

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Mémoire de fin d'études, Master (Installation énergétique et turbomachine)

La production électrique d'un système hybride éolien- hydrogène

THEME

Mémoire de master académique

Mémoire présenté par :

Mr : Fettis Si Ahmed

Mr : Boubekour Riadh

Sous la direction de :

Dr Aiche Hamane Lilia

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu de nous avoir permis d'arriver au bout de ce mémoire.

Mais surtout un grand Merci à Madame Hamane, notre encadreur pour tous ses conseils, et ses suggestions qui nous ont aidé à bien mener notre mémoire. Il nous a toujours poussé à donner le meilleur de nous-mêmes.

Je remercie également tous les membre de ma famille qui m'ont toujours soutenue, mes professeurs qui grâce à leurs efforts nous ont tenu la main durant notre parcours. Et un grand merci pour nos amis qui étaient là où nous étions besoin d'eux.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma chère mère qui a toujours cru en moi, et m'a toujours soutenue avec ses prières, merci maman. Et Je remercie tous mes frères pour leurs confiances et leurs motivations.

Sommaire :

Résumé	1
Introduction générale	2
Chapitre 01 : Etat de l'art des systèmes hybrides éolien-hydrogène	
1.1 Introduction	5
1.2 Historique des éoliennes	6
1.3 Historique de l'hydrogène	9
1.4 Etat de l'art du système hybride	9
1.5 Etat de l'art des logiciels SEH	17
1.6 Conclusion	18
Chapitre 02 : Méthodologie	
2.1 Introduction	20
2.2 Présentation du système hybride éolien-hydrogène	20
2.3 la production d'énergie éolienne	21
2.3.1 La puissance instantanée du vent [22]	22
2.3.2 L'énergie du vent	23
2.3.4 Explication avec quelques formules	23
2.4/ Éolienne	24
2.4.1 Classification des éoliennes selon le principe de fonctionnement :	25
2.4.1.1 Distinction selon l'axe de rotation	25
2.4.1.2 Distinction selon le nombre de pales	26
2.4.2 La description d'un système éolien	28
2.4.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne	29
2.4.4. Puissance et énergie d'une éolienne	29
2.4.5. La courbe de puissance	32
2.5/ Electrolyseur	32
2.5.1. Les différentes technologies d'électrolyseurs	33
2.5.2. Principe général de fonctionnement d'électrolyseur	34
2.6/ Pile à combustible	35

2.6.1 Principe de fonctionnement.....	35
2.6.2 Relations chimiques sur le fonctionnement d'une PAC.....	36
2.7 / Convertisseur.....	37
2.8 / Les types de stockage d'hydrogène	38
2.8.1 Stockage d'hydrogène gazeux	38
2.8.2 Stockage d'hydrogène liquide	38
2.8.3 Stockage d'hydrogène solide.....	39
2.9/ Conclusion	40

Chapitre 03 : Simulation du système hybride

1/ Introduction.....	42
2/ Présentation de HOMER.....	42
3/ Dimensionnement de système	45
3-1/ Site de Bejaïa	45
3.1.1 Données d'entrées	45
3.1.2 L'aérogénérateur	48
3.1.3 Convertisseur.....	49
3.1.4 L'électrolyseur	49
3.1.5 La pile à combustible	50
3.1.6 Le réservoir d'hydrogène	50
3.1.7 Simulation du système hybride (SEH) de la région de Béjaïa	52
3.1.7.1 Production énergétique annuelle	52
3.1.7.2 Le stockage d'hydrogène.....	53
3.1.8 Comparaison entre la production électrique et la consommation de l'électrolyseur	53
3.2/ Site de Tiaret :	53
3.2.1 Données d'entrées	55
3.2.2 Profile de consommation	56
3.2.3 L'Aérogénérateur	56

3.2.3.1 La courbe de puissance.....	60
3.2.4 Convertisseur.....	60
3.2.5 L'électrolyseur	60
3.2.6 La pile à combustible	61
3.2.7 Le réservoir d'hydrogène	61
3.2.8 Simulation du système hybride (SEH) à la région de Tiaret.....	62
3.2.8.1 Production énergétique annuelle	63
3.2.9 Comparaison entre la production électrique et la consommation de l'électrolyseur	64
3.2.9.1 Production énergétique du SEH (éolienne + pile à combustible) :	65
3.3/ Site d'Adrar	65
3.3.1 Données d'entrées	65
3.3.2 L'aérogénérateur	68
3.3.3 Convertisseur.....	69
3.3.4 L'électrolyseur	69
3.3.5 La pile à combustible	70
3.3.6 Le réservoir d'hydrogène	70
3.3.7 Simulation du système hybride de la région d'Adrar.....	71
3.3.7.1 Production énergétique annuelle	72
3.3.7.2 Le stockage d'hydrogène.....	72
3.3.8 Comparaison entre la production électrique et la consommation de l'électrolyseur	73
3.4 Comparaison des 3 sites (Bejaia, Tiaret et Adrar).....	76
4/ Conclusion.....	79
Conclusion et perspectives	81
Références bibliographique.....	83

Liste de figures :

Figure 1.1 : Evolution de la consommation énergétique mondiale	5
Figure 1.2 : Schémas d'un système éolienne hybride OFF-GRID	2
Figure 1.3 : moulin à vents pompe eau	7
Figure 1.4 : Première éolienne électriques 12 KW.....	7
Figure 1.5 : Eolienne GEDSER 200KW	8
Figure1.6 : projets éoliens autonomes à hydrogène Utsira.....	10
Figure 1.7 : Capacité des éoliennes installées dans le monde 2001-2016.....	11
Figure 1.8 <i>Comparaison de production d'hydrogène en 3 sites différents en Algérie</i>	11
Figure1.9 <i>Taux de production d'hydrogène sur 7 sites différents en Algérie</i>	12
Figure 1.10 : <i>Projet Enertag & H2BER Allemagne 2011</i>	12
Figure 1.11 : Tyer Wind	14
Figure 1.12 : <i>Effet de la vitesse du vent sur la production d'électricité</i>	15
Figure 1.13 : <i>les différents types de PAC</i>	16
Figure 2.1 : Les composants principaux du système SEH autonome	21
Figure 2.2 : anémomètre.....	22
Figure 2.3 : Parc éolien.....	25
Figure 2.4 : Éoliennes à axe horizontal Amont	25
Figure 2.5 : Éoliennes à axe horizontal Aval	25
Figure 2.6 : éolienne Darrieus	26
Figure 2.7 : éolienne Savonius	26
Figure 2.8 : Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales	27
Figure 2.9 : : les composants principaux d'une éolienne	28
Figure 2.10 : Représente le mécanisme de conversion d'énergie cinétique en énergie électrique	29
Figure 2.11 : Courbe de puissance d'une éolienne.....	32
Figure 2.12 : Schéma de principe d'électrolyseur alcaline.....	33

Figure 2.13: Schéma de principe d'électrolyseur PEM.....	33
Figure 2.14 : Electrolyseur	34
Figure 2.15 : Fonctionnement de la pile à combustible	36
Figure 2.16 : Réservoir de stockage d'Hydrogène	19
Figure 2.17 : Galette solide formée d'hydrogène et de métal	40
Figure 3.1 : Interface Homer_ différentes Zones	42
Figure 3.2 : Interface Homer _ choix des équipements.....	43
Figure 3.3 : Interface Homer - équipement sélectionnés.....	43
Figure 3.4 : Interface Homer_ Ressources	43
Figure 3.5 : interface Homer _ Simulation.....	44
Figure 3.6 : Interface Homer_ Fenêtre des résultats.....	44
Figure 3.7 : Évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région de Bejaia à 10m du sol	45
Figure 3.8 : Facture d'électricité d'une maison à Béjaia en été	46
Figure 3.9 : Charge électrique moyenne horaire en Kw (50 foyers)	47
Figure 3.10 : Caractéristiques aérogénérateur E4660 85KW	48
Figure 3.11 : courbe de puissance de l'aérogénérateur END-85.....	49
Figure 3.12 : Composants finaux utilisée pour le site de Bejaia	51
Figure 3.13 : Comparaison entre la production de l'aérogénérateur, la production de la pile combustible et la consommation total du mois de juillet	52
Figure 3.14 : Production et consommation annuelle du système hybride.....	52
Figure 3.15 : Evolution du stockage de l'hydrogène.....	53
Figure 3.16 : Variation de la consommation d'électrolyseur en fonction de la production de l'aérogénérateur.....	54
Figure 3.17: Production Journalière de l'aérogénérateur et de la PAC	54
Figure 3.18 : Comparaison entre la production annuelle de l'éolienne, la PAC et la consommation totale	55
Figure 3.19 : Évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Tiaret à 10m du sol	56
Figure 3.20 : Facture d'électricité d'une maison à Tiaret	57
Figure 3.21 : consommation journalière de 50 maisons dans la région de Tiaret	58
Figure 3.22 : caractéristique de l'aérogénérateur WES250.....	59
Figure 3.23 : la courbe de puissance en fonction de vitesse de vent pour WES250.....	60

Figure 3.24 : Comparaison entre la production de l'aérogénérateur, la production de la pilecombustible et la consommation total du mois d'aout	62
Figure 3.25 : Évolution du stockage de l'hydrogène durant le mois de juillet.....	63
Figure 3.26 : Comparaison entre la production électrique d'éolien WES250 et la consommation de l'électrolyseur.....	64
Figure 3.27 : Production électrique journalière de l'aérogénérateur et de la PAC en Kwh pourle mois du juillet.....	65
Figure 3.28 : Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Adrar à10m du sol.....	66
Figure 3.29 : facture d'électricité d'une maison à Adrar.....	66
Figure 3.37 : Charge électrique moyenne horaire en KW/h (50 foyers)	67
Figure 3.38 : Caractéristiques aérogénérateur Enercon E33	68
Figure 3.39: Courbe de puissance Enercon E330.....	69
Figure 3.40 : Comparaison entre la production de l'aérogénérateur, la production de la pilecombustible et la consommation total du mois d'Aout	71
Figure 3.41 : Evolution du stockage de l'hydrogène du mois d'aout.....	73
Figure 3.42 : Variation de la consommation d'électrolyseur en fonction de la production del'aérogénérateur	74
Figure 3.43: Production de l'aérogénérateur et de la PAC pour le mois d'aout	74
Figure 3.44 : Production horaire de l'aérogénérateur et de la PAC	75
Figure 3.44 : Comparaison entre la production annuelle de l'éolienne, la PAC et la consommation totale	75
Figure 3.45 : Comparaison de production électrique pour les 3 éoliennes sélectionnée....	76
Figure 3.46 : Comparaison de consommation électrique des 3 sites.....	77
Figure 3.47 : Comparaisons de la production électrique des 3 PAC sélectionnée	78

Liste de tableaux :

Tableau 2.1 : récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales.....	27
Tableau 2.2 : domaine d'application d'hydrogène	38
Le tableau 3.1 représente les caractéristiques géographiques de la station de mesure de Bejaia	45
Tableau 3.2 : Caractéristiques du convertisseur utilisée sur le site de béjaia.....	49
Tableau 3.3: Propriétés de l'électrolyseur	50
Tableau 3.4 : Propriétés de la PAC	50

Tableau 3.5 : Propriétés du réservoir d'hydrogène	51
Tableau 3.6 : Production du système hybride	52
Tableau 3.7 : Consommation du système hybride	52
Tableau 3.7: Caractéristiques géographiques de la station de mesure « Tiaret »	55
Tableau 3.8 : Caractéristiques du convertisseur utilisée dans ce site	60
Tableau 3.9 : Propriétés de l'électrolyseur	61
Tableau 3.10 : Propriétés de la PAC	61
Tableau 3.11 : Propriétés du réservoir d'hydrogène	61
Tableau 3.12 : Production du SEH.....	63
Tableau 3.13 : Consommation électrique.....	63
Tableau 3.14 : Caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Adrar	65
Tableau 3.15 : Caractéristiques du convertisseur utilisée dans ce site	69
Tableau 4.16: Propriétés de l'électrolyseur.....	69
Tableau 3.17 : Propriétés de la PAC	70
Tableau 3.18: Propriétés du réservoir d'hydrogène	70
Tableau 3.19: Production du système hybride	72
Tableau 3.20: Consommation du système hybride	72

Liste des abréviations :

P_{vent} : puissance instantanée du vent

P_i : la puissance du vent

P_{disp} : La puissance disponible

P_m : la puissance moyenne

P_{mt} : la Puissance moyenne totale

P_{rec} : La puissance moyenne récupérable.

P_{elec} : La puissance électrique.

P_{vent} : La puissance instantanée du vent.

M_{air} : la masse volumique de l'air

V_m : vitesse moyenne du vent

N : nombre naturel

V : vitesse instantanée du vent

A : la surface balayée par le vent

E_v : L'énergie du vent

E_c : L'énergie cinétique

m : la masse d'air

Π : constante d'Archimède

R : rayon du cercle formé par les pales

ρ : densité d'air

S : la surface des pales.

C_p : le coefficient de puissance.

Ω : Vitesse angulaire du rotor de l'éolienne.

λ : La vitesse relative.

η : Le rendement instantané à la vitesse V .

Résumé

Dans cette étude nous présentons un dimensionnement d'un système hybride éolien-hydrogène dont le but d'alimenter 03 sites différents en Algérie (Bejaia, Tiaret, Adrar).

Ce système a pour objectif de produire de l'électricité à partir d'un système éolien comportant un système de production d'hydrogène par électrolyse (SEH). Alors que l'éolien produit d'énergie électrique lorsque on note une présence du vent, l'électrolyseur profite d'une certaine partie d'énergie pour la production d'hydrogène au moment d'excès d'électricité comme une forme de stockage, afin de l'utiliser plus tard par la pile à combustible pour répondre à la demande en cas d'absence du vent, ainsi un fonctionnement en alternance des deux systèmes pour une production autonome optimal.

Abstract

In this study we present a sizing of a hybrid wind-hydrogen system whose purpose is to supply 03 different sites in Algeria (Bejaia, Tiaret, Adrar).

The purpose of this system is to produce electricity from a wind power system comprising a system for producing hydrogen by electrolysis (SEH). While wind power produces electrical energy when there is a presence of wind, the electrolyzer takes advantage of a certain part of energy for the production of hydrogen when there is excess electricity as a form of storage, in order to use it later by the fuel cell to meet demand in the absence of wind, thus alternating operation of the two systems for optimal autonomous production.

زُودم في هذه الدراسة نحجّ مّا لنظام هجّين موائى وهيدروجين يهدف إلى توفير 03 موقّعا مّختلفا في الجزائر (بجاية ، تيارت (أدرار).

الغرض من هذا النظام هو إنتاج الكهرباء من نظام طاقة الرياح الذي يشمل على نظام الإنتاج الهيدروجين عن طريق بّيما نّديج طاقة الرياح كهربية عند وجود الرياح ، فان المخلّل الكهربائي ينفيد من (SEH) التلّويل الكهربائي جزء مّعين من الطاقة الإنتاج الهيدروجين عندما يكون هناك فائض من الكهرباء كشكل من أشكال التخزين ، من أجل استخداّمه الحوّا بواسطة خلية الوقود للبيئة الطّلب في غياب الرياح ، وبالتالي تشغيل النظام بالانواب من أجل الإنتاج. المسئول الأمل

Introduction générale

Au cours des dernières années, l'énergie éolienne est devenue une source importante d'énergie respectueuse de l'environnement l'une des sources d'énergies la plus prometteuses. Il existe plusieurs avantages d'utiliser l'énergie renouvelable, l'énergie du vent étant parmi une source d'énergie libre, propre et inépuisable. Cette énergie peut apporter des solutions appropriées au changement climatique mondial et à la crise énergétique. L'utilisation de l'énergie éolienne élimine essentiellement les émissions de CO₂, SO₂, NO_x et autres déchets nocifs, comme dans les centrales à charbon traditionnelles ou les déchets radioactifs dans les centrales nucléaires. De plus, cette dernière réduit considérablement la dépendance aux combustibles fossiles, ce qui renforce la sécurité énergétique mondiale. Selon l'agence d'énergie éolienne mondiale (WWEA) (World Wind Energy Association) la capacité éolienne mondiale a atteint 597GW, 50.1GW en 2018. Les deux principaux pays représentés sont la Chine plus de (200 GW en 2018) et les États-Unis Approche de (100 GW en 2018).[1]

Il existe des raisons particulières d'utiliser l'énergie éolienne en Algérie pour électrifier des sites distants qui ne peuvent pas être connectés au réseau électrique (montagne, déserts et villages isolés) afin de pouvoir satisfaire les villages isolés. En outre, cela aide à développer les industries nationales. Parmi tous les candidats répondant à ces critères, l'hydrogène constitue la meilleure réponse ; c'est l'élément le plus abondant dans l'univers ; non polluant. L'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables offre la promesse d'un vecteur d'énergie propre et durable.

Actuellement, la production d'hydrogène par le procédé d'électrolyse de l'eau utilisant l'énergie éolienne est considérée comme des sources propres qui réduisent les émissions de GES.

Le premier chapitre est basé sur l'état de l'art de la système hybride éolien-hydrogène.

Dans le deuxième chapitre on a présenté les différents composants du système pour un fonctionnement optimal autonome ainsi que leur caractéristique.

Dans le troisième chapitre nous avons utilisé le logiciel HOMER pour un dimensionnement et une simulation sur les 3 différents sites, ainsi nous avons présenté les différentes variabilités

de production et consommation électrique ainsi que plusieurs autres données résultantes du logiciel (variabilité de la vitesse du vent, excès et stockage d'hydrogène etc.).

Enfin, on termine par une conclusion générale qui regroupe les différents aspects étudiés.

Chapitre 01 : Etat de l'art du système hybride éolien- hydrogène

1.1 / Introduction :

Depuis le début de civilisation humaine de nombreux savants ont cherchés à exploiter les éléments de la nature pour produire de l'énergie. Au fil des siècles et le progrès technologique de nombreuses sources sont devenues exploitables pour transformer des matériaux en source d'énergie rentables tels qu'Uranium ou bien les hydrocarbures. Cependant ces sources sont connues pour être polluantes d'autant plus d'être limité dans notre planète.

Près de 90%, de l'énergie dans le monde provient de sources fossiles. Les combustibles fossiles incluent le gaz naturel, le charbon, le pétrole ainsi que certaines sources non conventionnelles comme le pétrole et gaz de schiste [2*].

Ces sources sont puisées de gisements et réservoirs déterminés ; donc, ne sont pas renouvelables. Les combustibles fossiles sont utilisés par l'homme principalement pour se chauffer, transporter, faire fonctionner les usines et produire de l'électricité. Les combustibles fossiles sont très populaires grâce à la facilité d'utilisation et au confort énergétique qu'ils ont introduit, particulièrement dans le secteur des transports. Il y a eu plusieurs tentatives afin de les remplacer.

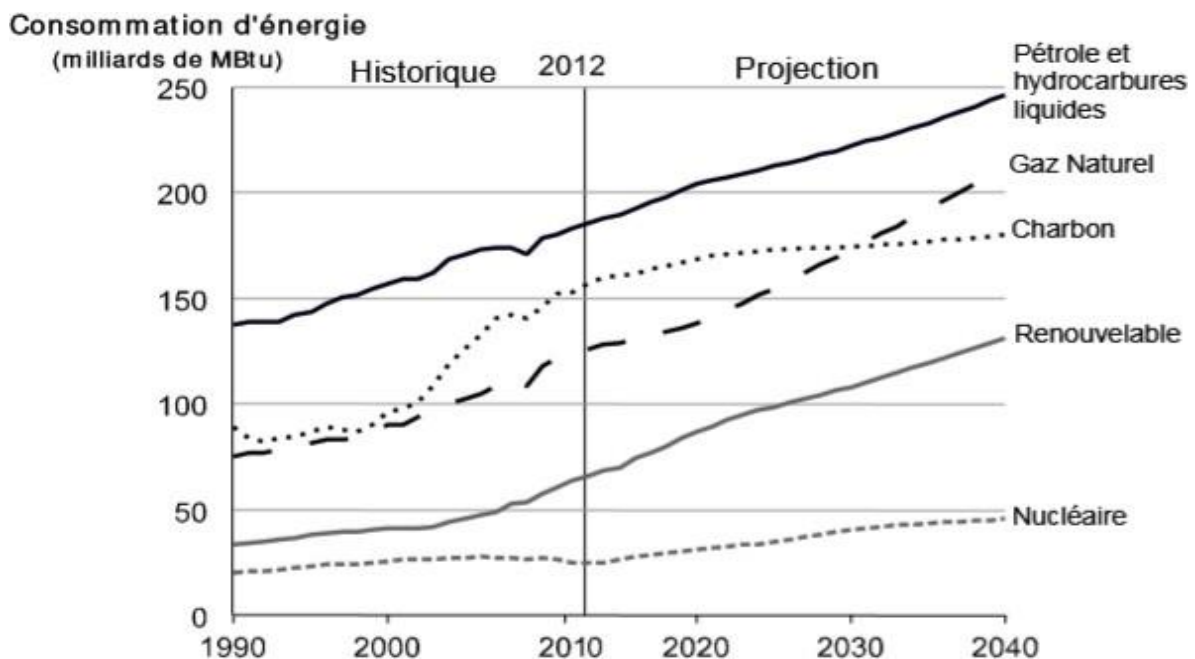


Figure 1.1 : Evolution de la consommation énergétique mondiale [3*]

Face à un besoin en énergie qui augmente constamment et des conflits internationaux, de nombreux pays se tournent davantage vers les énergies renouvelables. Ces derniers biens leurs rendement reste à améliorer, elles ne

demeurent pas moins négligeables pour subvenir aux besoins des communes voire de villes. Le system éolienne hybride est l'un des plus utilisés

notamment dans certains pays asiatiques tels que la Chine. Ce dernier exploite l'énergie du vent combiné à un hydroglisseur pour stocker autant d'énergie que possible.

La turbine/aérogénérateur génère de l'électricité lors du passage du vent, tandis que l'hydrolyser décompose l'eau dans un électrolyseur et stock l'Énergie sous forme d'hydrogène réutilisable à l'infinie dans des piles à combustibles, ces dernières permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre.[4]

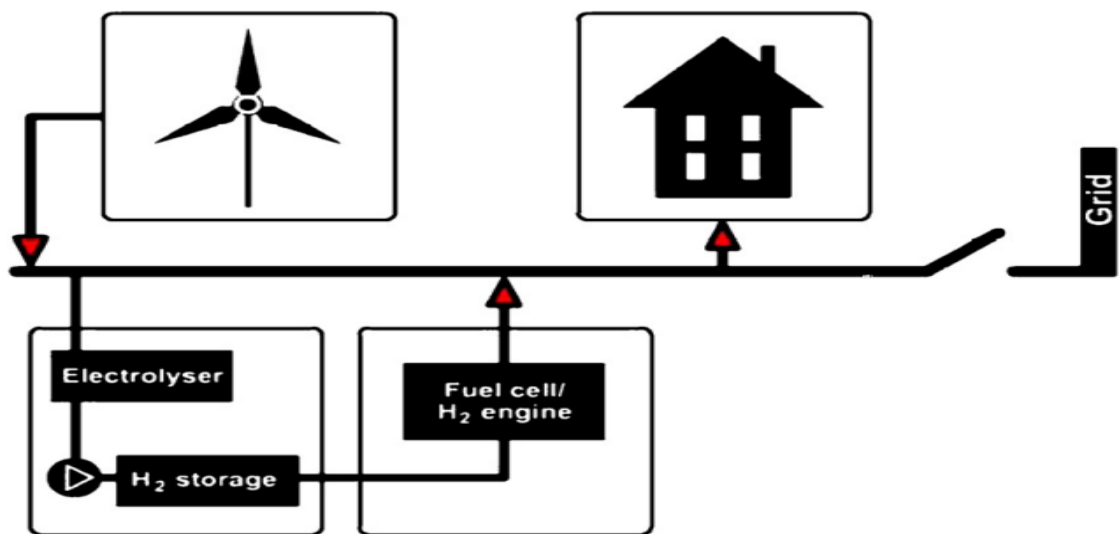


Figure 1.2 : Schémas d'un système éolienne hybride autonome. .[5]

L'hydrogène par électrolyse est le plus propre si l'électricité est d'origine renouvelable. Le coût de production est diminué si l'électricité pendant les heures creuses est employée.

L'utilisation de l'électricité durant les heures creuses mènerait à une utilisation améliorée des usines de production électrique et par conséquent à une réduction des émissions de CO₂.

L'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'hydrogène est plus favorable en termes de coût et pour l'environnement. [6]

1.2- Historique des éoliennes :

Antiquité : Dès l'aube de la civilisation, les moulins à vent se développent, l'homme à tenter de détourner les énergies naturelles pour ses propres fins. Le vent ne fait pas exception à la règle, les premières éoliennes ont vu le jour en Perse antique.

Apparus à l'an 600 au Moyen Orient, ils se sont ensuite implantés en Egypte. Les moulins à vent sont apparus en Europe (Grande Bretagne d'abord) un peu avant l'an 1000 puis ils se sont généralisés au XIIème siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical. Tout d'abord utilisée pour moudre le grain, elle fut ensuite utilisée dans des milieux tels que le travail du bronze et du fer.

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

Le XVIe siècle : L'énergie éolienne trouve de nouvelles activités, les occidentaux l'utilisent pour les scieries et pour pomper de l'eau. Cependant, l'Homme préférera l'énergie hydraulique, plus constante.

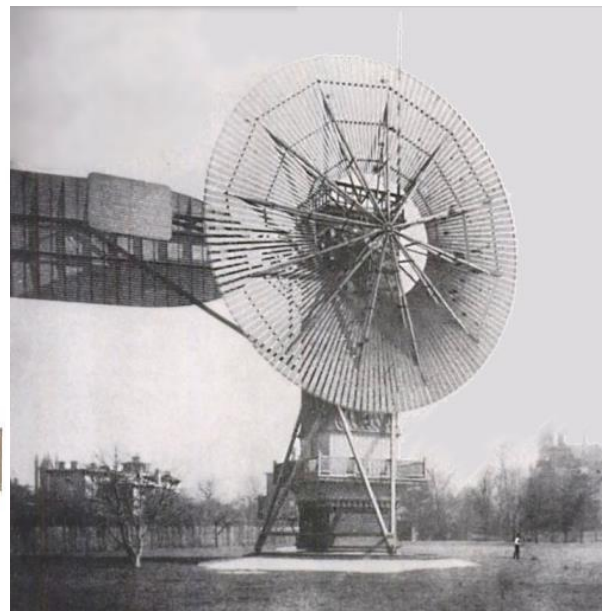
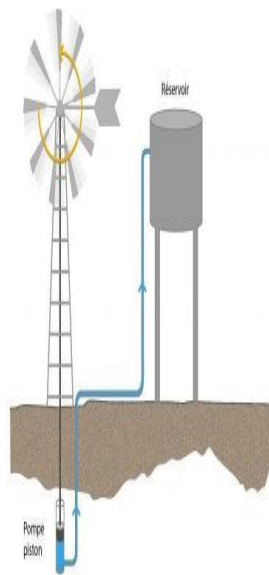


Figure 1.3 : moulin à vents pompe eau.[7]

Figure 1.4 : Première éolienne électriques 12 KW .[8]

1888 : L'apparition des premières éoliennes électriques se fait à la fin du XIXème siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush à Cleveland (Etats-Unis) qui met en place ce dispositif pour alimenter sa maison en électricité. Générant une capacité de 12 KW.

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.

1908 : Paul LACOUR 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.

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.



Figure 1.5 : Eolienne GEDSER 200KW [9]

Les énergies renouvelables ont de nouveau le vent en poupe après les deux chocs pétroliers et les parcs éoliens ne cessent de s'étendre. Ces machines partent également à la conquête de la mer, éolien offshore ou éoliennes flottantes, ce qui est prometteur pour la productivité énergétique.

