



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

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Installation mécanique et turbomachine

Evaluation des performances d'un système hybride éolien-PV en
fonction du moyen de stockage

Proposé et encadré par :
HAMANE

Réalisé par :
Yousfi Riadh
Mammeri Mohamed

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre promotrice Madame Hamane professeur à l'université de SAAD DAHLAB pour avoir accepté de nous encadrer, pour sa permanente gentillesse et pour ces précieux conseils tout au long de notre travail.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes parents qui grâce à eux je suis arrivée

Là où j'en suis aujourd'hui

A mes frères et sœurs

A tous les enseignants qui m'ont accompagné dans mon parcours d'étudiant

A toute personne qui m'est cher au cœur.

RIADH

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A mes chers parents que dieu les garde

A mes chers frères et sœurs.

Mes neveux et nièces ;

Mon grand-père et Mon grand-mère

Mes beaux-frères ;

Mes enseignants depuis mon enfance ;

A toute mes amis.

Mohamed

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE :	13
Chapitre I : état de l'art sur le système hybride éolien-photovoltaïque	14
I.1. Introduction	14
I.2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques	14
I.2.1. Introduction :	14
I.2.2. Généralités sur l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque :	14
I.2.2.1 Le gisement solaire :	14
I.2.2.1.2 Les angles :	16
I.2.2.2 Système de conversion de l'énergie solaire :	19
I.2.2.2.2. Les composants d'un système solaire photovoltaïque : (13)	20
I.2.2.2.5. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque : (15)	23
I.2.2.2.7. Estimation de la production d'énergie d'un système photovoltaïque: (16)	24
I.3. Généralités sur les systèmes éoliens	27
I.3.1. Le gisement éolien :	27
I.3.2. Système de conversion de l'énergie éolienne :	28
I.3.2.1. Historique des éoliennes: (21)	29
I.3.2.2. Les différents types d'éoliennes : (22)	29
I.3.2.3. Principe de fonctionnement du système éolien :	31
I.3.2.4. Estimation de la production d'énergie d'un système éolien : (24)	33
I.4 Les convertisseurs statiques	35
I.4.1 Convertisseur DC/DC (hacheur) (25)	35
I.4.2 Convertisseur DC/AC (onduleur)	36
I.4.3. Convertisseur AC/DC (Redresseur)	36
I.5 différent types de stockages (26)	36
I.5.1 Introduction	36
I.5.2. Stockage sous forme d'énergie mécanique potentielle	37
I.5.2.1. Stockage hydraulique	37
I.5.2.2. Air comprimé	37
I.5.3. Stockage sous forme électrochimique :	38
I.5.4. Stockage sous forme d'hydrogène (27)	39
I.5.4.1. Introduction :	39
I.5.4.2. Intérêt de l'hydrogène :	39
I.5.4.3. Historique :	39

I.5.4.4. Propriétés de l'hydrogène :	40
I.5.4.5. Production de l'hydrogène :	41
I.5.4.6. Stockage et transport de l'hydrogène :	43
I.5.4.7. Applications de l'hydrogène :	45
I.5.5. Stockage inertiel (26)	50
I.5.6. Stockage à l'aide de condensateurs	50
I.5.7. Stockage thermique :	51
I.6 Généralités sur Les systèmes électriques hybrides SEH	51
I.6.1 Introduction :	51
I.6.2 L'origine de la notion du système : (28)	52
I.6.3 Définition de système hybride : (29)	52
I.6.4 Les avantages des systèmes hybrides : (30)	52
I.6.5 Présentation du système hybride : (31)	52
I.6.5.1. Principaux Composants des systèmes hybrides :	53
I.6.6. Classification : (32)	54
I.6.6.1. Le régime du fonctionnement :	55
I.6.6.2. La structure du système hybride :	55
I.6.7. Etudes des systèmes hybrides :	56
I.6.7.1. Critères d'optimisation du système hybride :	56
I.6.7.2. Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides :	56
I.7 Description du logiciel HOMER: (34)	57
Chapitre II : Etude du site d'Adrar	59
II.1 Introduction	59
II.2 Caractéristiques climatiques de l'Algérie	59
II.3. Choix des sites	60
II.4 présentation du logiciel Homer pro	60
II.5 caractéristiques climatique de la région choisi	61
II.5.1 Caractéristiques de la région d'Adrar	61
II.6 Conclusion	63
Chapitre III : Dimensionnement et simulation	64
III.1. Introduction :	64
III.2. Présentation du système hybride :	64
III.3. Données d'entrées :	65
III.3.1. Les données du vent :	65

III.3.2. Les données solaires :	66
III.3.3. La charge électrique :	67
III.3.4. L'aérogénérateur :	68
III.3.5. Le générateur photovoltaïque :	69
III.3.6. L'électrolyseur :	69
III.3.7. La pile à combustible :	70
III.3.8. Le convertisseur :	70
III.3.9. Le réservoir d'hydrogène :	71
III.3.10. batterie :	71
III.4. Dimensionnement :	72
III.5. Simulation des systèmes considérés :	73
III.5.1. Simulation du système avec les configurations 1 et 2 :	73
III.5.1.1. Production énergétique annuelle pour le système avec stockage par batterie :	85
III.5.1.2. Production et consommation annuelle par le système avec stockage par hydrogène :	85
III.6. Comparaison entre les deux configurations étudiées:	86
III.7. Conclusion :	87
Conclusion générale :	88
Références bibliographiques :	89

Table des Figures

Chapitre I

Figure I 1: Les composantes solaires	16
Figure I 2: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale et normal au mois de juillet (9)	19
Figure I 3: La filière de l'énergie solaire	19
Figure I 4: cartes saisonnières de la vitesse moyenne à 50 m du sol [1]	28
Figure I 5: Configuration à axe horizontale	30
Figure I 6: Éolienne de type Savonius Figure I 7: Éolienne de type Darrieus	31
Figure I 8: Conversion de l'énergie cinétique du vent	31
Figure I 9: Principaux composants de l'éolienne moderne	32
Figure I 10: Coefficient de puissance de C_p en fonction de la vitesse spécifique λ	35
Figure I 11 : Une station de transfert d'énergie par pompage (STEP)	37
Figure I 12: station de stockage à air comprimé	38
Figure I 13: Principe de fonctionnement d'une cellule d'une PAC H ₂ /O ₂ en milieu acide	47

Figure I 14 : Schéma des différents types de PAC	47
Figure I 15 : volant d'inertie	50
Figure I 16: schéma d'une installation de stockage thermique	51
Figure I 17: Classification des systèmes hybrides	56
Figure I 18: Classification des études	57

Chapitre II

Figure II 1 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale sur une surface horizontale.....	59
Figure II 2: Carte de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 50 m du sol.....	60
Figure II 3: base de données du logiciel Homer pro	61
Figure II 4: Vue de la zone d'Adrar par le logiciel HOMER pro.....	61
Figure II 5: les Températures données par le logiciel Homer pro pour le site d'Adrar tout au long de l'année.....	62
Figure II 6: l'irradiation donnée par le logiciel Homer pro pour le site d'Adrar tout au long de l'année	62
Figure II 7: la vitesse du vent donnée par le logiciel Homer pro pour le site d'Adrar tout au long de l'année.....	63

Chapitre III

Figure III 1: Bibliothèque HOMER.....	64
Figure III 2: Architecture des configurations 1 et 2 respectivement	65
Figure III 3: Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Adrar à 10m du sol	65
Figure III 4: Variation de la fréquence des vitesses du vent mesurées pour la région d'Adrar	66
Figure III 5: Rayonnement horizontal global et indice de clarté.....	66
Figure III 6: Simulation de la charge à alimenter	67
Figure III. 7: Charge électrique moyenne horaire	67
Figure III. 8: Caractéristiques de l'aérogénérateur PGE 20/25	68
Figure III. 9: Courbe de puissance de l'aérogénérateur PGE 20 /25	69
Figure III 10: représentation des batteries utilisées dans notre système.....	71
Figure III. 11: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de janvier	73
Figure III. 12 : La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de janvier	73
Figure III. 13: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Février.....	74
Figure III. 14: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Février.....	74
Figure III. 15: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Mars	75
Figure III. 16: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Mars.....	75

Figure III. 17: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'Avril	76
Figure III. 18: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'Avril	76
Figure III. 19: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Mai.....	77
Figure III. 20: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Mai.....	77
Figure III. 21: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Juin.....	78
Figure III. 22: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de juin.....	79
Figure III. 23: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Juillet.....	79
Figure III. 24: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Juillet	80
Figure III. 25: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'août	80
Figure III. 26: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'août.....	81
Figure III. 27: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de septembre	81
Figure III. 28: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois septembre	82
Figure III. 29: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'Octobre	82
Figure III. 30: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'octobre.....	83
Figure III. 31: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Novembre.....	83
Figure III. 32: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de novembre	84
Figure III. 33: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de décembre	84
Figure III. 34: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de décembre.....	85

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I 1: Comparaison des différentes technologies d'électrolyse de l'eau.....	43
---	----

Chapitre III

Tableau III 1: Propriétés du champ photovoltaïque	69
Tableau III 2: Propriétés de l'électrolyseur	70

Tableau III 3: Propriétés de la PAC.....	70
Tableau III 4: Caractéristiques du convertisseur.....	71
Tableau III 5: Propriétés du réservoir d'hydrogène	71
Tableau III 6: Caractéristiques des batteries	71
Tableau III 7: Fiche de consommation des appareils électrique pour une seule maison (35).....	72
Tableau III 8: Production du SEH Tableau III 9: Consommation électrique	85
Tableau III 10: Production du SEH Tableau III 11: Consommation électrique	85
Tableau III 12: Comparaison de la production mensuelle moyenne entre les deux configurations	86

Liste des symboles et Abréviations :

Photovoltaïque :

PV : photovoltaïque

GPV : générateur photovoltaïque

CuO : oxyde cuivreux

Se : sélénium

N : neutron

P : proton

P_{opt} : La puissance optimale de la cellule [**W**].

