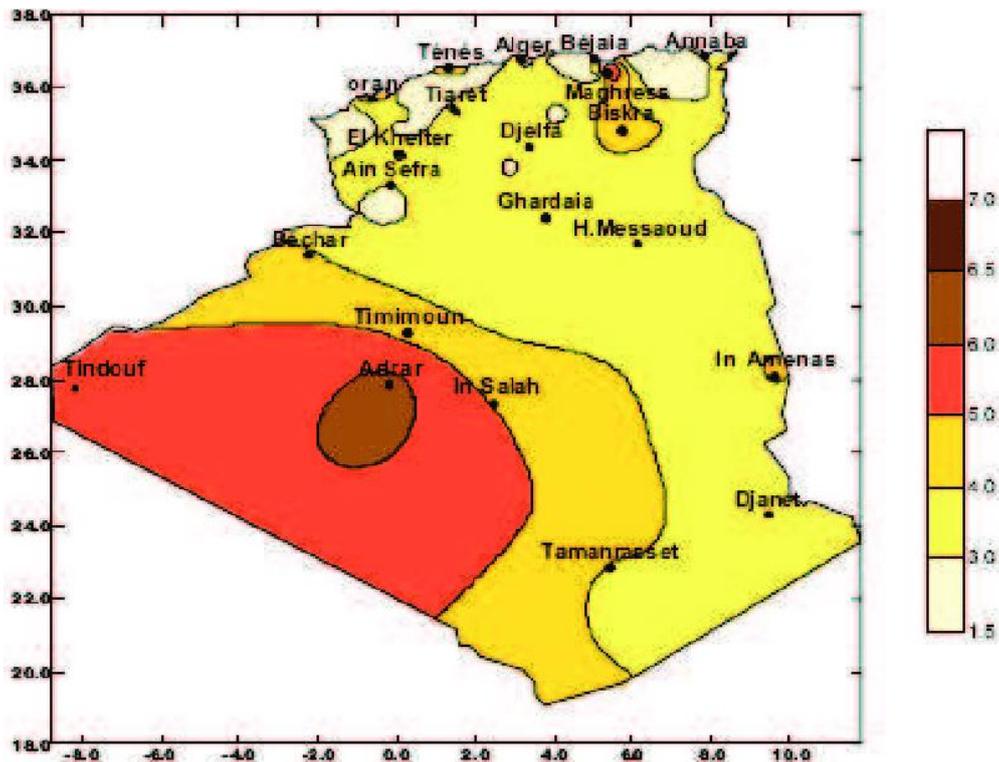


Figure 2.1. : Carte de vent en Algérie [35]

II.3 Présentation des systèmes de production hybrides (PV-éolien-Hydrogène) :

Le système hybride SEH a pour objectif de produire sur site de l'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolien qui sont les principales sources d'énergie, et stocker l'excès d'énergie en hydrogène pendant une période prolongée et la fournir à une pile à combustible pour la reconversion en électricité et alimenter la charge en période de dégradation de puissance photovoltaïque et éolienne. Lorsque la saturation de la charge l'énergie produire par le champ photovoltaïque et le parc éolien va alimenter l'électrolyseur qui permet la séparation des molécules d'eaux en atomes d'hydrogène et d'oxygène, l'hydrogène, ensuite la compression de gaz d'hydrogène et stocke-lui dans des réservoirs de stockage.

Les principaux bénéfices potentiels de ce système photovoltaïque-éolien-hydrogène sont avant tout la capacité de stocker l'énergie beaucoup plus longtemps que les batteries, même d'une saison à une autre, suivie de la minimisation de la Capacité générale de champ photovoltaïque et de parc éolien nécessaire pour garantir l'approvisionnement de toute l'année, car L'énergie solaire et éolienne excédentaire pendant les périodes d'irradiation et de vents élevés peut être stockée sous forme d'hydrogène pendant de longues périodes et sans pertes de charge, et utilisé par la pile à combustible pour produire l'électricité dans la cas de diminution de potentiel solaire ou éolienne.

II.3.1 L'importance de l'hybridation :

Le potentiel des sources d'énergie renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne n'est pas stable, c'est-à-dire il varie en fonction des périodes de la journée, de la saison et de l'année, et aussi en fonction des paramètres météorologiques de site. Sa qui a conduit les chercheurs à se tourner vers les systèmes hybrides qui connue l'hybridation, et qui basé sur la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie.

D'après le Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne de l'Université du Québec à Rimouski, la combinaison de plusieurs sources d'énergie, surtout les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique.

L'hybridation des sources d'énergies renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif. De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie.
- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie.

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation en amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle.

II.4 Les composantes d'un système hybride :

II.4.1 Champ photovoltaïque :

II.4.1.1 Les types des panneaux photovoltaïques :

II.4.1.1.1 Les panneaux solaire poly cristallins :

Les panneaux solaires poly cristallins - aussi appelés panneaux solaires multi cristallins sont fabriqués à partir de nombreux cristaux de silicium aux tailles diverses et variées.

Les panneaux solaires poly cristallins sont issus de fragments de cristaux de silicium qui sont fondus ensemble. Ce processus de fabrication a un impact sur leur couleur : elle n'est pas homogène et se rapproche du bleu foncé.

Les panneaux solaires poly cristallins sont souvent installés dans les régions méridionales, avec un fort taux d'ensoleillement.

Le rendement d'un panneau solaire polycristallins et seulement de 12 à 13 %. [36]



Figure 2.2 : Un panneau solaire polycristallins de 100 W. [37]

II.4.1.1.2 Les panneaux solaires monocristallins :

Un panneau solaire monocristallin est composé de cellules qui proviennent toutes du même cristal de silicium.

Les panneaux solaires monocristallins sont constitués de cellules qui sont toutes issues d'un même bloc de silicium. Si sa structure est homogène, sa fabrication demande des compétences bien plus spécifiques. Cette fabrication, plus complexe, a un impact sur le prix : le panneau solaire monocristallin est plus cher lors de l'achat.

La structure d'un panneau solaire monocristallin lui permet de mieux capter les rayonnements du soleil. Il est donc conseillé pour des logements qui ne bénéficient pas d'un taux d'ensoleillement optimal.

Un panneau solaire monocristallin dispose d'un rendement élevé : entre 16 et 17 % avec une durée de vie comprise entre 30 et 35 ans.

Sa couleur noire, sobre et élégante, lui permet de s'accorder facilement et discrètement aux toitures. [38]



Figure 2.3 : Un panneau solaire monocristallin de Dimel Solaire. [39]

II.4.1.1.3 Panneau solaire flexibles :

Les panneaux solaires amorphes - aussi appelés panneau silicium amorphe ou panneau solaire à couche mince - sont des panneaux photovoltaïques fins, légers et pliables !

Les panneaux solaires amorphes sont composés de silicium amorphe et représentent environ 10 % du marché. Comparé aux panneaux à cellules cristallines, le panneau silicium amorphe est 100 à 150 fois plus fin. Il se distingue aussi par sa souplesse, sa légèreté et son aspect pliable. D'ailleurs, il est régulièrement vendu sous forme de rouleaux à découper.

Un panneau solaire amorphe s'adapte facilement à tout type de support (même à un bateau). C'est également le panneau le moins coûteux à fabriquer. D'une part, il n'utilise que 1 % de la quantité de silicium nécessaire à un panneau solaire « classique ». D'autre part, le silicium ne subit aucun processus de purification. Cette technologie appelée technologie à « couche mince » est peu énergivore et elle est respectueuse de l'environnement.

Un panneau solaire silicium amorphe a aussi l'avantage de produire de l'énergie par temps nuageux et même grâce à une lumière artificielle.

La durée de vie d'un panneau solaire amorphe est limitée : environ 10 ans... et au fil des années, il perd en efficacité.

Sa composition en silicium ne lui permet qu'un rendement et une puissance très inférieurs par rapport aux autres panneaux. [40]



Figure 2.4 : un panneau solaire Amorphe. [41]

II.4.1.2 Les composants d'un système photovoltaïque :

II.4.1.2.1 Les panneaux photovoltaïques :

L'énergie électrique journalière produite par le champ photovoltaïque ($E_{\text{élec}}$) doit être au minimum égale à l'énergie journalière consommée par les appareils électriques (E_{besoin}). Donc, on doit avoir : $E_{\text{élec}} > E_{\text{besoin}}$

$$E_{\text{élect}} = (P_c/P_i) \cdot E_i \cdot PR \quad 2.14$$

Avec :

- E_i est l'irradiation solaire journalière, exprimée en kWh/m²/jour, reçue par le champ photovoltaïque.
- $E_{\text{élec}}$ est l'énergie électrique journalière potentiellement produite par l'installation photovoltaïque, exprimée en kWh/jour.
- P_c est la puissance crête du champ photovoltaïque.
- P_i est la puissance radiative dans les conditions standards de test (STC), exprimée en kW/m².
- PR est le ratio de performance de l'installation photovoltaïque.

II.4.1.2.2 Régulateur de charge :

Le dimensionnement du régulateur s'effectue selon 3 paramètres majeurs :

1. Le courant débité par le champ PV ne doit pas dépasser une certaine limite imposée par le régulateur, ce qui détermine le nombre maximal de branches parallèles.
2. La tension fournie par le champ PV doit être limitée afin de ne pas endommager le régulateur en cas de déconnexion des batteries. Cela détermine donc le nombre maximal de modules mis en série dans une branche.

3. La tension du parc de batterie doit être conforme à la configuration du régulateur.



Figure 2.5 : Un régulateur de charge de type MPPT. [42]

II.4.1.2.3 Onduleur :

Un onduleur convertit l'énergie produite par les panneaux solaires en électricité pour le quotidien.

Un onduleur transforme le courant continu produit par les installations photovoltaïques en courant alternatif. Ce courant alternatif pourra, ensuite, être injecté sur le réseau de distribution électrique, ou bien être utilisé pour les différents appareils de l'habitation (éclairage, lave-vaisselle...)

Il existe trois sortes d'onduleurs :

- Le micro-onduleur ;
- L'onduleur de chaîne (ou string) ;
- L'onduleur central.

L'onduleur string a une durée de vie moyenne de 8 à 12 ans. C'est l'un des éléments du panneau photovoltaïque qui nécessite un contrôle régulier pour s'assurer de son bon fonctionnement. Chez EDF ENR nous utilisons des micro-onduleurs garantis 25 ans.[43]



Figure 2.6 : Onduleur MPPT hybride 1000W 24V injection réseaux 230V avec limiteur. [44]

II.4.1.2.4 Parc des batteries :

Le dimensionnement de la batterie consiste à effectuer les deux choix techniques suivants :

- Choix de la tension de la batterie.
- Choix de la capacité de la batterie.

II.4.1.2.5 Les câbles :

Le choix de la section des câbles de polarité côté DC s'effectue selon deux critères majeurs :

- Le premier paramètre à prendre en compte pour le calcul de la section des câbles est le courant admissible. Le courant admissible I_Z des câbles dépend notamment du mode de pose et de la température du conducteur. Le courant admissible d'un câble est la valeur maximale de l'intensité du courant pouvant parcourir en permanence ce conducteur sans que sa température soit supérieure à sa température spécifiée (Voir les valeurs standards suivantes).
- Le deuxième paramètre à prendre en compte pour le calcul de la section des câbles est la chute de tension admissible. En théorie, un câble est un conducteur de courant parfait, c'est-à-dire que sa résistance est nulle. En pratique, un câble n'est pas un conducteur parfait : il se comporte comme une résistance.

II.4.1.3 Le principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque : [45]

- Les panneaux solaires installés en rangées et reliés entre eux captent la lumière du soleil.
- Sous l'effet de la lumière, le silicium, un matériau conducteur contenu dans chaque cellule, libère des électrons pour créer un courant électrique continu.
- Un onduleur transforme ce courant en courant alternatif pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau.
- L'électricité est consommée par les appareils électriques. Si l'installation n'est pas raccordée au réseau (site isolé), elle peut être stockée dans des batteries. Sinon, tout ou partie de la production peut être réinjectée dans le réseau

II.4.1.4 Branchement d'un système photovoltaïque : [46]

II.4.1.4.1 Le montage de modules photovoltaïques en série :

- Lorsque l'on branche des modules photovoltaïques en série, cela additionne les voltages, tout en conservant un ampérage identique. Il s'effectue normalement entre des modules de même ampérage. Dans le cas contraire, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible.
- Pour un branchement en série, il faut relier les pôles positifs d'un module aux pôles négatifs d'un autre module.

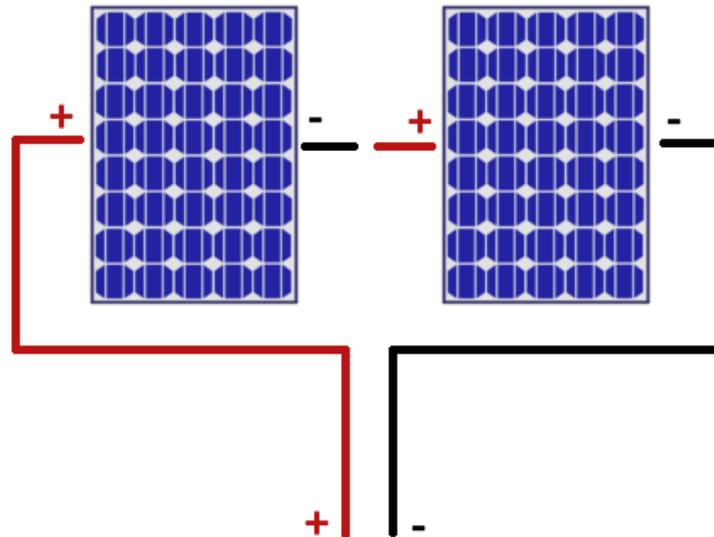


Figure 2.7 : branchement de panneaux photovoltaïques en série.[47]

II.4.1.4.2 Le montage de modules photovoltaïques en parallèle :

-Lors d'un montage de **modules en parallèle**, ce sont les intensités (ampérage) qui s'additionnent, tandis que la tension (voltage) reste identique. Le résultat est donc inverse d'un branchement en série. Il s'effectue normalement entre des modules de **même voltage**, et ce, afin d'éviter tout risque de surtension ou de court-circuit. Les intensités peuvent quant à elles être différentes, puisqu'elles s'additionnent. Ce type de branchement est utilisé lorsqu'on souhaite une forte intensité.

- Pour un branchement en parallèle, il faut relier les bornes positives entre elles. Il en est de même pour les bornes négatives.