A la base, L'énergie générée par les éoliennes alimentaient directement les foyers, les usines ou pour un usage industriel tout court. Par conséquent, une étude a montré que 40% de l'énergie électrique qui était à la base inévitablement perdue (*Gutiérrez-Martín et al*) pourrait être réinjectée dans le réseau électrique en alimentant le système d'une pile à combustible, d'un électrolyseur et d'un système de stockage de l'hydrogène [10].

1.3- Historique de l'hydrogène

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau en milieu alcalin est la première technologie à être utilisée pour la production d'hydrogène à une échelle industrielle. Par conséquent en raison de sa demande élevée en énergie son cout est élève.

C'est le facteur limitant de cette technologie, sauf pour les pays ou l'électricité n'est pas chère.

Par ailleurs, l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'énergie électrique est plus favorable en termes de cout et environnement (*E. Hosseini et all*), une réduction des émissions de CO₂, une réduction des nuisances sonores et de la pollution de l'air du site, unediminution de la consommation de carburant ainsi qu'une visibilité à long terme du coût de l'énergie [11]

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 étéouvertes dans les villes allemandes de Hambourg et de Munich.

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.

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 ».

1.4- Etat de l'art du système hybride éolien-hydrogène

En 2004, l'un des premiers grands projets éoliens autonomes à hydrogène a été mis en œuvre sur l'île isolée d'Utsira Le projet comprenait des éoliennes de 600 kW produisant une quantité importante d'énergie excédentaire, réutilisable grâce à l'hydrolyser et aux pilles. L'énergie

électrique généré par ce système, était utilisée pour alimenter des usages domestiques de la région.[12]

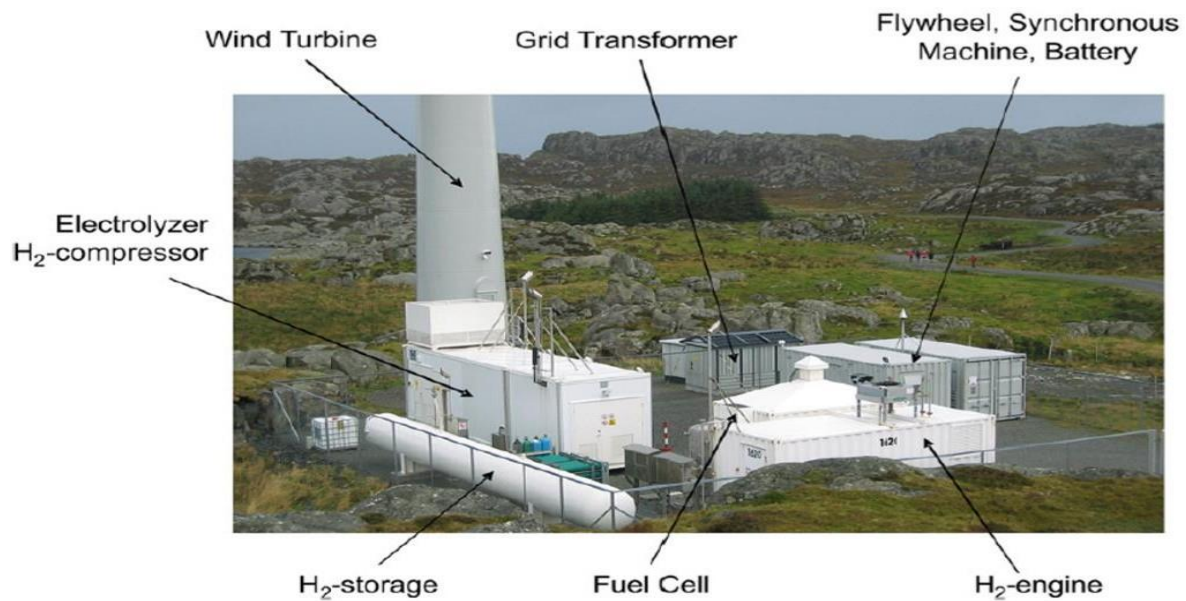


Figure 1.6 : projets éoliens autonomes à hydrogène Utsira .[13]

Pour un site isolé, un système hybride éolien hydrogène est le meilleur choix pour la production et le stockage d'électricité (*Khan MJ et all*), par conséquent l'énergie générée par l'éolienne dépend de la vitesse du vent dans le site en question, la taille et la puissance d'éolienne et d'autres critères que nous entamerons dans la deuxième partie.

Cette dernière est l'une des sources les plus développées actuellement et est toujours en cours de développement. Son utilisation ne cesse de se généraliser dans les régions les plus ventées de la planète. Des fermes éoliennes constituées d'aérogénérateurs de plusieurs mégawatts sont installées et fournissent de l'électricité au réseau conventionnel.

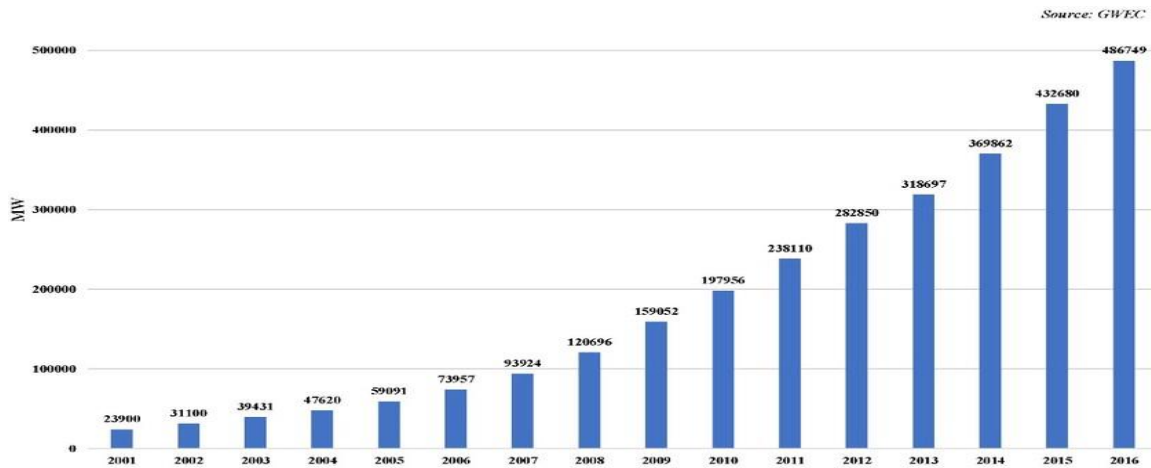


Figure 1.7 : Capacité des éoliennes installées dans le monde 2001-2016 .[14]

Pour les pays en cours de développement, le système hybride éolien-hydrogène est une option prometteuse, (Francois B, Mukherjee U, Rahmouni, S) pour ses avantages énergétique, économique et sans carbone. [15,15A,15B]

En Algérie, (Mohamed Douak et al) ont exploité les trois potentiels éoliens les plus élevés : ADRAR, Hassi R'MEL, TINDOUF, les données ont été analysées à l'aide de la fonction de distribution de probabilités de WEIBULL, l'Energie produite à ses sites est exploitée pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau en utilisant le système hybride éolien-hydrogène avec 4 éoliennes différentes. Les résultats montrent qu'il apparaît clairement que la production d'hydrogène dépend du site et de la taille de l'éolienne, La production maximale est observée à ADRAR, la seconde à Hassi R'MEL, et en fin à TINDOUF.[16]

Site	Turbine	H ₂ production (tH ₂ /yr)
Adrar	De Wind 48	36.290
	De Wind D6	76.122
	De Wind D7	98.719
	De Wind D8	113.994
Hassi-R'Mel	De Wind 48	35.296
	De Wind D6	74.262
	De Wind D7	95.124
	De Wind D8	112.241
Tindouf	De Wind 48	30.601
	De Wind D6	64.256
	De Wind D7	84.482
	De Wind D8	95.172

Figure 1.8 : Comparaison de production d'hydrogène en 3 sites différents en Algérie [17]

Il existe des raisons particulières d'utiliser l'énergie éolienne en Algérie pour objectif d'électrifier des sites éloignés qui ne peuvent pas être connectés au réseau électrique (montagne, déserts et villages isolés). (Maouedj R et al) En plus de développer les industries nationales. Cependant, les plus grands obstacles auxquels l'énergie éolienne est confrontée sont

l'intermittence du vent et les problèmes de stockage.[18]

D'autre part, (Lilia Aiche-Hamane et al) ont exploité 7 sites différents en Algérie pour la production d'hydrogène à partir d'une éolienne de 10 KW, la production annuelle d'hydrogène augmente lorsque la vitesse du vent augmente, cette dernière dépend aussi des caractéristiques de l'éolienne, l'analyse souligne que Adrar est le site le plus venté [19]

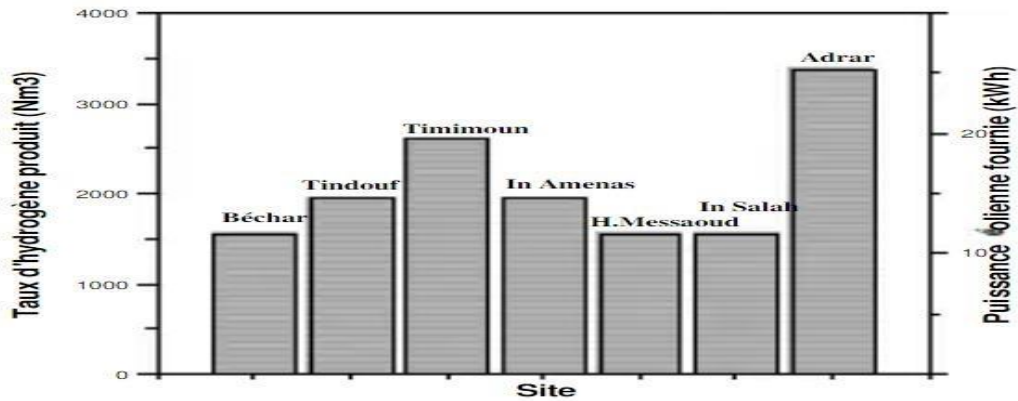


Figure 1.9 : Taux de production d'hydrogène sur 7 sites différents en Algérie [20]

En 2011, L'Allemagne a lancé le projet ENERTRAG, la première centrale électrique hybride éolienne-hydrogène au monde et a été par la suite complétée avec le projet H2BER qui a pour objectif d'utiliser le surplus d'énergie électrique du parc éolien ENERTRAG en alimentant un électrolyseur de McPhy Energy (20 à 100MW) et est utilisé pour produire de l'hydrogène pour être utilisé comme carburant dans des bus et automobiles fonctionnant à piles à combustible.

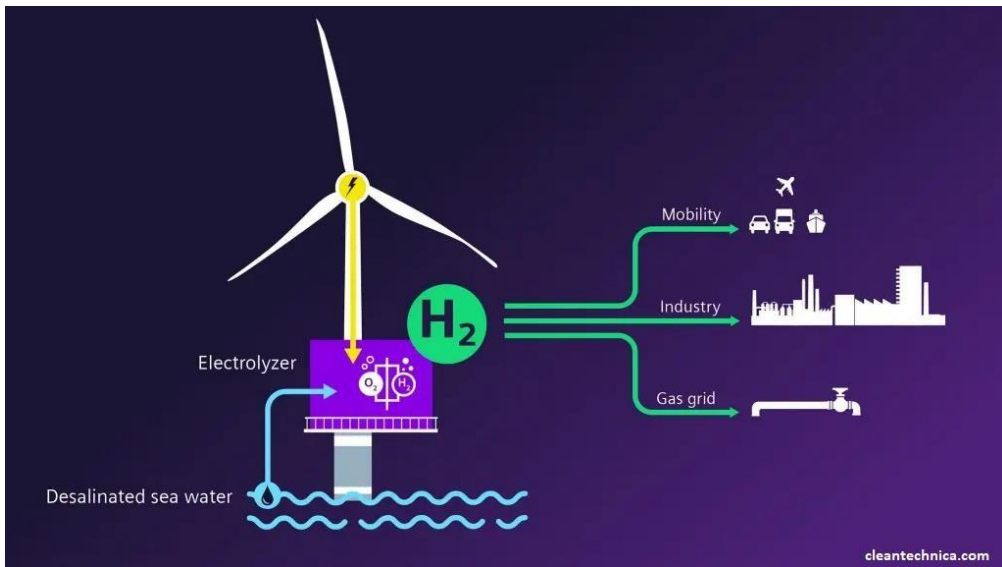


Figure 1.10 : Projet Enertrag & H2BER Allemagne 2011. [21]

En 2013, China National Electricity a proposé une nouvelle méthode de stockage de l'hydrogène à partir de l'énergie éolienne, et a souligné que le stockage efficace de l'hydrogène et la technologie des piles à combustible sont les principaux problèmes techniques du système.

2014 : le projet INGRID a été lancé en Italie, dans le but d'une démonstration industrielle qui consiste à produire, à partir d'énergie renouvelable, de l'hydrogène par électrolyse, le stocker sous forme solide. L'hydrogène stocké est réutilisé soit pour produire de l'électricité via une pile à combustible, soit pour alimenter le marché de l'hydrogène.[22]

(*Rau l Sarrias-Mena et al*) ont exploité le système hybride éolien-hydrogène en utilisant 4 types d'électrolyseurs différents, les résultats indiquent que les performances de l'électrolyseur jouent un rôle important sur la production d'hydrogène. [23]

En 2015, (*Mostefaoui, M et al*) ont fait une comparaison de la production d'hydrogène par électrolyse à partir de l'énergie photovoltaïque et de l'énergie éolienne, les résultats indiquent que :

- La quantité d'hydrogène produite dépend fortement du rayonnement solaire pour le système PV, la plus forte production d'hydrogène est obtenue en mars pour la région sud et juillet pour la région nord.
- La quantité d'hydrogène produite par l'énergie éolienne dépend de la vitesse du vent du site et sa variation saisonnière
- Le site d'ADRAR a été souligné pour sa capacité de productivité pour les deux systèmes.
- Enfin, l'existence d'un réservoir d'eau artésien dans la région sud (près de la région d'ARAR) fait que ce site est parmi les plus favorables à la production d'hydrogène par électrolyse.[24]

Début 2017, une entreprise tunisienne innove avec un nouveau type d'éolienne inspirée du battement d'ailes des oiseaux *Tyer Wind*, Un design en forme d'aile d'oiseau notamment connu pour sa capacité à faire du sur place en battant ses ailes très rapidement pour une plus grande efficacité comparée aux éoliennes classiques et [25]

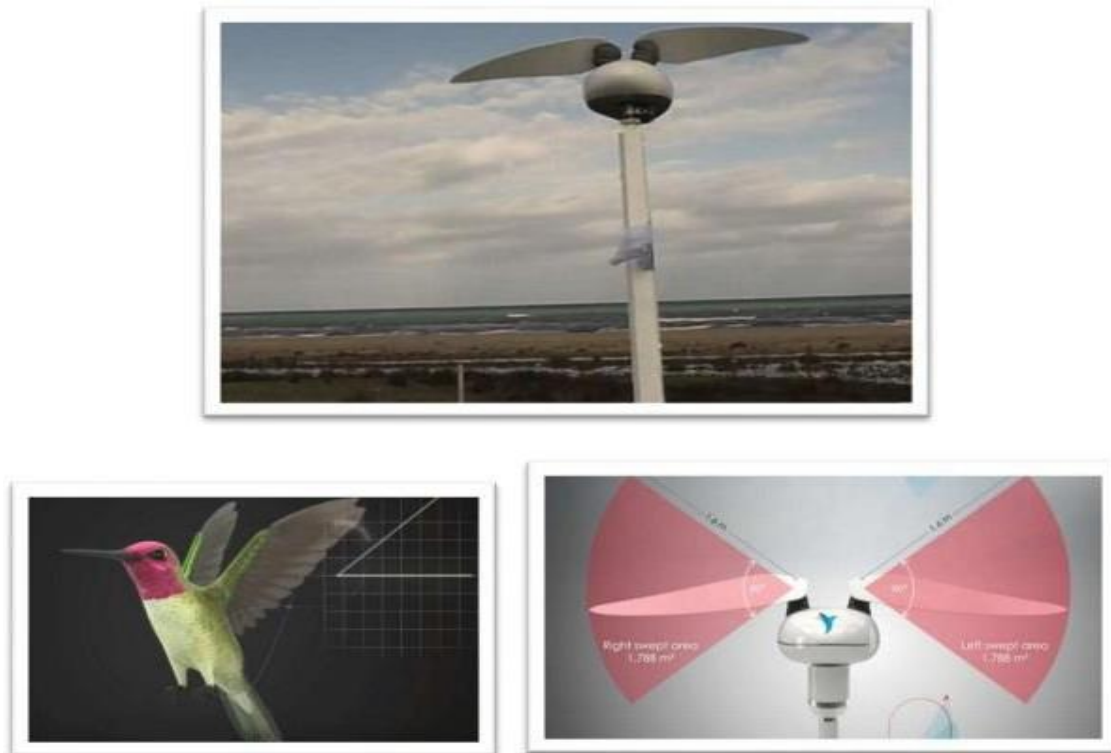


Figure 1.11 : *Tyer Wind* [26]

(Yin W, Rui X et al) ont souligné que la technologie de production d'hydrogène par l'énergie éolienne s'est développée rapidement, mais il reste encore un problème de faible rendement de production d'hydrogène et de forte consommation d'énergie pour la production d'hydrogène [27]

En 2018 (Haris Ishaq et al) ont analysé un système d'énergie éolienne-hydrogène intégré à une pile à combustible à hydrogène et un électrolyseur à membrane échangeuse de protons pour fournir de l'électricité à 25 domiciles, De plus, la chaleur générée dans la pile à combustible est utilisée pour le chauffage. [28]

L'efficacité énergétique globale est atteinte approximativement à 19.3% pour une vitesse du vent de 3 m/s et au maximum à 39.5 % avec une vitesse du vent de 9 m/s.

Les résultats soulignent également que la chaleur générée dans la pile à combustible pour le chauffage dépende des performances de l'éolienne et la variation du vent du site.

En 2019 : (Fang, R et al) ont analysé l'impact de la variation du vent sur l'électrolyseur alcalin, On note que le déclenchement de l'électrolyseur dépend de l'excès de l'énergie électrique de la turbine.

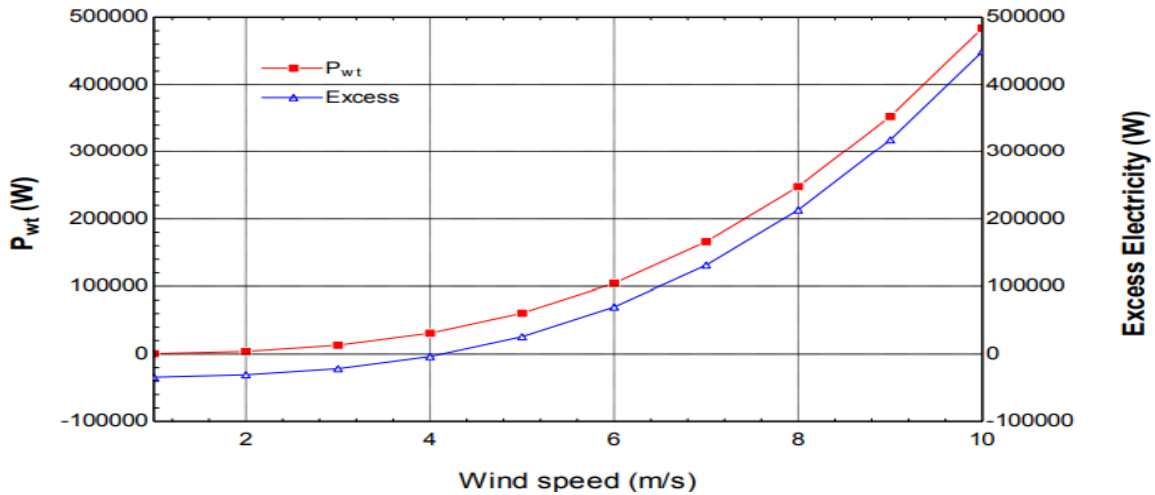


Figure 1.12 : Effet de la vitesse du vent sur la production d'électricité . [29]

Les résultats ont indiqué que :

- La variation fréquente de l'énergie éolienne conduira à des démarrages et arrêts des électrolyseurs alcalins, qui entraîneront la réduction de la production d'hydrogène, et même dégradent la sécurité et la durée de vie des électrolyseurs alcalins.

D'un autre côté, une stratégie adaptative pour contrôler le fonctionnement des électrolyseurs a été proposée, le temps de travail des électrolyseurs alcalins pourrait être considérablement réduit tandis que la production d'hydrogène sera fortement augmentée. Ceci est bénéfique pour le fonctionnement des électrolyseurs alcalins.

De même, (Liang, Y) a proposé d'autres stratégies de contrôle pour s'adapter aux fluctuations. [30]

En 2020 : (Firtina-Ertis et al) ont proposé un dimensionnement optimal d'un système hybride éolien-hydrogène autonome isolé pour une maison zéro énergie (Off-GRID) [31]

Les résultats montrent que :

- L'augmentation du nombre de piles à combustible contribuera à réduire le volume du réservoir de stockage d'hydrogène dans un système puisque l'utilisation d'une pile à

combustible à ses limites de puissance maximale augmente la consommation de quantité d'hydrogène et ainsi réduire le volume de stockage.

Par ailleurs, (V. Solomin *et al*) ont analysé les moyens de stockage d'électricité en dépend de l'utilisation pour arriver à la conclusion que le stockage d'énergie électrique via des batteries est préférable pour de court terme tandis que le stockage via hydrogène était préférable pour le long terme.[32]

L'objectif de ce système est l'utilisation de l'énergie excédentaire à travers un électrolyseur pour la production d'hydrogène lequel sera reconverti en électricité via une pile à combustible pour être injecter dans le réseau électrique. Ainsi la performance de la pile à combustible est évaluée selon son rendement, et de l'ordre de démarrage.

En ce qui concerne cette dernière, (I. Guerra *et al*) ont étudié les 6 types de piles à combustible, qui ont en général de faibles rendements électriques (40- 60) % les résultats indiquent que :

- Les piles à combustibles de type (DMFC), (AFC) répondent à des gammes de puissances relativement faibles. Ce qui réduit le choix aux quatre technologies restantes, (PEMFC), la (PAFC), (MCFC), (SOFC).
- La (PAFC) et la (MCFC) ont un rendement allant jusqu'à 55%, (M.Boudellal) mais présentent un temps de démarrage très lent de l'ordre de 1-3 heures [33]
- Au-delà de la maturité de la pile à oxyde solide (SOFC), elle est surtout intéressante lorsqu'il s'agit d'un usage où la chaleur peut être utilisé.

Seule la technologie de pile à membrane à échangeuse de proton (PEMFC) reste intéressante.

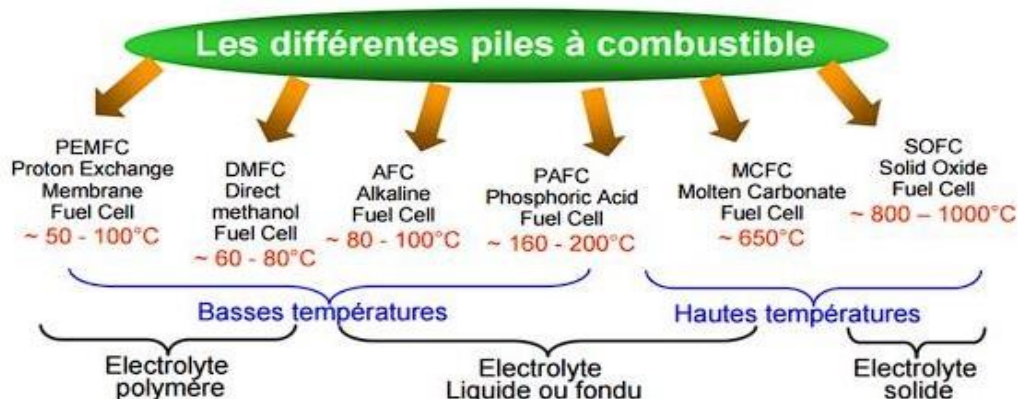


Figure 1.13 : les différents types de PAC [34]

Le développement de la technologie de production d'hydrogène par l'énergie éolienne est toujours confronté à de nombreux problèmes, tels que la structure des turbines, l'optimisation

de l'électrolyseur pour les fluctuations de l'énergie éolienne, la durée de vie de la pile à combustible et les équipements de stockage d'hydrogène à grande capacité [33]

1.5- Etat de l'art des logiciels

1.5.1 Logiciel d'études pour le système hybrides éolien-hydrogène :

Plusieurs logiciels de dimensionnement se présente, parmi lesquels les plus connus sont [35]:

- **HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)** – En utilisant ce logiciel, il est possible de modéliser des systèmes hybrides qui travaillent en parallèle avec le réseau électrique ou en régime autonome. Il dispose de modèles de générateurs conventionnels et à sources d'énergie renouvelables. De plus, le logiciel contient des algorithmes d'optimisation à l'aide desquels il est possible de choisir le meilleur système hybride ;

- **Hybrid2** : Ce logiciel est conçu pour étudier divers éléments. Il dispose d'outils pour effectuer des analyses économiques. La présentation des résultats peut être produits de deux manières – des résultats synthétisés ou des résultats détaillés avec variation dans le temps.

- **RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator)** – c'est un logiciel de simulation pour différents modes d'un approvisionnement en courant alternatif. Il peut être utilisé pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques, de générateurs éoliens et diesel dans des systèmes hybrides isolés.

- **SOLSIM** : Il est développé en (Allemagne). C'est un outil de simulation qui permet aux utilisateurs de concevoir, d'analyser et d'optimiser des systèmes d'énergie hybrides. Les sources d'énergie comme panneaux PV, autrement dit C'est un logiciel qui comporte un programme de simulation général appelé SOLSIM, une unité d'optimisation de l'angle d'inclinaison des panneaux PV appelée (SolOpti), et l'unité simulant des générateurs éoliens Appelée (SolWind).

- **SOMES** : C'est un outil de simulation et d'optimisation des systèmes d'énergies renouvelables, Les composants disponibles sont : PV, éolienne, générateur diesel, réseau électrique, batteries de stockage et plusieurs types de convertisseurs. La simulation est réalisée sur une base de temps horaire. Le système optimal est recherché en comparant les coûts de plusieurs systèmes.

Notre étude a objectif de modéliser le système hybride éolien-hydrogène ; pour réaliser cette simulation on s'intéresse uniquement au logiciel Homer.

1.6- Conclusion :

Le monde a prêté plus d'attention aux énergies renouvelable pour les 30 années récentes, particulièrement au système des éolien-hydrogène, alors que les pays ne cessent pas d'améliorer et d'innover le système pour le rendre rentable commençant par le moulin qui existe depuis longtemps pour produire d'énergie modeste en comparaison aux système moderne. Les recherches et découvertes des scientifiques ont permis à chaque fois d'ajouter une valeur positive aux système éolien hybride, ce que on peut voir clairement dans les composants du système SEH qui n'arrêtent pas d'avoir des nouveaux prototypes et des nouvelles versions mieux que les anciennes tel que les électrolyseurs alcalins et PEM. Grace ace développement dans le système hybride éolien-hydrogène on peut couvrir des sites isolés et répondre à leur besoin en énergie électrique.

Chapitre 02 : Méthodologie

2.1 / Introduction :

Le système hybride éolien-hydrogène se compose de différents composants qui ont tous des fonctions indispensables pour une meilleure production d'électricité. L'aérogénérateur présente la source principale de production d'énergie électrique, ensuite l'électrolyseur a objectifs de convertir l'excès d'énergie en hydrogène. Cette forme de stockage utilisée aura besoin d'une pile à combustible pour reconvertir l'hydrogène en énergie électrique afin de combler la demande lorsque l'éolien ne produit pas suffisamment d'énergie à cause d'absence du vent. Dans ce chapitre nous présenterons le principe de fonctionnement de chaque composant du système hybride éolien-hydrogène (SEH).