I : Le courant fournit par la cellule photovoltaïque [**A**].

V : La tension continue donnée par la cellule photovoltaïque [**V**].

I_L : Le photo-courant[**A**].

I_R : Le courant traversant la résistance parallèle[**A**].

I_D : Le courant traversant la diode[**A**].

I_O : Le courant de saturation [**A**].

R_s : La résistance série de la cellule [**Ω**].

R_p : La résistance parallèle de la cellule [**Ω**].

E_s : L'ensoleillement [**W/m^2**].

$E_{sréf}$: L'ensoleillement de référence [**W/m^2**].

T_j: La température de jonction de la cellule [°C].

T_jréf : La température de jonction de référence [°C].

T_a : La température ambiante [°C].

q : La charge d'électron $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

K : La constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$).

A: Coefficient d'idéalité de la cellule.

N_oct: Température de fonctionnement nominal des cellules (Nominal operating cell temperature).

E_g : Energie de gap.

α_{sc} : Représente un coefficient d'incrémentation du courant *I_{sc}* .

B_{oc} : Représente un coefficient d'incrémentation de la tension *V_{oc}* .

P&O : Perturbation et d'observation.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

Hacheur :

V_e : La tension d'entrée [V].

V_s : La tension de sortie [V].

V_L : La tension aux bornes de l'inductance *L* [V].

I_R : Le courant traversant a charge [A].

I_L : Le courant traversant l'inductance *L* [A].

I_c : Le courant traversant le condensateur *C* [A].

R : La résistance de la charge[Ω].

T : La période de hachage.

α : Le rapport cyclique.

Batterie :

E₀ : Source idéale de tension

V_{bat} : La tension aux bornes de la batterie [V].

V_{cbat} : La tension aux bornes du condensateur de la batterie [V].

I_{bat} : Le courant traversant la batterie [AA].

R_s : La résistance série de la batterie [Ω].

C_{bat} : La capacité nominale de la batterie [Ah].

Q_{bat} : La quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} [C]

Eolienne :

V_v : La vitesse du vent [m/s].

P_v : La puissance du vent [W].

P_t : La puissance de la turbine éolienne [W].

ρ : La densité d'air [$Kg.m^{-3}$].

$S=\pi R^2$: La surface balayée par la turbine [m^2].

C_p : Le coefficient de puissance de l'éolienne.

λ : La vitesse relative de la turbine éolienne [m/s].

T_t : Le couple aérodynamique [N/m].

T_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone [N/m].

T_{vis} : Le couple visqueux [N/m].

G : Le gain du multiplicateur.

Ω : La vitesse mécanique de la génératrice [rad/s].

Ω_t : La vitesse de la turbine éolienne [rad/s].

J : L'inertie totale de l'arbre de transmission.

f : Coefficient de frottement visqueux

INTRODUCTION GENERALE :

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIXème siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses.

Des récentes estimations ont montré qu'actuellement près de 2.2 milliards d'individus ne sont toujours pas raccordé aux grands réseaux d'électricité (ce qui représente environ 30% de la population mondiale), pour la plus part située dans les pays du tiers monde dont l'Algérie,

La consommation d'énergie mondiale et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine combustible. Certain pays, se sont tourné vers la nouvelle forme d'énergie dites « renouvelable » faisant appel de façon directe ou indirecte à l'énergie solaire .Parmi celle-ci l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire .En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays couvre certains de ses besoin en énergie solaire.

La production de l'électricité est donc forcément, synonyme de perturbations. L'utilisation excessive d'un mode de production accentue fortement l'effet nuisible qui lui est associé et il apparaît évident que la diversification des sources est une solution à promouvoir.

Le rôle d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté.

Chapitre I : état de l'art sur le système hybride éolien-photovoltaïque

I.1. Introduction

En vue de rendre l'approvisionnement en électricité plus écologique, les énergies renouvelables dont les sources sont illimitées et non polluantes ont vu le jour. C'est le cas du photovoltaïque, de l'éolien, de la géothermie, de la biomasse et de la marémotrice.

Dans notre travail le système hybride étudié est celui qui combine les deux sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque/éolien) en utilisant des batteries de stockage ou des piles à hydrogène. Ce système est fiable, économique et plus écologique comparé aux systèmes hybrides comportant des générateurs diesels à carburant fossiles dans le but de respecter l'environnement et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

I.2. Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.2.1. Introduction :

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. L'exploitation de cette énergie nécessite la connaissance exacte de la distribution de sa source qui est en fonction de plusieurs paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, sur le lieu d'implémentation de son système.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différentes caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiées dans ce mémoire : le solaire et l'éolien.

I.2.2. Généralités sur l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque :

I.2.2.1 Le gisement solaire :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire, disponible dans un site donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale.

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables (1). Grâce à ces multiples usages elle tend à être l'une des ressources énergétiques majeures du 3ème millénaire, avec un gigantesque gisement solaire qui équivaut à 10 000 fois la consommation énergétique de l'humanité entière (2)

Le soleil est un réacteur à fusion thermonucléaire, Composée de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, et le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments lourds (Fer, Néon, Azote, Silicium,...).

La chaleur produite lors du processus de la fusion de l'hydrogène au cœur du Soleil traverse les différentes couches de ce dernier jusqu'à sa surface (photosphère) pour y être libérée sous forme de rayonnement solaire ou de flux de particules. Donc la chaleur du Soleil est convertie, à sa surface, en Lumière se présentant sous forme de particules qu'on appelle photons. Ce flux de photon forme des ondes électromagnétiques qui se propagent sans perte d'énergie dans toutes les directions de l'espace, et notamment vers la Terre (3)

Le rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de $1367(\pm 1\%) \text{ W/m}^2$.

Seule une partie de ce rayonnement traverse l'atmosphère et atteint le sol. L'autre partie est diffusée et répartie à peu près uniformément dans toutes les directions de l'espace (4).

Le rayonnement émis par le soleil constitue un spectre allant des ultraviolets à l'infrarouge en passant par le spectre visible où il émet un maximum d'énergie. Pour chiffrer le rayonnement global journalier sur un plan incliné, il est important de définir les différentes composantes solaires, ainsi que les différents angles utilisés pour les calculs.

I.2.2.1.1 Les composantes solaires:

Après avoir traversé l'atmosphère, le rayonnement solaire reçu sur un plan incliné par rapport à la surface au sol se décompose en différentes composantes: Direct, diffus et réfléchi.(5)

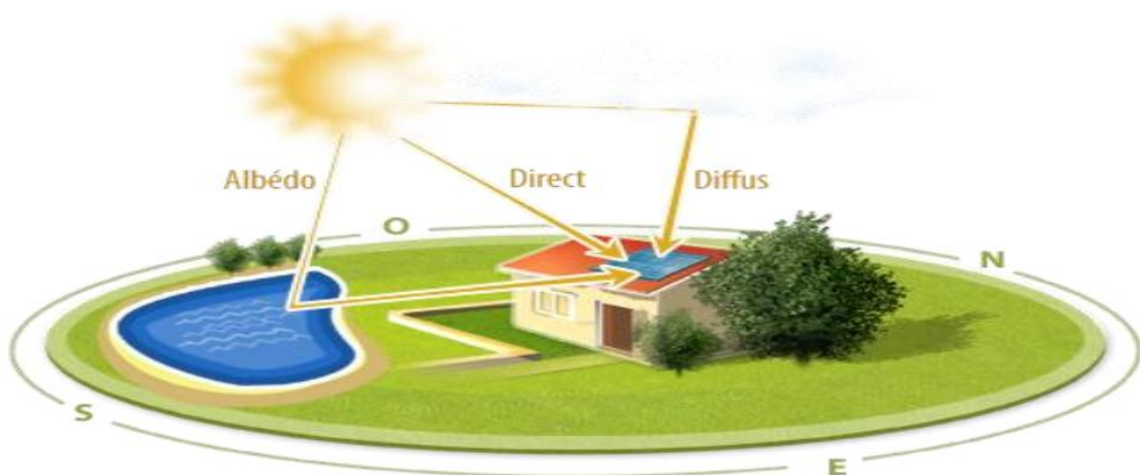


Figure I 1: Les composantes solaires

✓ La composante directe représente le flux solaire qui atteint directement la paroi quand celle-ci est exposée au soleil. Elle dépend de la hauteur du soleil et de l'angle d'exposition de la paroi au soleil à l'instant considéré.

✓ La composante diffuse qui provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages.

✓ La composante réfléchie représente la partie du flux interceptée par la paroi suite aux réflexions solaires produites par l'environnement proche, qui est représenté par un plan horizontal renvoyant une part du flux global incident (direct et diffus). La partie réfléchie dépend de l'albédo, qui est lié à l'environnement alentour du capteur solaire, sa valeur est comprise entre 0 et 1, il est défini comme étant le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente, et il est d'autant plus important que la surface est réfléchissante (neige, miroir).