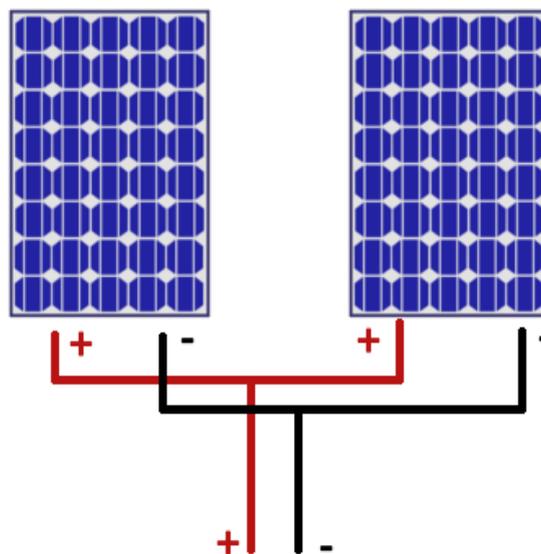


Figure 2.8 : Branchement de panneaux photovoltaïques en parallèle.[48]

II.4.1.4.3 Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque :

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Le courant de court-circuit I_{CC}
- La tension en circuit ouvert V_{OC}
- Le facteur de forme FF
- Le rendement de conversion d'énergie η
- La réponse spectrale RS

II.4.1.5 Parc éolien :

II.4.1.5.1 Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur : [49]

- Sous l'effet du vent, le rotor, se met en marche. Ses pales tournent.
- Le rotor est situé au bout d'un mât car les vents soufflent plus fort en hauteur. Suivant le type d'éoliennes, le mât varie entre 10 et 100 m de haut.
- Le rotor comporte généralement 3 pales.
- Pour pouvoir démarrer, une éolienne nécessite une vitesse de vent minimale d'environ 15 km/h.
- Pour des questions de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le vent dépasse 90 km/h.
- Le rotor entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre, relié à un alternateur.
- Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.
- Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau

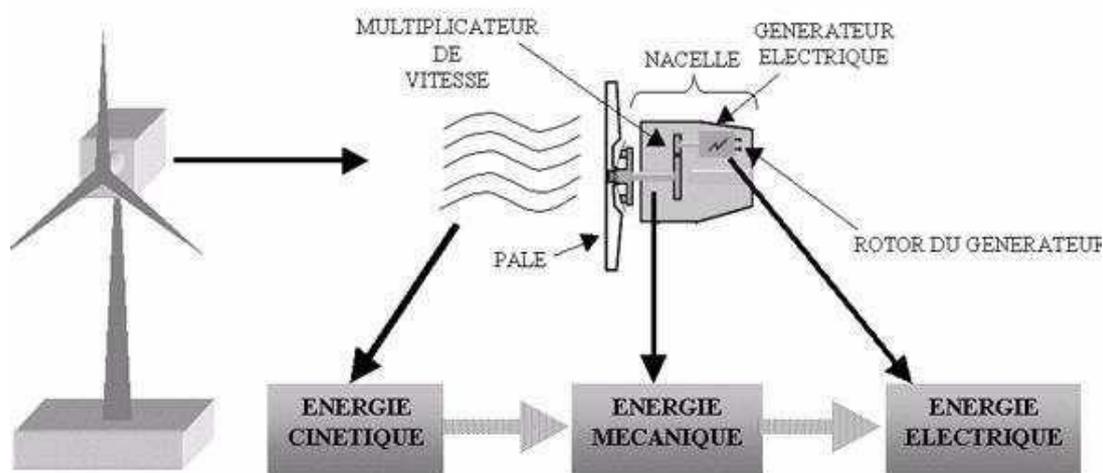


Figure 2.9 : Conversion de l'énergie cinétique du vent on énergie électrique. [50]

II.4.1.6 Classification des éoliennes :

II.4.1.6.1 Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. 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.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

Amont : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

Aval : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. [51]

II.4.1.6.2 Les Eoliennes à axe vertical (Perpendiculaire au vent) : [52]

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

Le rotor de Savonius : dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Figure 2.10) Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.



Figure 2.10 : éolien Savonius [53]

Le rotor de Darrieus : est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil, placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Figure)



Figure 2.11 : éolien Darrieus [54]

II.4.1.7 Avantages :

- Résistantes
- Faciles à installer et à entretenir
- Peuvent être installées sur une toiture
- Silencieuses
- Indépendantes de la direction du vent
- La Savonius fonctionne même avec de faibles vitesses de vent

II.4.1.8 Inconvénients :

- Destinées aux faibles puissances
- Faibles rendements (inférieurs à 10%).

II.4.1.9 Les composants d'une éolienne :[55]

II.4.1.9.1 Les pales d'éolienne :

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement. Les pales forment une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Cependant, il est bon de savoir que les pales déterminent grandement le rendement de l'éolienne et ces performances. Concevoir une palme revient à déterminer :

- La longueur de la pale : Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales. Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent. Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30 mètres.
- La largeur de la pale : La largeur des pales intervient pour le couple de démarrages qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis. La valeur du couple augmente si la largeur de pale augmente.
- Le profil aérodynamique de la pale : il est choisi en fonction de ses propriétés aérodynamiques telles que la portance et la traînée mais aussi selon le couple désiré et la vitesse spécifique de la pale. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance, elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice. Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).
- Le calage initial et le gauchissement de la pale : ils seront déterminés afin d'avoir tout au long de la pale un angle d'attaque optimum pour le régime de rotation du rotor correspondant à la vitesse du vent nominale. C'est à dire la vitesse de vent pour laquelle l'éolienne à le meilleur rendement.
- Les matériaux de fabrication de la pale : le choix des matériaux est une étape importante. En effet, le matériau détermine le procédé de fabrication, le coût, la durée de vie et la fiabilité des pales qui subissent beaucoup de contraintes en fatigue. Le matériau idéal doit être léger, résistant, homogène pour avoir des pales de même masse, facile à mettre en œuvre pour

diminuer le coût, résistant à l'érosion et à la corrosion. Certains types de bois certains métaux, mais aujourd'hui surtout des matériaux composites répondent aux critères requis.

- Nombre de pales : Le nombre de pales B , que l'éolienne possèdera influence aussi le design de la pale. Le nombre de pale est déterminé en fonction de la vitesse spécifique λ , et du couple à fournir. Lorsque la vitesse spécifique est fixée, une valeur pour le nombre de pale est recommandée. Ainsi pour $4 < \lambda$.

II.4.1.9.2 Le rotor :

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.

II.4.1.9.3 La nacelle :

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique :

- Arbres primaire et secondaire.

Multiplicateur.

- Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et
- Les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).
- Le système de refroidissement par air ou par eau.
- Un anémomètre.
- Le système électronique de gestion de l'éolienne.

II.4.1.9.4 Le multiplicateur :

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 mètres ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur. Trois types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

II.4.1.9.5 La génératrice :

C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction. Il existe plusieurs types de génératrices pour stabiliser la vitesse des moteurs : génératrices à basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses génératrice auto-excitée. Enfin, La nouvelle génératrice discoïde de Jeumont Industrie est une innovation majeure car elle réduit la taille, normalement imposante, de ces alternateurs multi pôles. Toutefois, le courant produit doit passer par un onduleur de grande puissance. Il s'agit là aussi d'une technologie de pointe.

II.4.1.9.6 La tour :

Son rôle est d'une part de supporter ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation (Figure I.9). Trois grands types de tour peuvent se rencontrer :

- Tour mât haubané : de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
- Tour en treillis : sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain
- Tour tubulaire : est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois fois celui de celui d'un pylône haubané.

II.4.2 Electrolyseur :

Une autre partie importante du système est l'électrolyseur. Ce dernier utilise l'énergie électrique dans une réaction chimique pour produire de l'hydrogène gazeux.

La source d'hydrogène la plus courante est l'eau. L'hydrogène peut être fabriqué à partir d'eau par un processus appelé électrolyse, qui utilise un courant électrique pour séparer l'eau en oxygène et en hydrogène. L'électrolyse est l'option la plus prometteuse pour produire de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables. Ressource. En utilisant des énergies renouvelables, l'hydrogène peut être produit avec peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre. Comme seule de l'eau est utilisée dans ce processus, de l'hydrogène et de l'oxygène purs à 99,9995 % sont produits.

II.4.2.1 Les différentes technologies d'électrolyseurs : [56]

La méthode de l'électrolyse consiste à décomposer les molécules d'eau, à l'aide d'un courant électrique en provenance des énergies renouvelables, pour obtenir d'un côté de l'oxygène (O₂) et de l'autre l'hydrogène (H₂).

II.4.2.1.1 Electrolyseur alcaline :

L'électrolyse alcaline est la plus utilisée actuellement et affiche des coûts d'investissement faibles et un rendement de 68 à 77 %. Peu réactive aux variations de puissance, elle produit de l'hydrogène facilement à partir d'hydroélectricité mais n'est pas adaptée au couplage avec de l'énergie photovoltaïque ou éolienne.

II.4.2.1.2 Electrolyseur PEM :

L'électrolyse à membrane PEM (Membrane à échange de proton) ouvre de nouvelles voies. Son rendement est sensiblement identique à celui de l'électrolyse alcaline mais son intérêt réside dans son excellente réactivité aux variations de puissance, ce qui la rend particulièrement adaptée pour intégrer des énergies renouvelables intermittentes. (htt30)

II.4.2.1.3 Electrolyseur haute température :

Les électrolyseurs haute température (SOEC) quant à eux ont un excellent rendement, mais nécessitent des hautes températures et souffrent encore de maladie de jeunesse. Ils ont un avenir très prometteur dans les applications industrielles.[57]

Chaque technologie a des avantages et des inconvénients. Les électrolyseurs PEM sont hautement compatibles avec les sources d'énergie renouvelables. Réactif, compact et avec de bonnes perspectives de production et de rendement. Le plus sophistiqué et le plus répandu est l'électrolyseur alcalin. Il est légèrement moins cher que le PEM et convient à la production de masse.

II.4.2.2 Principe général de fonctionnement d'électrolyseur :

L'électrolyse divise chimiquement l'eau en oxygène et en hydrogène sous l'influence d'un courant électrique. Un électrolyseur se compose généralement d'une anode et d'une cathode connectée à un générateur de courant continu et séparées par un électrolyte (milieu conducteur d'ions). Le courant continu (DC) est appliqué à la cathode depuis la borne négative du générateur par les électrons pour maintenir le flux magnétique. Les électrons capturés par les ions hydrogène produisent de l'hydrogène. A l'anode, les ions hydroxyde cèdent des électrons et forment de l'oxygène.

En utilisant l'électricité issue de l'énergie éolienne, le procédé a le potentiel d'être beaucoup plus conforme aux normes environnementales que les procédés industriels actuels.

II.4.2.2.1 Réactions chimiques de l'électrolyse de l'eau :

Voici les équations des réactions ayant lieu aux électrodes :

- A l'anode (lieu de l'oxydation) :



- A la cathode (lieu de la réduction) :



L'équation bilan de l'électrolyse de l'eau est donc :



II.4.3 Pile à combustible : [58]

-La pile à combustible utilise de l'hydrogène (H_2) et de l'oxygène (O_2) pour générer de l'électricité et de la chaleur, en n'émettant que de l'eau. La molécule d'hydrogène H_2 est constituée de deux atomes contenant chacun un noyau positif, appelé « proton » ou H^+ , et un électron.

-Pour la technologie appelée PEM (Proton Exchange Membrane ou membrane échangeuse de protons), le dispositif électrochimique contient une membrane insérée entre deux plaques métalliques conductrices. Cette membrane en polymère laisse seulement traverser les protons H^+ , les noyaux des atomes d'hydrogène.

-Les protons traversent la membrane et se dirigent vers l'autre pôle de la cellule. Les électrons, qui ne peuvent pas franchir cette barrière, passent dans le circuit électrique. Simultanément de l'autre côté de la membrane au contact d'un nouveau catalyseur, les protons réagissent avec l'oxygène et les électrons du circuit pour former de l'eau, le seul rejet de la pile.

-Cette réaction non polluante se produit dans chacune des cellules de base qui sont associées pour constituer un module d'énergie de la puissance souhaitée. Une pile à combustible est un assemblage de plusieurs cellules en série ou en parallèle dans un « stack », permettant d'obtenir différentes tensions et puissances.

-Le rendement d'une pile à combustible varie entre 30 et 70%. Il est généralement de 50%, c'est-à-dire que 50% de l'énergie de l'hydrogène est convertie en électricité et 50% en chaleur. Le couple pile à combustible – moteur électrique (lui aussi d'un très bon rendement) est ainsi plus efficace qu'un moteur à combustion interne.

-La pile à combustible est très silencieuse. Seuls certains organes comme le compresseur et le système de ventilation produisent un léger bruit. Au final, la pile à combustible n'émet que de faibles émissions sonores de l'ordre de 40 à 50 dB à 1 m, ce qui est bien moins que le bruit généré par une conversation normale, de l'ordre de 60 dB.

-La pile est constituée de cellules élémentaires. Mises en série ou en parallèle, elles permettent d'obtenir un courant électrique de tension et d'intensité parfaitement adaptées à l'utilisation désirée.

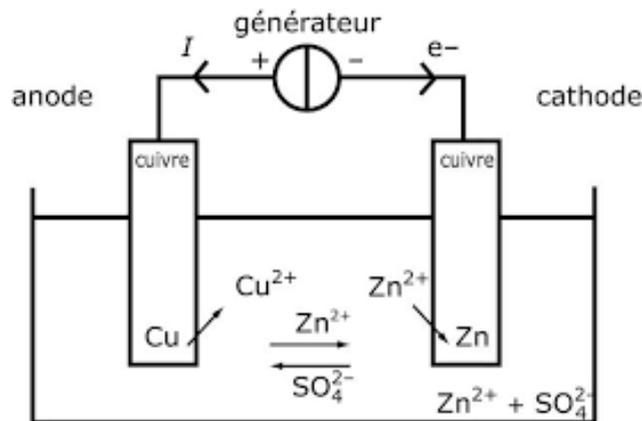


Figure 2.12 : Schéma d'une pile à combustible [59]

Les tests réalisés sur des piles à combustible ont déjà démontré une durée de vie compatible avec leur utilisation dans un véhicule à hydrogène ou une application stationnaire autonome.

Les piles à combustible PEM consomment environ 0,8 Nm³ d'hydrogène par kWh produit. Pour une voiture, il faut 1 kg d'hydrogène pour parcourir 100 km.

II.4.4 Convertisseur : [60]

Le convertisseur alternatif-continu comporte un premier circuit redresseur ayant une entrée triphasée et une sortie en continu. Un dispositif de compensation est connecté entre l'entrée et la sortie du premier circuit redresseur pour compenser les perturbations générées par un courant (IR) circulant dans ledit premier circuit redresseur. Le dispositif de compensation fait circuler un courant (IC) de compensation entre l'entrée triphasée et la sortie en continu. Ledit circuit de compensation comporte un second circuit redresseur à redresseurs commandés connecté à l'entrée triphasée, un circuit élévateur connecté entre le second circuit redresseur et la sortie en continu, et un circuit de contrôle pour commander le circuit de contrôle et le second circuit redresseur.

II.4.5 Mode de stockage d'hydrogène : [61]

Quand bien même le stockage pose quelques problèmes de taille, l'hydrogène a néanmoins l'avantage de pouvoir être stocké sous différents états : gazeux, liquide voir solide dans certains cas.

Tableau 2.1 : Domaine d'application d'hydrogène

Etat	Principales applications
Gazeux	Transports, électrification
Liquide	Aérospatiale, recherche
Solide	Prototype, recherche

II.4.5.1 Stockage de l'hydrogène gazeux :

La forme la plus courante sous laquelle est stocké l'hydrogène est sous forme gazeuse, essentiellement utilisée pour les transports.

Pour être intéressant et compétitif par rapport aux hydrocarbures conventionnels, le monde du transport a besoin d'un carburant qui soit tout autant voire plus énergétique et compact. L'hydrogène possède une forte densité énergétique, mais sous la forme gazeuse, il n'est pas compact à pression atmosphérique, c'est le gaz le plus léger et le moins dense (0.083 g/l à 20°C et à 1bar). C'est pourquoi ce gaz est fortement comprimé avant d'être utilisé. L'énergie nécessaire pour comprimer l'hydrogène à 700 bars est de 22MJ/kg.

Trois types de réservoirs à hydrogène existent en fonction de la pression qu'ils supportent. Il existe des réservoirs à 350 bars, à 500 bars et à 700 bars, en fonction de leurs utilisations. Idéalement, l'hydrogène devrait être comprimé à 700 bars. Au-delà, l'hydrogène ne se comprimerait plus de manière proportionnelle. Mais plus il est comprimé, plus il est gourmand en énergie.

II.4.5.2 Stockage de l'hydrogène solide :

Le stockage sous forme solide de l'hydrogène est possible à travers deux procédés différents, l'adsorption et l'absorption. Dire que l'hydrogène est sous forme solide est un abus de langage. En réalité, l'hydrogène gazeux est absorbé ou adsorbé par un matériau qui, lui, est sous forme solide.