2.2 Présentation du système hybride éolien-hydrogène :

Le système SEH a pour objectif de produire sur site de l'électricité à partir de l'éolien qui est la source primaire 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 puissance éolienne faible ou nulle. L'hydrogène est produit par un électrolyseur, ensuite stocké sous forme de gaz comprimé.

Les principaux bénéfiques potentiels de ce système 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 de l'aérogénérateur nécessaire pour garantir l'approvisionnement de toute l'année, car L'énergie éolienne excédentaire pendant les périodes de vents élevés peut être stockée sous forme d'hydrogène pendant de longues périodes. Reconstituer l'approvisionnement pendant les périodes de vent faible.

Les principaux composants de notre système sont comme suivant :

- Aérogénérateur (1) : source d'énergie primaire pour extraire l'énergie du vent.
- Convertisseur (2) : effectue la conversion de AC à DC, DC à AC ou DC/DC et contrôle de la tension de sortie.
- Electrolyseur (3) : production d'hydrogène gazeux à partir du surplus d'électricité
- Stockage d'hydrogène (4) : stockage d'hydrogène gazeux

- Pile à combustible (5) : production d'électricité à partir d'hydrogène gazeux
- Charge (6) : la résidentielle ; appareils électroménagers et autres appareils consommateurs d'électricité.

L'aérogénérateur produit de l'électricité qui est alimentée via un convertisseur directement à la charge avec tout excédent sur la demande étant dirigé vers un électrolyseur de production d'hydrogène pour le stockage. Un dispositif de contrôle de puissance commute le système pour tirer sur l'hydrogène du stockage pour une utilisation dans la pile à combustible pour générer l'électricité afin de répondre à tout déficit de la demande en cas d'énergie éolienne insuffisante.

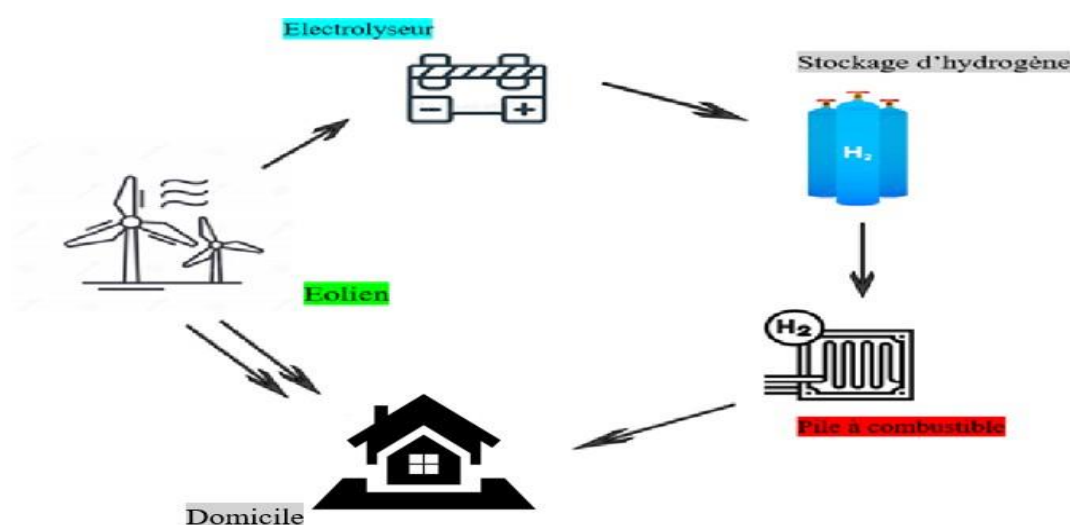


Figure 2.1 : Les composants principaux du système SEH autonome [36]

2.3 / La production d'énergie éolienne :

Le vent est le mouvement horizontal de l'air causé par les forces du gradient de pression. Lorsqu'il y a une différence de pression entre deux points, l'air s'écoule d'un endroit à haute pression vers un endroit à basse pression. Selon les mots des météorologues, on dit que l'air passe de la haute pression à la basse pression.

Dans l'atmosphère, la pression atmosphérique pousse l'air de l'endroit où la pression terrestre est la plus forte vers l'endroit où elle est la plus faible.

La vitesse du vent est mesurée par des anémomètres, qui ont été inventés en 1450 par l'architecte italien Leon Battista Alberti. [37]



Figure 2.2 : anémomètre . [38]

2.3.1La puissance instantanée du vent [39]

Une éolienne est une machine qui convertit l'énergie éolienne en énergie mécanique. Premièrement, il faut quantifier l'énergie disponible, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent a une certaine vitesse "V" à un instant donné et traverse une certaine surface "A", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.1)$$

Alors, depuis cette relation on peut conclure :

- que la puissance disponible du vent à un instant donné dépend du cube de la vitesse du vent. En conclusion, si vous avez un vent 2 x plus rapide, vous avez 8 x plus de puissance. On comprend dès lors tout l'intérêt de placer des éoliennes dans des sites venteux. Ce n'est donc pas un caprice de technicien puriste, on voit que le potentiel d'énergie dépend fortement de la vitesse du vent. C'est une condition nécessaire et non une option.

- que la puissance disponible dépend directement de la surface traversée par le vent. Si on la considère équivalente à la surface balayée par le rotor d'une éolienne, la puissance instantanée du vent (telle qu'évaluée par la relation ci-dessus) représente le maximum de puissance disponible que l'éolienne peut convertir. On sait que la surface balayée par une

éolienne dépend du rayon de son rotor ($\pi \cdot R^2$). Du coup, la puissance disponible dépend du carré du rayon de l'éolienne. En conclusion, si vous avez un rotor 2 x plus long, vous avez 4 x plus de puissance.

- que la masse volumique de l'air a une influence sur la puissance disponible. On sait que la masse volumique de l'air dépend de la température, de l'humidité et de la pression atmosphérique. Suivant ces paramètres, on peut obtenir des variations de 20 % de la masse volumique et donc de la puissance instantanée du vent.

Ainsi, au niveau de la mer, par $-10\text{ }^\circ\text{C}$ un mètre cube d'air pèsera 1,341 kg tandis qu'à $30\text{ }^\circ\text{C}$, il n'en pèsera plus que 1 164 kg. [39]

2.3.2L'énergie du vent :

C'est une chose de comprendre la force instantanée du vent, mais c'est son énergie qui nous intéresse. Il y a donc une notion de temps qui doit intervenir quelque part. Pour connaître l'énergie du vent sur une période de temps, il faut intégrer son énergie sur la même période. La connaissance de la vitesse moyenne du vent ne suffit pas, il faut comprendre l'évolution de la vitesse du vent au cours de l'étude et synthétiser les apports. [39]

2.3.4 Explication avec quelques formules

Supposons que l'on dispose de mesures du vent à intervalles réguliers pendant une période de plus ou moins une année. L'intervalle entre chaque mesure est de "dt" secondes et le nombre d'échantillons est de "N" mesures. La durée de la période d'observation, "T", est donc $N \cdot dt$. On obtient un échantillon de différentes vitesses, V_1 jusque V_N . Il est donc possible d'estimer simplement la vitesse moyenne du vent, U_m , pendant cette période de mesure :

3)
$$P = \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad (2.2)$$

Pour obtenir l'énergie, il faut sommer les contributions des différentes mesures. Si la puissance du vent associée à une mesure de vitesse V_i vaut

$$P_i = 1/2 * \rho_{air} * A * (V_i)^3 \quad (2.3)$$

L'énergie du vent, E_v , vaut alors :

$$E_v = (P_1 + P_2 + \dots + P_{N-1} + P_N) * dt \quad (2.4)$$

En fait, il faut connaître l'évolution de la vitesse du vent durant toute la période étudiée. Si on ne connaissait que la vitesse moyenne du vent, V_m ne suffirait pas pour déterminer l'énergie, E_v . En effet, on ne peut pas calculer l'énergie du vent au moyen de la vitesse moyenne. [39]

2.4 Éolienne :

Les éoliennes sont un composant indispensable pour les systèmes de production d'hydrogène. Il convertit l'énergie du vent en énergie électrique qu'on profite pour obtenir de l'hydrogène. Pour les systèmes alimentés par l'énergie éolienne, le critère principal est de produire suffisamment d'énergie pour répondre à la demande électrique quotidienne.

Bien qu'il existe de nombreux fabricants d'éoliennes dans le monde, le produit est référé à Generic et Enercon pour construire le modèle d'éolienne car ils détiennent une part dominante des ventes du marché en L'Europe.

Les éoliennes sont disponibles dans une variété de tailles, allant de quelques KW de puissance nominale pour un usage personnel à plusieurs MW dans des parcs éoliens commerciaux. Ces turbines ont généralement un axe horizontal à trois pales. Les grands aérogénérateurs utilisés dans les parcs éoliens ont la capacité à contrôler leur puissance et leur fréquence car ils doivent alimenter le réseau, qui a des normes spécifiques. Ces turbines peuvent être contrôlées par des opérateurs dans presque tous les aspects tel que l'activation/la désactivation, le lacet et l'angle des pales. Les aérogénérateurs considérés dans le présent projet sont relativement petits, avec puissances nominales jusqu'à 100 kW, de marque Generic.

Ces turbines sont normalement utilisées dans plusieurs parcs éoliens en raison de leur conception simple et leurs faibles besoins d'entretien. Ils fonctionnent librement dans le vent et la plupart s'enrouleront ou se détourneront du vent pour éviter les dommages par vent fort. La puissance à la sortie est un courant alternatif triphasé, qui est ensuite redressé en courant continu.



Figure 2.3 : Parc éolien [40]

2.4.1 Classification des éoliennes selon le principe de fonctionnement : 2.4.1.1 distinction selon l'axe de rotation :

A) Eolienne à axe horizontal :

A.1) Eoliennes à axe horizontal Amont

Le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle.

Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif d'orientation. [41]

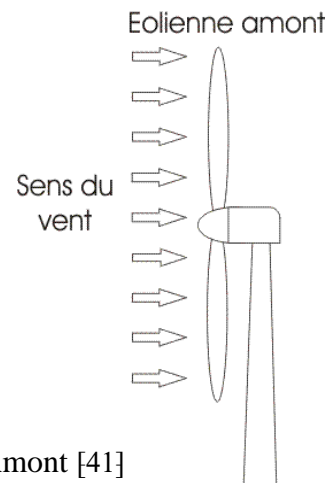


Figure 2.4 : Eoliennes à axe horizontal Amont [41]

A.2) Eoliennes à axe horizontal Aval

Le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible auto orientable. La disposition, turbine en amont est la plus

utilisée car elle est 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. [41]

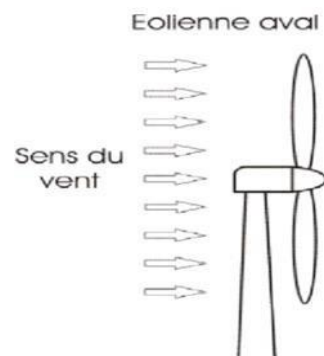


Figure 2.5 : Eoliennes à axe horizontal Aval [41]

B) Les Eoliennes à axe vertical (Perpendiculaire au vent)

Ce type d'éolienne se caractérise par son axe vertical. Il fonctionne sur un principe omnidirectionnel, qui a l'avantage de capter le vent d'où qu'il vienne, sans avoir besoin d'un mécanisme directionnel. Un autre avantage de ce type d'éolienne est la taille des pales, qui est moins restreinte par rapport au type à axe horizontal.

Plusieurs modèles d'éoliennes à axe vertical ont été conçus, mais les deux modèles les plus célèbres sont ceux de Darrieus et de Savonius. [41]



Figure 2.6 : éolienne Darrieus [41]



Figure 2.7 : éolienne Savonius [41]

2.4.1.2 Distinction selon le nombre de pales

On peut faire une distinction entre les éoliennes suivant le nombre de pales. [41]

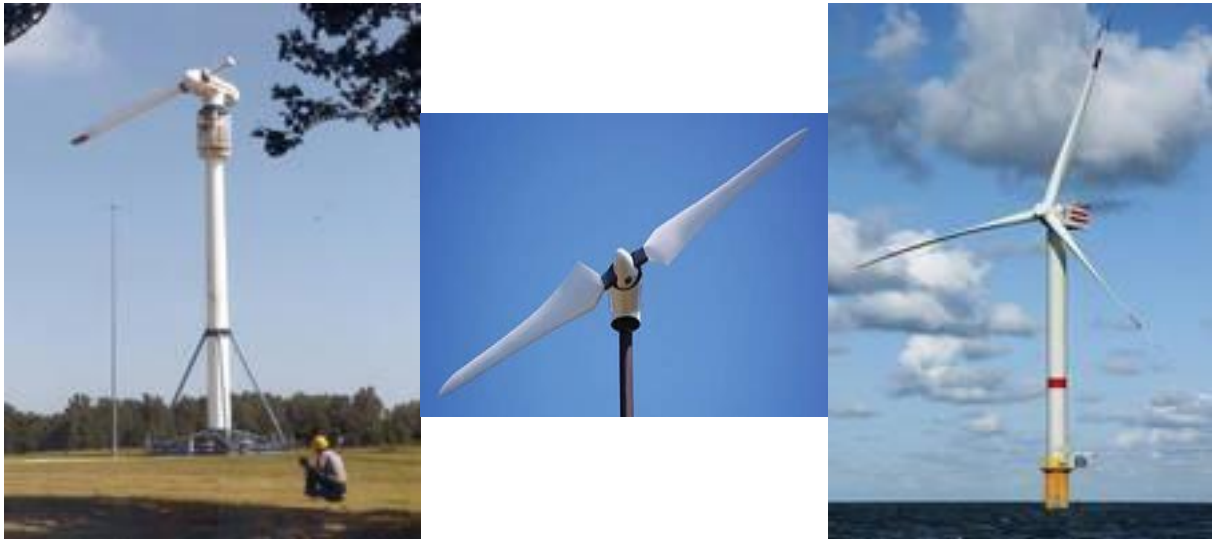


Figure 2.8 : Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales. [42]

Dans le cas des éoliennes à axe horizontal, la plupart des éoliennes ont 3 pales. En fait, c'est le meilleur compromis entre différentes contraintes. Les éoliennes à 3 pales (ou plus) tournent plus souvent que les éoliennes à 1 ou 2 pales, et nos rotors sont mieux équilibrés. D'un point de vue esthétique, l'effet de battement visuel est plus important pour les éoliennes de moins de 3 pales. L'efficacité aérodynamique, la capacité à convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique (et donc in fine en énergie électrique) équivaut à 2 à 4 pales. C'est une augmentation significative par rapport à 5. Le seul avantage d'avoir une éolienne à deux pales au lieu de trois est qu'elle sera moins chère, mais elle tournera moins souvent, ce qui signifie une durée de vie plus courte. On ne monte pas plus de 4 pales du fait de la résistance mécanique réduite : en effet, la "corde" des pales diminue au fur et à mesure que le nombre de pales augmente. [41]

Nombre de pâles	1	2	3	4	5
Équilibre du rotor	-	-	+	+	+
Esthétique (effet de battement visuel)	-	-	+	+	+
Rendement aérodynamique	-	=	=	=	+
Bruit et fatigue	-	-	+	+	+
Tenue mécanique	+	=	=	-	-

Tableau 2.1 : récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales. . [43]

2.4.2 La description d'un système éolien [44]

a. Ailes ou pales d'une éolienne

Les éoliennes modernes sont composées de 2 à 3 ailes, tournant autour d'un rotor à axe horizontal. Les pales de l'hélice d'une éolienne peuvent être en bois lamellé-collé, en plastique renforcé de fibre de verre, ou en métal... Le diamètre qu'elles balaiant varie de 40 m à 120 m.

b. La tour ou le mât d'une éolienne

L'hélice de l'éolienne est située en haut d'une tour de 50 m à 110 m. le mât peut être des assemblages de croisillons métalliques, en béton ou en métal.

c. La partie électrique d'une éolienne

Dans les éoliennes destinées à produire de l'électricité, l'hélice fait tourner un générateur électrique situé en haut de la tour, dans le prolongement de l'axe de l'hélice de l'éolienne. Entre l'hélice et le générateur électrique de l'éolienne se trouve en général un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 100 à 650 tours min alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1500 à 3000 tours min.

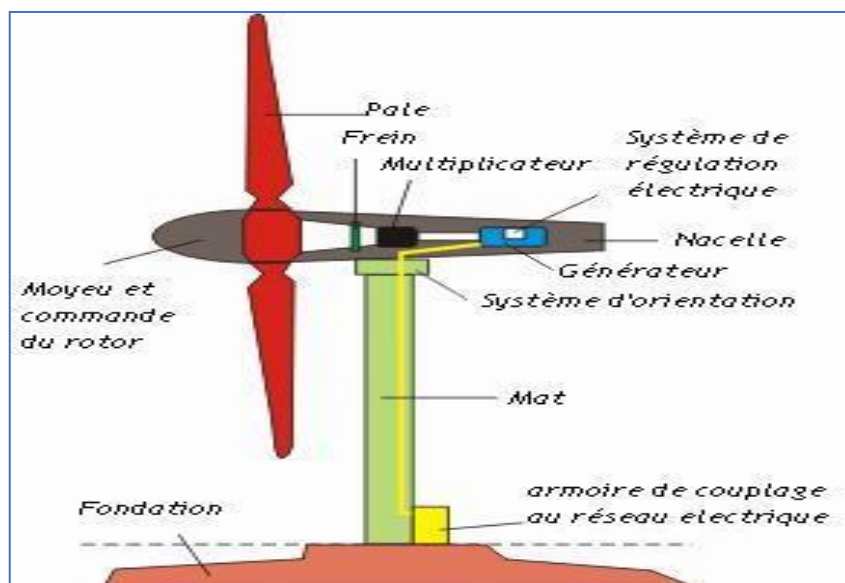


Figure 2.9 : : les composants principaux d'une éolienne [45]

2.4.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne produit de l'électricité grâce au vent. Sa force actionne les pales du rotor, qui met en mouvement un alternateur. [46]

La production d'électricité

Pour pouvoir démarrer, l'éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale d'environ 15 km/h. Pour des raisons de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement lorsque la vitesse du vent dépasse 90 km/h. Le rotor entraîne l'arbre de la nacelle, appelé arbre, qui est relié à l'alternateur. L'alternateur produit du courant alternatif grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'arbre.

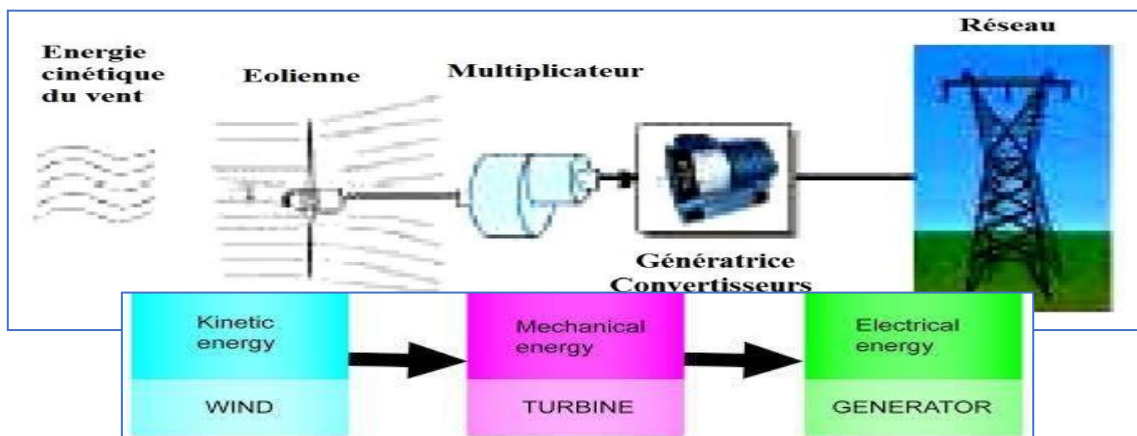


Figure 2.10 : Représente le mécanisme de conversion d'énergie cinétique en énergie électrique.

[47]

2.4.4 Puissance et énergie d'une éolienne :

La puissance potentielle est calculée en watts (W) ou kW (1 kW = 1000 W). L'énergie est calculée en W-heures (ou kW-h) en fonction du temps : 1 kW de puissance délivrée pendant une heure produit 1 kW-h. [48]

Les éléments qui déterminent la puissance de sortie (kW-h produits) d'une éolienne sont :

- la vitesse du vent ;
- le diamètre du rotor ;
- la masse de l'air ;
- le nombre et la forme de pales ;
- le rendement mécanique du rotor vers l'axe de la génératrice ;
- le rendement électrique de la génératrice ;
- la limite de Betz.

Quelques valeurs sur puissance d'éolienne :

On peut donner un ordre d'idées des puissances potentielles sur différentes éoliennes.

- Micro éoliennes : diamètre de rotor de 0,5 à 2 m : de 100 W à 1 kW.
- Petites éoliennes : diamètre de rotor de 2 à 12 m : de 1 kW à 36 kW.
- Moyennes éoliennes : diamètre de 12 à 35 m entre 36 et 350 kW.
- Grandes éoliennes : diamètre de rotor de 35 à 125 m : 350 kW à 5 MW.

Le petit et moyen éolien est adapté à l'équipement de particulier, d'exploitants agricoles, d'entreprises. Les moyennes et grandes éoliennes sont destinées à la production d'électricité pour le réseau. [48]

A) Potentiel éolien disponible

L'énergie cinétique d'une masse d'air **m** qui se déplace avec la vitesse **V**, est :

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \tag{2.5}$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface **A**, situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent

Le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donnée par :

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \tag{2.6}$$

B) La puissance moyenne récupérable [48]

En réalité, le dispositif de conversion (turbine éolienne) extrait une puissance **P_{rec}** inférieure à la puissance disponible **P_{disp}**.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 7. Sur lequel on a Représenté la vitesse du vent **V₁** en amont de l'aérogénérateur et la vitesse **V₂** en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le Rotor V_2 .

Soit $(V_1+V_2) / 2$ est la vitesse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (2.7)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (2.8)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (2.9)$$

Le ratio P_m / P_{mt} est appelé le coefficient C_p .

Ensuite la limite de **Betz** qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

$$P_r = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (2.10)$$

Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent donnée par.

$$\lambda = \frac{R \omega}{V} \quad (2.11)$$

On définit le rendement instantané global d'une éolienne pour une vitesse de vent, V , comme étant le rapport entre la puissance électrique débitée par la génératrice, $P_{elec}(V)$, et la puissance instantanée du vent, P_{vent}

η
= $\frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{mécanique}}}$
(V)

(2.12)

Rendement

La puissance utile dépend aussi des performances du rotor et du générateur et de leur perte mécanique et électrique. Le meilleur rendement est de 60 à 65 %, mais certaines éoliennes ont des rendements de 30 à 50%, ceci est dû à des pertes [48] :

- Les pertes mécaniques proviennent de la conversion d'énergie du rotor vers la génératrice.
- Les pertes électriques du générateur.

2.4.5 La courbe de puissance :

Un aérogénérateur est caractérisé par sa courbe de puissance. Voici un exemple de la courbe de puissance montré sur la figure 2.11. [49]

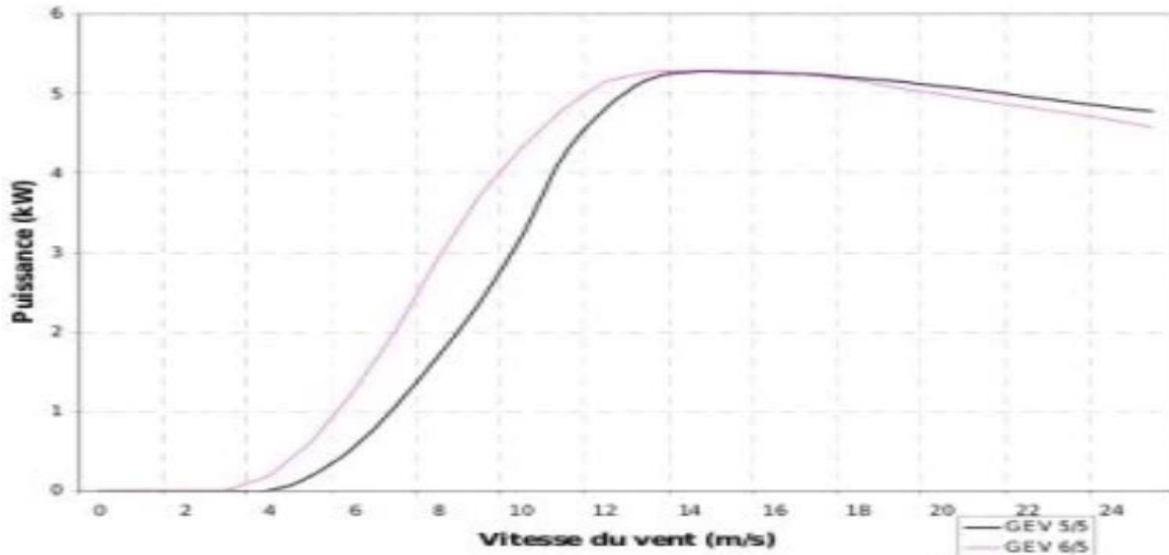


Figure 2.11 : Courbe de puissance d'une éolienne on peut distinguer 3 parties [50]

essentielles sur cette courbe :

- De 0 à la vitesse de démarrage (**ici 4 m/s**) : la puissance de sortie est considérée nulle, car le vent n'est pas suffisamment important pour entraîner la rotation du rotor.
- De la vitesse de démarrage à la vitesse nominale (**ici 16m/s**) : la puissance de sortie augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale.
- De la vitesse nominale à la vitesse de coupure (**ici 25m/s**) : la puissance de sortie est maintenue à la puissance nominale, presque constante grâce au dispositif de régulation.

2.5 Électrolyseur :

Un autre composant important du système est l'électrolyseur. Ce dernier utilise l'énergie électrique dans une réaction chimique pour produire de l'hydrogène gazeux. [51]

La source d'hydrogène la plus abondante est l'eau. L'hydrogène peut être produit à partir d'eau à l'aide d'un processus appelé électrolyse, dans lequel un courant électrique est utilisé 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. Lorsqu'il est utilisé avec des énergies renouvelables, il peut produire de l'hydrogène avec des émissions de gaz à effet de serre nulles ou quasi nulles. Comme le processus n'utilise que de l'eau, il produit de l'hydrogène et de l'oxygène purs à 99,9995 %. [51]

2.5.1 Les différentes technologies d'électrolyseurs :

Il existe de nombreux types de technologies pour l'électrolyse de l'eau, mais Il y a deux principaux types d'électrolyseurs utilisés dans les systèmes éolien-hydrogène : alcalin et proton électrolyseurs à membrane échangeuse (PEM). Les schémas de ces deux concepts d'électrolyse sont présentés à la figure 2.12 et 2.13.