I.2.2.1.2 Les angles :

Dans le calcul du rayonnement solaire global, différents angles doivent être pris en compte. (6)

✓ Coordonnées géographiques terrestres : Un point sur la surface de la terre est repéré par ces coordonnées :

➤ Latitude φ : donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur. Elle varie entre 0 et 90°, positivement vers le pôle Nord et négativement vers le pôle sud.

➤ Longitude L : donne l'angle formé par le méridien du lieu considéré avec le méridien d'origine (Greenwich). Elle varie de 0 à 180°, positivement vers l'est et négativement vers l'ouest.

➤ Altitude : donne l'élévation du lieu considéré par rapport au niveau de mer, mesuré en mètre.

✓ Coordonnées horaires : sont liées à l'heure de l'observation, et n'ont aucune relation avec la position de l'observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence le plan de l'équateur. Les coordonnées horaires sont au nombre de deux :

➤ Déclinaison solaire δ : C'est l'angle formé par la direction solaire et le plan équatorial. Elle varie de $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver à $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Son équation est donnée par :

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + j) \right] \quad (1.1)$$

➤ Angle horaire du soleil ω : C'est l'angle formé par le plan méridien du lieu considéré et celui passant par la direction du soleil. Il est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (1.2)$$

Avec :

TSV : est le Temps solaire vrai en heure, donné par :

$$TSV = TSL + \Delta t \quad (1.3)$$

Δt : est l'équation du temps en heure, calculée par :

$$\Delta t = 229.2 [0.000075 + 0.001868 \cos \beta - 0.0032077 \sin \beta - 0.014615 \cos 2\beta - 0.04089 \sin 2\beta] \quad (1.4)$$

L'angle β est donné en fonction du numéro du jour :

$$\beta = (j - 1) \frac{360}{365} \quad (1.5)$$

TSL : est le temps solaire local en heure, donné par

$$TSL = TU + \frac{24}{360} L \quad (1.6)$$

$\frac{24}{360} L$: Correction longitudinale

$$TU = TL - \text{Décalage} \quad (1.7)$$

TU : est le temps universel en heure

TL : est le temps local indiqué par la montre en heure.

Décalage : en heure.

✓ Coordonnées horizontales : Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu.

➤ Hauteur du soleil h : mesuré dans le plan vertical, il est formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à 0° et 180° au lever et au coucher du soleil respectivement, sa valeur est maximale à midi, en temps solaire vrai. Son expression est donnée par :

$$\sin(h) = \cos(\varphi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (1.8)$$

➤ Azimut a : mesuré dans le plan horizontal depuis le sud, c'est l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Son expression est donnée par :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (1.9)$$

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique.(7)

L'énergie solaire représente un gisement très important au niveau de la surface du globe terrestre.

De par sa situation géographique, l'Algérie constitue une zone particulièrement bien ensoleillée, elle dispose de l'un des gisements solaires les plus importants (voir figure I.2). La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la grande partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays (8).

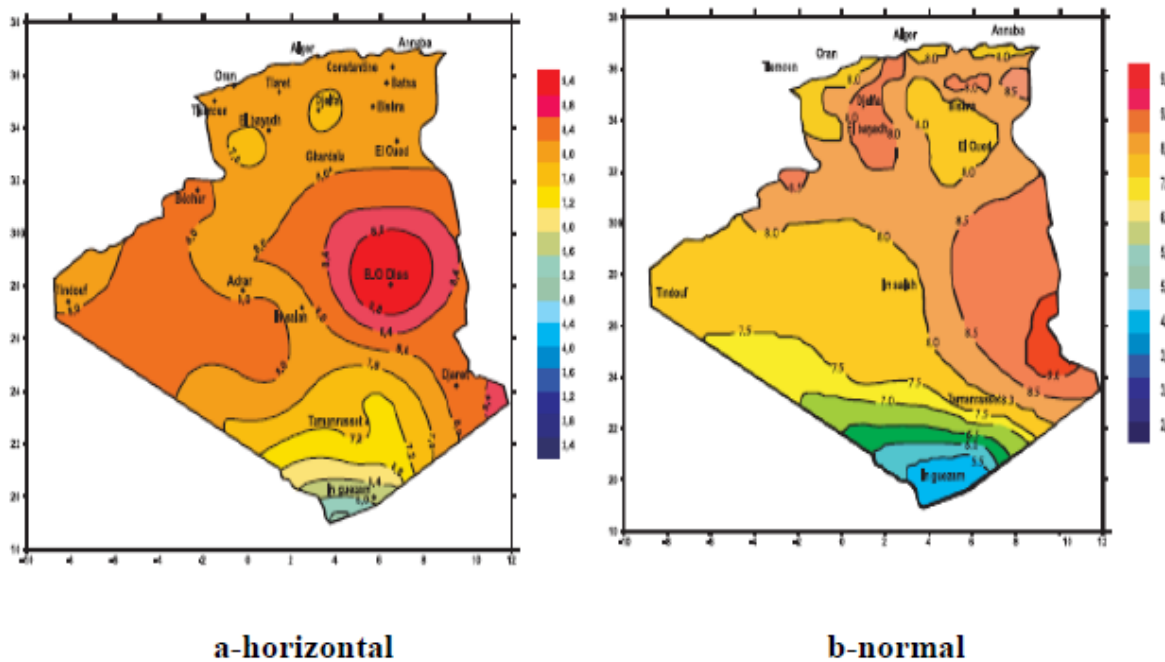


Figure I 2: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale et normal au mois de juillet (9)

I.2.2.2 Système de conversion de l'énergie solaire :

Le terme énergie solaire désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil pour combler ses besoins pour presque une année. Ce qui fait du soleil une source d'énergie puissante, gratuite, et inépuisable. Donc il n'y a qu'à l'exploiter.

Une énergie à différent usages, Les technologies actuelles permettent de convertir le rayonnement solaire sous deux formes : en chaleur (énergie thermique) ou en électricité comme le montre la figure I 3.

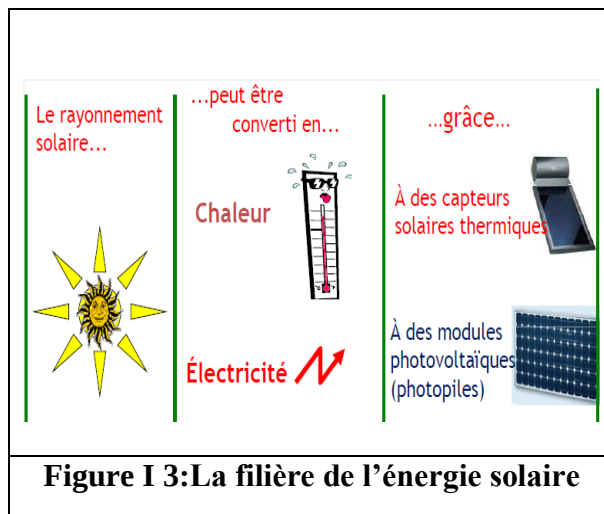


Figure I 3: La filière de l'énergie solaire

Selon les besoins énergétiques et les conditions présentes, trois filières d'exploitation de l'énergie solaire sont disponibles (10) :

- Le solaire thermique : est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :
 - ✓ En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
 - ✓ En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : froid solaire.
- Le solaire thermodynamique : utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques.
- Le solaire photovoltaïque : L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire) en énergie électrique.

Notre intérêt porte sur la conversion photovoltaïque.

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photos » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme *photovoltaïque* peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.(11)

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Dans un semi-conducteur les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y a donc courant électrique sous l'exposition à la lumière (12) .

I.2.2.2.1. Historique du photovoltaïque : (13)

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule Photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

I.2.2.2.2. Les composants d'un système solaire photovoltaïque : (14)

Le courant continu disponible aux bornes du module peut être utilisé de différentes manières en raccordant ces bornes à un circuit électrique qui l'achemine vers un ensemble de

composants qui forment un "système photovoltaïque" conçu et dimensionné en fonction de l'application et de l'usage qui est fait de l'électricité produite.

Dans le cas d'une centrale photovoltaïque, raccordée au réseau, on retrouve généralement les divers équipements suivants :

1. Une structure porteuse ou de fixation : elle a pour fonction :

- Supporter le poids des panneaux
- Résister aux contraintes environnementales.

2. Les panneaux photovoltaïques : ont pour fonction :

- Convertir le rayonnement solaire en courant continu
- Assurer une fonction de couverture (projet en toiture)

3. Les composants de distribution courant continu (DC) ou alternatif (AC) (câbles, connectiques, protections, etc.) : ont pour fonction :

- Raccorder les chaînes de panneaux entre elles ;
- Protéger les chaînes de panneaux et les intervenants des risques électriques et atmosphériques ;
- Assurer l'acheminement du courant produit vers les postes de conversion.

4. L'onduleur : a pour fonction :

- Convertir le courant continu en courant alternatif
- Protéger les circuits de distribution DC et les intervenants des risques électriques et atmosphériques
- Générer un courant alternatif de qualité
- Transformer la basse tension en moyenne tension

5. Le système de supervision : a pour fonction :

- Suivre le fonctionnement et la performance de l'installation ;
- Permettre d'optimiser la production (détection d'anomalie).

6. Le compteur de production : a pour fonction :

- Suivre la production du système.

Le système peut aussi être équipé de batteries, destinées à stocker l'électricité.

I.2.2.2.3. Différents types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, en dehors du prix, le choix d'un type de cellule n'a que peu de conséquences pour l'utilisateur, la principale différence sera la surface qui, à puissance égale, pourra varier du simple au double (15).