Figure 2.13 : Galette solide formée d'hydrogène et de métal.[62]

II.4.5.3 Stockage de l'hydrogène liquide :

Stocker de l'hydrogène gazeux à 700 bars pour augmenter sa densité est bien, mais réduire l'hydrogène à l'état liquide est encore mieux. En effet, la densité de l'hydrogène passe de 40kg/m^3 à l'état gazeux sous une pression de 700 bars à 71kg/m^3 à l'état liquide pour une pression de 1 bar.



Figure 2.14 : stockage d'hydrogène sous forme liquide. [63]

II.5 Conclusion :

Un système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage basé sur l'hydrogène est conçu pour exploiter de manière optimale les avantages complémentaires de l'énergie solaire et éolienne, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie à travers le stockage sous forme d'hydrogène.

Ce système hybride offre une solution intégrée qui combine efficacement les avantages du solaire et de l'éolien, tout en fournissant une méthode de stockage d'énergie à long terme grâce à la conversion de l'électricité excédentaire en hydrogène. Cela permet une utilisation continue et fiable de l'électricité renouvelable, même en l'absence de conditions optimales de production.

Chapitre III : Simulation et résultats

III.1 Introduction :

Ce chapitre présente un système de production d'énergie hybride à partir de diverses sources d'énergie sur le site d'Adrar. Considérez deux configurations.

Il existe une variété de logiciels de dimensionnement et de simulation pour optimiser les systèmes énergétiques hybrides, avec différentes stratégies d'optimisation. Dans notre cas, nous avons décidé d'utiliser le logiciel HOMER.

III.2 Présentation de logiciel HOMER [64] :

Le logiciel HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) est une plateforme de simulation des systèmes hybrides utilisée pour faire des analyses et modélisations et des optimisations pour les systèmes de production de l'énergie hybrides. Il est spécialement conçu pour les systèmes énergétiques qui combinent plusieurs sources d'énergie, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, thermique, ainsi que les systèmes de stockage et les générateurs diesel.

HOMER est utilisé dans le domaine de l'énergie renouvelable et de la planification énergétique pour évaluer les options de production et de consommation d'énergie. Le logiciel permet de modéliser et de simuler le comportement des systèmes hybrides dans différentes conditions, en prenant en compte les données météorologiques, les profils de charge, les coûts de l'énergie, les contraintes techniques et les objectifs de performance.

L'une des fonctionnalités clés de HOMER est son optimisateur intégré, qui permet de trouver la configuration optimale du système hybride en termes de coûts, de fiabilité et de durabilité. L'outil d'optimisation explore automatiquement différentes combinaisons de sources d'énergie et de paramètres du système pour trouver la solution qui répond le mieux aux besoins spécifiques de l'utilisateur.

Le logiciel HOMER fournit également des outils de visualisation avancés pour représenter les résultats de simulation sous forme de graphiques et de tableaux, facilitant ainsi l'analyse et l'interprétation des performances du système. Il permet également de réaliser des analyses de sensibilité pour évaluer l'impact des variations des paramètres sur les résultats.

En résumé, HOMER est un logiciel puissant pour la simulation des systèmes hybrides d'énergie, offrant des fonctionnalités d'optimisation, de modélisation et d'analyse avancées. Il est largement utilisé dans les secteurs de l'énergie renouvelable, de la planification énergétique et de la prise de décision stratégique pour concevoir des systèmes énergétiques performants, économiques et durables.

III.3 Présentation de système hybride :

Dans cette étude comparative ont fait la simulation pour deux configurations hybrides pour la production de l'électricité :

- Système hybride éolien à pile à combustible :

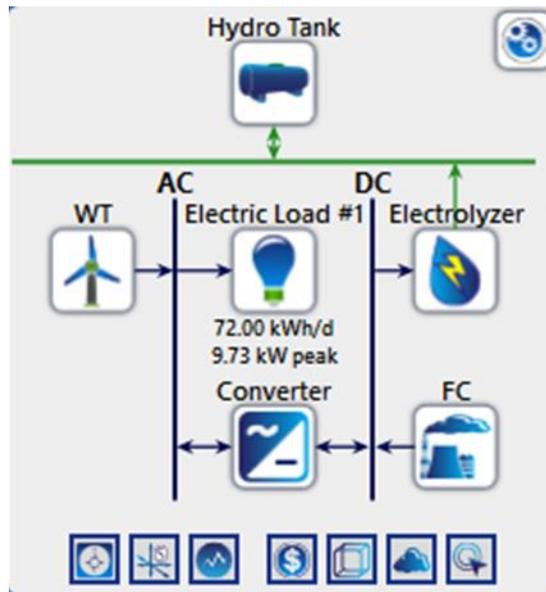


Figure 3.1 : Architecture des configurations de système 1

- Système de pile à combustible hybride éolien-solaire.

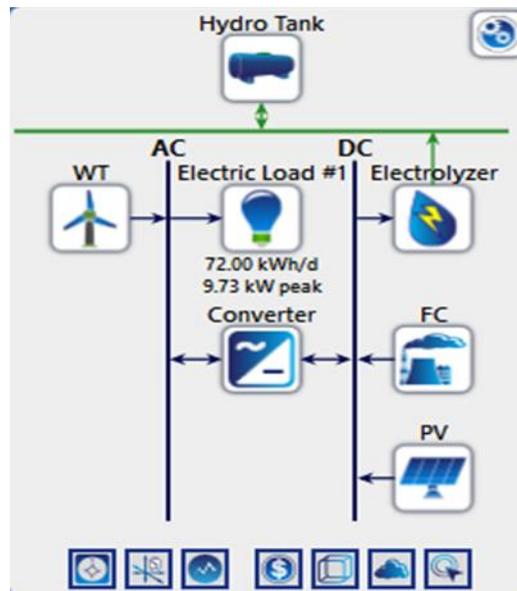


Figure 3.2: Architecture des configurations de système 2

L'énergie électrique produite par système hybride est utilisée pour l'alimentation d'une charge électrique spécifique et l'énergie excédentaire est alimente un électrolyseur pour produire de l'hydrogène. L'hydrogène est stocké pour utiliser plus tard par la pile à combustible lorsque la source d'énergie est insuffisante pour alimenter sa charge.

III.4 Données d'entrées :

III.4.1 Les données du vent :

Les données de vitesse du vent du site d'Adrar sont utilisées pour la simulation. Celles-ci se composent de la vitesse lunaire moyenne et des paramètres de Weibull k et c mesurés à une hauteur de 10 m au-dessus du sol.

Le tableau 3.1 montre les caractéristiques géographiques des stations de surveillance d'Adrar.

Tableau 3.8: Caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Adrar

Latitude	Longitude	Altitude	Rugosité
28,22°	0,28°	276 m	0,01 m

On peut voir l'évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent sur la figure 3.3. Nous avons remarqué que la vitesse varie selon les mois, Juillet est le plus élevé avec 6,5 m/s, suivi de mars, août et septembre avec 6,1 m/s, mais il en va de même pour les mois autres que janvier et décembre. Elle fluctue à environ 5,7 m/s au cours de l'année.



Figure 3.3: Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Adrar à 10m du sol

Une analyse statistique des données horaires des vitesses et leur distribution pour des classes données ont été effectuées pour le site d'Adrar à l'aide du logiciel HOMER.

Les valeurs des paramètres de weibull k et c ainsi que la vitesse moyenne du vent pour la station de Adrar sont données au Tableau 3.2 :

Tableau 3.2: Données statistiques de la vitesse du vent

K	C	$\langle v \rangle$
2,15	7,2 m/s	5,87 m/s

III.4.2 Les données solaires :

Les données de rayonnement solaire du site d'Adrar sont utilisées pour la simulation. Ils se composent du rayonnement solaire et de l'indice de luminosité, comme le montre la figure 3.4.

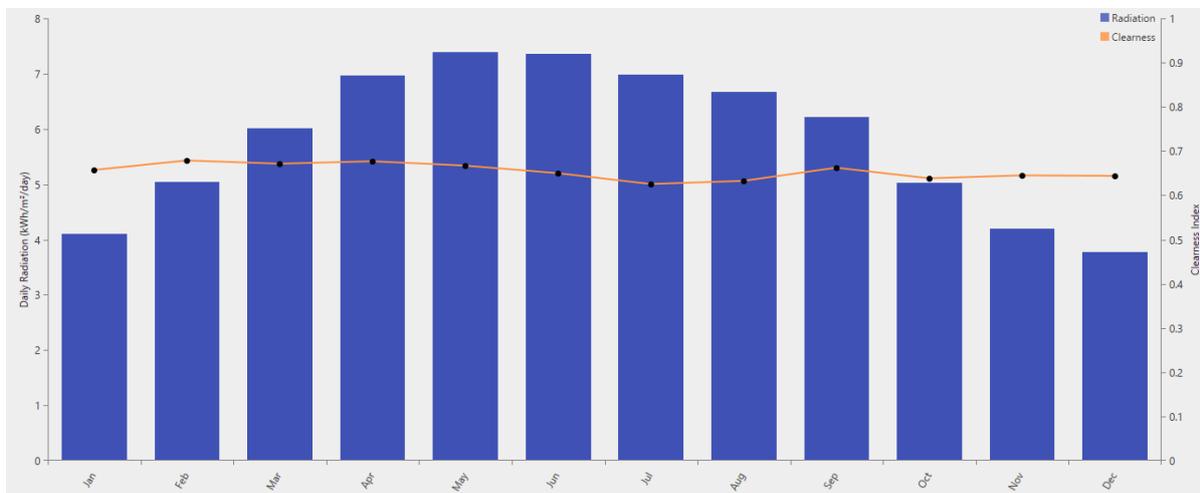


Figure 3.4: Rayonnement horizontal global et indice de clarté

Les données sur le rayonnement solaire ne sont pas disponibles. Cette information moyenne mensuelle est obtenue à partir du logiciel METEONORM présentant les caractéristiques géographiques ci-dessus du site d'Adrar.

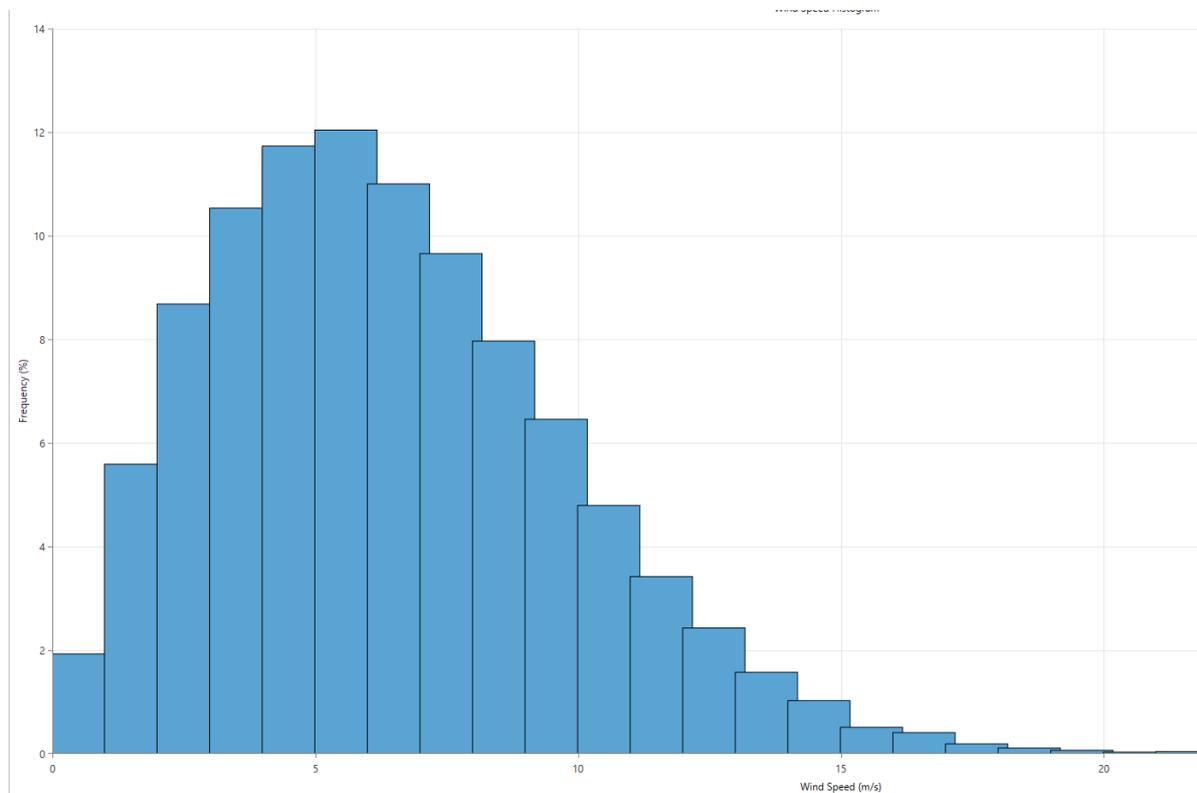


Figure 3.5: Variation de la fréquence des vitesses du vent mesurées pour la région d'Adrar

III.4.3 La charge électrique :

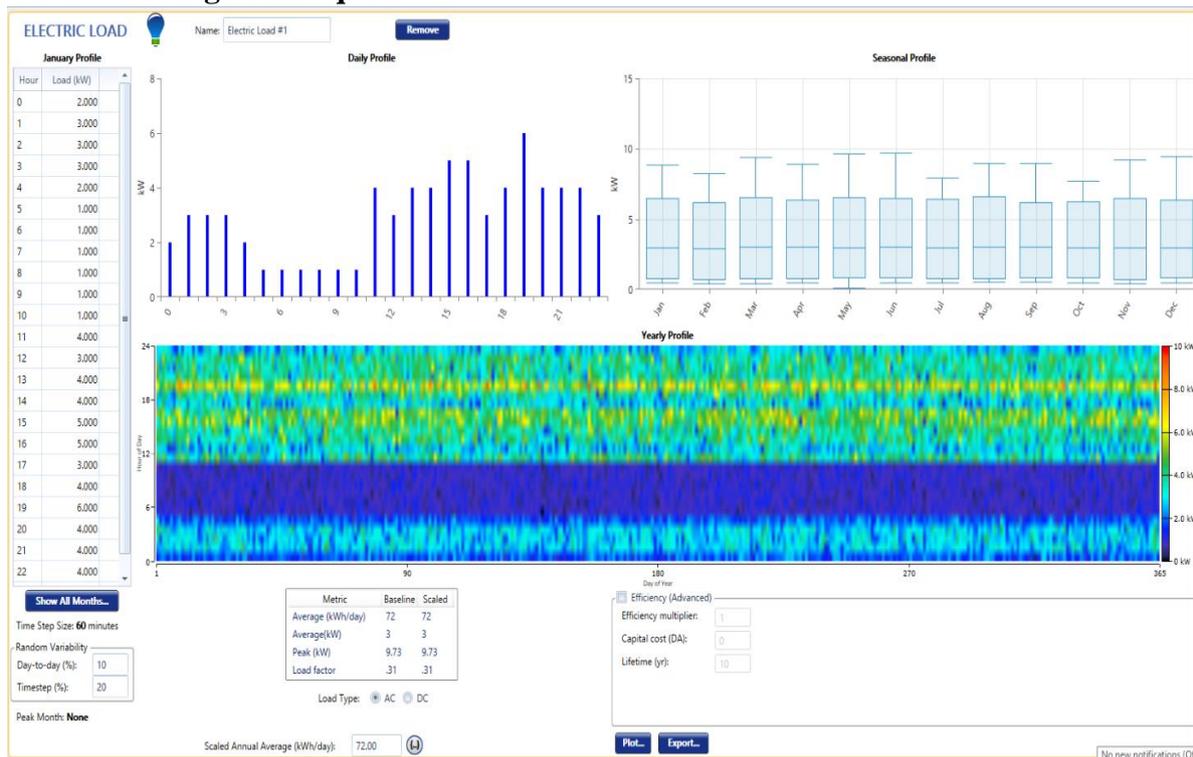


Figure 3.1: Simulation de la charge à alimenter

Le tableau au bas de la Figure 3.6 indique la puissance maximale (crête) et minimale que le système fournira pour répondre à la charge considérée.