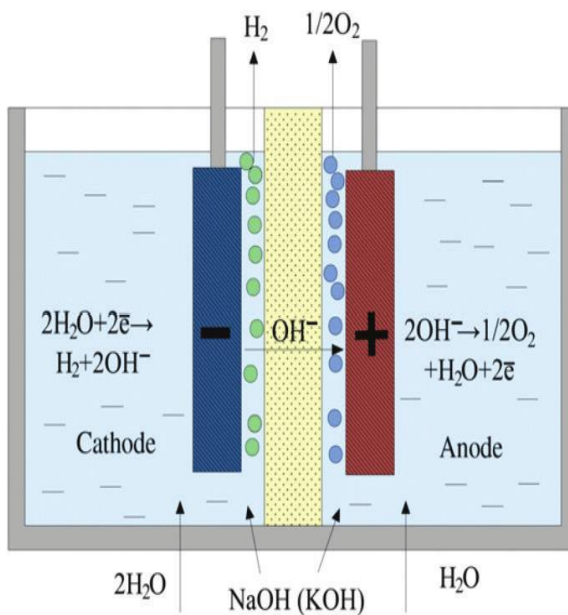


Figure 2.12 : Schéma de principe d'électrolyseur alcaline [52]

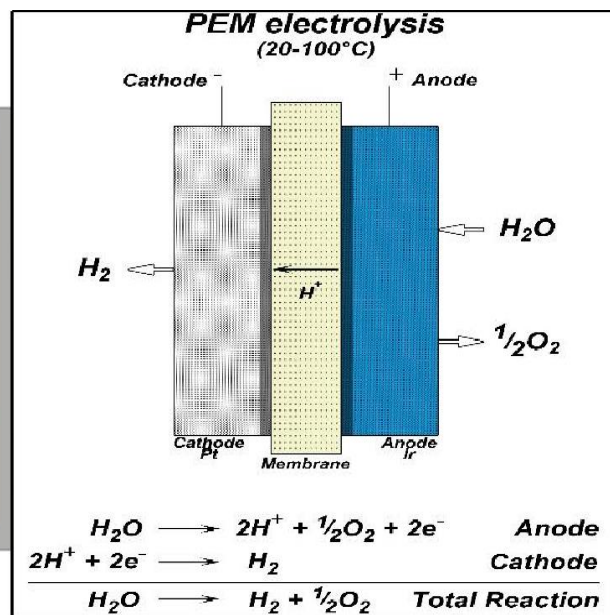


Figure 2.13: Schéma de principe d'électrolyseur PEM [53]

L'électrolyse alcaline est la technologie la plus mature, qui utilise entre 20% à 30% KOH ou NaOH dans l'eau (hydroxyde potassium ou sodium) comme milieu conducteur ionique. Le niveau de réduction d'une molécule de solution alcaline est La cathode permet la production

d'hydrogène (H₂) et d'ions hydroxyde (OH⁻), qui traversent le diaphragme jusqu'à l'anode, Figure 2.12

L'électrolyse PEM, est la deuxième technologie d'électrolyseur à basse température, elle est basée sur une membrane polymère mince, solide et conductrice d'ions (généralement du Nafion). Cette membrane permet le transfert des protons H⁺ de l'anode vers la cathode. L'oxygène est produit au niveau de l'anode et l'hydrogène au niveau de la cathode, Figure 2.13. [54]

Chaque technologie a ses avantages et ses inconvénients. Les électrolyseurs PEM sont extrêmement compatibles avec les sources d'énergie renouvelables. Ils sont réactifs, compacts et ont de bonnes perspectives de volume et de rendement. Les électrolyseurs alcalins sont les plus matures et les plus largement utilisés. Ils sont légèrement moins chers que les PEM et plus adaptés à la production de masse. [55]

Cependant, les progrès récents de la R&D ont considérablement réduit le coût des matériaux, ce qui rend l'électrolyseur PEM plus compétitif avec l'électrolyseur alcalin. [56]

2.5.2 Principe général de fonctionnement d'électrolyseur :

L'électrolyse permet de décomposer chimiquement l'eau en oxygène et hydrogène sous l'action d'un courant électrique. Typiquement, la cellule d'électrolyse est constituée d'une anode et d'une cathode, reliées à un générateur de courant continu, et séparées par un électrolyte (milieu conducteur ionique) comme le montre la figure 2. Un courant continu (DC) est appliqué afin de maintenir le flux d'électrons de la borne négative du générateur de courant vers la cathode. Les électrons capturés par les ions d'hydrogène vont permettre la formation de l'hydrogène. Au niveau de l'anode, les ions d'hydroxyde vont céder leurs électrons et former ainsi de l'oxygène. [57]

En utilisant un courant électrique provenant d'une énergie éolienne, ce procédé pourrait être beaucoup plus respectueux des normes environnementales que les procédés industriels actuels.

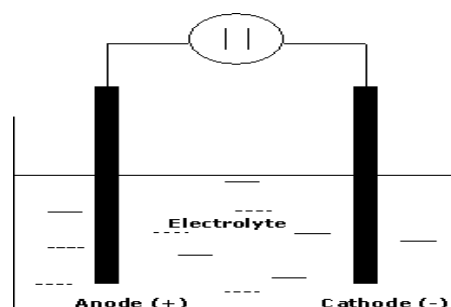
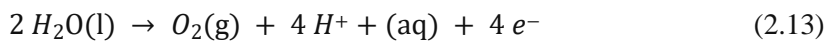


Figure 2.14 : Electrolyseur [58]

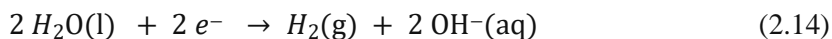
Réactions chimiques de l'électrolyse de l'eau [59]

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 :



2.6 / Pile à combustible :

Une pile à combustible est similaire à une batterie en ce sens qu'elle génère de l'électricité par une réaction chimique. La plupart des batteries s'épuisent lorsque les produits chimiques qu'elles contiennent s'épuisent ; Les produits chimiques dans la pile à combustible ne s'épuisent pas, ils proviennent d'un réservoir de carburant séparé. Alors la pile à combustible continue de fonctionner et de produire de l'électricité tant qu'il y a du carburant dans le réservoir. Aujourd'hui, la plupart des piles à combustible utilisent l'hydrogène comme carburant dans ce réservoir. [60]

2.6.1 Principe de fonctionnement :

Une pile à combustible fonctionne en combinant de l'hydrogène et de l'oxygène dans une pile à combustible l'air pour faire de l'eau. C'est la même réaction chimique qui se produit lorsque l'hydrogène brûle. En effet, dans une pile à combustible, la réaction produit de l'électricité.

L'élément hydrogène n'est constitué que d'un proton (+) et un électron (-), sans neutrons, dans le noyau de son atome. Pour produire de l'électricité, les protons et les électrons doivent être séparés, et les piles à combustible peuvent exécuter cette fonction. [60]

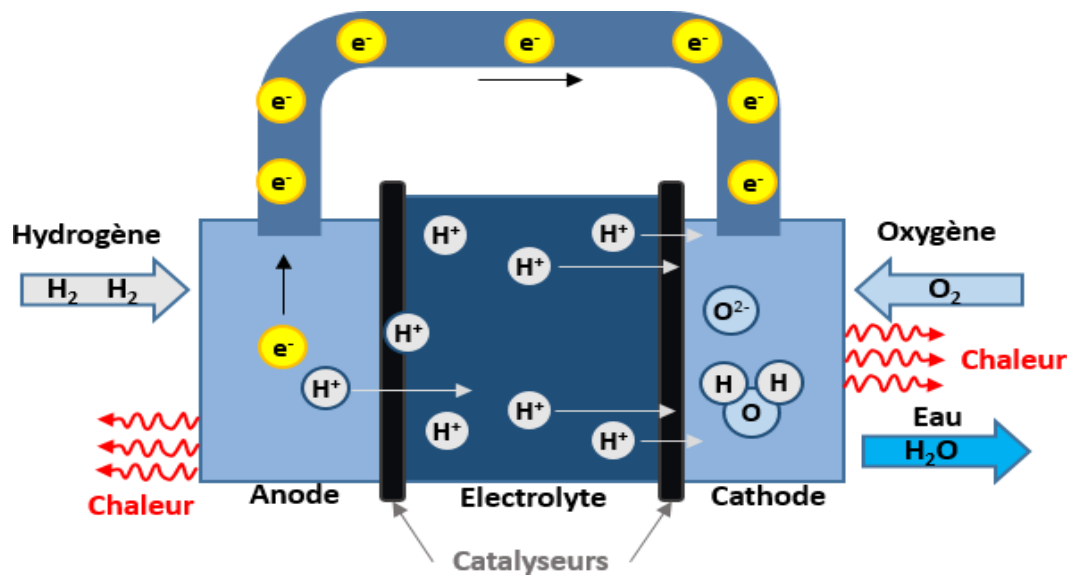


Figure 2.15 : Fonctionnement de la pile à combustible [61]

Lors de la séparation de l'hydrogène, ce dernier arrive d'un côté de la pile à combustible et les électrons de l'hydrogène sont attirés vers l'électrode positive. C'est ce qu'on appelle l'anode, où les électrons sont séparés des protons. Les électrons voyagent à travers le circuit électrique et génèrent en chemin de l'électricité ; les électrons continuent de circuler à travers le circuit, et, finalement, finissent de l'autre côté de la pile à combustible.

Pendant ce temps, de l'autre côté de la cellule, les protons traversent une couche du plastique au milieu d'une pile à combustible. Dans ce cas, le plastique est appelé proton Membrane d'échange (PEM). A ce moment, le proton est positif et négatif L'électrode ou la cathode de l'autre côté du PEM, à travers laquelle seuls les protons peuvent passer par PEM. Une fois passé, le proton rencontre l'électron entrant. [62]

2.6.2 Relations chimiques sur le fonctionnement d'une PAC

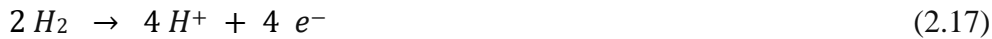
Le processus de la pile à combustible peut se résumer ainsi à une réaction chimique simple [63] :

Hydrogène + Oxygène → Electricité + Eau + Chaleur



Dans la pile, une réaction d'oxydoréduction se forme permettant de créer l'électricité et la chaleur.

Au niveau de l'anode, la molécule d'hydrogène, au contact d'un catalyseur, se décompose et libère des électrons qui vont créer le courant électrique. Ce processus est appelé l'oxydation.



D'autre part, la réaction de la réduction se forme au niveau de la cathode, l'oxygène réagit au contact des électrons libérés par la première réaction.



Enfin, après que les protons d'hydrogène atteignent la cathode, ils se recombinent avec des ions d'oxygène pour former de l'eau.



2.7 / Convertisseur :

Le convertisseur alternatif-continu comprend 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 provoquées par le courant circulant dans le premier circuit redresseur. Le dispositif de compensation fait circuler le courant de compensation entre l'entrée triphasée et la sortie continue. Le circuit de compensation comprend un second circuit redresseur ayant un redresseur commandé connecté à une 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. [62]

Le convertisseur assure la conversion du courant alternatif triphasé produit par l'éolien en courant continu qui est ensuite consommé par la résidentielle et les différents composants de la station.

2.8 Les types de stockage d'hydrogène :

Le stockage d'hydrogène à grande échelle est un moyen réalisable de faire face à un excédent temporaire d'énergie renouvelable pour constituer des provisions de compensation à un moment ultérieur lorsque la demande d'énergie dépasse l'offre. [63]

Bien que le stockage pose des problèmes majeurs, l'hydrogène a tout de même l'avantage de pouvoir être stocké sous différents états : dans certains cas, il peut être gazeux, liquide, voire solide.

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

Tableau 2.2 : domaine d'application d'hydrogène

2.8.1 Stockage d'hydrogène gazeux :

La forme de stockage la plus courante de l'hydrogène est l'hydrogène gazeux, qui est principalement utilisé pour le transport. Pour rivaliser et être compétitif avec les hydrocarbures conventionnels, le secteur des transports a besoin d'un carburant tout aussi dynamique et plus compact. L'hydrogène a une haute densité énergétique, mais sous forme gazeuse il n'est pas dense à la pression atmosphérique, c'est le gaz le plus léger et le moins dense (0,083 g/l à 20°C et 1 bar). C'est pourquoi ce gaz est fortement comprimé avant utilisation. L'énergie nécessaire pour comprimer l'hydrogène à 700 bars est de 22MJ/kg. Il existe trois types de réservoirs à hydrogène en fonction de la pression qu'ils supportent. Il existe des réservoirs de 350 bar, 500 bar et 700 bar selon leur utilisation. Idéalement, l'hydrogène doit être comprimé à 700 bar. Au-delà, l'hydrogène ne sera plus comprimé proportionnellement. Mais plus il est comprimé, plus il est gourmand en énergie. [63]

2.8.2 Stockage d'hydrogène liquide :

Une condition pour obtenir un liquide est de soumettre le matériau à sous-refroidissement. Pour l'eau, la température à laquelle nous sommes en sous-refroidissement est généralement inférieure à 373K (100°C). Mais pour liquéfier l'hydrogène, il faut le refroidir en dessous de 20,28K (-253°C). Une fois l'hydrogène liquéfié, il faut le maintenir à ces basses températures pour qu'il ne redevienne pas gazeux.

Il faut tellement d'énergie pour liquéfier l'hydrogène et le maintenir à l'état liquide que cela n'a pas encore été vu dans le cycle, et il n'est rentable que de liquéfier l'hydrogène en grande quantité.

L'hydrogène doit être stocké après avoir été produit, il faut donc un réservoir de stockage fixe sur site.



Figure 2.16 : Réservoir de stockage d'Hydrogène [64]

Comme les autres gaz, l'hydrogène peut être stocké sous pression dans des conteneurs adaptés à sa diffusivité élevée, mais la densité d'énergie en volume ainsi obtenue est très faible. Les méthodes de stockage actuellement à l'étude tentent de tirer parti de différentes propriétés de l'hydrogène pour résoudre ce problème. L'hydrogène liquide et l'hydrogène combiné dans un hydrures métalliques, les structures à base de carbone ou les nanotubes sont une des alternatives de recherche. [65]

2.8.3 Stockage d'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.

Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption résulte de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates. [66]



Figure 2.17 : Galette solide formée d'hydrogène et de métal [67]

Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%. [62]

2.9 / Conclusion :

La vitesse du vent présente sur un site est importante pour bon fonctionnement d'un aérogénérateur, grâce à cette condition l'éolienne produit l'énergie suffisante pour couvrir la demande du réseau électrique. Pour les périodes qui soulignent un excès d'électricité, l'électrolyseur intervient pour la récupérer et la convertir en hydrogène ensuite le stocker sous la forme liquide dans des citernes spéciales qui satisfait les conditions de stockage pour ce substitut très sensible.

L'aérogénérateur fonctionne à des vitesses du vent connues, alors dès que cette dernière se diminue au-dessous de vitesse minimale, l'éolienne ne pourra plus répondre aux besoins électriques, à ce moment la pile à combustible consomme l'hydrogène en stock pour produire de l'électricité pour combler la demande. Alors on peut conclure que la mise en marche de PAC dépend directement à l'arrêt de l'éolienne. Ainsi, le développement des composants du système SEH, nous permet aujourd'hui l'automatisation du fonctionnement autonome d'une ferme.

Chapitre 03 : Simulation

1/ Introduction :

En utilisant le logiciel Homer, nous allons travailler sur la simulation du système eolien-hydrogen. L'étude est faite sur les trois différents sites ; Bejaia, Tiaret et Adrar. En se basant sur la consommation locale des villages situés aux sites évoqué, un système SEH sera choisi avec optimisation. Vers la fin de ce chapitre, nous allons comparer entre les trois sites en fonction de la consommation, et la production électrique de différents aérogénérateurs avec les piles à combustible sélectionnées.

2/ Présentation de HOMER :

Homer est un logiciel développé pour les systèmes de production d'énergie à faible puissance. Il permet des simulations avec des énergies renouvelables et avec combustibles fossiles. Un de ses grands atouts est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes Hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou fossile. La première version date de 1992 sous le nom de NREL (National Renewable Energy Labs), suivi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions. La version utilisée pour le présent projet est Homer_Pro_3.14.2_x64 sortie en janvier 2021. Ce logiciel est largement utilisé dans plus de 190 pays et plus de 40 000 utilisateurs.

On peut considérer que l'interface d'HOMER a trois zones importantes comme indiqué

Sur la **figure 3.1** la zone de définition du système, celle des ressources et celle des résultats.

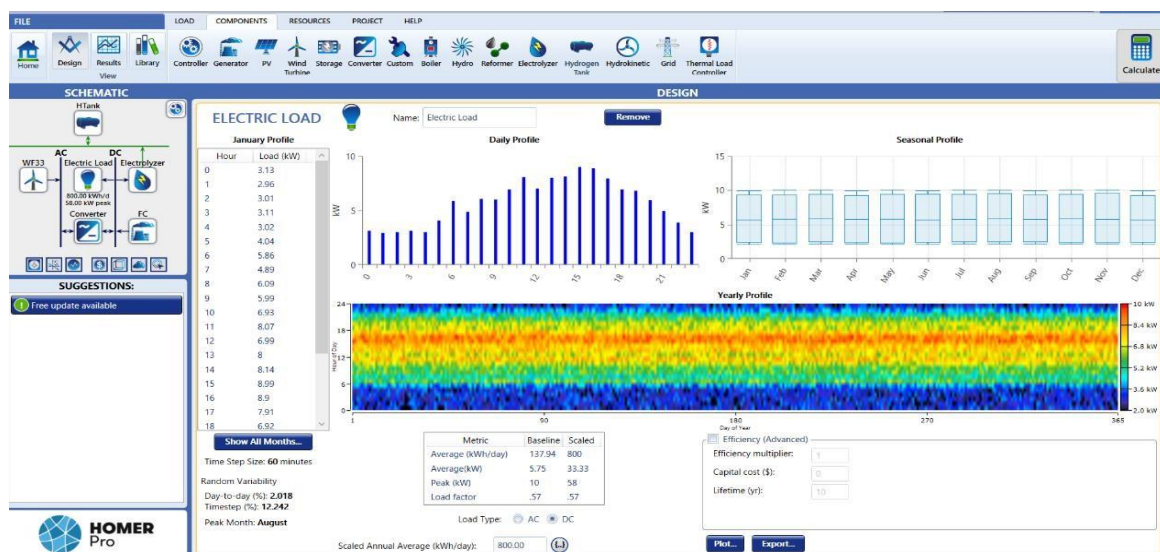


Figure 3.1 : Interface Homer_ différentes Zones

La zone de définition du système permet de choisir les équipements qui seront inclus dans le Système à modéliser. Il suffit de cocher les éléments à utiliser selon les choix illustrés à la **Figure 3.2**. De plus, dans cette même fenêtre, il est possible de choisir de modéliser le Réseau Électrique.

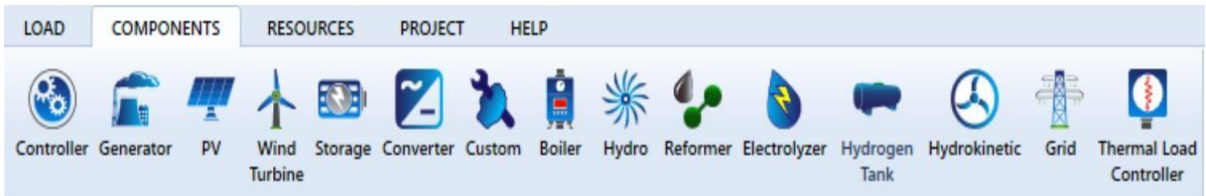


Figure 3.2 : Interface Homer _ choix des équipements

Une fois sélectionnés, les divers équipements apparaissent dans la zone 1 de définition du Système comme à la **Figure 3.3**

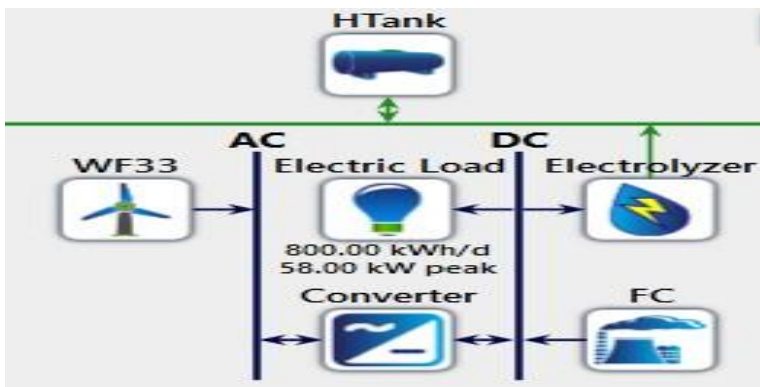


Figure 3.3 : Interface Homer - équipement sélectionnés

Pour ajouter les ressources à notre système, il suffit d’entrer à la fenêtre des ressources en haut comme illustré dans la **figure 3.4** suivante :



Figure 3.4 : Interface Homer_ Ressources

Après l'ajout de toutes les parties du système, on peut passer à la simulation en cliquant sur l'icône de la machine en haut à droite.

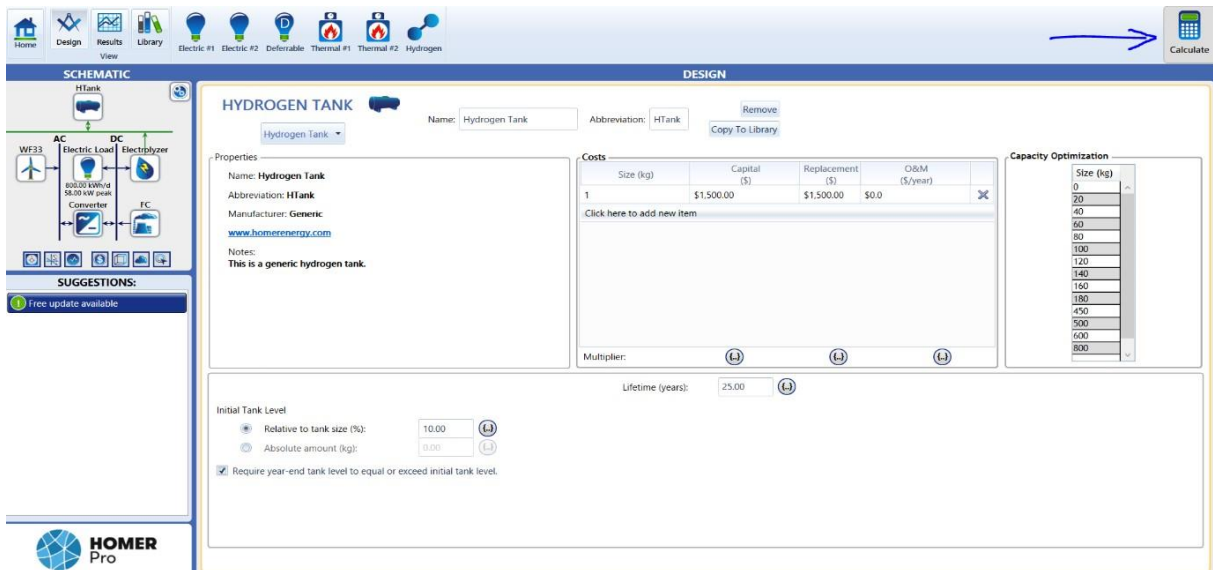


Figure 3.5 : interface Homer _ Simulation

Juste après avoir cliqué sur l'icône précédente de simulation les résultats s'afficheront automatiquement sur l'écran de Homer.

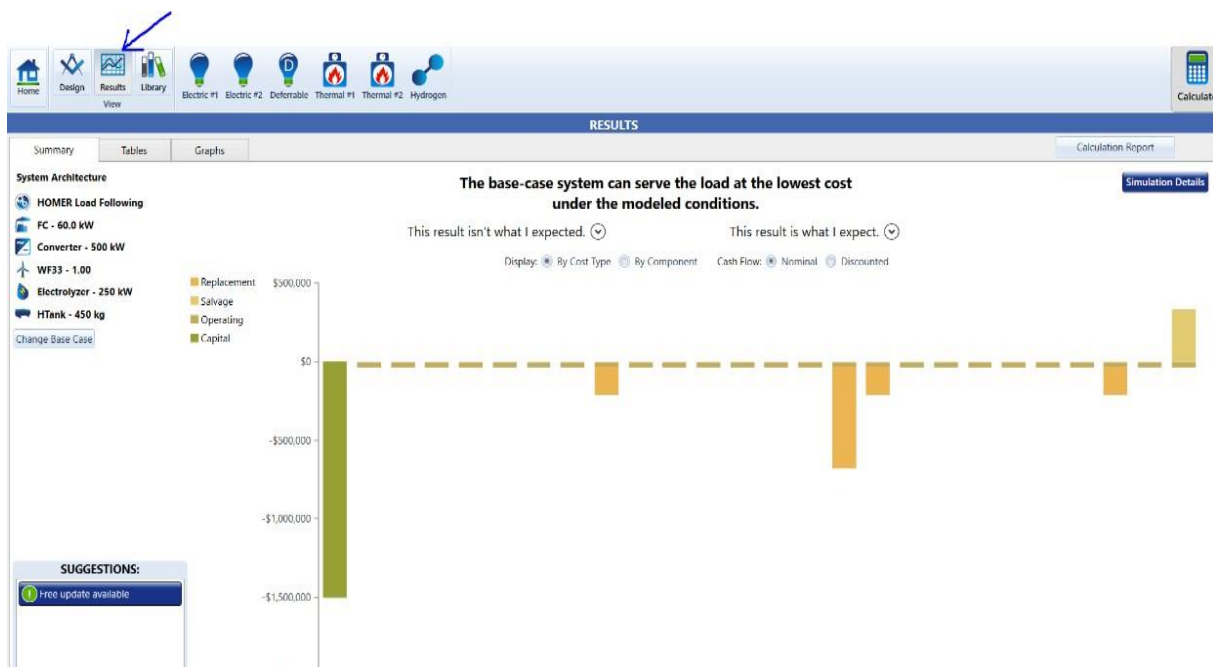


Figure 3.6 : Interface Homer_ Fenêtre des résultats

3/ Dimensionnement de système :

3-1/ Site de Bejaia

3.1.1 Données d'entrées :

Les données des vitesses du vent du site de Bejaia sont utilisées pour la simulation. Elles sont constituées de vitesses mensuelles moyennes mesurés à la hauteur de 10 m du sol.

Latitude	Longitude	Altitude	Rugosité
35.25°	1,25°	949 m	0,01 m

Le tableau 3.1 représente les caractéristiques géographiques de la station de mesure de Bejaia.

On peut voir l'évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent sur la figure 3.7. Nous avons remarqué que la vitesse varie selon les mois, decembre étant le plus élevé à 6.36 m/s, suivi de novembre et janvier avec des vitesses de 6.23 à 6.33 m/s. À d'autres moments de l'année, elle varie autour de 5.61 m/s.

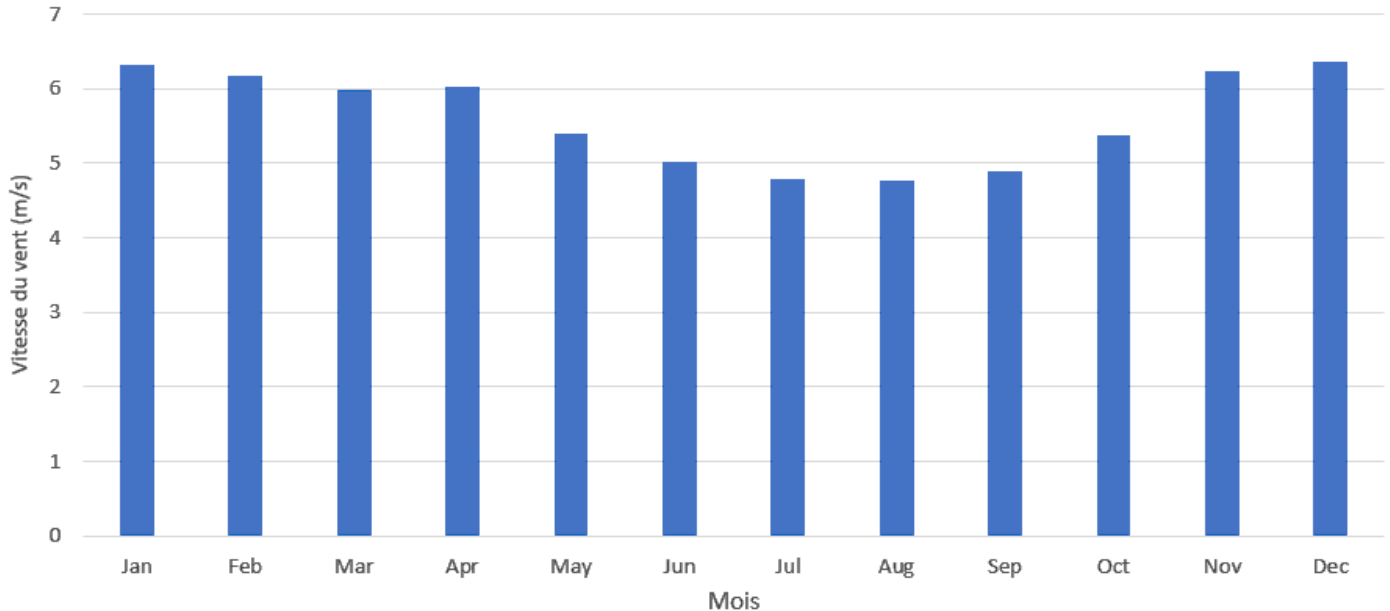


Figure 3.7 : Évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région de Bejaia à 10m du sol

Dans notre étude, notre objectif est d'alimenter 50 foyers à Bejaia avec notre système hybride éolien-hydrogène en mode autonome.