➤ Cellules au silicium monocristallin : Les cellules au silicium monocristallin offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m² pour obtenir 1 kilowatt Crête (kWc).

➤ Cellules au silicium poly cristallin (ou multi cristallin) : Les modules utilisant des cellules au silicium poly cristallin ont en général un rendement compris entre 12 et 14%. Il faut environ 8m² de cellules pour obtenir 1kWc. Ces cellules sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin. Les cellules poly cristallines sont reconnaissables aux formes irrégulières des cristaux qui apparaissent nettement à l'œil nu.

➤ Cellules au silicium amorphe : Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou poly cristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium, Ce type de cellule est donc moins cher et plus facile à fabriquer. Sa faible épaisseur permet, par exemple, de les utiliser pour créer des panneaux solaires souples. Cependant ces cellules ont des rendements limité (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m² pour obtenir 1kWc) et sont donc réservées à des applications nécessitant peu de puissance. Les cellules au silicium amorphes sont beaucoup utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice...).

➤ Cellules utilisant d'autres matériaux que le silicium : Ce sont également des cellules à couches minces, elles peuvent être fabriquées à partir de matériaux divers :

di sélénure de cuivre et d'iridium (CIS), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles ont des rendements compris entre 7 et 11%. On peut citer pour mémoire d'autres types de cellules à couches minces très rares dans le commerce ou encore au stade de la recherche :

Les cellules à l'arséniure de gallium utilisées essentiellement dans les applications spatiales

Les cellules multicouches, multi jonctions, hybrides ou tandem qui superposent plusieurs couches minces afin d'exploiter différentes longueurs d'onde de la lumière et d'offrir des rendements plus élevés (dépassant parfois 40% en laboratoire)

Les cellules solaires organiques sont créées à partir de matériaux de synthèse, donc moins chères, mais qui offrent encore des rendements et une durée de vie trop faibles.

I.2.2.2.4. Caractéristiques des panneaux photovoltaïques :(16)

- Puissance crête P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- Caractéristique de I(V): courbe représentant le courant débité en fonction de la tension au borne du module.
- Tension à vide (V_{co}): tension à vide en l'absence de courant.
- Courant de court-circuit (I_{cc}): courant débiteur en court-circuit.

I.2.2.2.5. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque : (17)

- ☑ Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- ☑ L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- ☑ Génère l'énergie requise.
- ☑ Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- ☑ L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- ☑ La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- ☑ Entretien minimal.
- ☑ Aucun bruit.
- ☑ technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- ☑ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.

- ☒ Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- ☒ Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

I.2.2.2.6. Principe de fonctionnement du système photovoltaïque : (18)

Les panneaux solaires photovoltaïques, transforment la lumière en électricité. Ces panneaux sont donc les plus répandus, et sont tout simplement un assemblage de cellules photovoltaïques, chacune d'elles délivrant une tension de 0.5V à 0.6V. Elles sont donc assemblées pour créer des modules photovoltaïques de tension normalisée comme 12V.

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de Silicium (matériau semi-conducteur):

- ✓ une couche dopée avec du Bore qui possède moins d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée positivement (P).
- ✓ une couche dopée avec du Phosphore qui possède plus d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée négativement (N).

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée.

I.2.2.2.7. Estimation de la production d'énergie d'un système photovoltaïque: (19)

La production d'une cellule photovoltaïque dépend évidemment du soleil. Par conséquent il est impossible de dire par avance quelle quantité d'électricité produira un panneau solaire : la production sera différente selon l'endroit où elles sont installées et positionnées.

L'énergie produite dans des conditions réelles sera en général nettement inférieure à celle qui aurait été produite dans des conditions standards. Elle dépendra essentiellement de 3 facteurs :

- le rayonnement global journalier (l'ensoleillement) ;
- la position des panneaux solaires (orientation et inclinaison) ;
- la température.

La production d'une installation photovoltaïque est donnée par l'équation suivante :

$$E_{\text{élé}} = H_i \times S \times \eta \quad (1.10)$$

Avec :

- $E_{\text{élé}}$ [kWh/an]: énergie électrique produite en sortie du système sur un an
- H_i [kWh/m²an]: irradiation globale reçue sur le plan des modules sur 1m² pendant un an.
- S [m²] : surface du champ des modules photovoltaïques
- η : rendement global du système.

Le rendement global du système inclut l'ensemble des pertes provoquées par ses composants, des modules jusqu'au point d'injection du courant alternatif sur le réseau de distribution. Il permet de caractériser la fraction de l'énergie lumineuse captée au départ que l'on retrouve sous forme électrique injectée sur le réseau. Il est donc égal au rapport entre l'énergie lumineuse E_{lum} reçue sur les panneaux et l'énergie électrique $E_{\text{élec}}$ de sortie injectée sur le réseau.

$$\eta = \frac{E_{\text{elec}}}{E_{\text{lum}}} \quad (1.11)$$

Le rendement global peut être séparé en deux composantes :

$$\eta = \eta_{\text{stc}} \times \eta_{\text{système}} \quad (1.12)$$

Avec :

η_{stc} : est le rendement des modules en conditions de tests standards, c'est-à-dire sous une luminosité $G_{\text{stc}} = 1000 \text{ W/m}^2$ à 25°C. Soumis à cette luminosité, les panneaux délivrent une puissance électrique de sortie globale que l'on nomme la puissance crête P_c . C'est elle qui caractérise le champ photovoltaïque lors de son installation. Pour les particuliers, une installation moyenne fait environ 3kW crête. Le rendement η_{stc} permet donc de caractériser l'efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, avant qu'elle n'arrive au niveau des onduleurs. Il est donc égal au rapport entre l'énergie lumineuse $G_{\text{stc}} \times S$ (surface du champ photovoltaïque) reçue sur les panneaux et l'énergie électrique (la puissance crête) P_c de sortie des modules.

$$\eta_{\text{stc}} = \frac{P_c}{G_{\text{stc}} \times S} \quad (1.13)$$

$\eta_{\text{système}}$: est appelé ratio de performance et est égal aux autres rendements caractérisant les composants qui suivent les modules et liés à la typologie de l'installation :

- le rendement de l'onduleur et son adaptation aux caractéristiques du champ photovoltaïque.
- les pertes dans les câbles.
- la température de fonctionnement des modules.
- la qualité d'appairage des modules selon leurs caractéristiques réelles (mismatch).
- la typologie de câblage des séries de modules tenant plus ou moins compte des masques proches.
- la tolérance sur la puissance crête de l'installation (divergence entre puissance théorique nominale et puissance réellement installée).

$$E_{\text{élé}} = H_i \times P_c \times \eta_{\text{systeme}} \quad (1.14)$$

La production photovoltaïque dépend donc de 3 composantes :

- l'irradiation reçue,
- la puissance crête,
- le ratio de performance ($\eta_{\text{système}}$) (PR, dans la littérature anglophone).

C'est le ratio de performance (PR) qui peut être utilisé pour quantifier la performance d'un système.

Calcul du ratio de performance

Pratiquement, le ratio de performance s'obtient en effectuant le rapport entre la production réelle et la production théorique, pendant une période de référence. La différence entre les productions théoriques et réelles provient des pertes engendrées par les différents équipements de l'installation.

$$PR = \frac{\text{Production réelle (kwh)}}{\text{Production théorique (kwh)}} \quad (1.15)$$

- La production théorique est égale à la production idéale en sortie des modules :

$$E_{\text{élec}} = H_i \times P_c \quad (1.16)$$

Son utilisation permet d'obtenir un indicateur de performance indépendant de la puissance crête du système, de sa localisation géographique et des orientations et inclinaisons du champ.

Lors du dimensionnement d'un système, on s'attachera à maximiser ce coefficient, alors que les autres termes de la dernière équation (H_i et P_c) seront uniquement affectés par la localisation, l'inclinaison et l'orientation du champ, le type et la surface du modules employés.

I.3. Généralités sur les systèmes éoliens

I.3.1. Le gisement éolien :

Le rayonnement du soleil et la rotation de la terre sont à l'origine des zones de températures et de pressions atmosphériques différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Les masses d'air s'écoulent alors, avec une vitesse plus ou moins élevée, des zones de forte pression vers les zones de plus faible pression

Une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément, et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Le vent naît de processus cycliques appliqués à l'atmosphère puis à l'air dans un contexte topographique défini.

La ressource éolienne de l'Algérie varie considérablement d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de montagne : l'atlas tellien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien et de vastes étendues de sable (20)

Il est à noter que le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest qui se caractérise par des vitesses supérieures à 6m/s tout le long de l'année avec une importante augmentation au printemps et en été avec des vitesses qui dépassent 9 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud.