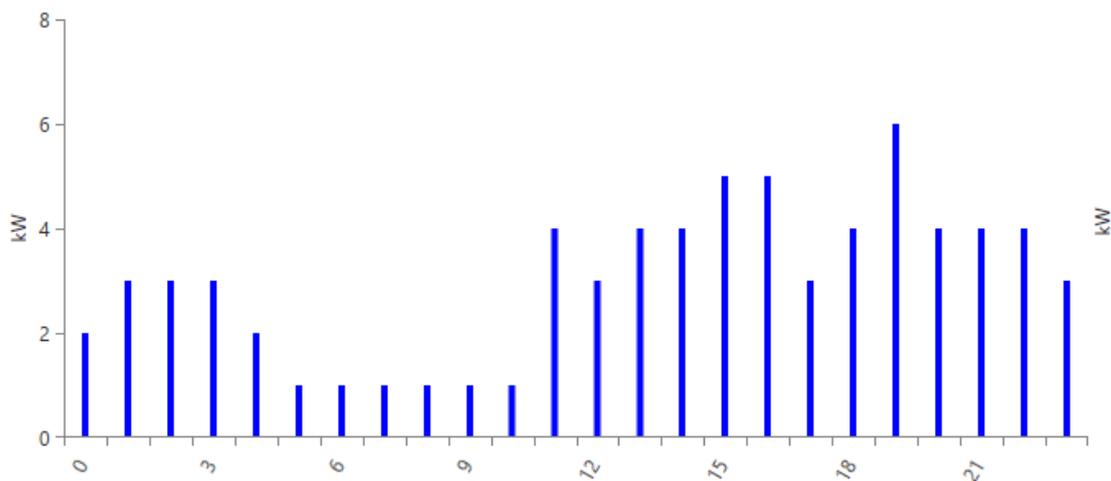


Figure 3.2: Charge électrique moyenne horaire

La figure 3.7 montre la charge électrique moyenne par heure de la journée. On regarde que la charge culmine vers 19h00, ce qui correspond aux heures de pointe pour les policiers.

III.4.4 La conversion éolienne :

L'éolienne utilisée dans ce système est de 10 kW dont les caractéristiques sont présentées à la Figure 3.8. Sa durée de vie est de 17 ans, la hauteur du moyeu atteint 24 m et sa courbe de puissance est représentée sur la figure 3.8.

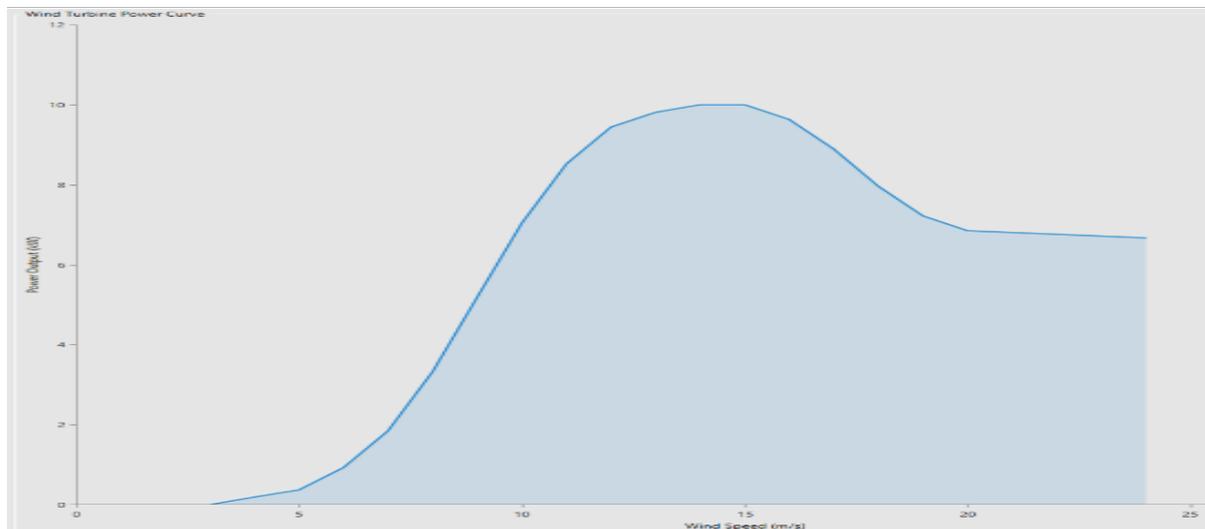


Figure 3.8: Courbe de puissance de l'aérogénérateur PGE 20 /25

III.4.5 Le générateur photovoltaïque :

Les modules photovoltaïques qui composent notre système ont les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.9: Propriétés du module photovoltaïque

Propriétés	Valeurs
Puissance	10 kW
Durée de vie	20 ans
Inclinaison	30°
Orientation	0° Sud
Réfectivité du sol	0.45
Coefficient de perte de puissance dû à la température	-0.5 % / °C
Température nominale d'utilisation	47°C
Rendement dans les conditions standards	13%

III.4.6 L'électrolyseur :

Les électrolyseurs sont utilisés pour produire de l'hydrogène en cas de surproduction d'énergie éolienne ou solaire. L'électrolyseur sélectionné pour notre système a les caractéristiques indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.4: Propriétés de l'électrolyseur

Propriétés	Valeurs
Type	Alcalin
Puissance	10 KW
Durée de vie	15 ans
Rendement	85%
Mode de fonctionnement	CC
Rapport de la charge minimale	20%

III.4.7 La pile à combustible :

Lorsque les différentes sources d'énergie ne suffisent pas à répondre à la demande, les pompes à chaleur doivent intervenir pour combler le déficit énergétique.

La pompe à chaleur sélectionnée pour cette étude présente les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.5: Propriétés de la PAC

Propriétés	Valeurs
Type	PEM
Puissance	15 KW
Mode de fonctionnement	CC
Durée de vie	87000 heures
Consommation spécifique	0,07 kg/kWh

III.4.8 Le convertisseur :

Tableau 3.6: Caractéristiques des convertisseurs

Caractéristiques	Valeurs
Puissance	50 KW
Durée de vie	15 ans
Rendement CA/CC	85%
Rendement CC/CA	90%

III.4.9 Le réservoir d'hydrogène :

L'hydrogène produit par l'électrolyseur est stocké dans des réservoirs et la demande est couverte par des pompes à chaleur.

Les caractéristiques des réservoirs utilisés sont :

Tableau 3.10: Propriétés du réservoir d'hydrogène

Propriétés	Valeurs
Capacité de stockage	1000 kg
Durée de vie	25 ans
Volume réservé	10%

III.5 Dimensionnement :

L'objectif de ces travaux est d'assurer l'électrification d'une maison située à Adrar avec une charge électrique moyenne de 72 kWh/jour.

Cette maison est constituée par un rez de chaussé constitué de deux chambres, une cuisine et des sanitaires. Le premier étage est constitué de deux chambres, une cuisine et sanitaire.

En utilisant les données de consommation horaire d'électricité mesurée pour une maison à Adrar pendant 24 heures. Présenté sur Le tableau 3.8 :

Tableau 3.8 : Consommation horaire d'électricité mesurée pour une maison à Adrar pendant 24 heures.

Heures	Consommation kwh	Heures	Consommation kwh	Heures	Consommation kwh
06 :30-07 :30	44940 kwh	14 :30-15 :30	44955 kwh	22 :30-23 :30	44990 kwh
07 :30-08 :30	44941 kwh	15 :30-16 :30	44959 kwh	23 :30-00 :30	44994 kwh
08 :30-09 :30	44941 kwh	16 :30-17 :30	44964 kwh	00 :30-01 :30	44997 kwh
09 :30-10 :30	44942 kwh	17 :30-18 :30	44969 kwh	01 :30-02 :30	44999 kwh
10 :30-11 :30	44943 kwh	18 :30-19 :30	44972 kwh	02 :30-03 :30	45001 kwh
11 :30-12 :30	44944 kwh	19 :30-20 :30	44982 kwh	03 :30-04 :30	45003 kwh
12 :30-13 :30	44948 kwh	20 :30-21 :30	44986 kwh	04 :30-05 :30	45010 kwh
13 :30-14 :30	44951 kwh	21 :30-22 :30	44986 kwh	05 :30-06 :30	45010 kwh

Le logiciel HOMER a défini chaque élément de l'installation en fonction de toutes les caractéristiques et données présentées dans le paragraphe précédent.

HOMER simule une configuration de système en utilisant toutes les combinaisons de composants donnés en entrée. Cela élimine toutes les conséquences de configurations système irréalisables qui ne répondent pas aux exigences d'alimentation et sont incompatibles avec les ressources.

Export...

Optimization Results
Left Double Click on a particular system to see its diet

Architecture										Cost			
			PV (kW)	WT	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	Hydro Tank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (DA)	COE (DA)	Operating cost (DA/yr)	Initial capital (DA)
				27	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA123M	DA165.75	DA45,122	DA122M
				27	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA123M	DA165.75	DA45,122	DA122M
				27	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA123M	DA165.75	DA45,122	DA122M
				27	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA123M	DA165.75	DA45,122	DA122M
				27	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA123M	DA165.75	DA45,122	DA122M
				27	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA123M	DA165.75	DA45,122	DA122M
				28	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA123M	DA165.87	DA46,504	DA122M
				28	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA123M	DA165.87	DA46,504	DA122M
				28	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA123M	DA165.87	DA46,504	DA122M
				28	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA123M	DA165.87	DA46,504	DA122M
				30	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA123M	DA166.11	DA49,270	DA122M
				30	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA123M	DA166.11	DA49,270	DA122M
				30	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA123M	DA166.11	DA49,270	DA122M
				30	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA123M	DA166.11	DA49,270	DA122M
				34	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA124M	DA166.59	DA54,804	DA122M
				34	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA124M	DA166.59	DA54,804	DA122M
				38	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA124M	DA167.08	DA60,344	DA122M

Figure 3.9: Tableau des configurations possibles

Ce tableau permet de visualiser toutes les configurations possibles du système proposé. Ils sont classés du plus rentable au moins rentable.

L'utilisation du logiciel HOMER suit un processus itératif. J'ai commencé mes calculs avec des données d'entrée approximatives. Après avoir analysé les résultats, ajustez les estimations et répétez le processus autant de fois que nécessaire pour obtenir des résultats raisonnablement précis. Dans notre cas, HOMER a choisi les dimensions suivantes :

	PV (kW)	WT	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	Hydro Tank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (DA)	COE (DA)	Operating cost (DA/yr)	Initial capital (DA)
		27	10.0	10.0	1,000	40.0	CC	DA123M	DA165.75	DA45,122	DA122M
	10.0	21	10.0	10.0	1,000	40.0	LF	DA124M	DA167.71	DA83,480	DA122M

Figure 3.10: Dimensions choisis par HOMER pour la configuration 1 et 2 respectivement

III.6 Simulation des deux configurations :

III.6.1 Simulation du système éolien-pile à combustible :

III.6.1.1 Production énergétique du SEH :

III.6.1.1.1 Production énergétique mensuelle :

Les figures 3.11 à 3.22 représentent une comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour chaque mois de l'année.

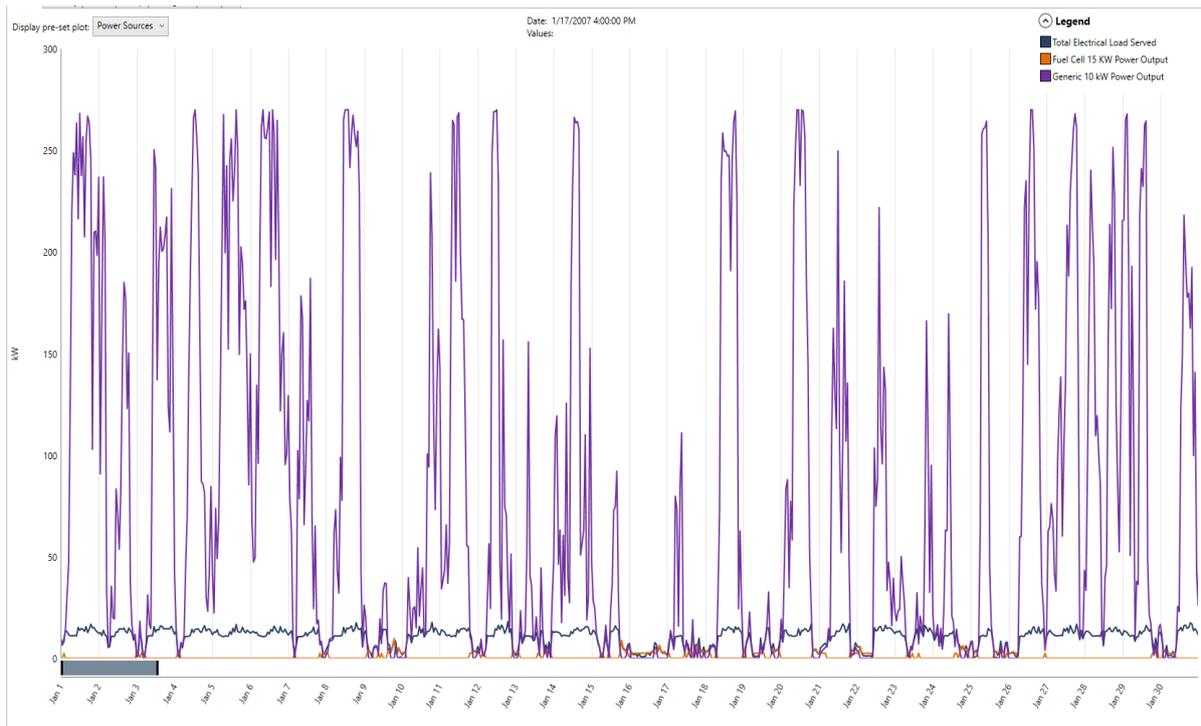


Figure 3.11: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de janvier.