La consommation trimestrielle d'un foyer est approximativement de 780 Kwh

Nous avons par la suite, calculé la consommation journalière moyenne :

$$780/90 \text{ (nombre de jours en 3 mois)} = 8.66 \text{ Kwh/Jr}$$

Par la suite, à l'aide du profil de consommation donné par le logiciel Homer illustré sur la **figure 3.8**, la consommation journalière moyenne de (8.666 Kwh) est distribuée en tenant compte des heures de basses consommation d'énergie, moyennes et élevées. Enfin en multipliant chaque consommation horaire par le nombre de 50 qui est le nombre de maison.



Figure 3.8 : Facture d'électricité d'une maison à Béjaia en été

Dans notre étude, nous nous intéressons au mois où la consommation est maximale. Pour le cas de la région de Béjaia, la charge électrique la plus élevée est notée en mois de juillet, voir que l'augmentation de la température en été pousse les gens à utiliser les différents matériels pour le refroidissement en intérieur des maisons, tels que les climatiseurs, ce qui justifie la charge élevée en ce mois-ci.

Depuis le logiciel HOMER, nous avons réalisé un profil de consommation horaire représenté sur la figure 3.9, en tenant compte d'une consommation journalière.

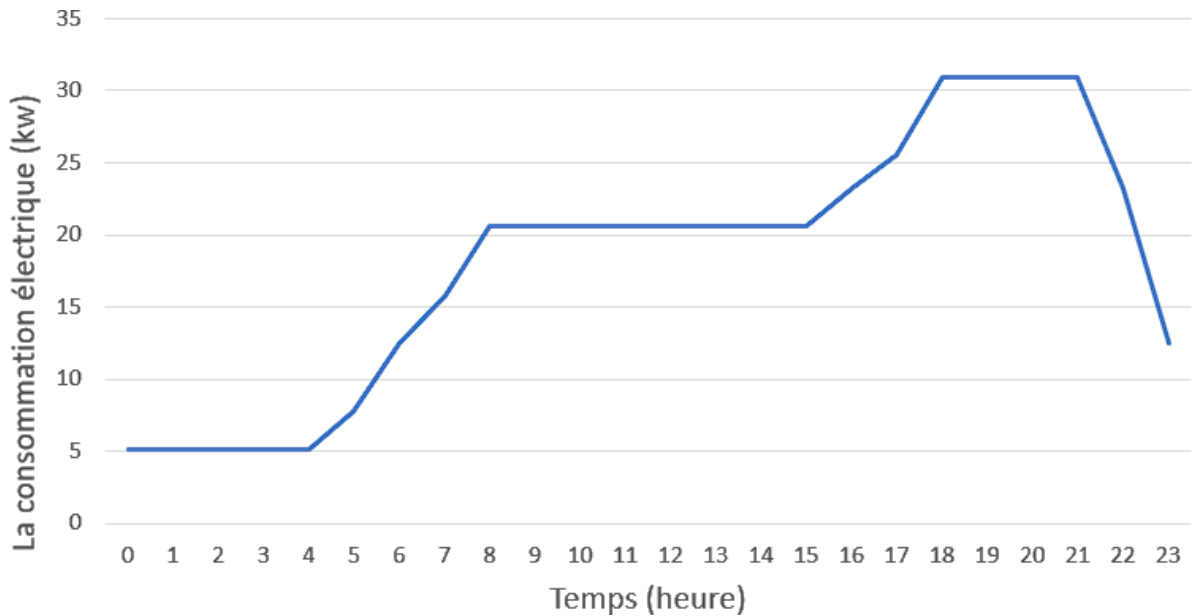


Figure 3.9 : Charge électrique moyenne horaire en Kw (50foyers)

La figure 3.9 représente la charge électrique moyenne horaire pendant une journée. On note que le profil de la charge se décompose en trois phases. Du 00 :00 jusqu'à 5h, est une période où presque toute la communauté dort. Ensuite les heures entre 6h et 16h, la consommation augmente à cause d'utilisation des télévisions les ordinateurs et surtout les climatiseurs et les ventilateurs. Enfin, de 17 h jusqu'à 23h, tout les habitants utilise de les lampes et même les collimateurs.

3.1.2L'aérogénérateur :

Afin de pouvoir alimenter notre village, nous avons sélectionné l'aérogénérateur *End85 de 85KW* dont les caractéristiques sont présentées sur la **figure 3.10**. Son moyeu atteint une hauteur de à 36.6 m et sa courbe de puissance est représentée sur la **figure 3.11**


<ul style="list-style-type: none">▪ Puissance nominale = 85 KW▪ L'axe de rotation : horizontal ▪ Vitesse de démarrage : 4 m/s ▪ Vitesse nominale du vent : 15 m/s ▪ Vitesse maximale : 25 m /s ▪ Diamètre de rotor : 23.5 m▪ La surface Balayé : 434.0 m² ▪ La durée de vie : 20 ans▪ Nombre des pales : 3▪ Poids total : 6.2 t▪ Onshore : oui▪ Tension : 400 V▪ Fréquence du secteur : 50/60 Hz ▪ Type de générateur : Asynchrone Triphasé	
---	---

Figure 3.10 : *Caractéristiques aérogénérateur E4660 85KW*

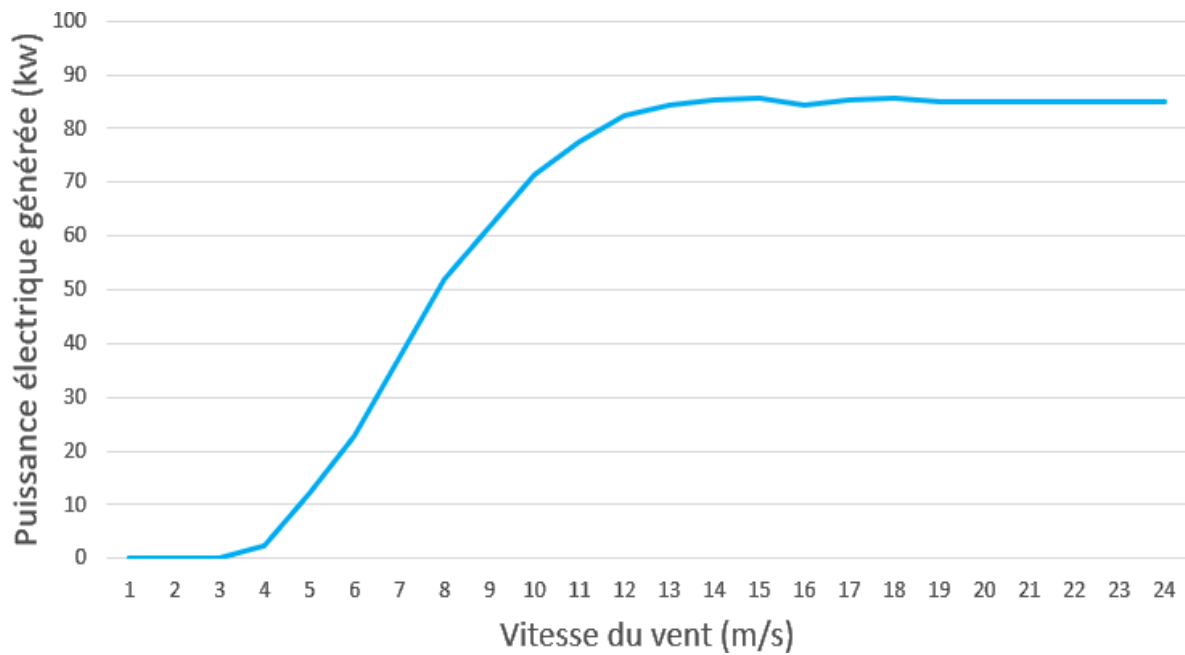


Figure 3.11 : courbe de puissance de l'aérogénérateur END-85

3.1.3 Convertisseur:

Caractéristiques	Valeurs
Puissance	110 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement CA/CC	90%
Rendement CC/CA	95%

Tableau 3.2 : Caractéristiques du convertisseur utilisée sur le site de béjaia

3.1.4 L'électrolyseur :

L'électrolyseur sélectionné est utilisé pour produire de l'hydrogène lorsque l'énergie éolienne est produite en excès. Pour notre système l'électrolyseur choisi porte les caractéristiques citées dans le tableau 3.3 :

Propriétés	Valeurs
Type	Alcalin
Puissance	60 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement	85%
Mode de fonctionnement	CC

Tableau 3.3: Propriétés de l'électrolyseur

3.1.5 La pile à combustible :

Lorsque les différentes sources ne suffisent pas à la demande, alors c'est à la PAC d'intervenir pour remédier au manque d'énergie.

La PAC choisi pour ce site, présente les propriétés présentées sur le tableau 3.4:

Propriétés	Valeurs
Type	PEM
Puissance	40 KW
Mode de fonctionnement	CC
Durée de vie	40,000 heures

Tableau 3.4 : Propriétés de la PAC

3.1.6 Le réservoir d'hydrogène :

L'hydrogène produit par l'électrolyseur est stocké dans un réservoir pour être utilisé par la PAC afin de combler la demande.

On note que les caractéristiques de stockage sont : 700 bars et 20.28k (-253°C) Le réservoir utilisé se caractérise comme suit :

Propriétés	Valeurs
Capacité de stockage	460 kg
Durée de vie	25 ans
Volume réservé	10%

Tableau 3.5 : *Propriétés du réservoir d'hydrogène*

A l'aide du logiciel HOMER, nous avons défini chaque élément de nos installations en se basant sur toutes les caractéristiques et les données fournies dans les paragraphes précédents.

HOMER simule les configurations du système avec toutes les combinaisons des composants spécifiés en entrée. Il élimine les résultats de toutes les configurations de systèmes infaisables, qui ne sont pas en adéquation avec la demande en électricité ni ne sont compatibles avec les ressources au but de permettre une production optimale et lucrative.

Les composants finaux de notre système pour le site de Bejaia au but d'alimenter 50 foyers sont comme suit :

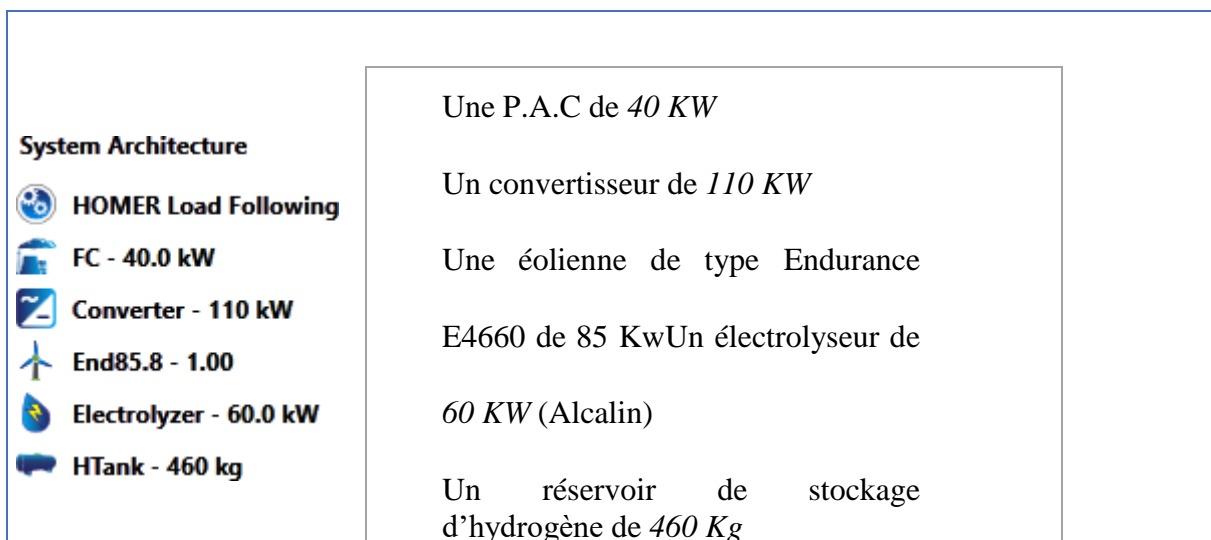


Figure 3.12 : *Composants finaux utilisée pour le site de Bejaia*

3.1.7 Simulation du système hybride (SEH) de la région de Béjaia:

La **Figure 3.13** représente la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible et la charge pour le mois de juillet, On observe une alternance entre la production de l'aérogénérateur et la PAC.

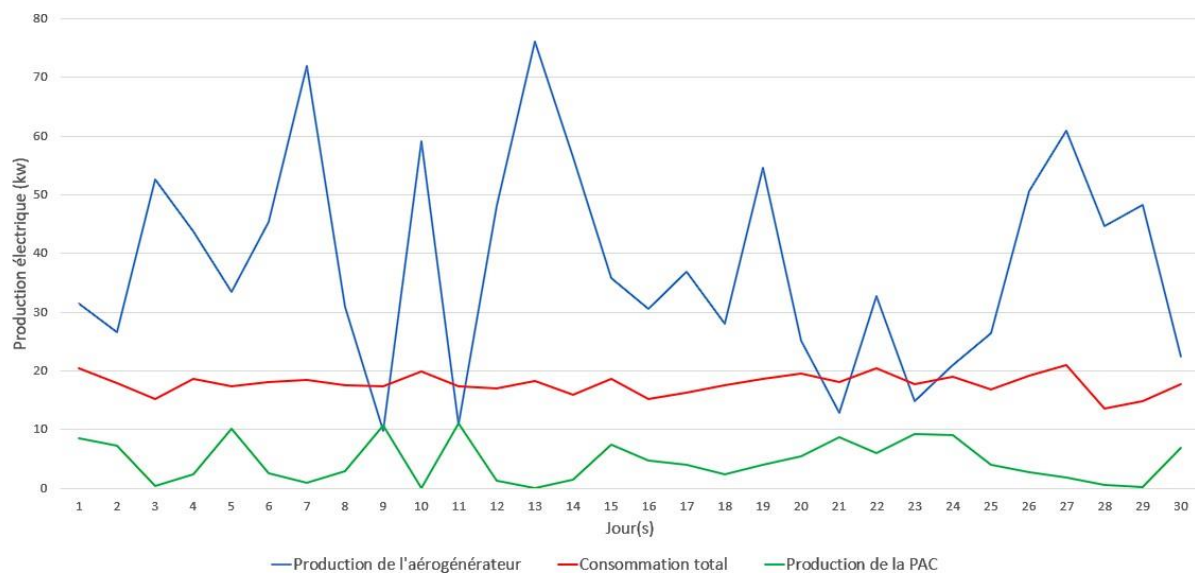


Figure 3.13 : Comparaison entre la production de l'aérogénérateur, la production de la pile combustible et la consommation total du mois de juillet

3.1.7.1 Production énergétique annuelle :

Les tableaux 3.6 et 3.7 représentent la production et la consommation d'énergie sur une année.

Tableau 3.6 : Production du système hybride			Tableau 3.7 : Consommation du système hybride		
Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%
Fuel Cell	49,238	14.9	AC Primary Load	156,213	50.6
Endurance E4660 85kW 23.5m	280,601	85.1	DC Primary Load	0	0
Total	329,839	100	Electrolyzer	152,595	49.4
			Total	308,808	100

Figure 3.14 : Production et consommation annuelle du système hybride

D'après le **tableau 3.6** on voit que l'énergie éolienne produit 85.1% de l'énergie annuelle et que la pile à combustible produit seulement 14.9% d'énergie électrique.

D'après le **tableau 3.7** l'électrolyseur consomme 49.4% de l'énergie électrique produite, afin de produire et stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène.

3.1.7.2 Le stockage d'hydrogène :

D'après la **figure 3.15** on constate que le stockage d'hydrogène dépend de la production électrique de l'aérogénérateur, ce qui signifie que l'énergie produite en excès permet la production, d'une quantité d'hydrogène considérable, qui diminue au fur et mesure que la vitesse du vent diminue.

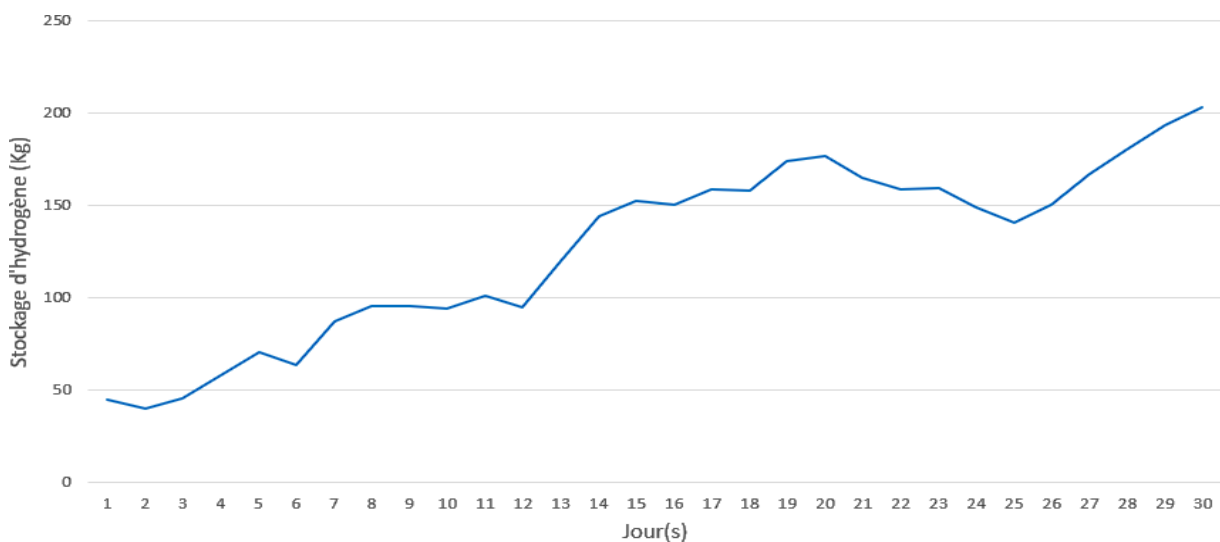


Figure 3.15 : Evolution du stockage de l'hydrogène

3.1.8 Comparaison entre la production électrique et la consommation de l'électrolyseur :

La figure 3.16 présente la production éolienne ainsi que la consommation électrique de l'électrolyseur pour le mois de novembre. On remarque que le déclenchement de

l'électrolyseur dépend de l'énergie en excès qui est produite par l'aérogénérateur pour être stocké sous forme d'hydrogène

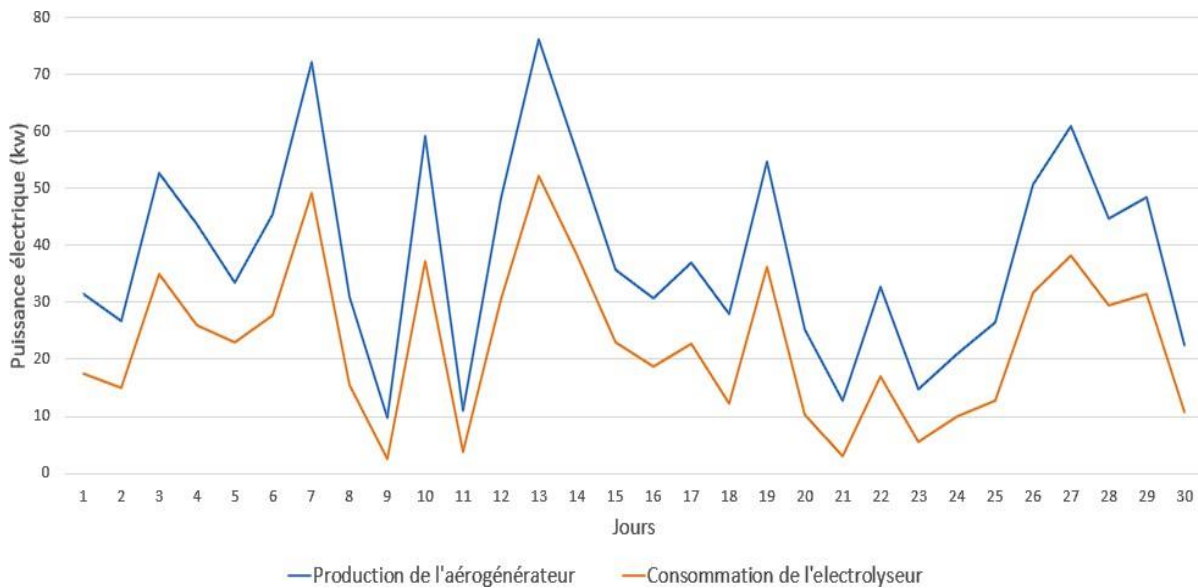


Figure 3.16 : Variation de la consommation d'électrolyseur en fonction de la production de l'aérogénérateur

D'après la **figure 3.16**, On remarque que la production électrique de l'aérogénérateur dépend de la vitesse du vent, de même, la consommation de l'électrolyseur dépend de l'excès de cette dernière.

La **figure 3.17** traduit exactement le principe de fonctionnement de notre système hybride, lors de la diminution de la production de l'aérogénérateur, la PAC fournit l'énergie nécessaire pour combler la demande.

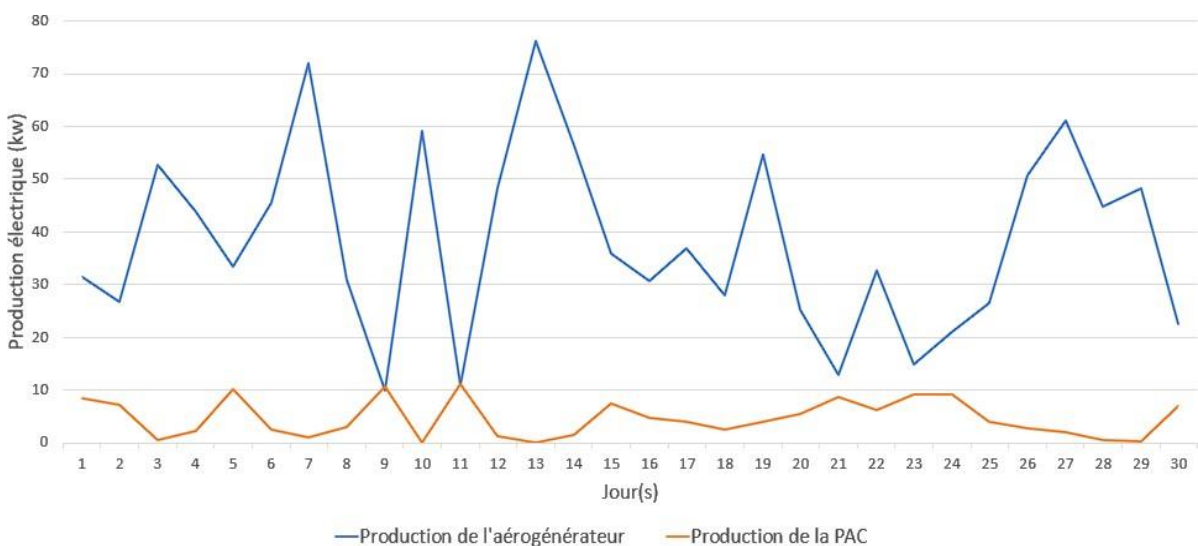


Figure 3.17: Production Journalière de l'aérogénérateur et de la PAC.

On remarque que lorsque l'accumulation de la source éolienne présente une production excédentaire, la PAC est en état d'arrêt, comme le montre la figure. En cas de sous-production, la PAC intervient pour satisfaire à la demande.

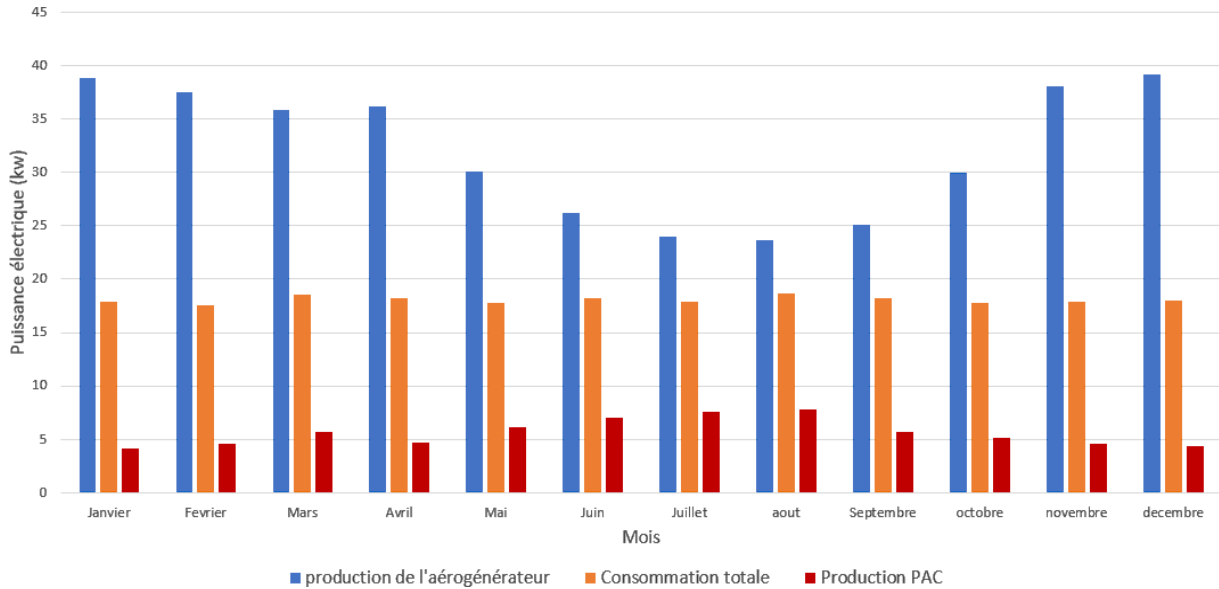


Figure 3.18 : Comparaison entre la production annuelle de l'éolienne, la PAC et la consommation totale

3.2 / Site de Tiaret :

3.2.1 Données d'entrées :

Les données des vitesses du vent du site de **Tiaret** sont utilisées pour la simulation. Elles sont constituées de vitesses mensuelles moyennes mesurés à la hauteur de 10 m du sol.

L a t i t u d e	L o n g i t u d e	A l t i t u d e
3 5	1 .	9 7

. 2 5 °	2 5 °	8 m m
----------------------------	----------------------	----------------------

Tableau 3.7: *Caractéristiques géographiques de la station de mesure « Tiaret ».*

On peut voir l'évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent sur la figure 3.6. Nous avons remarqué que la vitesse varie selon les mois, décembre étant le plus élevé à 6.36 m/s, suivi de janvier et novembre avec des vitesses de 6,33 à 6,23 m/s. À d'autres moments de l'année, elle varie autour de 5,61 m/s.