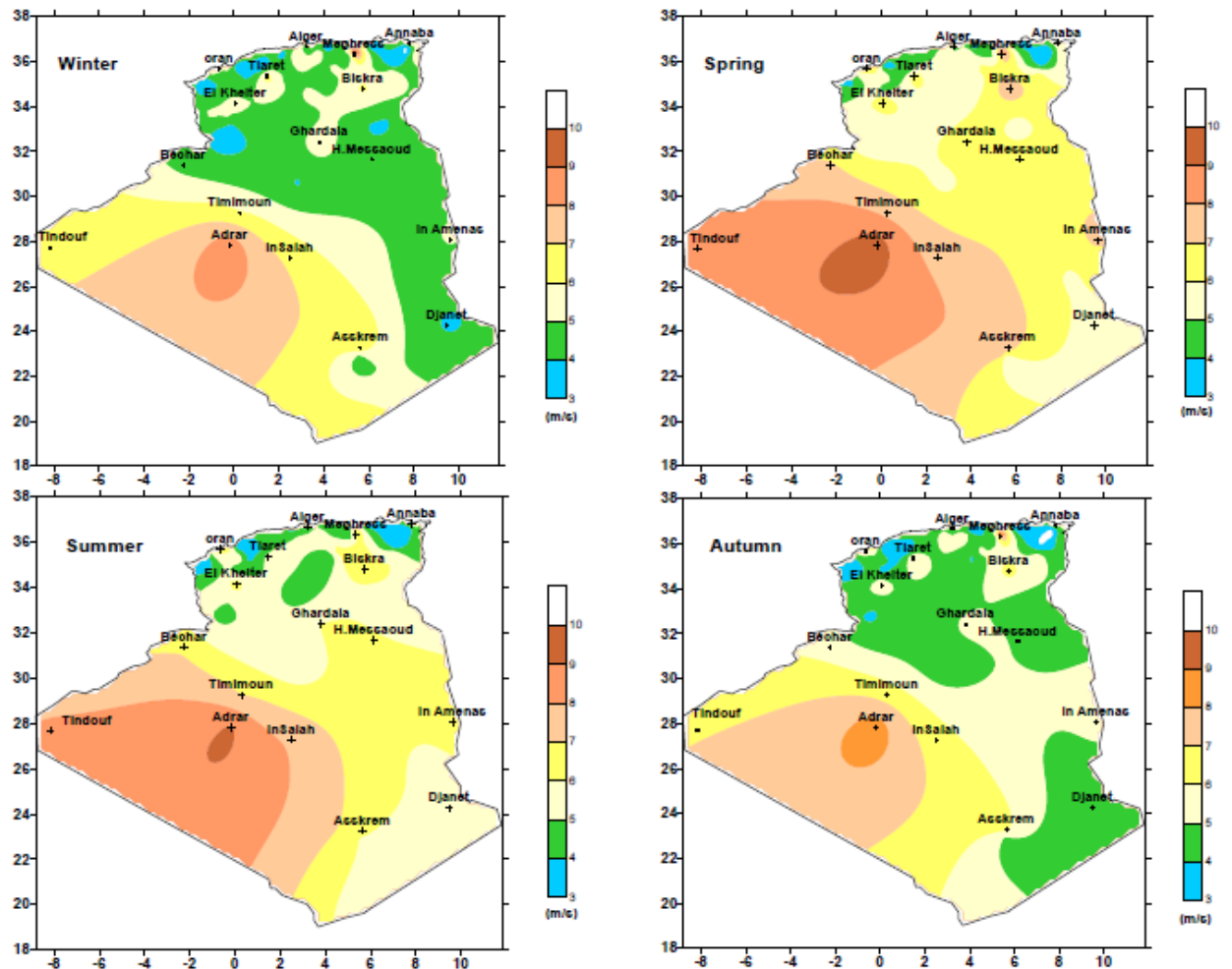


Figure I 4: cartes saisonnières de la vitesse moyenne à 50 m du sol [1]

I.3.2. Système de conversion de l'énergie éolienne : (21)

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. Elle désigne l'énergie cinétique contenue dans le vent, tirée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, elle tire son nom d'Éole, le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique. Elle peut être utilisée de deux manières:

- Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irrigation).
- Transformation en énergie électrique: l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif.

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

I.3.2.1. Historique des éoliennes: (22)

Vers 1700 av. J.C.: L'énergie du vent est utilisée en Mésopotamie pour l'irrigation des cultures.

600 – 700: Les premiers moulins à vent apparaissent en Perse. En Chine, on construit des roues hydrauliques actionnées par le vent.

1887 – 1888: Charles F. Brush construit la première éolienne entièrement automatisée aux Etats-Unis. Un rotor de 17 m de diamètre composé de 144 pales en bois de cèdre alimente un générateur de 12 kW. Jusqu'en 1920, la quasi-totalité des éoliennes seront munies de rotors à pales multiples.

1920: Albert Betz poursuit des recherches sur la physique et l'aérodynamique des éoliennes. Il formule la loi qui porte son nom, selon laquelle l'énergie cinétique du vent peut être exploitée au maximum à 59,3%. Sa théorie sur le façonnage des ailes est encore appliquée de nos jours.

1973: La crise du pétrole ravive l'intérêt pour l'énergie éolienne.

1978 : les danois réalisèrent une machine tripale de 54 m pour une puissance de 2 MW.

1980 : Décollage des systèmes raccordés au réseau en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du nord.

I.3.2.2. Les différents types d'éoliennes : (23)

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

➤ Les éoliennes à axe horizontal : Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

✓ Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction du vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.

✓ Elles ont un rendement élevé.

✓ Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

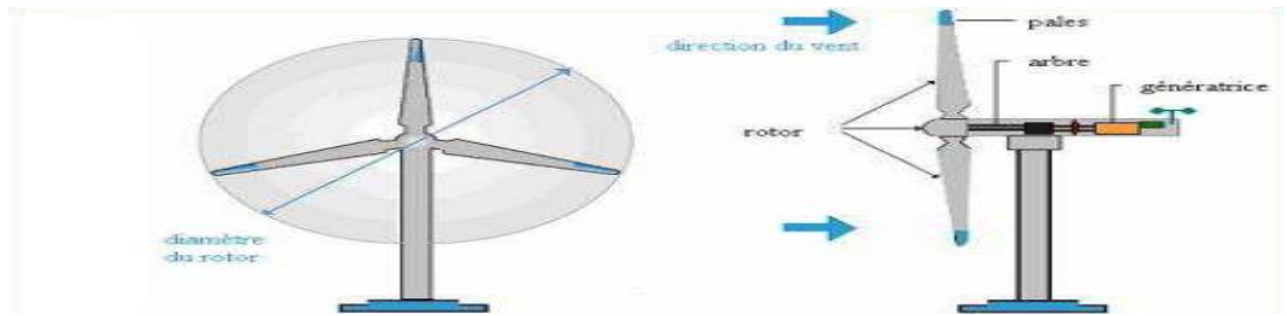


Figure I 5: Configuration à axe horizontale

➤ Les éoliennes à axe vertical : Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical perpendiculaire à la direction du vent, et Sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

✓ L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages : Elle est simple à fabriquer

Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s

✓ L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.



Figure I 6: Éolienne de type Savonius

Figure I 7: Éolienne de type Darrieus

I.3.2.3. Principe de fonctionnement du système éolien :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique.

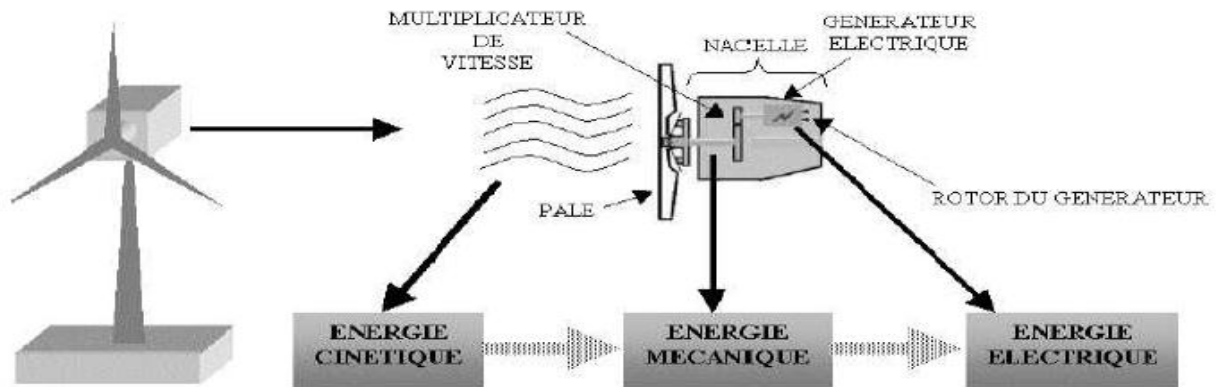


Figure I 8: Conversion de l'énergie cinétique du vent

Cette conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

I.3.2.3.a. Principaux Composants :

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire (24).

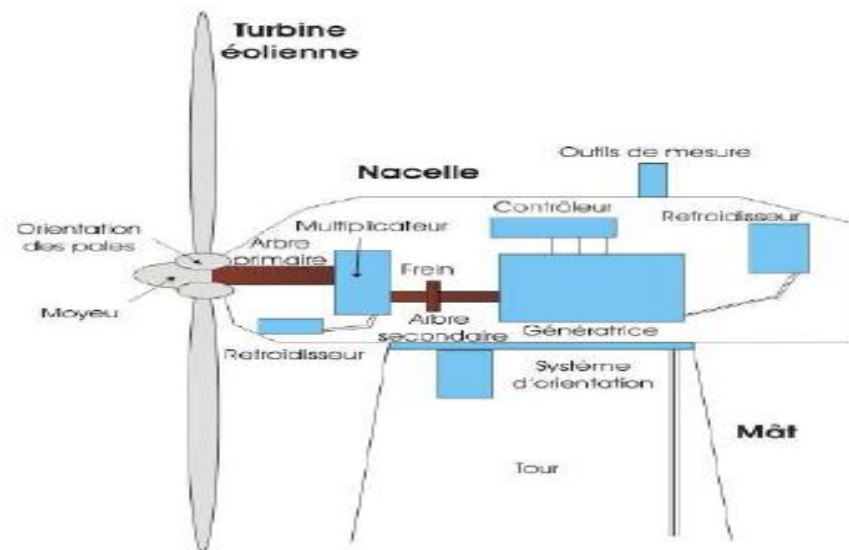


Figure I 9: Principaux composants de l'éolienne moderne

✓ Mécanisme d'orientation : Utilisé pour tourner la turbine contre le vent. On dit que l'éolienne possède une erreur d'orientation lorsqu'elle n'est pas tournée perpendiculairement au sens du vent. Une telle erreur implique qu'une part plus restreinte de l'énergie contenue dans le vent passera au travers du rotor.