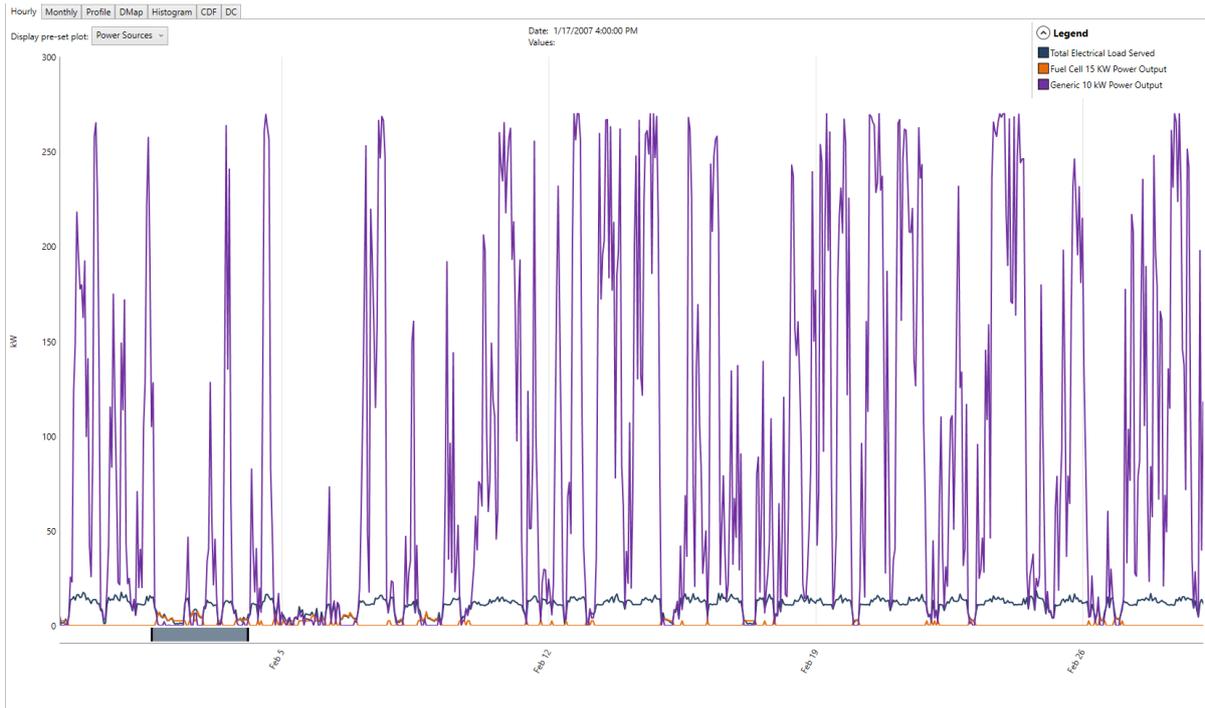


Figure 3.12: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de février.

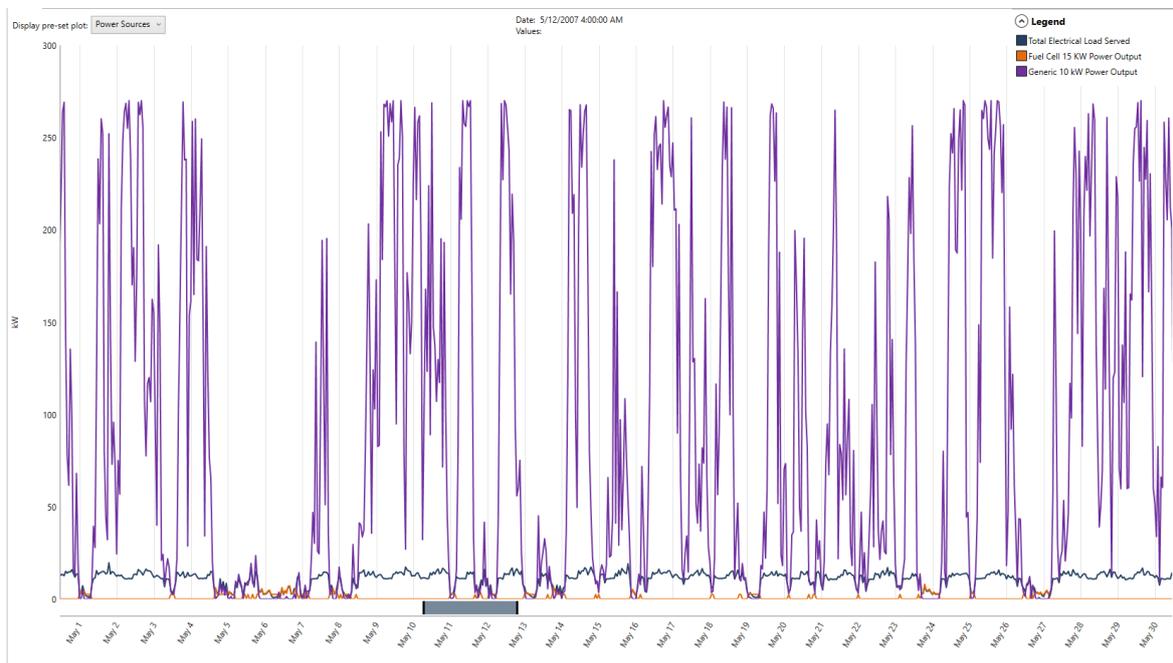


Figure 3.13: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mai.

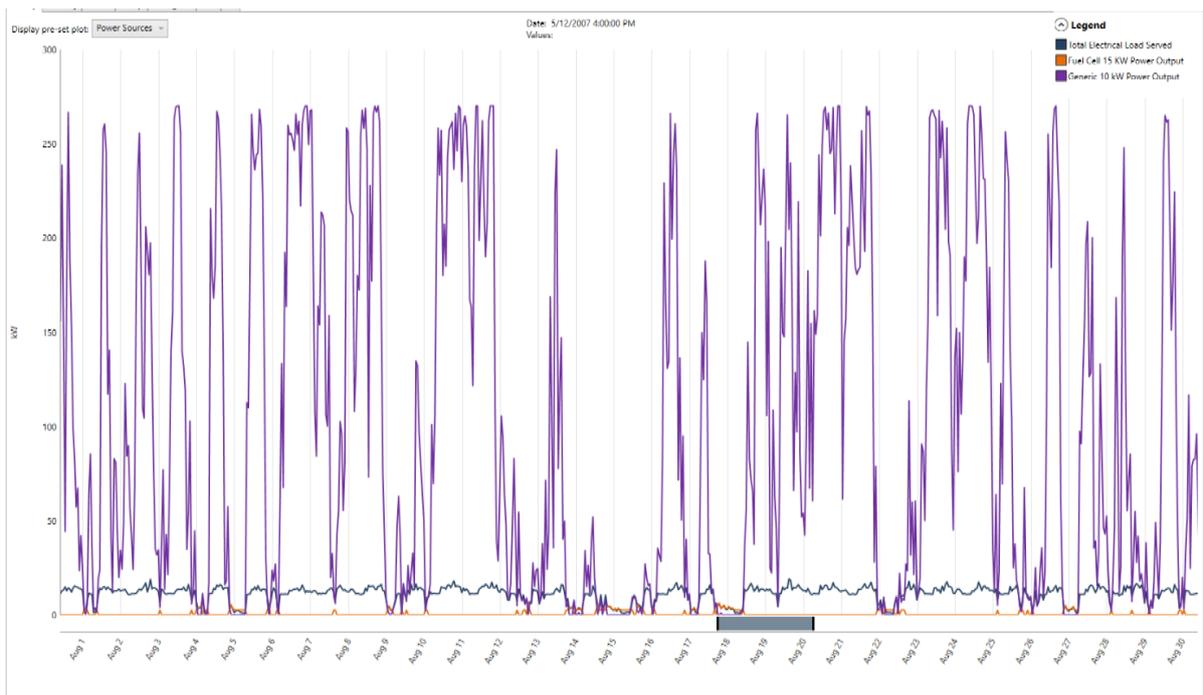


Figure 3.14: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'août.

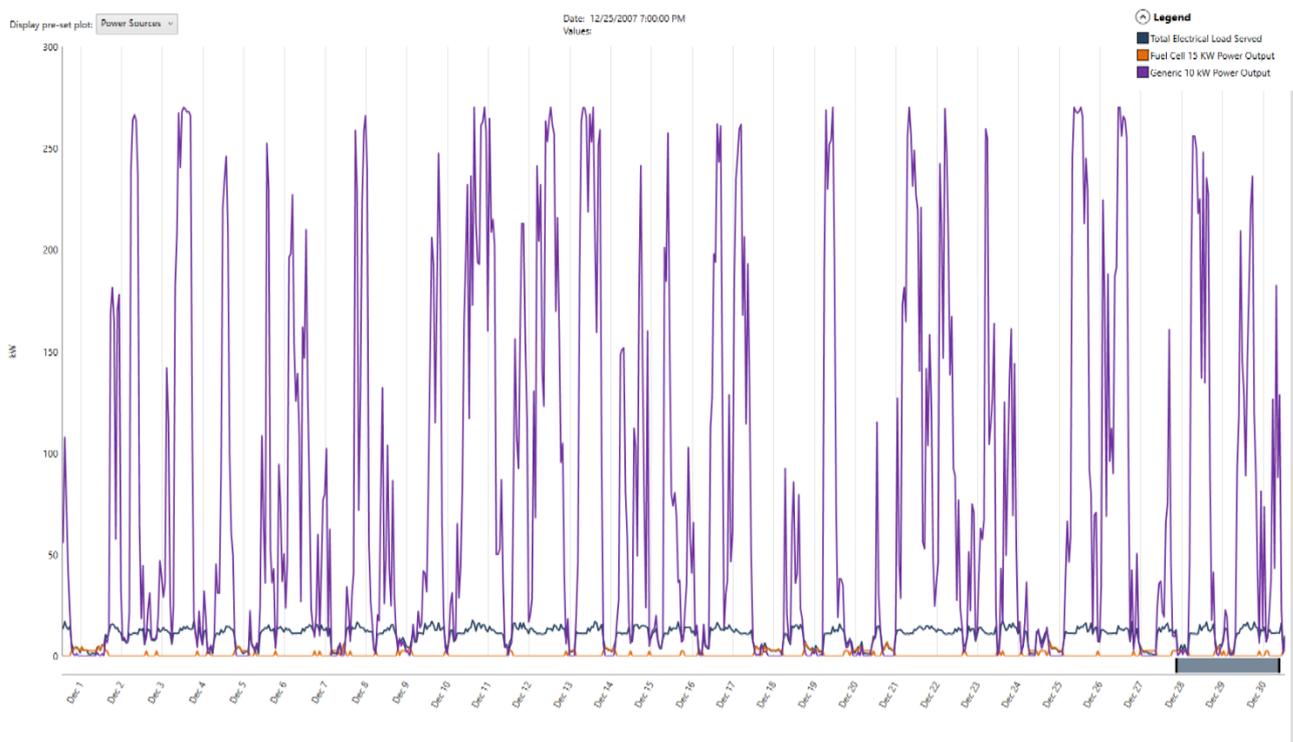


Figure 3.15: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de décembre.

Les figures 3.12 à 3.16 montrent la production mensuelle d'électricité des éoliennes, des piles à combustible et des charges au cours de l'année. Il y a une alternance de production d'éoliennes et de pile à combustible, qui est particulièrement élevée dans les mois les plus venteux, comme mars, juillet, août et septembre, pour les aérogénérateurs. Aux faibles vitesses

de vent, ce rendement énergétique est moins important car il se reflète dans les chiffres de janvier, octobre et décembre, lorsque le rendement de la pile à combustible est le plus élevé.

Pour bien voir et comprendre la complémentarité entre les systèmes, un exemple de production d'énergie moyenne pour une journée de janvier est présenté à la figure 3.17.

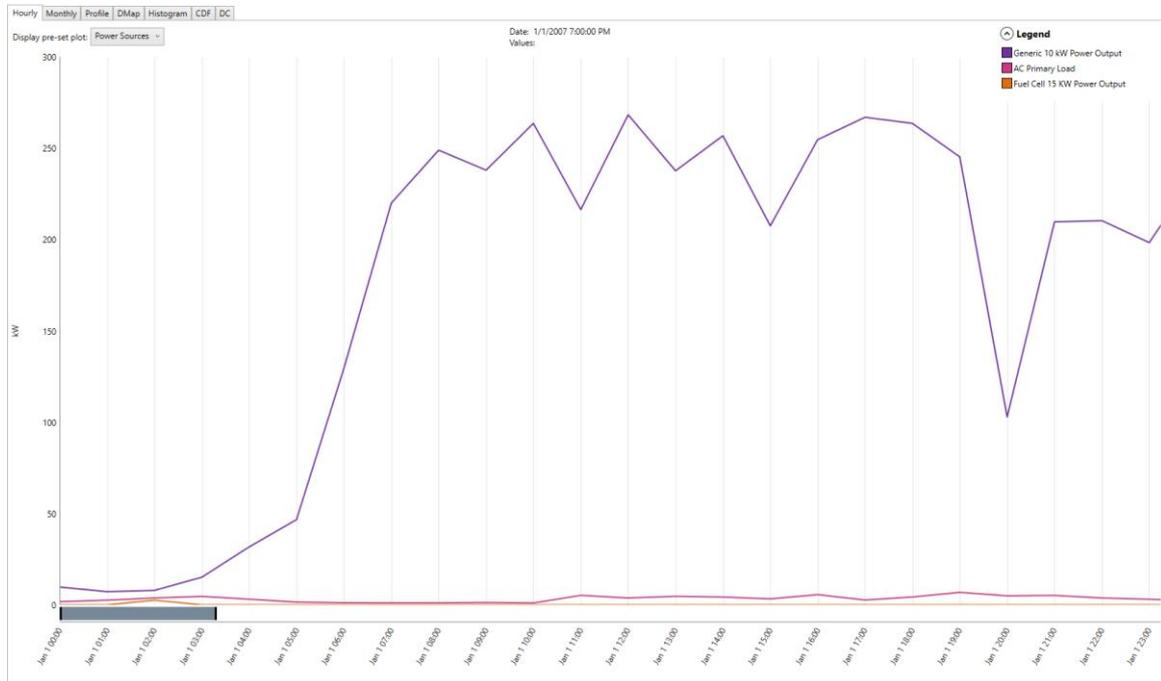


Figure 3.16: Production horaire de l'aérogénérateur et de la PAC

La figure 3.17 montre une alternance entre la production horaire des deux sources pour une journée, on remarque qu'aux environs de 17h, la production éolienne passe par un maximum alors que la PAC présente une production nulle, et aux alentours de 01h l'aérogénérateur présente une très faible production ne satisfaisant pas au besoin, alors la PAC intervient pour compenser le manque.

III.6.1.1.2 Production énergétique annuelle :

Les tableaux 3.9 et 3.10 représentent la production et la consommation d'énergie sur une année.

Tableau 3.11: Production du SEH

Production	kWh/yr	%
Fuel Cell 15 KW	6,531	0.843
Generic 10 kW	768,014	99.2
Total	774,545	100

Tableau 3.12: Consommation électrique

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	26,279	28.9
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	90,828	100

D'après le tableau 3.9, nous pouvons voir que l'énergie éolienne produit 99.2 % de l'énergie annuelle et que les piles à combustible ne produisent que 0.84 % de l'énergie électrique

avec une efficacité énergétique moyenne de 42,9 %. Cela rend les éoliennes 10 KW adaptées à la région de Adrar.

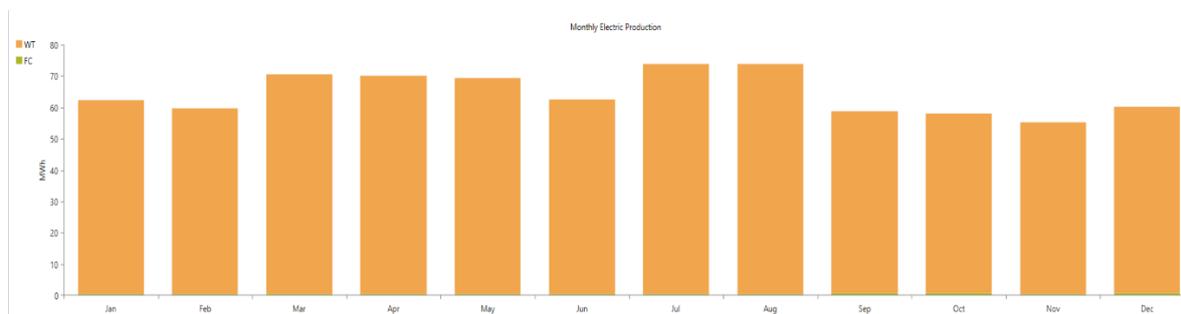


Figure 3.17: Production électrique moyenne mensuelle pour l'aérogénérateur



Figure 3.18: Evolution du stockage de l'hydrogène en fonction de la production de l'aérogénérateur

Sur la Figure 3.19, nous pouvons voir que le stockage de l'hydrogène dépend de la production d'énergie des éoliennes. Cela signifie que l'énergie produite en excès produit des quantités importantes d'hydrogène, qui diminuent avec le temps à mesure que la vitesse du vent diminue. Parce qu'il est consommé par la PAC

Bien comprendre la relation entre le stockage de l'hydrogène et l'énergie produite par les éoliennes représentées par les figures 3.20 et 3.21. Celles-ci représentent la production minimale et maximale d'hydrogène en février et novembre respectivement.