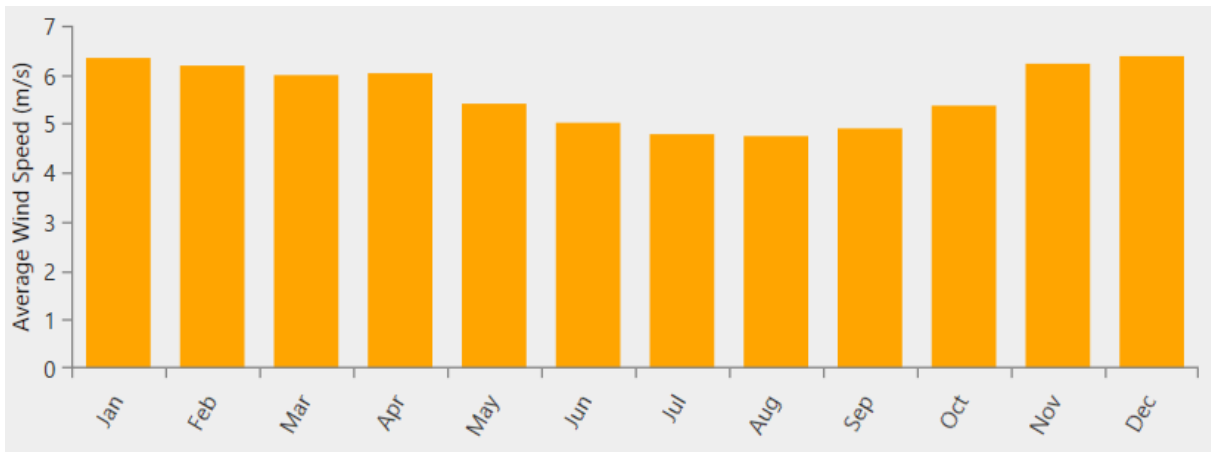


Figure 3.19 : Évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d’Tiaret à 10m du sol.

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

3.2.2 Profil de consommation :

Après avoir choisis dans Homer, la charge électrique, on aura besoin d’estimer la consommation journalière et horaire de 50 maison située dans la région de Tiaret. A l’aide d’une facture d’électricité exemplaire d’une seule maison, on pourra estimer la consommation en kilowatt heure d’une communauté.

Par le même principe utilisé avant sur le site de Tiaret, on aura le profil de consommation illustrée sur la figure 3.21

شركة توزيع الكهرباء والغاز لتيارت
Société de Distribution de l'Électricité et du Gaz de Tiaret

Fourniture d'énergie Électrique et Gaz
BASSE TENSION / BASSE PRESSION
établie le 04.02.16

Capital Social de 25 MILLIARD DE DA FACTURE N° 621160107916

Direction Distribution: TIARET FAX: 42 11 40

N° RC: 06 B 0108492/01 N° IS: 631019002457001 Dépannage Electricité: 42 89 62
N° RIP: 00799999000038062327 N° RIB: 00100540030030079713 Dépannage Gaz: 42 89 62
Agence Commerciale TIARET NORD ROUTE DE FRIGO Tél: 42 24 43

CLIENT

Référence: N° RC: N° IS: N° IS:
Nom et Prénom: Tél.: Fax:
Adresse lieu de consommation:
Nom à adresse du Destinataire de facture:

Nous vous prions de bien vouloir régler cette facture par l'un des moyens indiqués au verso. période: 1er Trimestre 2016

CONSUMPTIONS	TARIFF	NUMERO	RELEVÉ DE COMPTEUR		DIFFERENCE	COEF.	CONSUMATION (KWH/TRI-M)
			Index Nulveau	Index Ancien			
PHD= 20 Kw	E01	005372	24252 R	22127 R	2535	1.00	2535
DHD= 5 m3h	G83	003469	93701 R	91201 R	2500	8.86	22150

R: Releve
E: Estime
M: Releve Speciale

DETAIL DE FACTURATION (en hors taxes)	PREMIERE TRANCHE		DEUXIEME TRANCHE		TROISIEME TRANCHE		PRIMES FIXES (DA)
	CONSUMATION	PRIX UNITAIRE (DA)	CONSUMATION	PRIX UNITAIRE (DA)	CONSUMATION	PRIX UNITAIRE (DA)	
ELEC. E01	125.0	1.779	2410.0	4.179			262.20
GAZ G83	1125	0.168	21025	0.324			85.50

CALCUL DES TAXES ET RECAPITULATION	MONTANT HORS TVA (DA)	TVA		Le montant de votre consommation moyenne d'énergie par jour: 212.53 DA/jour	MONTANT TOUTES TAXES (DA)
		Taux %	MONTANT (DA)		
ELEC. E01	10555.96	07	738.91	Cte EBP: 810	11294.87
GAZ G83	7086.60	07	496.06		7582.66
DROIT FIXE	100.00				100.00
TAXE HABITATION	150.00				150.00
Contribution aux coûts permanents du système:	34.52 DA				17892.56
			1234.97		19127.53
				Montant à payer TTC (A la poste, chèque ou virement)	192.00
				Droit de timbre	19319.53
				Montant total à payer en espèces	

La présente facture est arrêtée à la somme : dix neuf mille cent vingt sept dinars algériens , 53 cts
à régler avant le : 22.02.16

Figure 3.20 : Facture d'électricité d'une maison à Tiaret.

Dans notre étude, nous nous intéressons au mois où la consommation est maximale. Pour le cas de la région de Tiaret, la charge électrique la plus élevée est noté en mois de juillet, voir que l'augmentation de la température en été pousse les gens à utiliser les différents matériels pour le refroidissement en intérieur des maison, tels que les climatiseurs, ce qui justifie la charge élevée en ce mois-ci.

On note que le site de Tiaret est situé sur les hauts plateaux, connu pour un climat chaud en été et froid en hiver.

Profil de consommation Journalier :

Sur la figure 3.21 on a un profil de consommation journalière d'énergie électrique de 50 maisons dans la région de Tiaret.

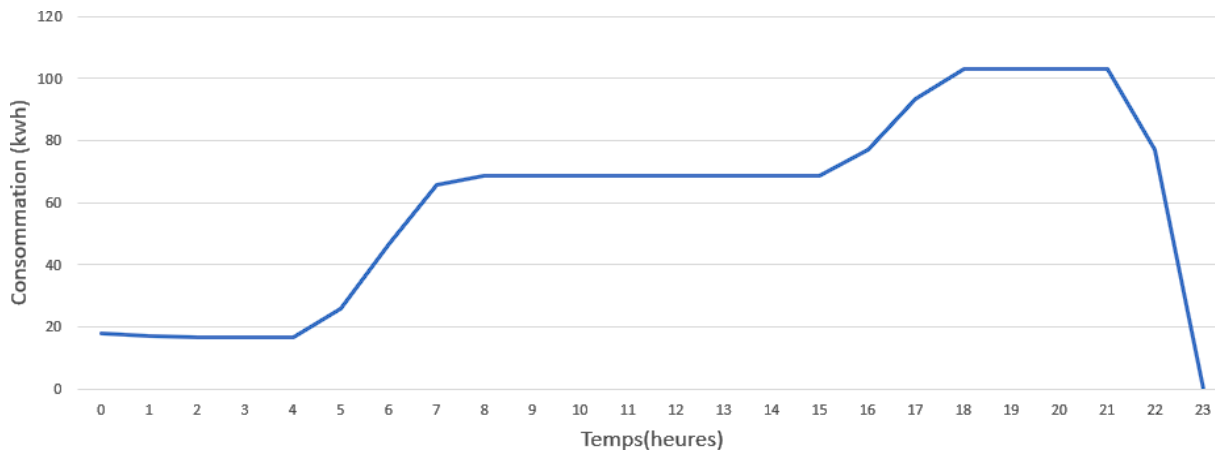


Figure 3.21 : consommation journalière de 50 maisons dans la région de Tiaret.

On voit clairement sur graphe qu'il en a 3 différentes périodes de consommation. Le matin depuis l'heure de 00 :00 jusqu'à 5h, est une période de basse consommation car l'ensemble de la communauté en dort, puis à partir de 6h jusqu'à 15h l'après-midi on aura une augmentation de la consommation justifié l'utilisation des climatiseurs et les ventilateurs. Enfin une consommation très élevée le soir à partir de 17 :00h et 23 :00h ce qui très logique, puisque qu'il fait nuit, et tout les habitant du village utilisent des lampes de maison et même des ventilateurs.

3.2.3L'Aérogénérateur :

Afin de pouvoir alimenter notre village, nous avons sélectionné l'aérogénérateur 250 kw WES250, ses caractéristiques sont indiquées dans le tableau 4.3, sa puissance nominale est de 250 kW et sa vitesse est de 11.5 m/s, et sa courbe de puissance est illustrée sur la **figure 3.22**

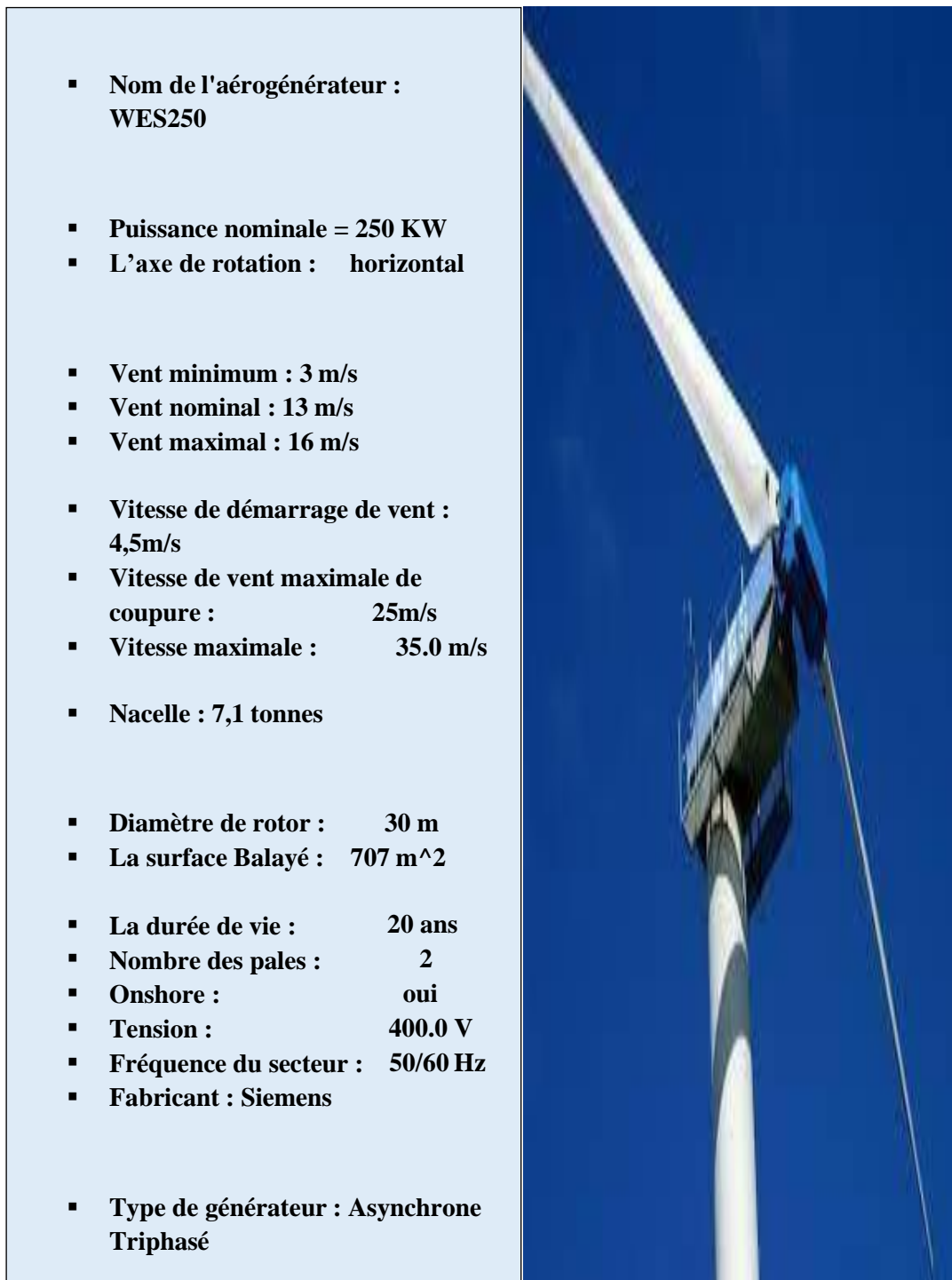


Figure 3.22 : caractéristique de l'aérogénérateur WES250.

3.2.3.1 La courbe de puissance :

Sur la figure 3.23 suivantes on a la courbe de puissance de l'éolienne WES250 utilisé pour alimenter 50 maisons à Tiaret.

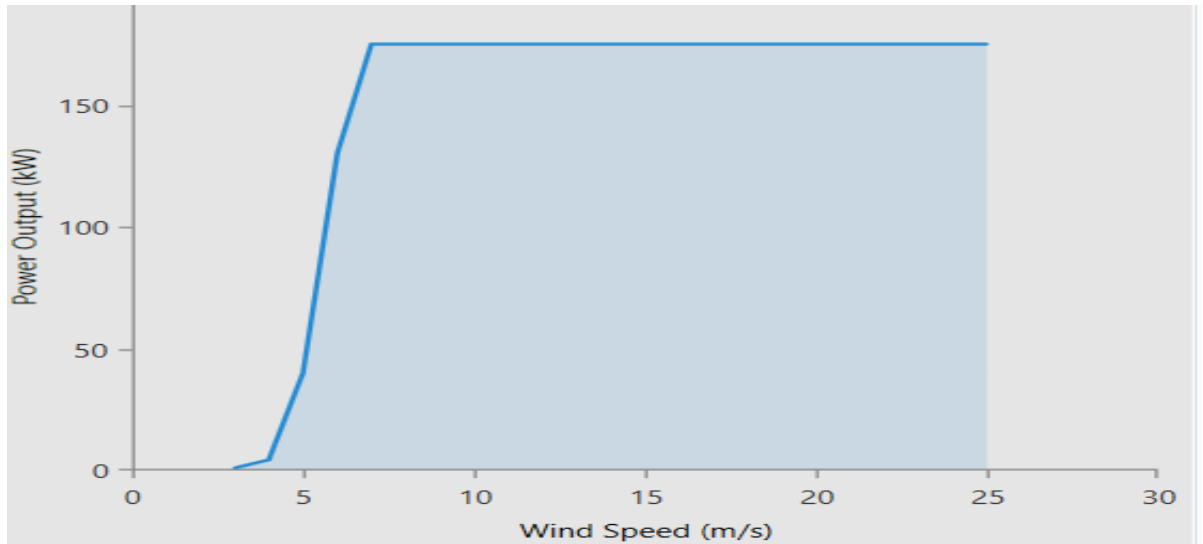


Figure 3.23 : la courbe de puissance en fonction de vitesse de vent pour WES250.

3.2.4 Convertisseur :

Caractéristiques	Valeurs
Puissance	110 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement CA/CC	90%
Rendement CC/CA	95%

Tableau 3.8 : Caractéristiques du convertisseur utilisée dans ce site

3.2.5 L'électrolyseur :

L'électrolyseur sélectionné est utilisé pour produire de l'hydrogène lorsque l'énergie éolienne est produite en excès. Pour notre système l'électrolyseur choisi porte les caractéristiques citées dans le tableau 3.9 :

Propriétés	Valeurs
Type	Alcalin
Puissance	120 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement	85%
Mode de fonctionnement	CC

Tableau 3.9 : Propriétés de l'électrolyseur

3.2.6 La pile à combustible :

Lorsque les différentes sources ne suffisent pas à la demande, alors c'est à la PAC d'intervenir pour remédier au manque d'énergie.

La PAC choisi pour ce site, présente les propriétés suivantes :

Propriétés	Valeurs
Type	PEM
Puissance	120 KW
Mode de fonctionnement	CC
Durée de vie	40,000 heures

Tableau 3.10 : Propriétés de la PAC

3.2.7 Le réservoir d'hydrogène :

L'hydrogène produit par l'électrolyseur est stocké dans un réservoir pour être utiliserpar la PAC afin de combler la demande.

On note que les caractéristiques de stockage sont : 700 bars et 20.28k (-253°C)Le réservoir utilisé se caractérise comme suit :

Propriétés	Valeurs
Capacité de stockage	520 kg
Durée de vie	25 ans
Volume réservé	10%

Tableau 3.11 : Propriétés du réservoir d'hydrogène

3.2.8 Simulation du système hybride (SEH) à la région de Tiaret:

La figure 3.24 représente une comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour chaque jour du mois de juillet.

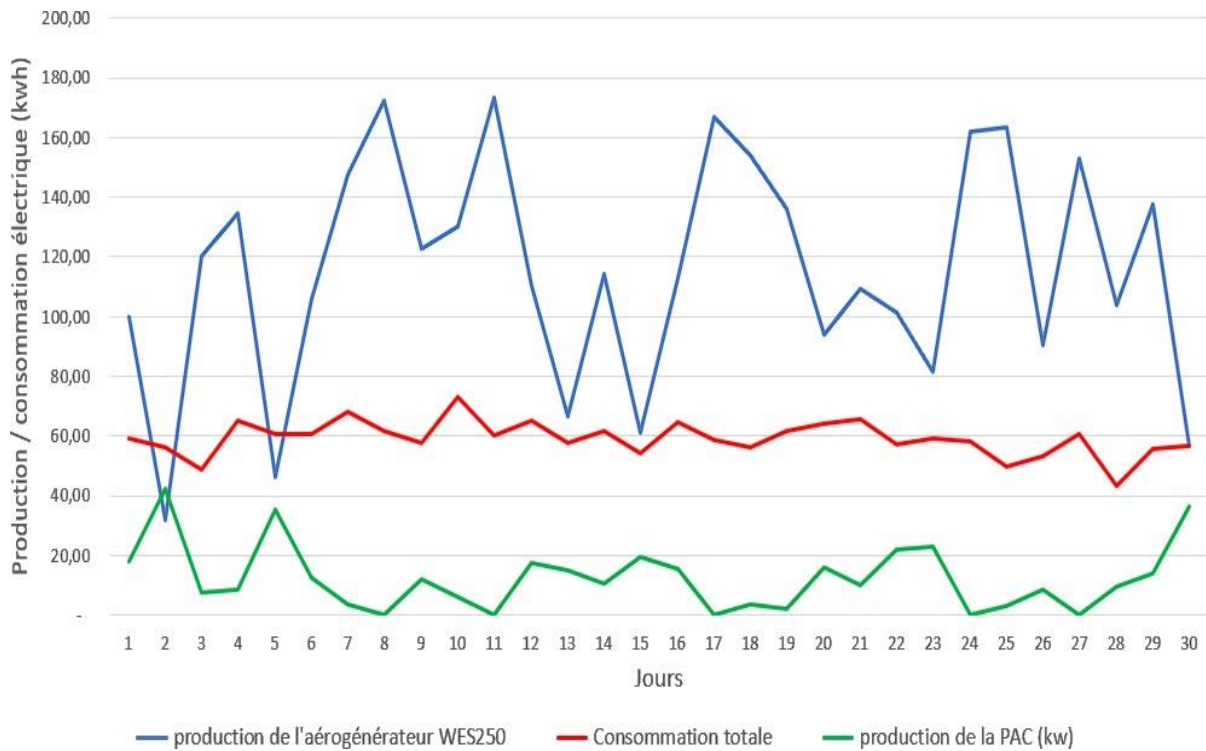


Figure 3.24 : Comparaison entre la production de l'aérogénérateur, la production de la pile combustible et la consommation total du mois d'aout.

D'après la **Figure 3.24** , représentant la production d'électricité d'éolienne WES250, de la pile à combustible et des charges pour chaque jour du mois de juillet, on observe l'alternance entre la production des éoliennes, et on constate que la production est plus élevée pour l'éolien turbines, surtout durant les jours les plus ventés comme le 8 et le 11 du mois évoqué, cette production est moins importante pour les faibles vitesses de vent, comme il ressort des résultats lors du reste des jours du mois, lorsque la production d'électricité était maximale pour la pile à combustible.

3.2.8.1 Production énergétique annuelle :

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

Production	kWh/yr	%
Fuel Cell	134,130	12.6
WES 30 [250kW]	932,862	87.4
Total	1,066,992	100

Tableau 3.12 : Production du SEH

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	507,284	56.2
DC Primary Load	0	0
Total input energy	395,179	43,8
Total	902,463	100

Tableau 3.13 : Consommation électrique

Comme le montre le tableau 3.12, l'énergie éolienne produit 87,4 % de l'énergie annuelle, tandis que la piles à combustible ne produisent que 12,6 % de l'électricité, avec un rendement électrique moyen de 43 %, ce qui signifie que les éoliennes WES250 ont les caractéristiques correctes pour la région de Tiaret.

Selon le tableau 3.13, l'électrolyseur consomme 46,8 % de l'électricité produite pour générer et stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène.

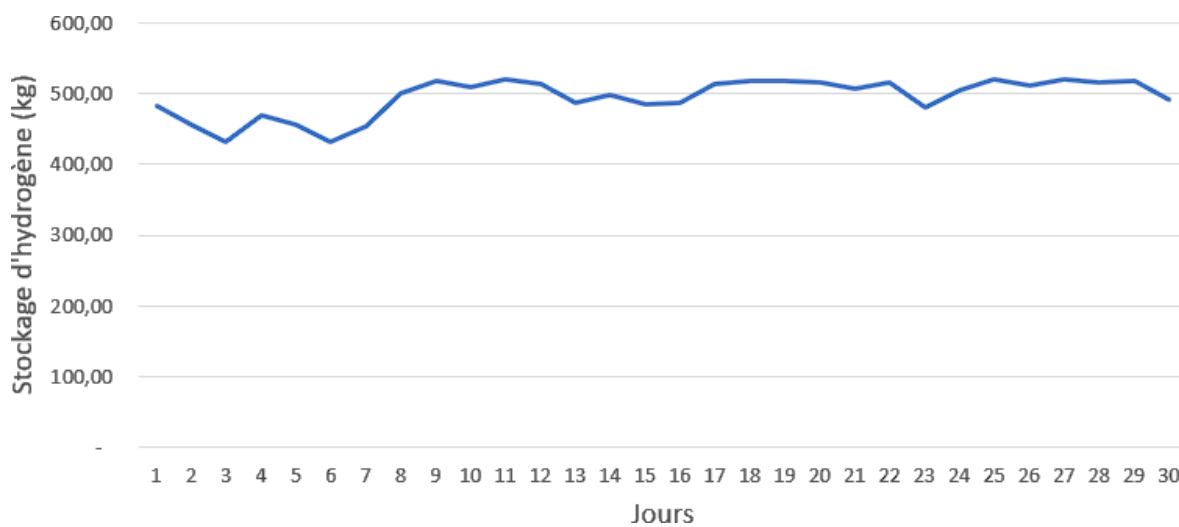


Figure 3.25 : Évolution du stockage de l'hydrogène durant le mois de juillet.

Comme le montre la figure 3.25, le stockage de l'hydrogène dépend de la puissance de l'éolienne, ce qui signifie que l'énergie excédentaire produite peut produire une quantité considérable d'hydrogène, qui diminue avec le temps à mesure que la vitesse du vent diminue.

3.2.9 Comparaison entre la production électrique et la consommation de l'électrolyseur:

La figure 3.26 représente la production éolienne ainsi que la consommation électrique de l'électrolyseur pour un mois de chaque saison. On remarque que le déclenchement de l'électrolyseur dépend de l'énergie en excès qui est produite par l'aérogénérateur pour être stocké sous forme d'hydrogène à des horaires bien particulière.

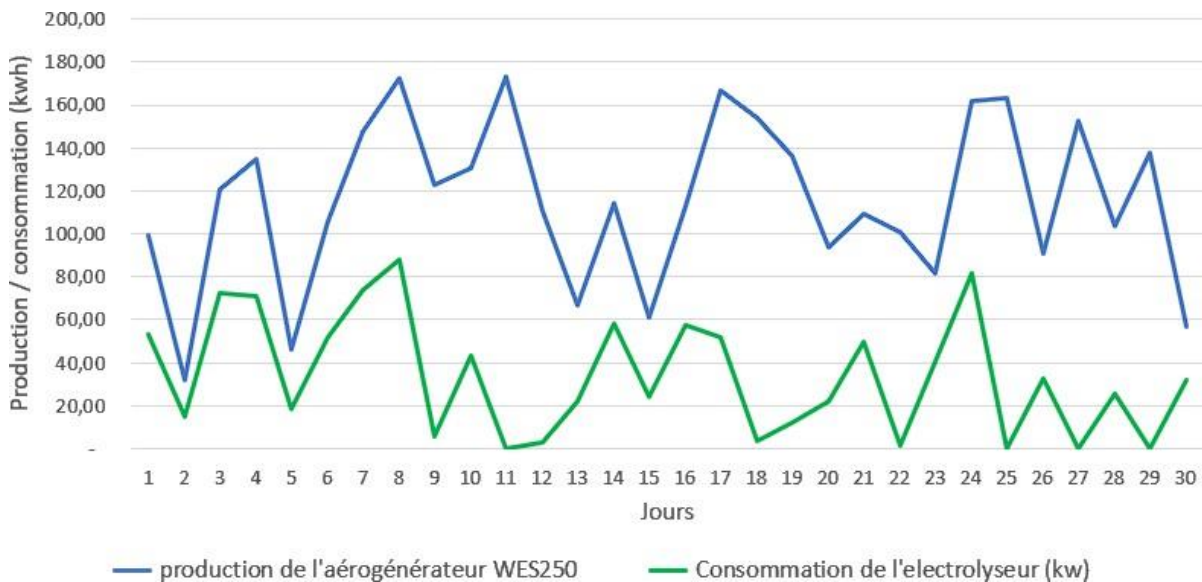


Figure 3.26 : *Comparaison entre la production électrique d'éolien WES250 et la consommation de l'électrolyseur.*

3.2.9.1 Production énergétique du SEH (éolienne + pile à combustible) :

On remarque bien que la figure 3.27 reflète exactement le principe de fonctionnement de notre système hybride, lors de la diminution de la puissance d'éolienne, la pile à combustible fournit l'énergie nécessaire pour combler la demande.

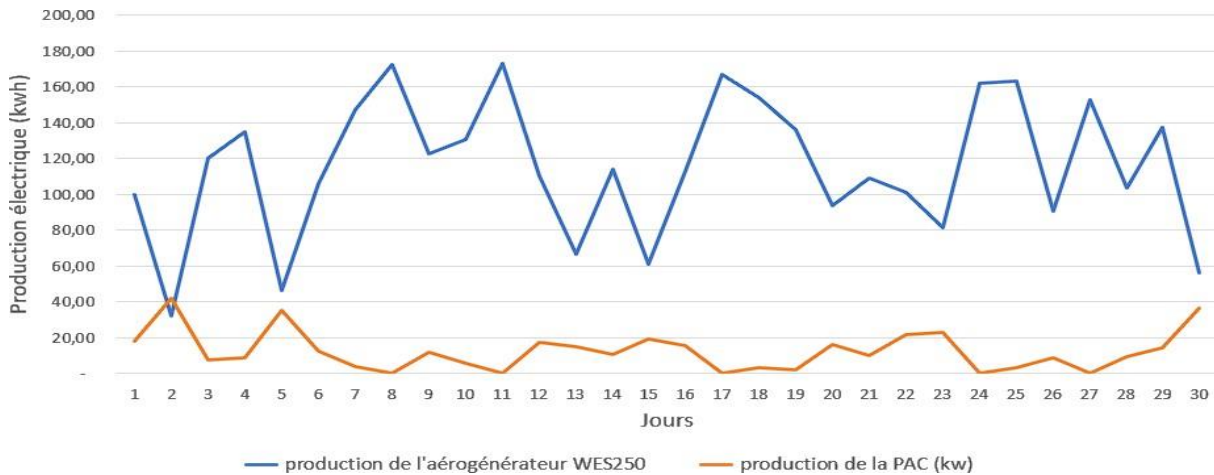


Figure 3.27 : Production électrique journalière de l'aérogénérateur et de la PAC en Kwh pour le mois du juillet.

On remarque que lorsque l'accumulation de la source éolienne présente une production excédentaire, la PAC est en état d'arrêt, comme le montre la figure 3.27. En cas de sous-production, la PAC intervient pour satisfaire à la demande.