✓ Boîte de vitesse : La puissance provenant de la rotation du rotor est transmise au générateur par le biais de deux arbres de transmission et de la boîte de vitesse. La solution pratique utilisée, en parallèle avec l'industrie automobile, est la mise en place d'une boîte de vitesse. Ainsi la rotation lente et puissante de l'arbre en amont sera transformée en rotation rapide à bas couple en aval de la boîte de vitesse, mieux à même d'être utilisée par le générateur.

✓ Anémomètre et girouette: La mesure de la vitesse du vent est habituellement effectuée à l'aide d'un anémomètre. Possédant un axe vertical et trois coupes captant le vent et entraînant sa rotation, le nombre de révolutions effectuées est décompté électroniquement. Généralement couplé à une girouette permettant de déterminer la direction du vent, les informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.

✓ Système de refroidissement: Les générateurs nécessitent la mise en place d'un système de refroidissement pour leur bon fonctionnement. Dans la plupart des éoliennes, le refroidissement se fait en plaçant le générateur dans un conduit d'air frais. Certains fabricants utilisent un refroidissement par eau. Cela présente l'avantage

d'être plus compact mais nécessite la mise en place d'un radiateur dans la nacelle pour évacuer la chaleur contenu dans le liquide de refroidissement.

✓ Le rotor : Le rotor est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. C'est un ensemble constitué des pales avec un nombre variable et de l'arbre primaire. La liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Quant aux pales, elles sont en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. De leurs performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine.

✓ La nacelle : Considérée comme une véritable salle des machines perchées dans le ciel, la nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales et de la nacelle. A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, l'anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

✓ La tour : Le mât doit être le plus haut possible de manière à sortir le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Il existe sur le marché trois grands types de tour, elle peut être haubannée, à treillis ou bien tubulaire. Cette dernière reste la plus répandue car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande et apporte une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance qui doivent grimper jusqu'à la nacelle. Son aspect esthétique est de plus un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne. Néanmoins, sa réalisation reste assez complexe par rapport aux deux autres types de mât.

I.3.2.4. Estimation de la production d'énergie d'un système éolien : (25)

Afin d'optimiser la production d'une éolienne, la connaissance de sa ressource, à savoir, le vent, est indispensable et primordiale à cause de ses grandes variabilités autant temporelle que spatiale. Pour ce faire, il est nécessaire de faire une estimation du potentiel éolien disponible sur un site afin d'évaluer de manière quantitative le gisement éolien que le dispositif éolien pourra récupérer.

Considérons une masse d'air m , qui se déplace avec la vitesse v , son énergie cinétique est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.17)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface A , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie, appelée aussi potentiel éolien disponible sur un site, serait alors:

$$P_d = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (1.18)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air

En réalité, le dispositif de conversion extrait une puissance récupérable P_r inférieure à la puissance disponible P_d car la vitesse en aval de l'aéromoteur n'est pas nulle. Betz a démontré que la puissance éolienne récupérable d'une éolienne idéale est de 16/27 soit 0.59 de la puissance disponible. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale qu'on peut extraire pour une vitesse de vent donnée.

$$P_r = \frac{1}{2}C_{p_{max}}\rho Av^3 \quad (1.19)$$

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance, exprimé en fonction de la vitesse spécifique λ , représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (1.20)$$

Où Ω est la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne.

On définit le coefficient de puissance C_p qu'on appelle aussi facteur de conversion par le rapport entre la puissance fournie et celle disponible. Il représente le rendement de l'éolienne.

$$C_p = \frac{P_f}{P_d} \quad (1.21)$$

$$P_f = \frac{1}{2}C_p(\lambda)\rho Av^3 \quad (1.22)$$

La valeur de C_p dépend de la vitesse spécifique λ .

Des courbes typiques de C_p en fonction de λ pour différents aérogénérateurs sont présentées sur la figure 3.. On remarque que le coefficient de puissance augmente avec la vitesse spécifique λ sans jamais atteindre la limite de Betz qui est 0.593.

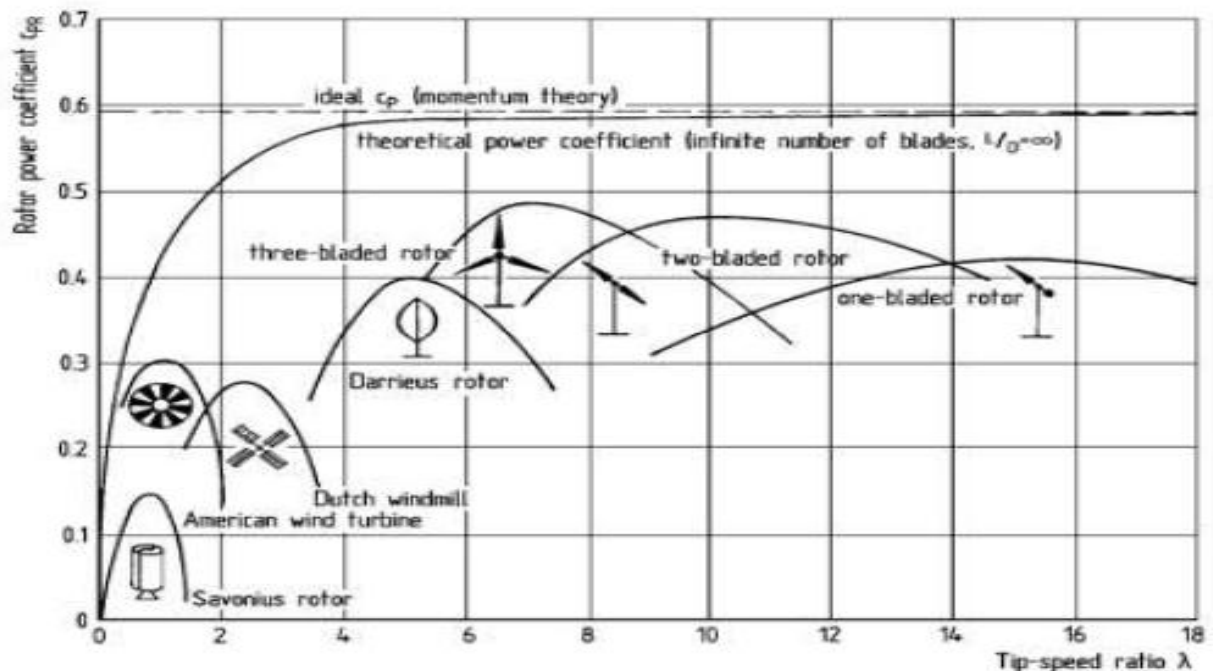


Figure I 10: Coefficient de puissance de C_p en fonction de la vitesse spécifique λ

Ces variations de C_p (λ), dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais aussi de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, le nombre de pales utilisées et la vitesse de rotation.

I.4 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

I.4.1 Convertisseur DC/DC (hacheur) (26)

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée .

I.4.2 Convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite .

Nous distinguons plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie :

- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée, en marche d'escalier, générateur d'une onde proche de l'onde sinusoïdale.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI (pulse-width modulation).
- Onduleur à onde sinusoïdale.

I.4.3. Convertisseur AC/DC (Redresseur)

Le redresseur commandé est le montage le plus simple des montages d'électronique de puissance et permet de transformer l'énergie alternative provenant en général du réseau électrique en une énergie unidirectionnelle quasi-continue que l'on peut diriger vers les moteurs à courant continu .

I.5 différent types de stockages (27)

I.5.1 Introduction

Le stockage de l'électricité répond à trois grands types de besoins :

- Ceux liés à la production nucléaire, centralisée, massive et peu adaptative. C'est le cas de la gestion, sur le réseau de transport, de l'énergie électrique produite par les centrales actuelles, afin d'équilibrer en temps réel la production et les demandes variables journalière, hebdomadaire, saisonnière et, en plus, dans le futur, de la sécuriser face aux fluctuations d'une production importante et nécessairement intermittente d'énergie électrique d'origine renouvelable.
- Ceux liés à de la production autonome décentralisés et de quantité plus modeste. L'électricité créée, en général par des sources variables (solaire, éolien) dans le cas de maisons autonomes (non raccordées au réseau) a besoin d'être stockée car souvent il y a décalage entre les heures de production et les heures de consommation.
- Ceux liés à des applications mobiles (téléphone portable, transports du type vélo à assistance électrique, automobile électrique ou hybride).

Les besoins n'étant pas les mêmes, il va exister différentes solutions adaptées aux différents besoins. On notera qu'il est possible de stocker l'énergie sous forme électrique, chimique, thermique et mécanique

I.5.2. Stockage sous forme d'énergie mécanique potentielle

I.5.2.1. Stockage hydraulique

Pour contourner la difficulté de stocker directement l'énergie électrique, il est possible de passer par une étape intermédiaire qui consiste à la convertir en une énergie mécanique potentielle que l'on donne à un fluide stockable (eau, gaz, vapeur d'eau, air comprimé, etc.), pendant une durée déterminée, et ensuite de reconvertir cette énergie mécanique en énergie électrique dans une turbine dédiée au fluide entraînant un alternateur. Une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) est une installation de stockage hydraulique gravitaire. Elle comprend nécessairement un lac supérieur et une retenue d'eau inférieure, entre lesquels est placée l'usine hydroélectrique réversible de turbinage/pompage. L'usine est reliée au lac supérieur par des ouvrages d'adduction d'eau (conduites forcées) et vers la retenue inférieure par des canalisations.