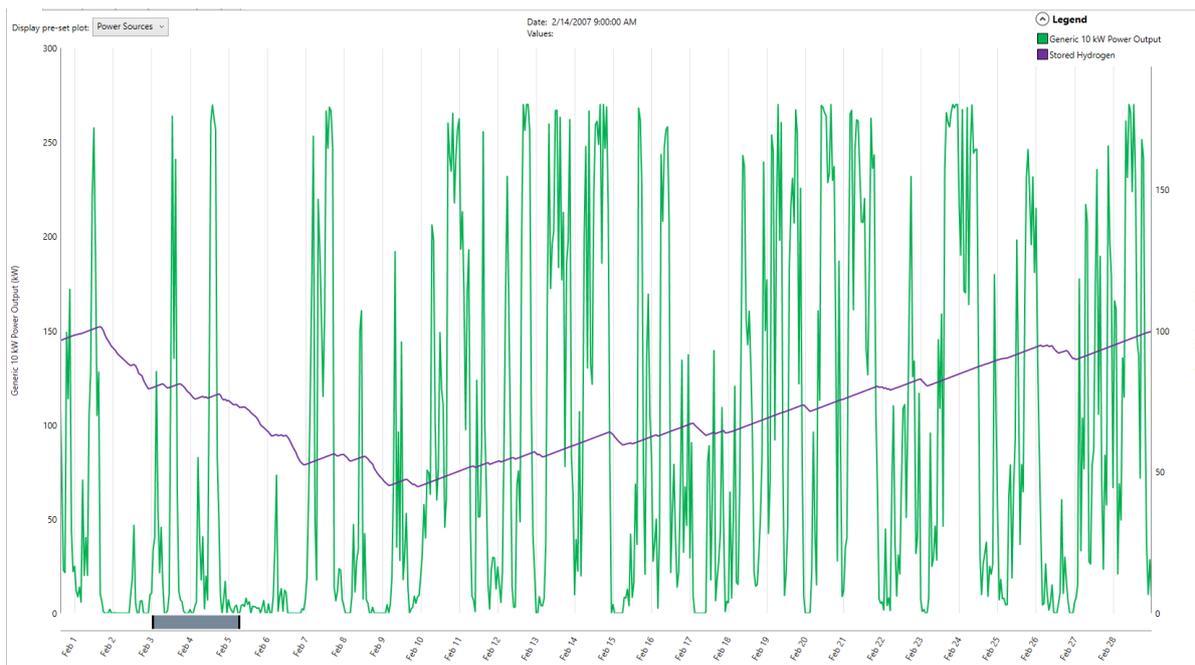


Figure 3.19: Comparaison entre le stockage d'hydrogène et la production de l'éolienne pour le mois de février

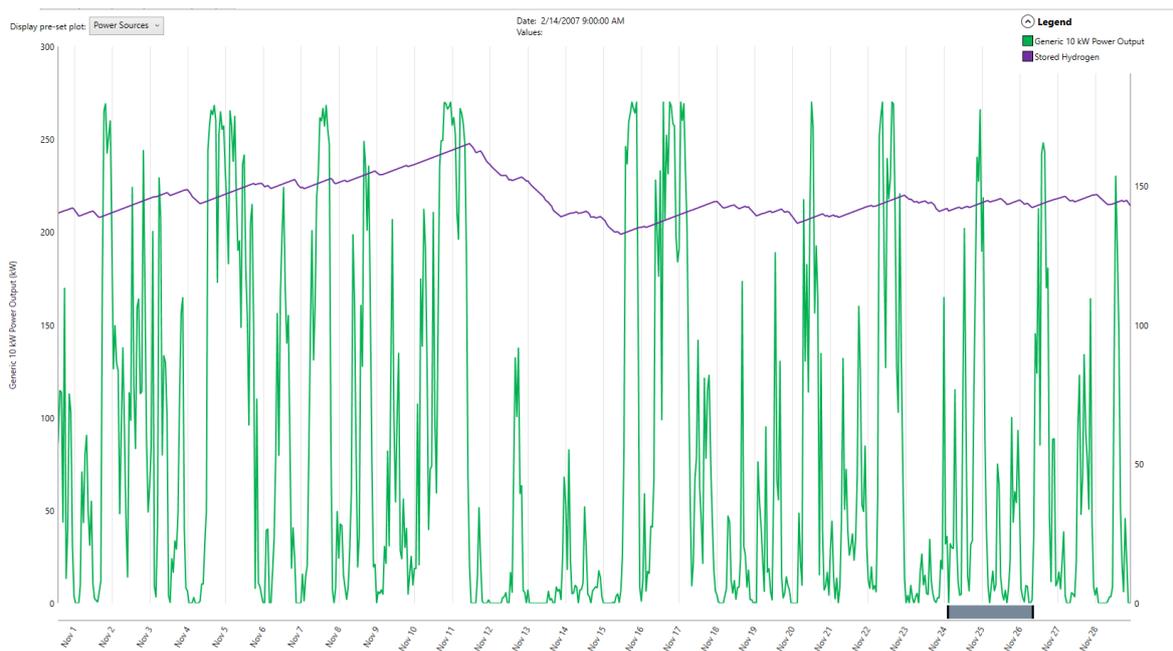


Figure 3.20: Comparaison entre le stockage d'hydrogène et la production de l'éolienne pour le mois de novembre

Les figures 3.19 et 3.20 montrent une nette variation de la quantité d'hydrogène stockée avec la production des aérogénérateurs. A noter que cet ensemble passe un minimum en février et un maximum en novembre. Cette variation est due au caractère intermittent de l'énergie éolienne.

III.6.1.2 Comparaison entre la production électrique et la consommation de l'électrolyseur :

Les figures de 3.21 à 3.23 représentant la production éolienne ainsi que la consommation électrique de l'électrolyseur à l'échelle horaire pour un mois de chaque saison. On remarque clairement que l'excès d'énergie éolienne est utilisé par l'électrolyseur pour la production d'hydrogène.

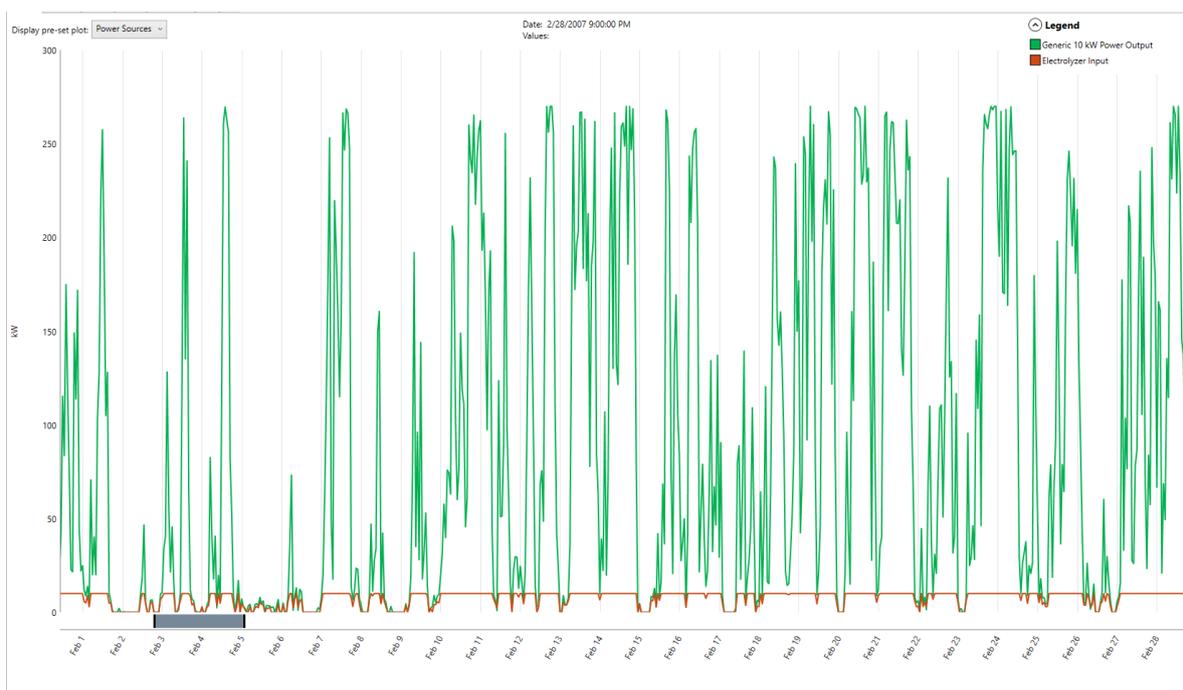


Figure 3.21: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de février

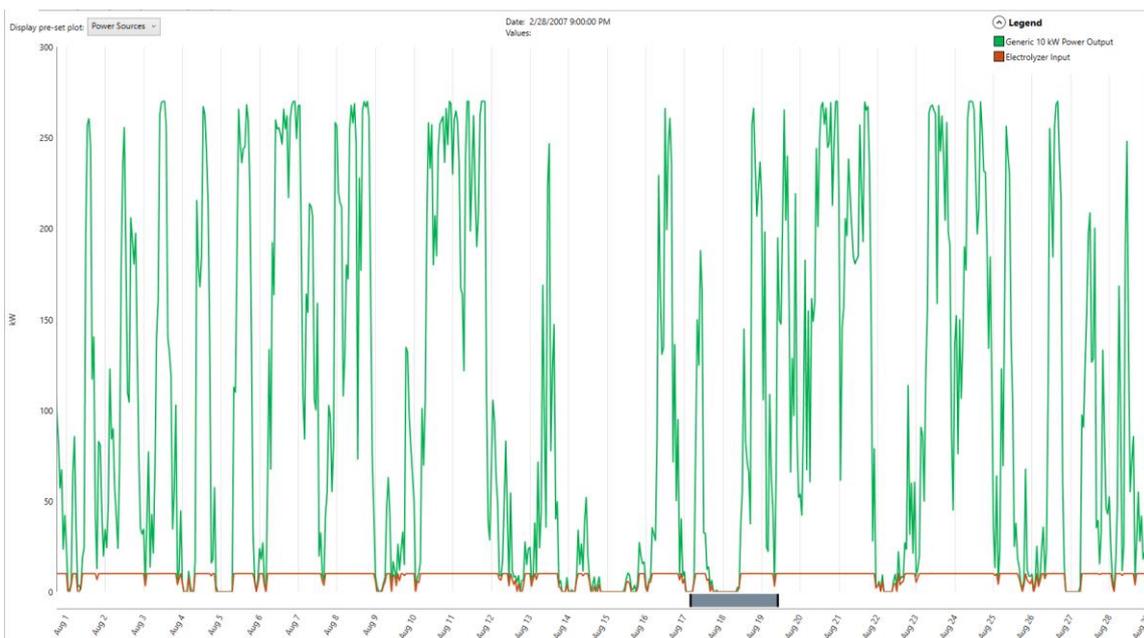


Figure 3.22: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois d'août

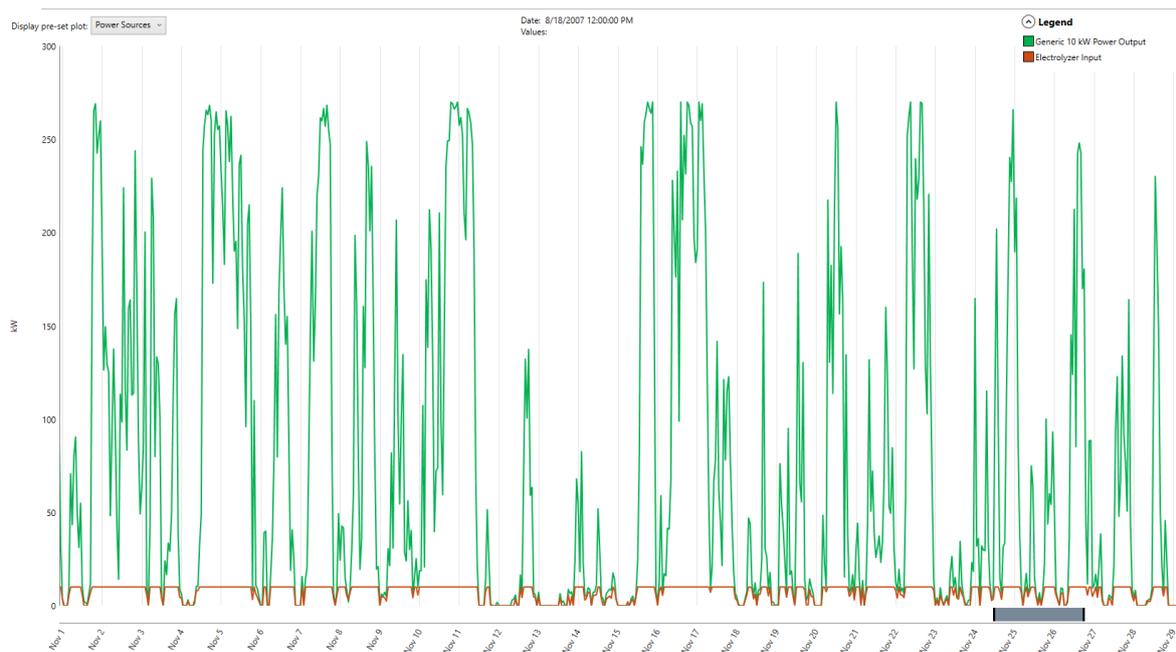


Figure 3.23: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de novembre

III.7 Simulation du système éolien-photovoltaïque-pile à combustible :

III.7.1 Production énergétique du SEH :

III.7.1.1 Production énergétique mensuelle :

Les figures 3.24 à 3.27 montrent la comparaison de la production et de la charge des générateurs solaires, des éoliennes et des piles à combustible pour les mois de janvier ;

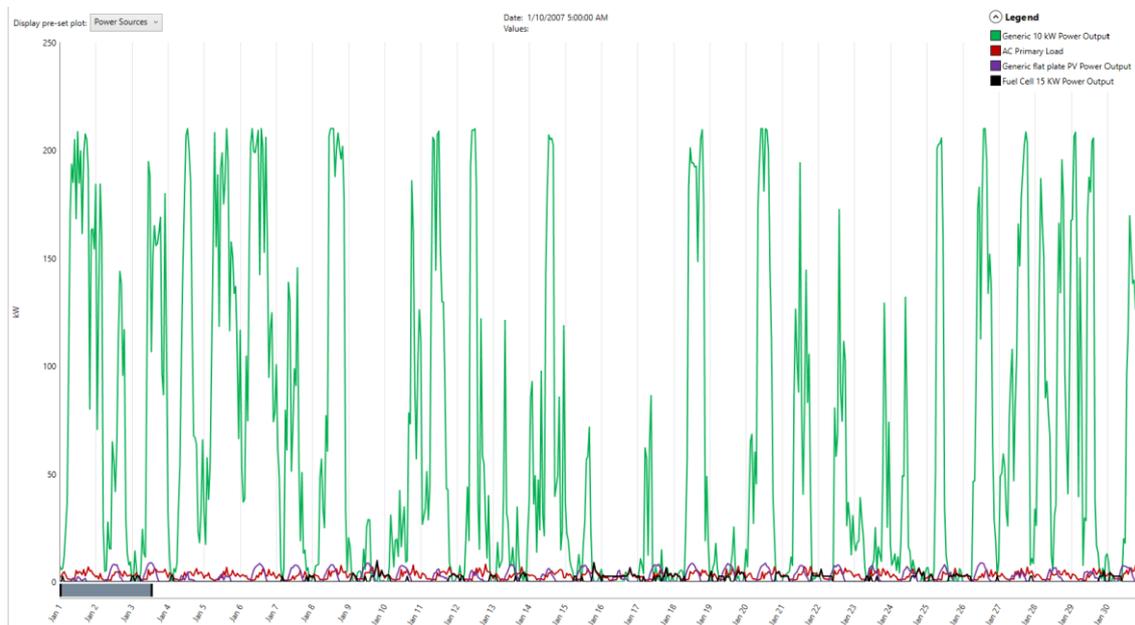


Figure 3.24: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de janvier, mai, aout, décembre