3.3 / Site d'Adrar :

3.3.1 Données d'entrées :

Les données des vitesses du vent du site d'Adrar sont utilisées pour la simulation. Elles sont constituées de vitesses mensuelles moyennes mesurés à la hauteur de 10 m du sol.

Le tableau 3.14 représente les caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Adrar.

Lat itude	Longit ude	Altitu de	Rugosi te
28, 25 °	-0,25°	258 m	0,01 m

Tableau 3.14 : Caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Adrar.

On peut voir l'évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent sur la **figure 3.28**. Nous avons remarqué que la vitesse varie selon les mois, avril étant le plus élevé à 6.76 m/s, suivie de Juillet et août avec des vitesses de 6.69 m/s. À d'autres moments de l'année, elle varie autour de 6.35 m/s.

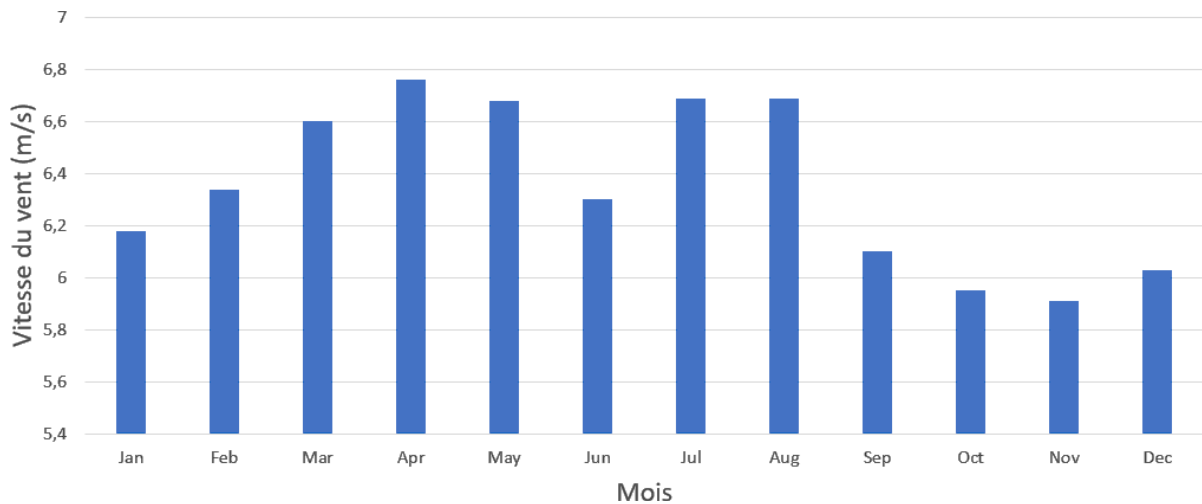


Figure 3.28 : Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Adrar à 10m du sol

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.

Dans notre étude, notre objectif est d'alimenter 50 foyers à Adrar. Notre consommation trimestrielle d'un foyer est de 2880 Kwh pour une seule maison située dans la région.

Consommation par trimestre(KWh)								2880
PREMIERE TRANCHE		DEUXIEME TRANCHE		TROISIEME TRANCHE		QUATRIEME TRANCHE		PRIMES FIXES (DA)
CONSUMMATION	PREX UNITAIRE (DA)	CONSUMMATION	PREX UNITAIRE (DA)	CONSUMMATION	PREX UNITAIRE (DA)	CONSUMMATION	PREX UNITAIRE (DA)	
125.00	1.7787	125.00	4.1789	750	4.8120	1880	5.4796	
CALCUL DES TAXES ET RECAPITULATION				MONTANT HORS T.V.A.(DA)		T.V.A		MONTANT TOUTES TAXES(DA)
				744.70	09	67.023		811.72
				33910.648	19	2643.02		16553.67
PRIMES FIXES				150				150
DROIT FIXE				100.00				100
TAXE HABITATION				150.00				150
DROIT DE TIMBRE								200
MONTANT TOTAL A PAR TRIMESTRE								17965.39

Figure 3.29 : facture d'électricité d'une maison à Adrar

Dans notre étude, nous nous intéressons au mois où la consommation est maximale. Pour le cas de la région d'Adrar, la charge électrique la plus élevée est noté en mois de aout, voir que l'augmentation de la température en été pousse les gens à utiliser les différents matériels pour le refroidissement en intérieur des maison, tels que les climatiseurs, ce qui justifie la charge élevée en ce mois-ci.

La consommation trimestrielle d'un foyer est approximativement de 2880 Kwh. Nous avons par la suite, calculé la consommation journalière moyenne :

Par la suite, à l'aide du profil de consommation donné par le logiciel Homer illustré sur la **figure 3.30**, la consommation journalière moyenne de (32 Kwh) est distribué en tenant compte des heures de basse consommation d'énergie, moyennes et élevées. Enfin on multiplie chaque consommation horaire par le nombre de 50 qui est le nombre de maison.

Depuis le logiciel HOMER, nous avons réalisé un profil de consommation horaire représenté sur la figure **3.30**, en tenant compte d'une consommation journalière.

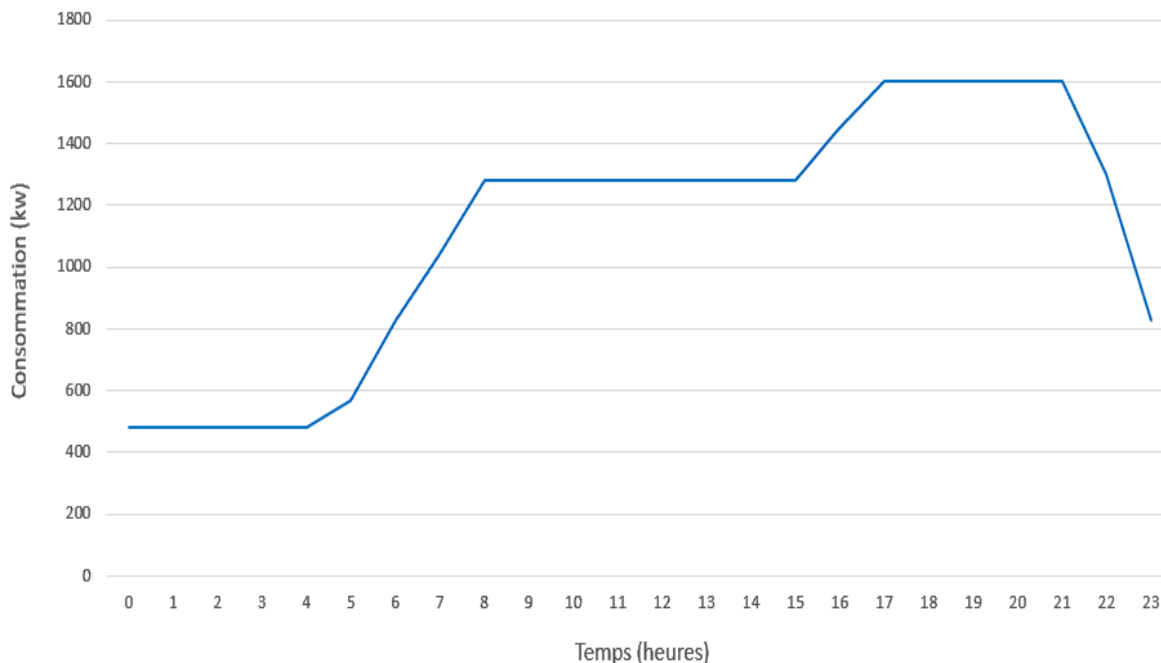


Figure 3.37 : Charge électrique moyenne journalière

La **figure 3.37** représente la charge électrique moyenne horaire pendant une journée. On note que la charge atteint son maximum aux environs de 17-19h, qui représente les heures de pointe

des fonctionnaires. La consommation élevée d'énergie électrique est justifiée par l'utilisation des climatiseurs et les ventilateurs au niveau de l'ensemble du village.

3.3.2 L'aérogénérateur :

L'aérogénérateur choisi dans ce système est le *Enercon E33 de 330 kW* dont les caractéristiques sont présentées sur la figure 3.38. Son moyeu atteint une hauteur de 30 m et sa courbe de puissance est représentée sur la figure 3.39.

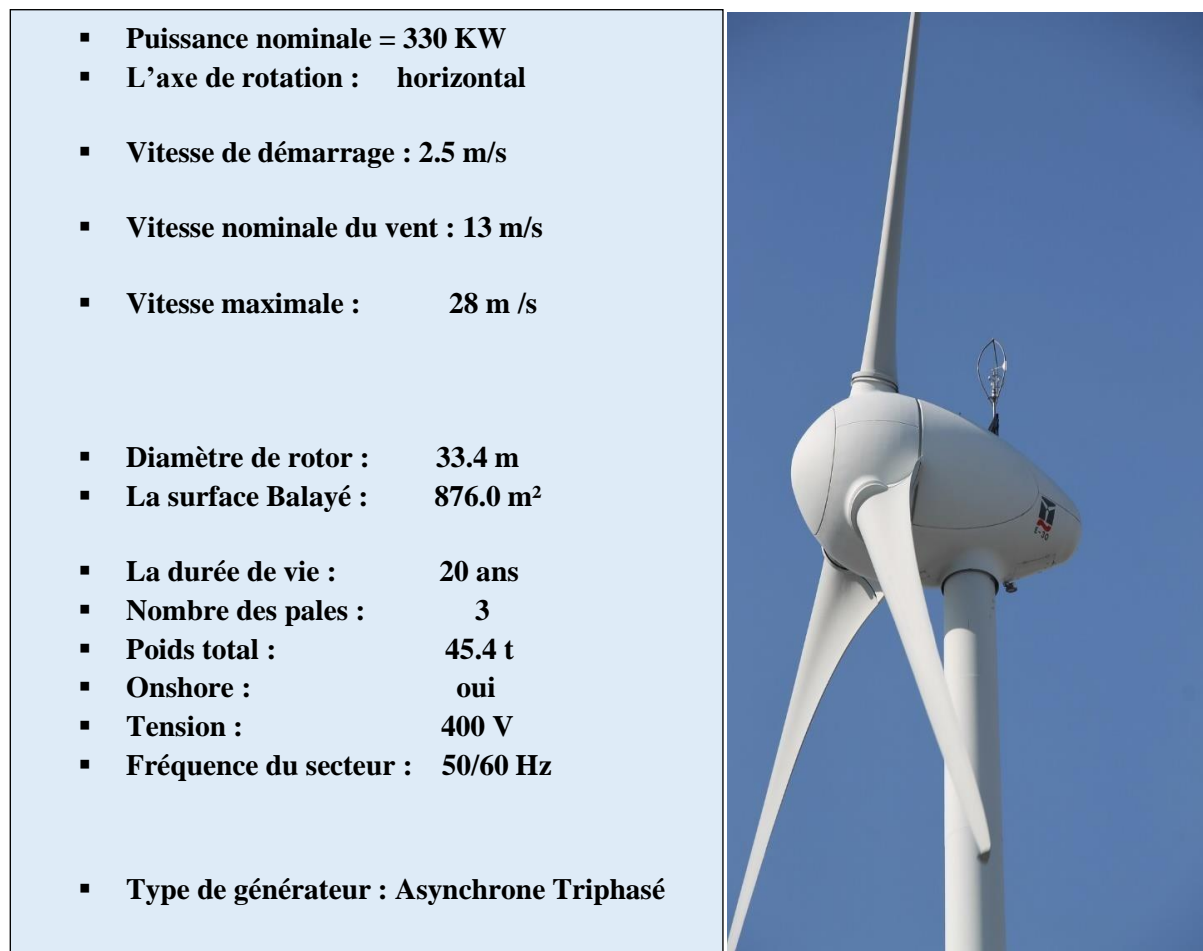


Figure 3.38 : *Caractéristiques aérogénérateur Enercon E33*

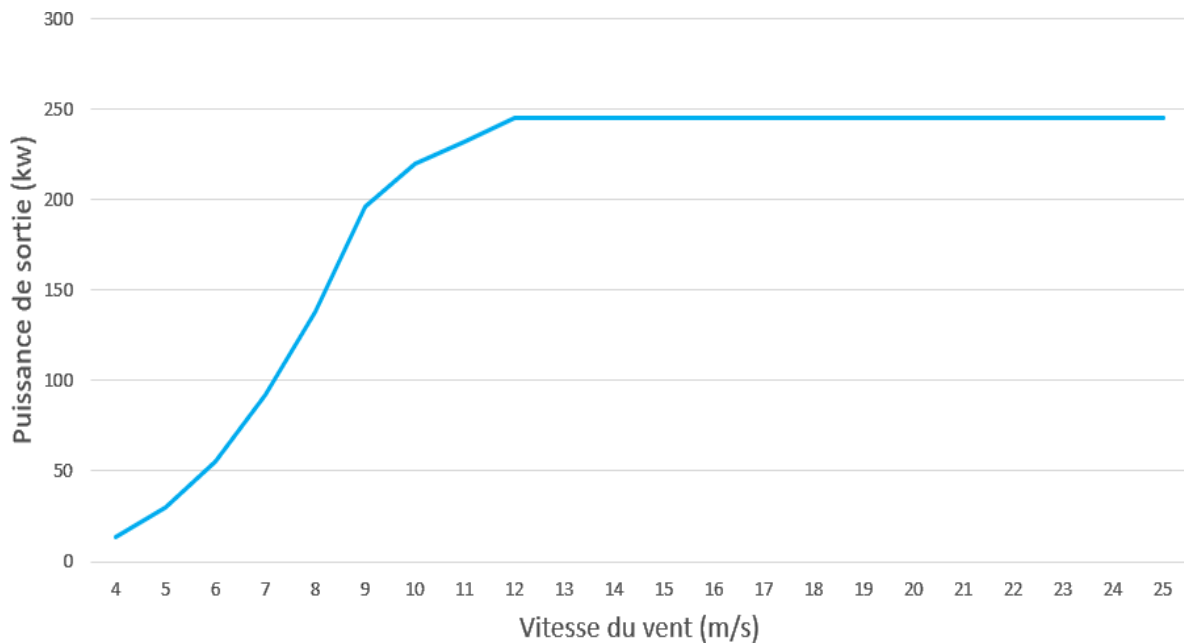


Figure 3.39: Courbe de puissance Enercon E330

3.3.3 Convertisseur :

Caractéristiques	Valeurs
Puissance	300 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement CA/CC	90%
Rendement CC/CA	95%

Tableau 3.15 : Caractéristiques du convertisseur utilisée dans ce site

3.3.4 L'électrolyseur :

L'électrolyseur sélectionné est utilisé pour produire de l'hydrogène lorsque l'énergie éolienne est produite en excès. Pour notre système l'électrolyseur choisi porte les caractéristiques citées dans le tableau 4.16

Tableau 4.16: Propriétés de l'électrolyseur

Propriétés	Valeurs
Type	Alcalin
Puissance	200 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement	85%

Mode de fonctionnement	CC
------------------------	----

3.3.5 La pile à combustible :

Lorsque les différentes sources ne suffisent pas à la demande, alors c'est à la PAC d'intervenir pour remédier au manque d'énergie. La PAC choisi pour notre étude, présente les propriétés suivantes :

Propriétés	Valeurs
Type	PEM
Puissance	140 KW
Mode de fonctionnement	CC
Durée de vie	40,000 heures

Tableau 3.17 : *Propriétés de la PAC*

3.3.6 Le réservoir d'hydrogène :

L'hydrogène produit par l'électrolyseur est stocké dans un réservoir pour être utiliser par la PAC afin de combler la demande.

On note que les caractéristiques de stockage sont : 700 bars et 20.28k (-253°C) Le réservoir utilisé se caractérise comme suit :







Propriétés	Valeurs
Capacité de stockage	800 kg
Durée de vie	25 ans
Volume réservé	10%

Tableau 3.18: *Propriétés du réservoir d'hydrogène*

A l'aide du logiciel HOMER, nous avons défini chaque élément de nos installations en se basant sur toutes les caractéristiques et les données fournies dans les paragraphes précédents.

HOMER simule les configurations du système avec toutes les combinaisons des composants spécifiés en entrée. Il élimine les résultats de toutes les configurations de systèmes infaisables, qui ne sont pas en adéquation avec la demande en électricité ni ne sont compatible avec les ressources au but de permettre une production optimale et lucrative.

Les composants de notre système pour le site d'ADRAR au but d'alimenter 50 foyers sont comme suit :

System Architecture	
	HOMER Load Following Une P.A.C de 140 KW
	FC - 140 kW
	Converter - 300 kW Un convertisseur de 300 KW
	Ene335 - 1.00 Une éolienne de type Enercon E33 de 330KW
	Electrolyzer - 200 kW
	HTank - 800 kg Un électrolyseur de 200 KW (Générique)
	Un réservoir de stockage d'hydrogène de 800KG

3.3.7 Simulation du système hybride de la région d'Adrar :

La Figures 3.40 représente la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible et la charge pour le mois d'aout, On observe une alternance entre la production de l'aérogénérateur et la PAC.

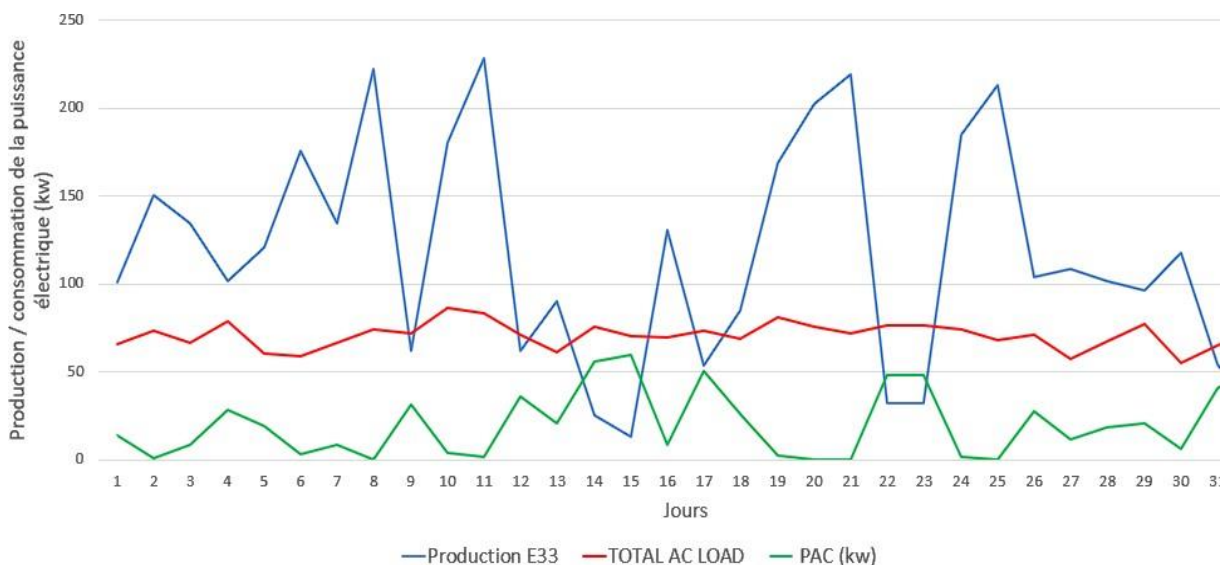


Figure 3.40 : Comparaison entre la production de l'aérogénérateur, la production de la pile combustible et la consommation total du mois d'Aout

3.3.7.1 Production énergétique annuelle :

Les tableaux 3.18 et 3.19 représentent la production et la consommation d'énergie sur une année.

Tableau 3.19: Production du système hybride système hybride

Production	kWh/yr	%
Fuel Cell	173,967	15.1
Enercon E33 33.4m 330kw	977,917	84.9
Total	1,151,884	100

Tableau 3.20: Consommation du système hybride

Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	592,591	55.0
DC Primary Load	0	0
Electrolyzer	484,636	45%
Total	1,077,227	100

D'après le **tableau 3.19** on voit que l'énergie éolienne produit 84.9% de l'énergie annuelle et que la pile à combustible produit seulement 15.1% d'énergie électrique.

D'après le **tableau 3.20** l'électrolyseur consomme 45.0% de l'énergie électrique produite, afin de produire et stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène.

3.3.7.2 Le stockage d'hydrogène :

D'après la figure 3.41 on constate que le stockage d'hydrogène dépend de la production électrique de l'aérogénérateur, ce qui signifie que l'énergie produite en excès permet la production, d'une quantité d'hydrogène considérable, qui diminue au fur et mesure que la vitesse du vent diminue.

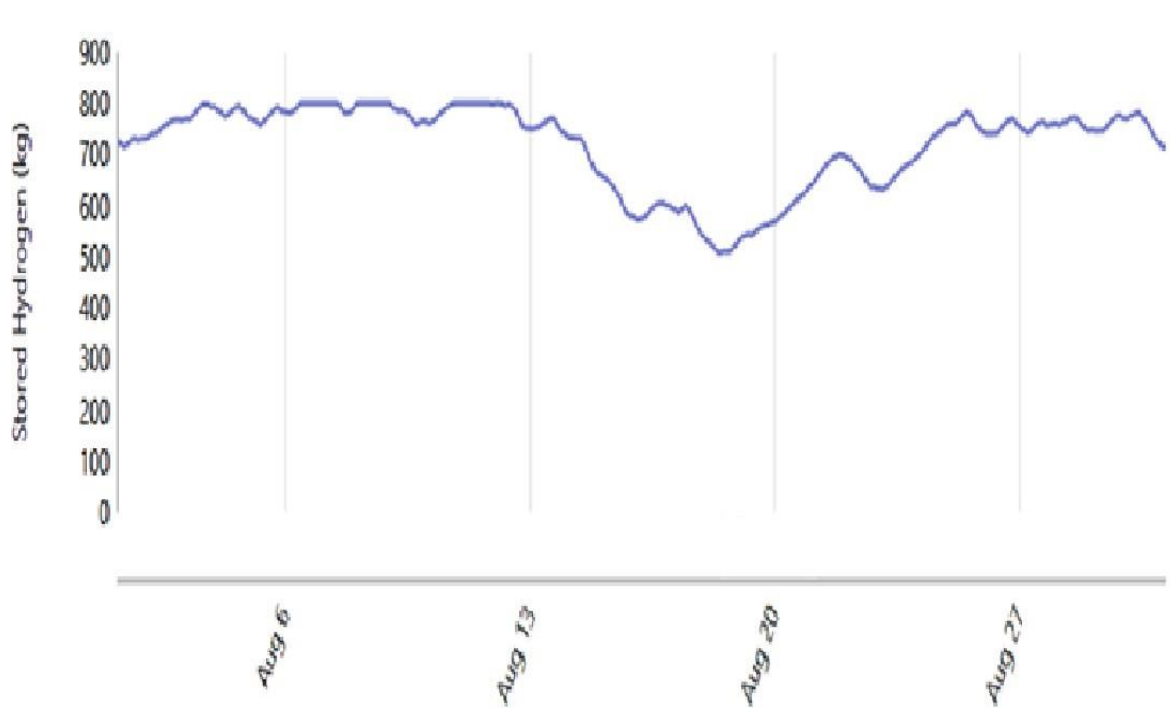


Figure 3.41 : Evolution du stockage de l'hydrogène du mois d'août

La production d'hydrogène dépend indirectement de la production électrique en excès, en effet cette excès déclenche l'électrolyseur qui de son côté produit de l'hydrogène et qu'est stocké par la suite dans le réservoir, ce dernier est consommé par la PAC en cas de chute de vitesse du vent (chute de génération électrique) pour compenser le manque et satisfaire la charge requise.

3.3.8 Comparaison entre la production électrique et la consommation de l'électrolyseur :

La figure 3.42 présente la production éolienne ainsi que la consommation électrique de l'électrolyseur pour le mois d'août. On remarque que le déclenchement de l'électrolyseur dépend de l'énergie en excès qui est produite par l'aérogénérateur pour être stocké sous forme d'hydrogène.

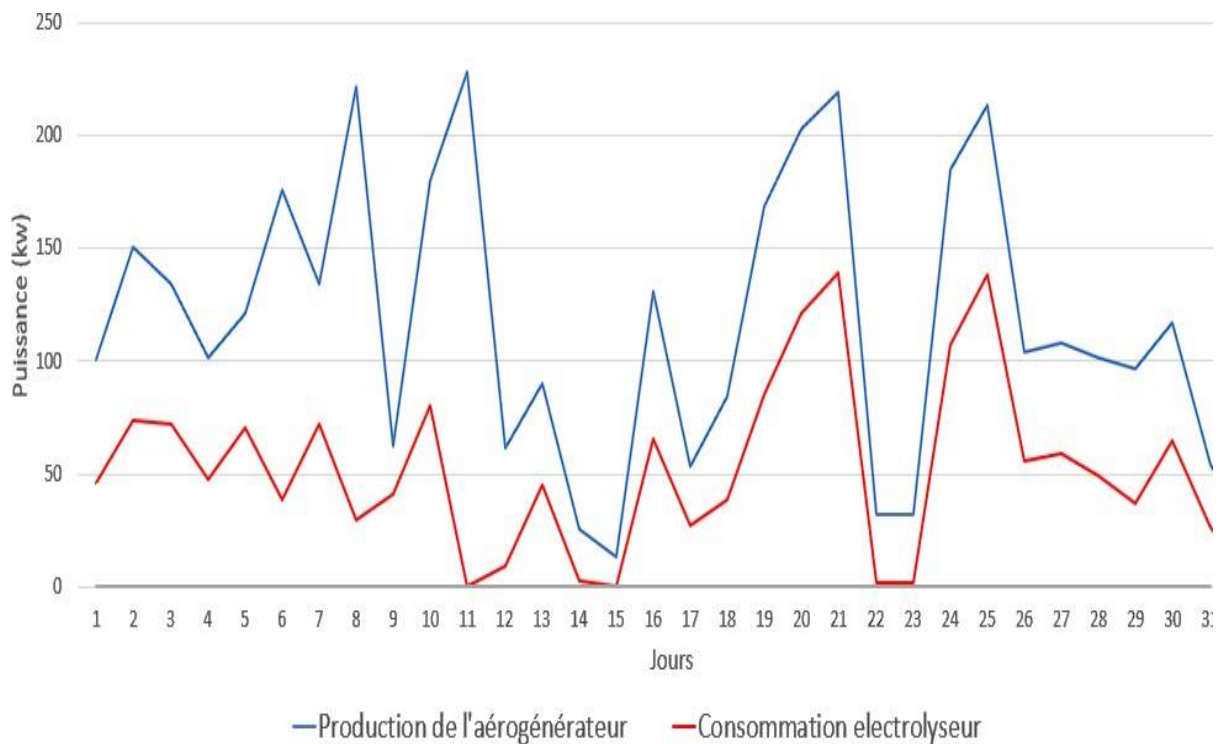


Figure 3.42 : Variation de la consommation d'électrolyseur en fonction de la production de l'aérogénérateur

D'après la **figure 3.43**, On remarque que la production électrique de l'aérogénérateur dépend de la vitesse du vent, de même, la consommation de l'électrolyseur dépend de l'excès de cette dernière.