Le principe de fonctionnement des STEP est simple : pendant les heures creuses (surproduction) on remonte l'eau par pompage pour la turbiner aux heures de pointe. Le rendement est de l'ordre de 65 à 85%.

L'équation de l'énergie stockée est donnée par : $W \text{ (en J)} = m.g.h = \rho.V.g.h$

ρ est la masse volumique de l'eau en kg/m^3

V le volume d'eau en m^3

g la constante de gravitation $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

h en mètre, le dénivelé entre la retenue d'eau supérieure et la retenue d'eau inférieure).

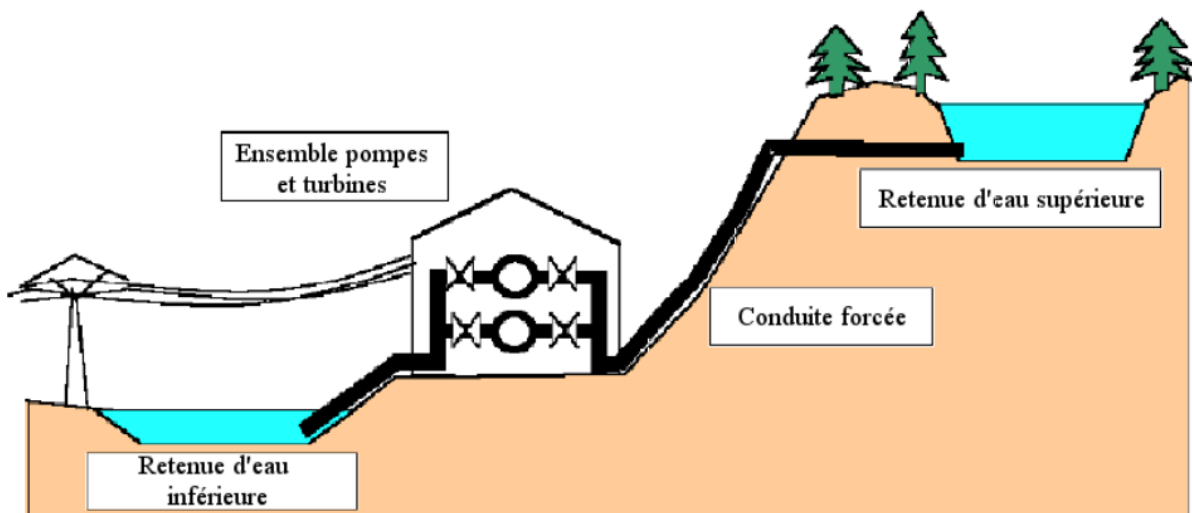


Figure I 11 : Une station de transfert d'énergie par pompage (STEP)

I.5.2.2. Air comprimé

On sait utiliser de l'air comprimé pour produire un travail mécanique, par conséquent il est possible de stocker de l'énergie en comprimant un gaz (en général avec un compresseur mu

par de l'énergie électrique disponible). Le rendement sera médiocre, car la compression s'accompagne d'un échauffement du gaz, sauf à récupérer la chaleur produite (cogénération air comprimé + chaleur). A plus grande échelle, on peut utiliser des cavernes souterraines ou d'anciennes mines pour stocker l'air comprimé. Quand il y a une forte demande d'électricité, on utilise l'air qui a été précédemment comprimé et stocké pour mettre en mouvement une turbine qui grâce à un alternateur produit de l'électricité. Des installations de ce type ont été mises en place ou sont en projet dans différents pays mais le rendement n'est que d'environ 40 %. Il existe une variante à gaz de CAES (Compressed Air Energy Storage), en fonctionnement depuis plus de 20 ans en Allemagne: de l'air est comprimé aux heures creuses par un turbocompresseur accouplé à la turbine à gaz, puis est stocké dans des cavités souterraines. Aux heures de pointe, l'air comprimé est co-alimenté en gaz dans la chambre de combustion d'une turbine à gaz (éventuellement du type cogénération chaleur/électricité). Pour restituer 1 kWh sur le réseau, il faut consommer 0,75 kWh d'électricité en pompage, et brûler 1,22 kWh de gaz. La durée de stockage est de quelques heures.

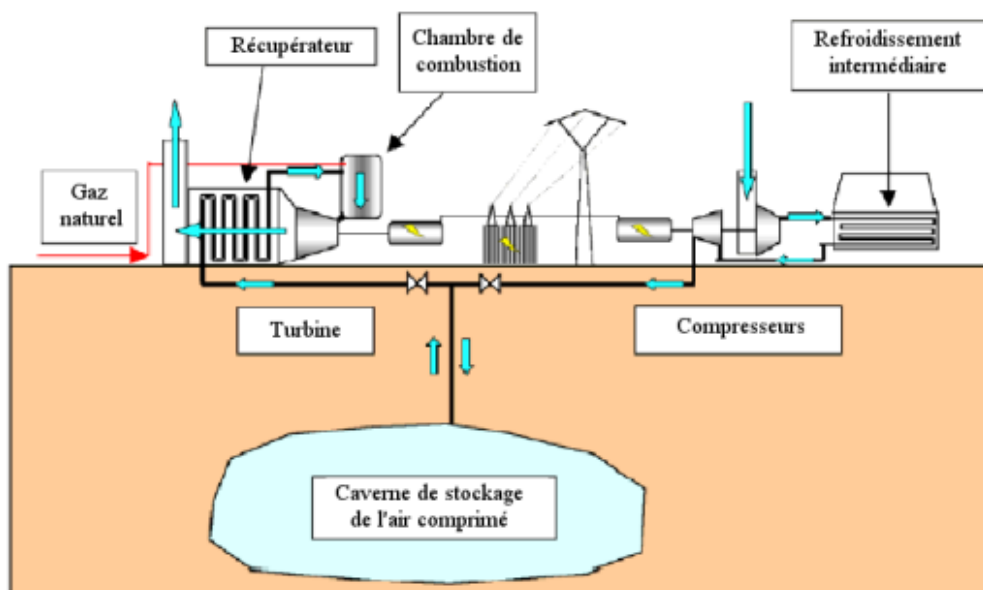


Figure I 12: station de stockage à air comprimé

En plus du mauvais rendement le système émet du CO₂ (combustion du gaz).

I.5.3. Stockage sous forme électrochimique :

Les batteries C'est la voie la plus connue du grand public, les batteries ayant de nombreuses applications quotidiennes (véhicules, téléphones portables...). Les technologies de batteries sont multiples et possèdent des caractéristiques très variables. L'inconvénient majeur est leur faible durée de vie (Nombre de cycles charge/décharge limité ~ 100 à 1000). On peut voir la batterie comme un réservoir électricité que l'on vide (décharge) ou que l'on remplit (charge). La quantité d'électricité étant définie par l'Ampèreheure.

L'énergie stockée (capacité de la batterie) : W (en W.h) = $Q.V$, où

V (en volts V) : est la tension aux bornes de la batterie.

Q (en Ampère heure A.h):est la quantité d'électricité stockée .

I.5.4. Stockage sous forme d'hydrogène

I.5.4.1. Introduction :

Dans un contexte de réchauffement climatique et d'appauvrissement des ressources naturelles, il est important de remplacer progressivement ces énergies fossiles par des sources d'énergies propres. C'est justement dans cette vision de développement durable que de nombreuses recherches sur les nouvelles énergies de demain ont vu le jour. L'utilisation de l'hydrogène comme futur vecteur énergétique s'avère une solution prometteuse et propre face à ce contexte alarmant.

Dans ce chapitre nous allons décrire les différentes notions qui définissent l'hydrogène et les technologies qui lui sont associés.

I.5.4.2. Intérêt de l'hydrogène :

L'hydrogène présente l'avantage d'être transportable, stockable, et possède un pouvoir calorifique massique très important. Cette énergie peut être restituée par combustion mais peut également être convertie en électricité par oxydation électrochimique dans une pile à combustible. Sa consommation ne produit pas de gaz à effet de serre mais uniquement de l'eau et de l'électricité. Il constitue aussi un moyen de stockage des énergies renouvelables et de pallier à leur caractère intermittent.

Pendant les heures creuses de consommation, l'électricité en surplus est convertie en hydrogène. Il est stocké puis l'énergie chimique est restituée sous forme d'électricité grâce à une Pile à Combustible lors des pics de consommation. Pour des applications stationnaires, l'hydrogène est donc une solution complémentaire au vecteur électricité. Par ailleurs, la pile à combustible peut être utilisée comme un procédé de cogénération d'électricité et de chaleur : la chaleur produite peut facilement être valorisée (eau chaude sanitaire, réseau de chaleur). L'utilisation non stationnaire de l'hydrogène est également envisageable pour le remplacement des hydrocarbures comme combustible dans les transports. Dans ce cas, l'hydrogène stocké est consommé afin de produire l'électricité via une PAC pour alimenter le moteur électrique et assurer la motricité du véhicule.

La durée de vie ciblée pour ces systèmes hydrogène va dépendre essentiellement du type d'application et des conditions de fonctionnement.