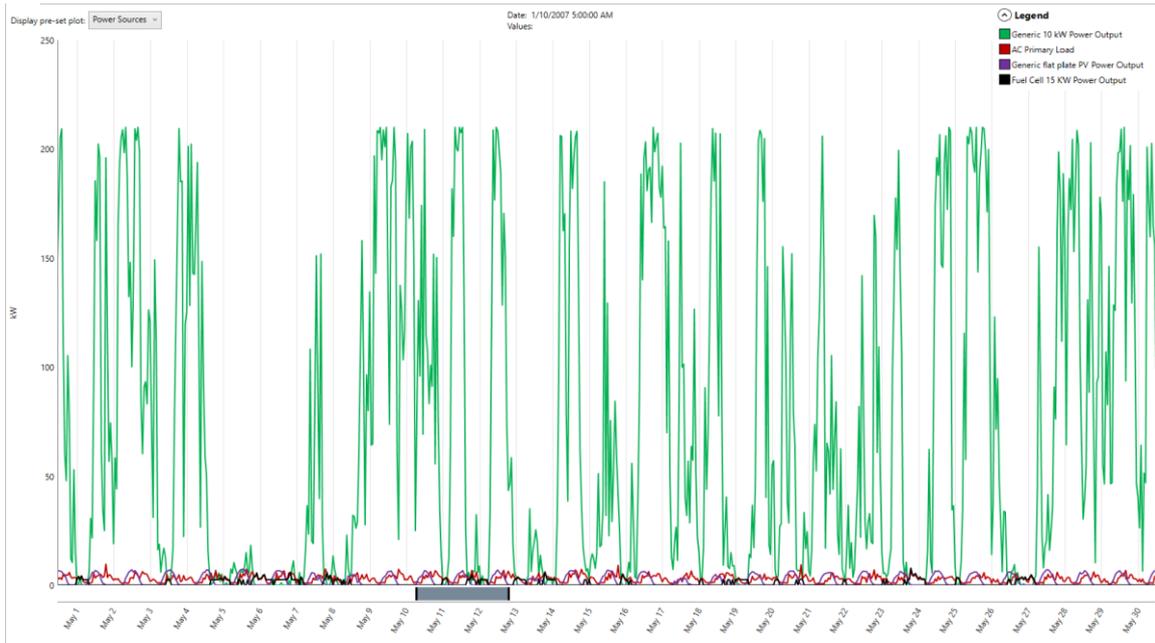


Figure 3.25: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mai

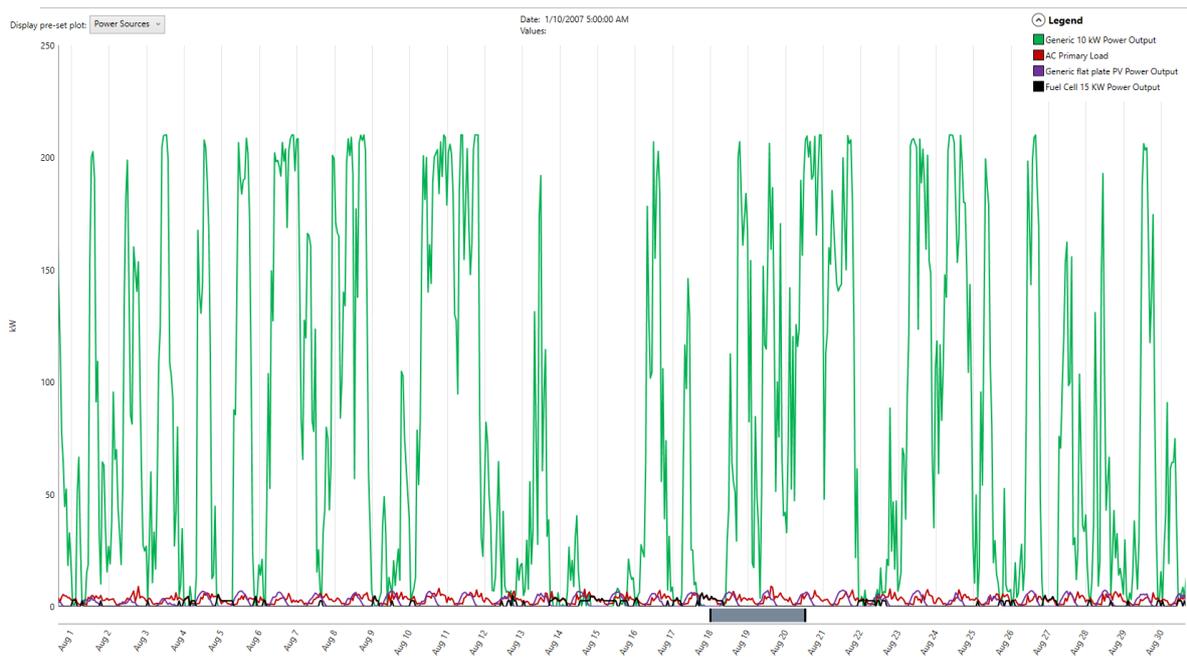


Figure 3.26: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'aout

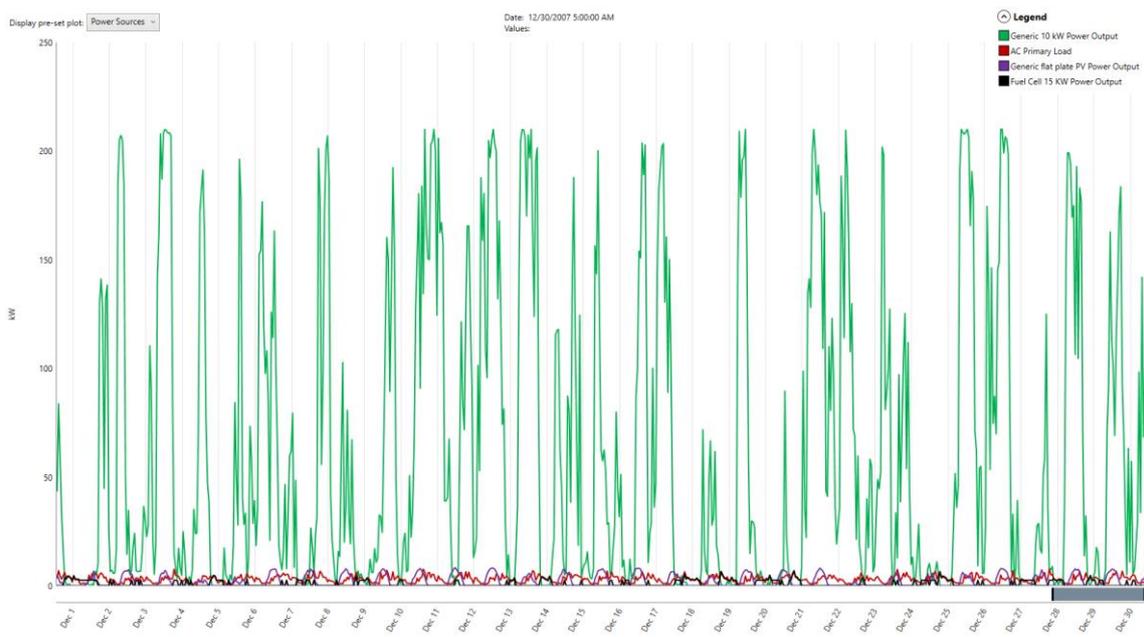


Figure 3.27: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de décembre

D'après les Figures 3.24 jusqu'à 3.27, représentant la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et la pile à combustible, On observe une alternance entre les différentes sources, on remarque bien que la production est toujours élevée pour l'aérogénérateur surtout pour les mois les plus ventés comme mars, juillet et août, cette production est moins importante pour une faible vitesse du vent comme cela est représenté sur les figures des mois de janvier, octobre et novembre ou la production électrique de la pile à combustible est maximale.

Afin de bien comprendre la complémentarité entre les systèmes on a représenté un exemple de production d'énergie moyenne pour un jour de janvier sur la figure 3.28.

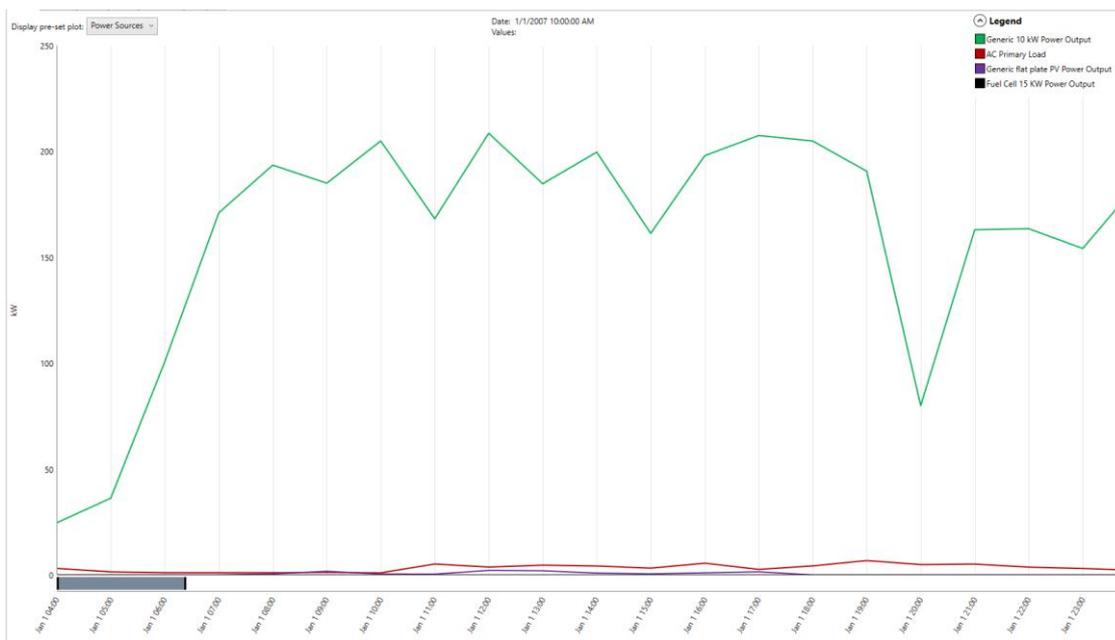


Figure 3.28: Production horaire du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et de la PAC

On remarque bien que la figure 3.28 traduit exactement le principe de fonctionnement de notre système hybride, lors de la diminution de la production de l'aérogénérateur et du générateur photovoltaïque, la PAC fournit l'énergie nécessaire pour combler la demande.

III.7.1.1.1 Production et consommation annuelle :

Les tableaux 3.11 et 3.12 montrent la production et la consommation d'énergie pour une année.

Tableau 3.13: Production du SEH

Production	kWh/yr	%
Generic flat plate PV	16,722	2.69
Fuel Cell 15 KW	6,627	1.07
Generic 10 kW	597,344	96.2
Total	620,693	100

Tableau 3.14: Consommation électrique

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	26,279	28.5
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	92,144	100

D'après les tableaux 3.11 et 3.12 on voit que l'éolienne contribue à 96.2% de la production d'énergie annuelle alors que le photovoltaïque et la pile à combustible chacune produit seulement 3.76% d'énergie électrique avec un rendement électrique moyen de la PAC de 42.9 %, Ce qui traduit le choix de l'éolienne 10 KW en termes de performances.

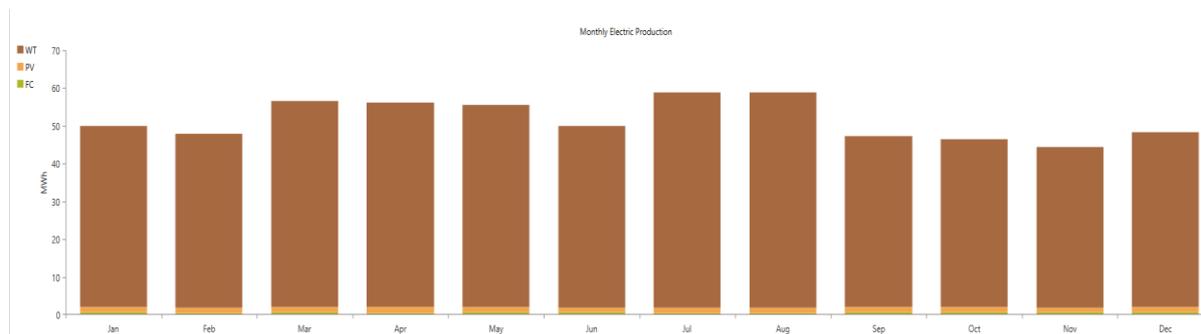


Figure 3.29: Production électrique moyenne mensuelle

La contribution des aérogénérateurs à la production d'énergie s'est avérée significative au cours des saisons de printemps et d'été. Cette production est réduite en hiver et en automne en raison des vitesses de vent plus faibles. Il a été observé que les centrales photovoltaïques atteignent leur production maximale d'électricité en hiver et en automne.



Figure 3.30: Evolution du stockage de l'hydrogène en fonction de la production du générateur photovoltaïque et l'aérogénérateur

D'après la figure 3.30 on constate que le stockage d'hydrogène est proportionnel à la production électrique à partir de l'aérogénérateur et du générateur photovoltaïque, c'est-à-dire l'énergie produite en excès grâce aux deux sources, la quantité d'hydrogène stocké devient plus importante, cette quantité diminue lorsque le cumul présente une déficience, et dans ce cas la quantité stockée d'hydrogène sera utiliser pour alimenter notre PAC.

III.7.2 Comparaison entre la production des différentes sources et celle consommé par l'électrolyseur :

Les figures 3.31 à 3.33 montrent la comparaison de la production des générateurs solaires, des éoliennes et des piles à combustible et de la consommation des électrolyseurs pour un mois de chaque saison.