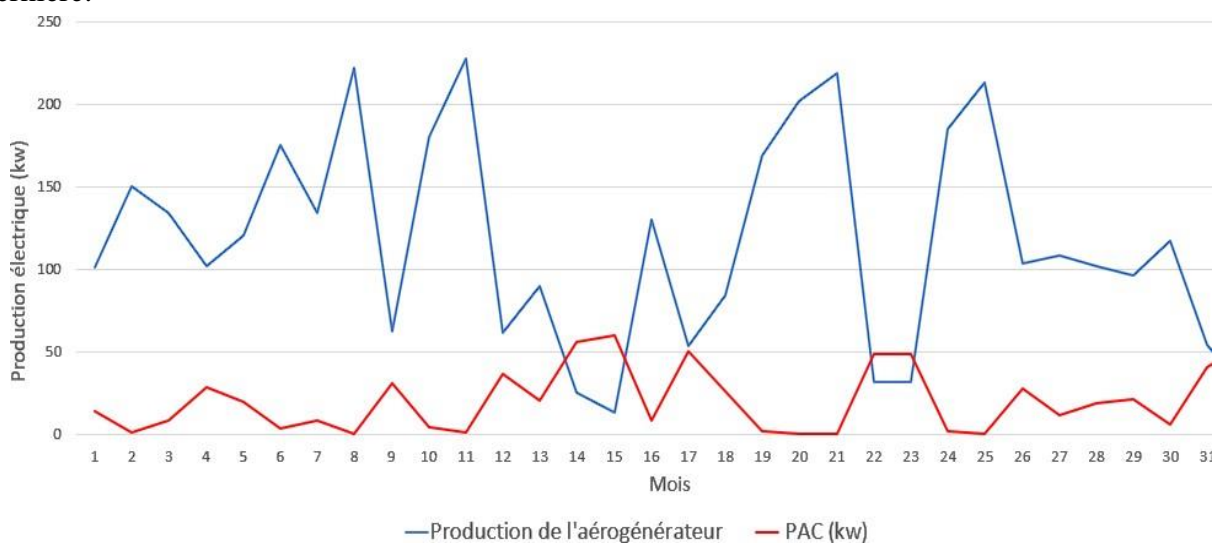


Figure 3.43: Production de l'aérogénérateur et de la PAC pour le mois d'aout

La **figure 3.43** traduit exactement le principe de fonctionnement de notre système hybride, lors de la diminution de la production de l'aérogénérateur, la PAC fournit l'énergie nécessaire pour combler la demande.

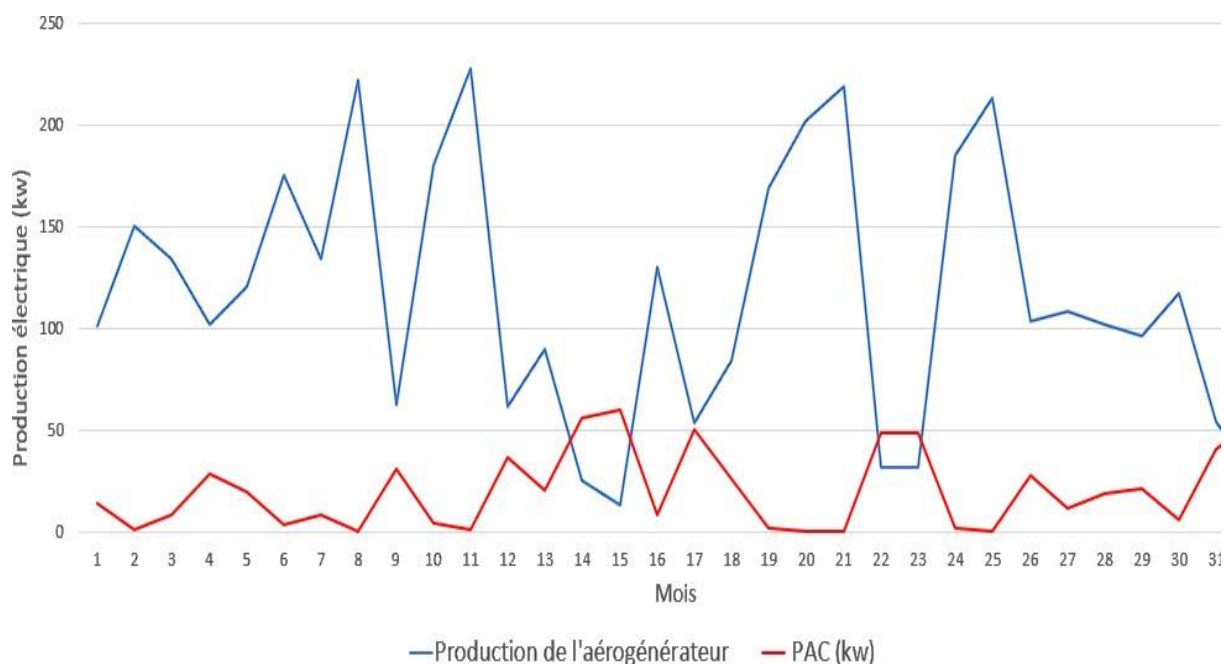


Figure 3.44 : Production horaire de l'aérogénérateur et de la PAC.

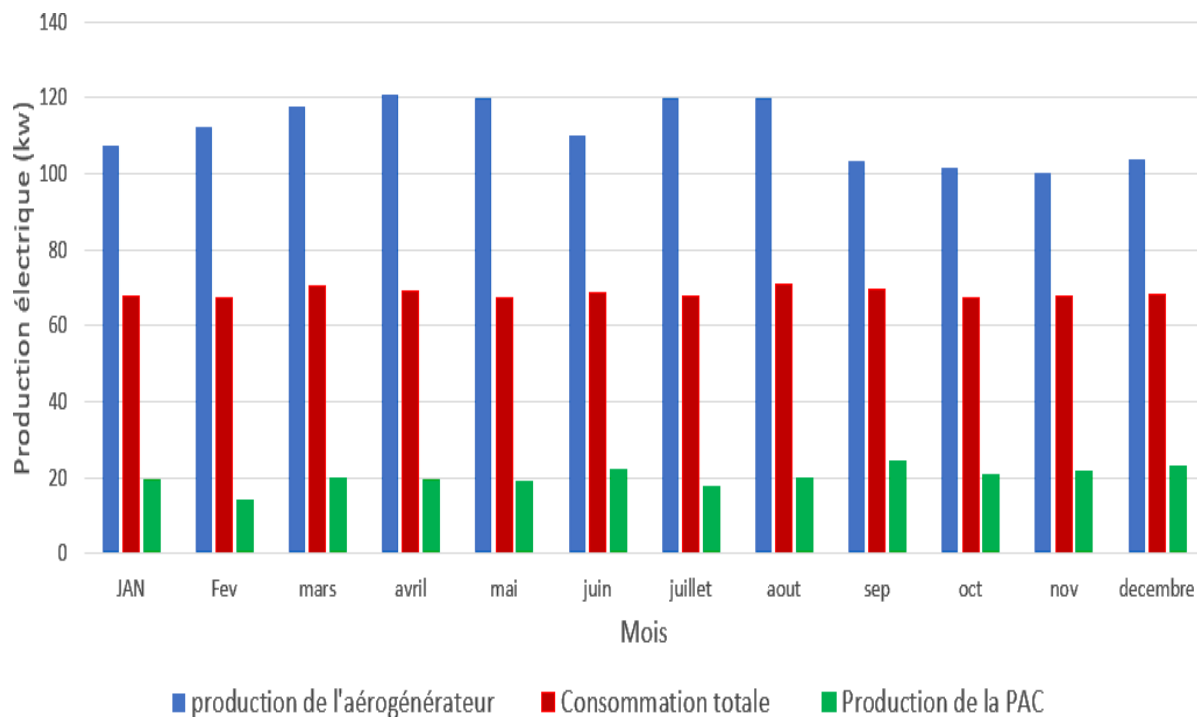


Figure 3.44 : Comparaison entre la production annuelle de l'éolienne, la PAC et la consommation totale

Les résultats ont montré une bonne complémentarité entre l'énergie produite par l'aérogénérateur et celle produite par la PAC. En effet pour les périodes de faible production, le système fait appel à la PAC pour combler le manque.

Donc nous concluons que l'électrolyseur permet le stockage de l'énergie excédentaire sous forme d'un vecteur énergétique appelé hydrogène, pour enfin le restitué par la PAC afin de compenser le manque d'énergie dû à l'intermittence de l'énergie éolienne.

3.4 / Comparaison de production et consommation pour les 3 sites :

La figure 3.45 représente une comparaison de production électrique des éoliennes (85kw,250kw,330kw) sélectionnée pour les 3 sites (Bejaia, Tiaret, Adrar) respectivement.

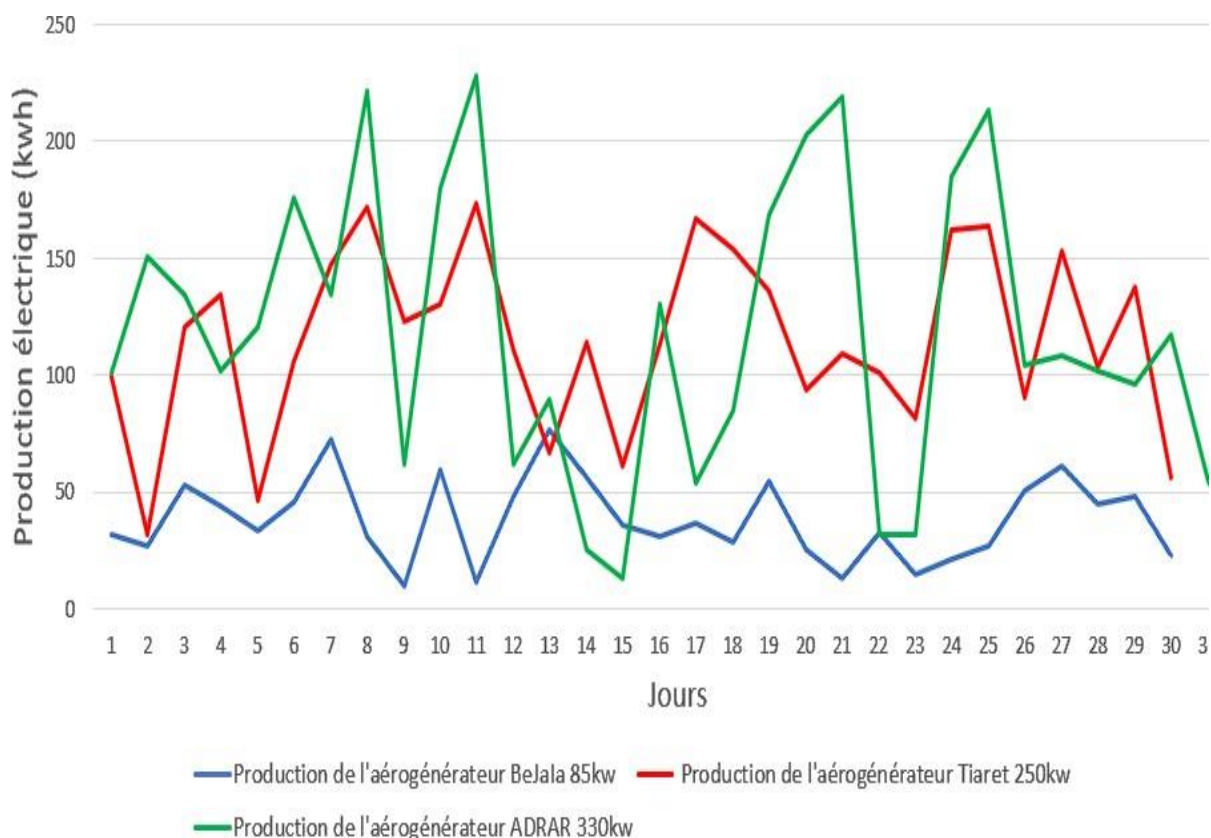


Figure 3.45 : Comparaison de production électrique pour les 3 éoliennes sélectionnée

On note que la puissance électrique générée par les éoliennes dépend grandement de la variation de la vitesse du vent sur le site en question mais aussi de la puissance de cette dernière.

Dans notre étude, nous avons sélectionnée différentes éoliennes pour les 3 différents sites, d'un côté pour couvrir la charge nécessaire pour alimenter notre site, d'un autre pour la compatibilité de la puissance de sortie de cette dernière en fonction de la variation du vent du site.

D'après la figure 3.45, nous remarquons que la puissance électrique générée par l'éolienne du site d'Adrar (330kw) est 1.6% supérieure par rapport à l'éolienne du site de Tiaret, et est le triple pour l'éolienne du site de Bejaia.

La figure 3.46 représente une comparaison entre la consommation électrique des 3 sites (Bejaia, Tiaret, Adrar)

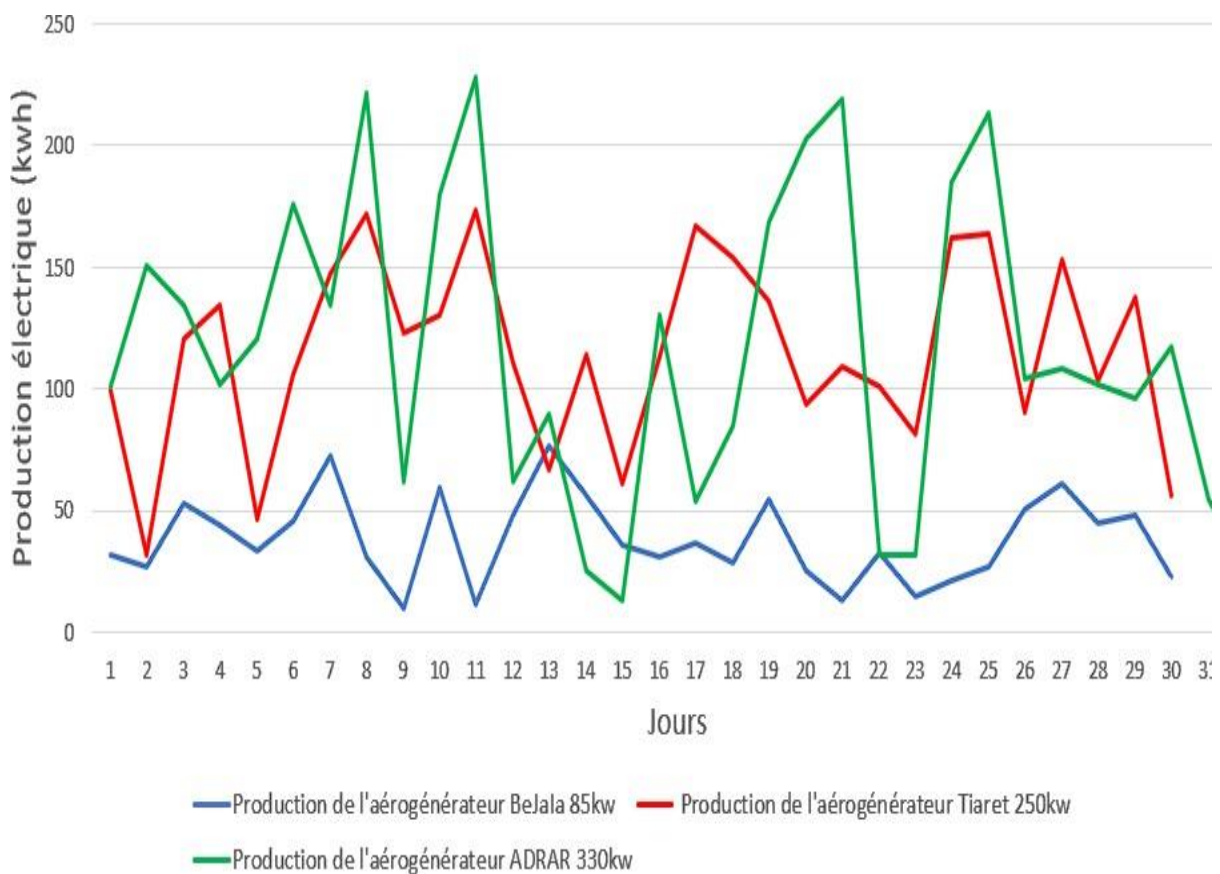


Figure 3.46 : Comparaison de consommation électrique des 3 sites

D'après la figure 3.46, nous remarquons que la consommation électrique du site d'adrar est approximativement 8% supérieure à la consommation du site de Tiaret, et est 3 fois supérieure pour le site de Bejaia.

On note que ceci est dû à la haute utilisation des appareils de climatisation pour les périodes où la température est élevée (jusqu'à 46° pour le site d'adrar) ainsi que leur durée d'utilisation.

La figure 3.47 représente également une comparaison entre la production électrique des piles à combustibles sélectionnée sur les 3 sites.

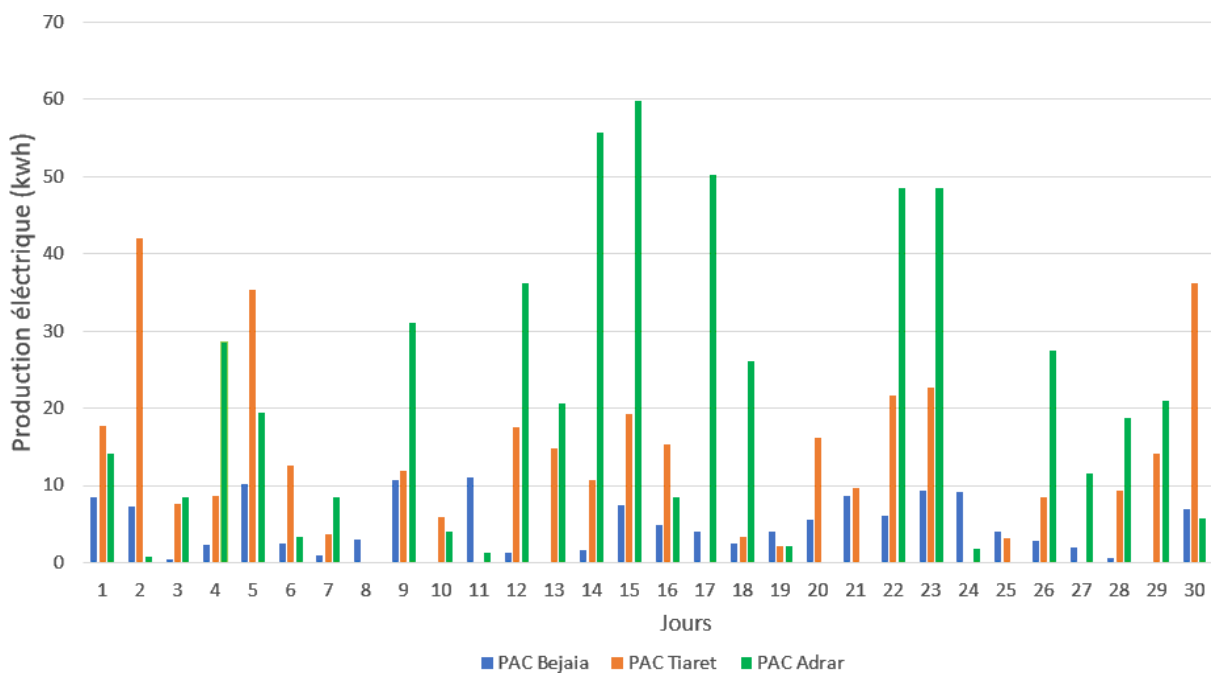


Figure 3.47 : Comparaisons de la production électrique des 3 PAC sélectionnée

D'après la figure 3.47, nous remarquons que la production électrique pour le site d'ADRAR est la plus élevée, suivis de la PAC du site de Tiaret et enfin de Bejaia.

On note que le déclenchement de la pile à combustible dépend de la variation de la vitesse du vent sur le site, ainsi son principal but est de compenser le manque de charge nécessaire pour l'alimentation du village, cette dernière fonctionne en alternance avec l'aérogénérateur, pour une alimentation autonome optimal.

4/ Conclusion :

A l'aide du logiciel de simulation Homer, on a obtenu les résultats numériques sur les différentes parties du système SEH, ensuite on a utilisé l'Excel pour réaliser des graphes sur la variation de la consommation d'énergie en fonction du temps (journalière et horaire) avec un le choix du mois qui a noté la plus haute demande électrique durant l'année. Enfin, en utilisant l'excel, on a pu réaliser des graphes racontant la variation de la production électrique depuis l'aérogénérateur et la pile à combustible en fonction du temps, la production d'hydrogène à partir d'électrolyseur et sa consommation par la pile à combustible en fonction de la production d'éolienne. Grâce à ces graphes on peut simplement comparer entre les données et les résultats obtenues.

Conclusion et perspectives :

Les énergies renouvelables sont les 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.

Les principaux résultats de cette étude sont obtenus à l'aide du programme HOMER qui nous a permis de prédire le comportement de l'ensemble du système afin de dimensionner et simuler un système hybride éolien-hydrogène pour l'alimentation de 50 foyers de charges différentes respectivement (8.66 KWh/j, 28.66 KWh/j, 32 KWh/j) en 3 sites différents (Bejaia, Tiaret, Adrar) en Algérie.

On a trouvé que les dimensions optimales des composants répondant au régime du vent pour le site de Bejaia sont constituées d'une éolienne de 85 kW, une PAC de 40KW, d'un stockage de 460 KG et un électrolyseur de 60KW.

Pour le site de Tiaret, les composants répondant au régime du vent du site sont constitués d'une éolienne de 250 KW, d'un électrolyseur de 120KW, d'une PAC de 120kw et d'un stockage de 520 KG.

En ce qui concerne le dernier site, les composants répondant au régime du vent du site générée par HOMER sont constituées d'une éolienne de 330 KW, d'un électrolyseur de 200kw, une PAC de 140K et un stockage de 800 KG.

D'après les figures précédentes (3.45 à 3.47), nous concluons que pour chaque site nous avons besoins de différent type d'éolien compatible avec ce dernier, d'un côté pour ses caractéristiques, d'un autre pour leur rendement qui dépend de la variation de la vitesse du vent du site au but de couvrir la charge à alimenter.

En tenant compte de la puissance de l'éolienne, la wilaya qui a une valeur maximale d'unité d'énergie produite par l'énergie éolienne parmi les 3 différents sites est la wilaya d'ADRAR, dû à ses avantages météorologiques et ses points stratégiques.

Suivis de la wilaya de Tiaret et enfin de la wilaya de Bejaia.

Perspectives :

Dans les perspectives, en ce qui concerne la productivité et l'autonomie du système, il serait intéressant d'ajouter un système PV au système actuel pour une meilleure productivité pendant les saisons où la vitesse du vent est faible.

De plus, avoir un libre contrat avec le système du réseau électrique ou simplement être connecté sur un réseau de vente peut permettre d'avoir le choix de vendre l'électricité lorsqu'on le souhaite ce qui privilégiera la production du vecteur hydrogène ou de l'électricité. Pour une alimentation peu coûteuse contrairement au cas où il est alimenté par une source variable.

Références bibliographiques

[1] T. Gale, *Alternative Energy*. UXL, 2006.

[2] S. Lee, J. G. Speight, et S. K. Loyalka, *Handbook of Alternative Fuel Technologies*, 2ndéd. CRC Press, 2015.

[3] Khan MJ, Iqbal MT. *Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland. Renew Energy* 2005;30:835e54. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.001>.

[4] F. Gutiérrez-Martín, D. Confente, et I. Guerra, « Management of variable electricity loads in wind – Hydrogen systems: The case of a Spanish wind farm », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, no 14, p. 7329-7336, juill. 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.181.

[5] S. E. Hosseini et M. A. Wahid, « La production d'hydrogène à partir de ressources renouvelables et ressources énergétiques durables: un vecteur d'énergie verte prometteur pour un environnement propre développement », *Examens des énergies renouvelables et durables*, vol. 57, non Supplément C, p. 850-866, mai 2016.

[6] Øystein Ulleberg et al. *The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools*, *international journal of hydrogen energy* 35 1841–1852 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.077>

[7] Zhou T, Francois B. *Modeling and control design of hydrogen production process for an active hydrogen/wind hybrid power system. Int J Hydrogen Energy* 2009;34(1):21e30. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.030>.

[7A] Mukherjee U, Marouf mashat A, Ranisau J, Barbouti M, Trainor A, et al. *Techno-economic, environmental, and safety assessment of hydrogen powered community microgrids; case study in Canada. Int J Hydrogen Energy* 2017;42:14333e49. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.083>.

[7B] Rahmouni, S. et al., 2017. Prospects of hydrogen production potential from renewable resources in Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(2), pp.1383–1395.

[8] Douak, M., & Settou, N. (2015). *Estimation of Hydrogen Production Using Wind Energy in Algeria*. *Energy Procedia*, 74, 981–990.
doi:10.1016/j.egypro.2015.07.829

[9] Maouedj R, Bouselem S e Benyoucef B. *Optimisation d'un système de pompage éolien application aux sites sahariens*. *Revue des énergies renouvelables (Algérie)* 2008; 11:239-250

[10] Lilia AICHE-HAMANE, Mustapha HAMANE et Maiouf BELHAMEL Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Algérie. *Estimation de la production d'hydrogène par énergie éolienne dans le sud algérien*
www.academia.edu/13744475/ Estimation de la production d'hydrogène par énergie éolienne dans le sud algérien

[11] « INGRID 39 MWh grid-connected renewable energy storage project », *Fuel Cells Bull.*, vol. 2012, no 8, p. 9, août 2012, doi: 10.1016/S1464-2859(12)70238-9.

[12] Sarrias-Mena, R., Fernández-Ramírez, L. M., García-Vázquez, C. A., & Jurado, F. (2015). *Electrolyzer models for hydrogen production from wind energy systems*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(7), 2927–2938.

doi:10.1016/j.ijhydene.2014.12.125

[13] Blal, M., Belasri, A., Benatillah, A., Hamouda, M., Lachtar, S., Sahouane, N., ... Mostefaoui, M. (2018). *Assessment of solar and wind energy as motive for potential hydrogen production of Algeria country; development a methodology for uses hydrogen-based fuel cells*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9192–9210.
doi:10.1016/j.ijhydene.2018.03.200

[14] Tyerwind. Home. [Enligne].
Disponible sur : < <http://www.tyerwind.com/> >

[15] Yin W, Rui X and Wu X (2016) *Modeling analysis and simulation research on 1.5 MW wind power hydrogen production system*. *China Science and Technology Paper Online*. Available at: [www. paper.edu.cn/releasepaper/content/201601-531](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201601-531)

[16] Ishaq, H., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2018). *Performance investigation of an integrated wind energy system for co-generation of power and hydrogen*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9153–9164.

doi:10.1016/j.ijhydene.2018.03.139

[17] Fang, R., & Liang, Y. (2019). *Control strategy of electrolyzer in a wind-hydrogen system considering the constraints of switching times*. *International Journal of Hydrogen Energy*.

doi:10.1016/j.ijhydene.2019.03.033

[18] Firtina-Ertis, I., Acar, C., & Erturk, E. (2020). *Optimal sizing design of an isolated stand-alone hybrid wind-hydrogen system for a zero-energy house*. *Applied Energy*, 274, 115244. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115244

10.1016/j.apenergy.2020.115244

[19] O. V. Marchenko et S. V. Solomin, « *Modeling of hydrogen and electrical energy storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast* », *Int. J. Hydrog. Energy*, mars2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.02.076.

[20] M. BOUDELLAL, *LA PILE A COMBUSTIBLE*, 2 vol. Paris: Dunod, 2012.

[21] <https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/653412/filename/TotalFRrapideCORRECTED.pdf>

[22] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Vent-page-2.html>

[23] <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/>

[24] <https://energieplus-lesite.be/techniques/eolien6/eoliennes/#:~:text=On%20peut%20faire%20une%20distinction,meilleur%20compromis%20entre%20diff%C3%A9rentes%20contraintes.>

[25] <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne>

[26] <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>

[27] <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/>

[28] <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/67-enercon-e-40-5.40#:~:text=La%20puissance%20nominale%20de%20Enercon,5.40%20est%2040%2C3%20m.>

[29] <https://www.mediachimie.org/sites/default/files/NAT-TSTL-D3Electrolyse.pdf>

[30] https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber48_10_11.pdf

[31] <https://hydrogentoday.info/tout-savoir-sur-lhydrogene/fiche-n2-fonctionnement-dun-electrolyseur/#:~:text=Le%20principe%20de%20l%C3%A9lectrolyse.eau%20en%20hydrog%C3%A8ne%20et%20oxyg%C3%A8ne.&text=Une%20cellule%20d%C3%A9lectrolyseur%20alcalin,un%20bain%20de%20solution%20%C3%A9lectrolytique.>

[32] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>

[33] <https://www.exquado.com/publication/electrolyse-hydrolyse>

[34] <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/electrolyse-de-l->