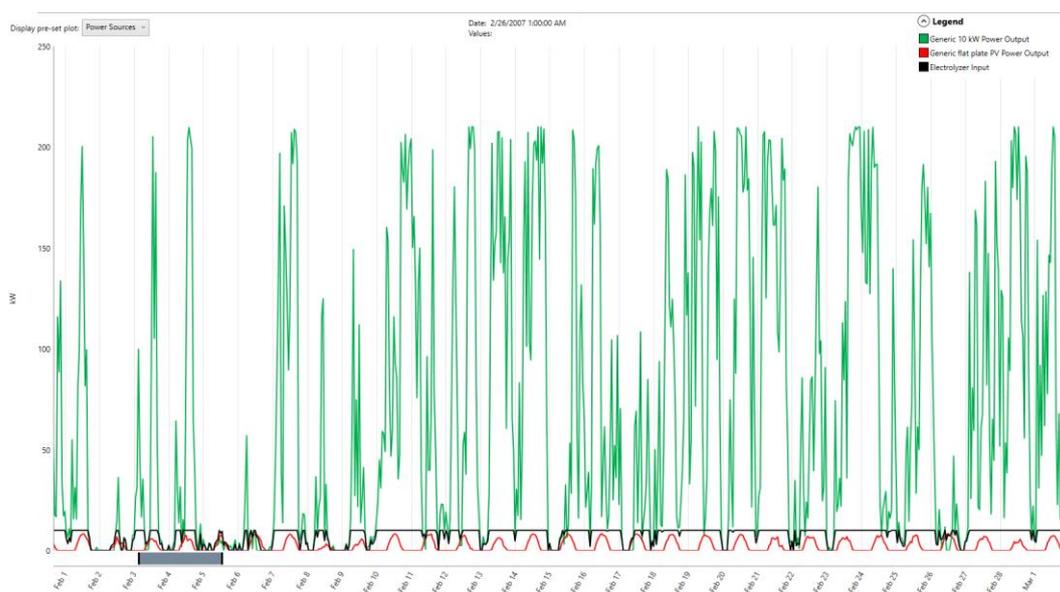


Figure 3.31: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de février



Figure 3.32: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois d'aout

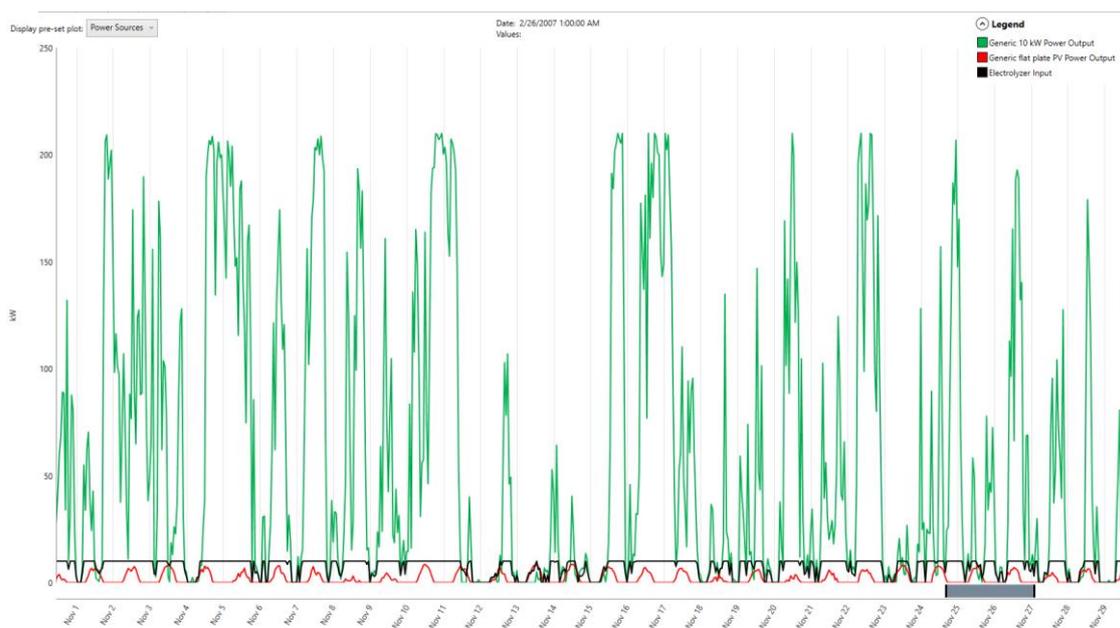


Figure 3.33: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de novembre

Les figures 3.31-3.33 montrent l'énergie éolienne et solaire et la consommation d'énergie de l'électrolyseur pendant un mois de chaque saison, l'énergie éolienne excédentaire étant utilisée pour produire de l'hydrogène dans l'électrolyseur. Les électrolyseurs sont donc un moyen de stocker l'énergie excédentaire.

Les résultats présentés sur les figures 3.28 et 3.30 montrent que la consommation de l'électrolyseur dépend de l'excès d'accumulation de deux sources.

III.7.3 Comparaison entre les deux configurations étudiées :

Une étude comparative a été simulée pour le site d'Adrar à l'aide du logiciel HOMER, et les résultats sont présentés dans le tableau 3.13 :

Tableau 3.13: Comparaison de la production mensuelle moyenne entre les deux configurations

Mois	Configuration 1		Configuration 2		
	Wind (kW)	Fuel cell (kW)	PV (kW)	Wind (kW)	Fuel cell (kW)
Janvier	83.04	0.76	1.89	64.58	0.77
Février	88.07	0.75	2.06	68.5	0.75
Mars	94.16	0.71	2.12	73.27	0.76
Avril	96.67	0.67	2.10	75.19	0.68
Mai	92.66	0.71	1.98	72.07	0.74
Juin	86	0.78	1.85	66.89	0.77
Juillet	98.76	0.64	1.77	76.81	0.64
Août	98.57	0.67	1.81	76.67	0.69
Septembre	80.70	0.83	1.92	62.77	0.85
Octobre	77.05	0.82	1.84	59.93	0.82
Novembre	76.06	0.77	1.80	59.16	0.76
Décembre	80.01	0.83	1.79	62.23	0.86

D'après le tableau 3.13, on peut voir que les performances de l'éolienne sont les mêmes pour les deux configurations et que l'efficacité de la PAC dans la deuxième configuration est inférieure à celle de la première. Cela est dû à la présence d'une troisième source d'électricité.

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, le logiciel HOMER a été utilisé pour dimensionner le système hybride EnR-H2 afin de garantir que l'habitat situé à Adrar puisse être électrifié avec une charge de 72 kWh/jour. Les dimensions optimales des composants alimentant notre habitation pour les deux configurations se sont les suivantes :

Les configurations 1 et 2 ont les mêmes dimensions : un convertisseur de 50 KW, capacité de stockage 1000 kg, électrolyseur 15 kW, éolienne 10 kW, générateur photovoltaïque 10 kW et PAC 10 kW.

Les résultats ont montré qu'il existe une bonne complémentarité entre les énergies générées par les différentes sources d'énergie et les énergies générées par les PAC. En fait, pendant les périodes de faible production, le système utilise des PAC pour combler le vide. On peut en conclure que l'énergie excédentaire est stockée sous forme d'un vecteur énergétique appelé hydrogène par l'électrolyseur puis récupérée grâce à la PAC pour combler le déficit énergétique.

Conclusion générale

Les énergies renouvelables sont des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Il faut trouver des solutions énergétiques alternatives et durables répondant à la diminution de la consommation des énergies fossiles, ne participant pas à l'effet de serre et permettant de généraliser l'accès à l'électricité, notamment dans les pays en voie de développement.

Ces systèmes combinent différentes sources d'énergie renouvelables pour assurer une production d'électricité stable et continue, tout en permettant le stockage à long terme de l'énergie sous forme d'hydrogène.

Le Logiciel HOMER a été utilisé pour dimensionner le système hybride EnR-H2 afin de garantir que l'habitat situé à Adrar puisse être électrifié avec une charge de 72 kWh/jour. Les dimensions optimales des composants répondant aux besoins de notre maison pour les deux configurations suivantes :

Les configurations 1 et 2 ont les mêmes dimensions : un convertisseur de 50 KW, capacité de stockage 1000 kg, électrolyseur 15 kW, éolienne 10 kW, générateur photovoltaïque 10 kW et PAC 10 kW.

Les résultats ont montré qu'il existe une bonne complémentarité entre les énergies générées par les différentes sources d'énergie et les énergies générées par les pompes à chaleur. En fait, pendant les périodes de faible production, le système utilise des pompes à chaleur pour combler le vide. On peut en conclure que l'énergie excédentaire est stockée sous forme d'un vecteur énergétique appelé hydrogène par l'électrolyseur et éventuellement récupérée grâce aux pompes à chaleur pour combler le déficit énergétique dû à la destruction des sources d'énergie renouvelables.

Les résultats ont montré qu'il existe une bonne complémentarité entre les énergies générées par les différentes sources d'énergie et les énergies générées par les PAC. En fait, pendant les périodes de faible production, le système utilise des PAC pour combler le vide. On peut en conclure que l'énergie excédentaire est stockée sous forme d'un vecteur énergétique appelé hydrogène par l'électrolyseur puis récupérée grâce à la PAC pour combler le déficit énergétique.

Finalement ; la configuration 1 avec le système éolien PAC est suffisant. Il n'est pas nécessaire de rajouter le système PV pour le cas du site d'adras. Ceci permettra d'économiser sur le cout de notre système hybride.

Références et bibliographie :

- [01] <https://www.un.org/fr/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
- [03] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0950&from=FR>
- [04] <https://www.france24.com/fr/europe/20210526-proc%C3%A8s-climatique-shell-bient%C3%B4t-fix%C3%A9-sur-son-sort-aux-pays-bas>
- [05] <https://unfccc.int/fr/news/la-cop-27-parvient-a-un-accord-decisif-sur-un-nouveau-fonds-pertes-et-prejudices-pour-les-pays>
- [06] <https://www.fchea.org/hydrogen-as-storage#:~:text=Hydrogen%20can%20be%20generated%20from,compounds%20for%20longer%20term%20use>
- [07] <https://www.copee.eu/la-naissance-du-photovoltaïque/>
- [08] <https://www.copee.eu/la-naissance-du-photovoltaïque/>
- [09] <https://www.copee.eu/la-naissance-du-photovoltaïque/>
- [10] <https://www.paperblog.fr/7109992/la-cellule-solaire-a-60-ans/>
- [11] <https://www.copee.eu/la-naissance-du-photovoltaïque/>
- [12] <https://www.copee.eu/la-naissance-du-photovoltaïque/>
- [13] <https://www.linfodurable.fr/environnement/mexique-le-plus-grand-parc-solaire-du-continent-americain-4356>
- [14] <https://www.lapresse.ca/affaires/economie/energie-et-ressources/201211/06/01-4590934-transcanada-inaugure-un-parc-eolien-en-gaspesie.php>
- [15] https://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne
- [16] <https://www.sudouest.fr/economie/energie/energies-renouvelables-mais-qui-a-invente-la-premiere-eolienne-de-l-histoire-13258265.php>
- [17] <https://www.connaissancedesenergies.org/etat-des-lieux-du-developpement-de-leolien-dans-le-monde-220218>
- [18] https://www.cder.dz/wih2/poster/t3_15.pdf
- [19] <https://www.mediachimie.org/sites/default/files/NAT-TSTL-D3Electrolyse.pdf>
- [20] **Baillux, Christian. 1996.** Histoire de l'électrolyse alcaline de l'eau de ses débuts à nos jours [article]. *Bulletin d'histoire de l'électricité*. Juin 1996, pp. 19-33.
- [21] **C. Lamy, J.-M. Leger. 1994.** Les piles à combustible : application au véhicule électrique. *Journal de physiueq*. Janvier 1994, pp. C1-253 - C1-281.
- [22] <https://www.numerama.com/vroom/1448338-cest-quoi-une-voiture-a-hydrogene.html>

- [23] <https://www.euractiv.fr/section/energie/news/shell-annonce-la-construction-de-la-plus-grande-usine-dhydrogene-renouvelable-deurope>
- [24]<https://renews.biz/76712/german-green-hydrogen-capacity-could-be-28gw-by-2030/>
- [25] ,[26] **L.AICHE. Hamane, M. Hamane, M.Belhamel. 2007.CDER.** [Online] 2007. https://www.cder.dz/download/ICRES07_21.pdf.
- [27] **D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, C. Elmasides. 2009.** Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage. *International Journal Of Hydrogen Energy*. August 2009, Vol. 34, pp. 6581-7130.
- [28]<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319914016759?via%3Dihub>
Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico. Sanchez, Victor M. 2014. 29, October 2014, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 16646-16655.
- [29] [30] A. khalilnejad, G.H.Riahy, 2014, “A hybrid wind PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyze”, *Energy Conversion and Management*.
- [31] Pei-Hsing Huang, Jenn-Kun Kuo, et Zong-Dain Wu. 2016. *Applying small wind turbines and a photovoltaic system to facilitate electrolysis hydrogen production*. April 2016, *International Journal of Hydrogen*.
https://www.researchgate.net/publication/301305929_Applying_small_wind_turbines_and_a_photovoltaic_system_to_facilitate_electrolysis_hydrogen_production
- [32]https://www.researchgate.net/publication/345334234_A_Novel_Probabilistic_Approach_to_Optimize_Stand-Alone_Hybrid_Wind-Photovoltaic_Renewable_Energy_System
- [33]<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122005056>
- A. Okunlola, M. Davis, A. Kumar. 2022. 112610, September 2022, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 166.
- [34] L.Aiche,2003 “Contribution à élaboration de la carte du potentiel gisement énergétique éolien de l’Algérie ” , Mémoire de magister .
https://www.cder.dz/download/jnv2_14.pdf
- [35]https://www.researchgate.net/figure/Carte-annuelle-de-la-vitesse-moyenne-du-vent-a-10m-du-sol-s_fig2_278639384
- [36]<https://www.edfenr.com/lexique/panneaux-solaires-polycristallins/>
- [37]<https://www.amazon.fr/ECO-wORTHY-polycrystalline-photovoltaic-panneau-charging/dp/B00HTSVDAM?th=1>
- [38]<https://www.edfenr.com/lexique/panneaux-solaires-monocristallins/>
- [39]<https://www.dimel-dz.com/product/panneau-solaire-monocristallin/>

- [40] <https://www.edfenr.com/lexique/panneaux-solaires-amorphes/>
- [41] <https://www.1panneau-solaire.fr/panneau-solaire-photovoltaique/panneau-solaire-amorphe/>
- [42] <https://www.re-volt.fr/produit/regulateur-de-charge-de-panneau-solaire-avec-2-ports-usb-40-a/>
- [43] <https://www.edfenr.com/lexique/onduleur/>
- [44] <https://www.comptoireolien.fr/onduleurs-hybrides-230v-onduleur-mppt-hybride-1000w-24v-injection-reseau-230v-avec-limiteur.html>
- [45] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-photovoltaique>
- [46] <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaique/schema-panneau-photovoltaique.html>
- [47] <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaique/schema-panneau-photovoltaique.html>
- [48] <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaique/schema-panneau-photovoltaique.html>
- [49] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-eolienne>
- [50] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-eolienne>
- [51] F. POITIER, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [52],[53] <https://dspace.univadrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/748/1/Mod%c3%a9lisation%20et%20simulation%20de%20la%20pale%20d%e2%80%99une%20petite%20c3%a9olienne.pdf>
- [54] <https://www.ecosources.org/eolienne-verticale-savonius>
- [55] <https://www.univ-sba.dz/ft/images/Polycopie/POLYCOPIE-BENAMARA.pdf>
- [56] <https://www.univ-sba.dz/ft/images/Polycopie/POLYCOPIE-BENAMARA.pdf>
- [57] <https://www.edf.fr/entreprises/le-mag/le-mag-entreprises/conseils-energie-competitivite/electrolyse-et-pile-a-combustible-les-promesses-d-un-hydrogene-vert>
- [58],[59] <https://hydrogentoday.info/tout-savoir-sur-lhydrogene/fiche-n2-fonctionnement-dun-electrolyseur/#%3A~%3Atext%3DLe%20principe%20de%20l%27%C3%A9lectrolyse%20eau%20en%20hydrog%C3%A8ne%20et%20oxyg%C3%A8ne.%26text%3DUne%20cellule%20d%27%C3%A9lectrolyseur%20a%20c>
- [60] <https://energies.airliquide.com/fr/mediatheque-planete-hydrogene/planet-hydrogen-pile-combustible>
- [61] <https://patents.google.com/patent/EP0926807A1/fr>

[62] <https://www.ecosources.org/stockage-hydrogene>

[63] <https://www.ecosources.org/stockage-hydrogene>

[64] <https://www.homerenergy.com/products/pro/version-history.html>