I.5.4.3. Historique : (28)

1766 : Le chimiste britannique Henry Cavendish parvient à isoler une étrange substance gazeuse qui, en brûlant dans l'air, donne de l'eau : l'hydrogène.

1781 : Appelé jusqu'alors "gaz inflammable", "l'hydrogène" doit son nom au chimiste français Antoine-Laurent de Lavoisier, qui effectua la synthèse de l'eau vient du grec ὕδωρ (*hudôr*), «eau» et γένναι (*gennen*), « engendrer ».

1804 : Le Français Louis-Joseph Gay-Lussac et l'Allemand Alexander von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène.

1839 : L'Anglais William R. Grove découvre le principe de la pile à combustible : il s'agit d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène avec production simultanée d'électricité, de chaleur et d'eau.

1939-1953 : L'Anglais Francis T. Bacon fait progresser les générateurs chimiques d'électricité, qui permettent la réalisation du premier prototype industriel de puissance.

1960 : À partir de cette date, la Nasa utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules Apollo et Gemini).

I.5.4.4. Propriétés de l'hydrogène : (29)

Elément chimique le plus abondant dans l'univers, l'hydrogène H est classé en première place du tableau de Mendeliev. Il s'agit de l'atome le plus simple et le plus léger, il est constitué d'un noyau contenant un proton et d'un électron périphérique.

L'hydrogène est un gaz diatomique, sans couleur ni odeur et non toxique. Il présente certaines caractéristiques physico-chimiques avantageuses d'un point de vue énergétique. C'est un gaz très léger (masse volumique = 0,09 kg/m³, à 0°C) qui possède un pouvoir calorifique très élevé (33,3 kWh/kg, contre environ 14 kWh/kg pour le méthane ; données PCI), ces avantages sont nombreux:

- c'est un atome très abondant sur terre (sous forme d'eau),
- c'est la molécule la plus énergétique : 120 MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel,
- il n'est ni polluant, ni toxique,
- sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau,
- c'est le plus léger des gaz ce qui est un facteur positif vis à vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air),
- son transport est aisé (en particulier par pipes),
- ses modes de production sont variés et il est le combustible idéal des piles à combustible (le moyen le plus efficace pour convertir l'énergie chimique en énergie électrique).

Il convient aussi de mentionner ses inconvénients:

- sa légèreté implique une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel (facteur 4 à 200 bars, par exemple)
- ses limites d'inflammabilité et de détonation avec de l'air sont plus larges que pour le gaz naturel (d'un facteur 5 environ), mais, de fait, seule compte la limite inférieure : 4% en volume dans l'air au lieu de 5,3% pour la limite inférieure d'inflammabilité et 13% au lieu de 6,3% en limite inférieure de détonation. En dehors d'une situation dite « confinée » (c'est à dire emprisonné avec de l'air dans un volume fermé), l'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. En situation confinée, l'énergie explosive théorique par m³ de gaz est 3,5 fois plus faible pour l'hydrogène et la surpression de détonation légèrement plus faible (14,7 bars contre 16,8).
- l'énergie minimale à fournir pour l'enflammer est 10 fois inférieure à celles requises pour les hydrocarbures classiques (20μJ pour l'hydrogène, contre 260 pour le propane),
- sa flamme est presque invisible, et sa combustion (non électrochimique), en présence d'air, génère des NOx.
- son image dans le public n'est pas bonne (il est considéré comme un gaz dangereux) et son acceptabilité n'est donc pas encore acquise.

I.5.4.5. Production de l'hydrogène :(30)

Il est clair que l'hydrogène présente un intérêt certain car comme l'électricité, il n'est pas à proprement parler une énergie mais seulement un vecteur d'énergie. Malgré son abondance sur Terre, et contrairement aux énergies fossiles ou renouvelables comme l'énergie solaire ou la biomasse, il n'est pas disponible en l'état. Il est combiné avec d'autres atomes comme dans les molécules d'eau (H₂O) et de méthane (CH₄), constituant principal du gaz naturel. C'est un vecteur énergétique qui doit être produit pour ensuite être stocké, distribué et consommé.

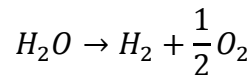
L'hydrogène peut être produit à partir de nombreuses sources, telles que, l'eau, la biomasse et les hydrocarbures. Les modes de production sont également variés. Il peut être produit à partir :

I.5.4.5.1. Energies fossiles :

Actuellement, 95% de l'hydrogène est produit à partir des hydrocarbures, pour des raisons économiques. Il existe plusieurs procédés de production : les principaux sont le reformage par la vapeur d'eau (vaporeformage), l'oxydation partielle et le reformage auto-thermal.

I.5.4.5.2. Décomposition de l'eau :

Consiste à dissocier les atomes d'oxygène et d'hydrogène combinés dans les molécules d'eau selon la réaction :



Cette solution présente un intérêt en terme d'émission de gaz à effet de serre, à condition d'opérer à partir de sources d'énergie non émettrices de CO₂. Parmi les procédés envisageables, deux sont actuellement à l'étude : l'électrolyse et la dissociation de la molécule d'eau par cycles thermochimiques .

I.5.4.5.3. Energies renouvelables :

Dans un contexte de protection de l'environnement, les technologies de production d'hydrogène utilisant les énergies renouvelables sont en cours de développement. Plusieurs sources sont envisageables : Le solaire, l'éolien, la biomasse et la géothermie. Cette voie de production consiste en la décomposition de l'eau par électrolyse. Son principe repose sur l'application de l'électricité entre deux électrodes immergées dans de l'eau, Il se dégage de l'oxygène à l'anode et de l'hydrogène à la cathode.

Il existe plusieurs types d'électrolyseurs qui se différencient notamment par la nature des matériaux qui les composent et leur température de fonctionnement conditionnant le recours à de l'eau liquide ou sous forme de vapeur. On trouve :

I.5.4.5.3.1. Electrolyseur alcalin :

Il est composé de deux électrodes métalliques (généralement en nickel) séparées par un électrolyte aqueux composé de KOH ou NaOH. Les températures de fonctionnement sont comprises entre 40 et 90°C. Néanmoins, ce procédé est pénalisé par un vieillissement des matériaux par corrosion, en raison de la présence de bases fortes dans l'électrolyte. C'est la technologie la plus mature industriellement, elle présente un rendement de l'ordre de 35%.

Les électrolyseurs se présentent en modules de petite ou moyenne capacité (0,5-800 Nm³/h d'hydrogène), utilisant une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (ou potasse) dont la concentration varie en fonction de la température.

I.5.4.5.3.2. Electrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM) :

Ils fonctionnent à basse température (20-100°C). Dans ce cas l'électrolyte est une membrane polymère conductrice protonique (H⁺). Cette technologie est encore au stade de la recherche et du développement.

I.5.4.5.3.3. Electrolyseurs de la vapeur d'eau à haute température (EHT) :

Ils fonctionnent à des températures allant de 700 à 1000°C, se caractérisent par un électrolyte en céramique, conducteur à haute température. Ils sont encore au stade de la recherche et développement. Cette technologie est directement issue des développements de piles à combustible de type SOFC.

Le tableau I.1 compare les trois technologies selon la température de fonctionnement, les réactions électrochimiques au niveau des électrodes ainsi que les charges transportées .

Tableau I 1: Comparaison des différentes technologies d'électrolyse de l'eau

Technologie	Température [°C]	Réaction cathode	Charge transporté	Réaction anode
Alcaline	40-90	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	OH^-	$2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
PEM	20-100	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	H^+	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
Haute température	700-1000	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$	O^{2-}	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$

I.5.4.6. Stockage et transport de l'hydrogène :

I.5.4.6.1. Le stockage de l'hydrogène :

L'hydrogène est un gaz extrêmement léger qui occupe un volume important dans les conditions de pression standard, c'est à dire à la pression atmosphérique. Pour le stocker et le transporter efficacement, il faut fortement réduire ce volume.

Plusieurs techniques existent pour cela :

I.5.4.6.1.1. Stockage gazeux :

La méthode la plus simple permettant de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression.

Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m^3 contre 0.090 kg/m^3 à pression et température normales. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres.

Aujourd'hui, l'hydrogène est déjà distribué dans des bouteilles en acier dans lesquelles il est stocké à 200 bars.

Pour améliorer encore la capacité de stockage, les industriels développent des bouteilles ou des réservoirs composites, matériaux bien plus légers que l'acier, qui permettent de stocker l'hydrogène jusqu'à une pression de 700 bars.

I.5.4.6.1.2. Stockage liquide (cryogénique) :

L'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit à une température inférieure de -250°C . Ainsi, à -252.8°C et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m^3 . À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres.

Afin de pouvoir conserver l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés.

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide est pour l'instant réservé à certaines applications particulières de très hautes technologies comme la propulsion spatiale. Par exemple, les réservoirs de la fusée Ariane, conçus et fabriqués par Air Liquide, contiennent les 28 tonnes d'hydrogène liquide qui vont alimenter son moteur central. Ces réservoirs sont une véritable prouesse technologique : ils ne pèsent que 5,5 tonnes à vide et leur paroi ne dépasse pas 1.3 mm d'épaisseur.

I.5.4.6.1.3. Stockage moléculaire :

Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau.

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.

Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie.

Avant d'envisager des applications à grande échelle, il faut aussi maîtriser certains paramètres comme la cinétique, la température et la pression des cycles de charge et décharge de l'hydrogène dans ces matériaux.

I.5.4.6.2. Le transport de l'hydrogène :

Pour pouvoir transporter l'hydrogène, il est nécessaire de le distribuer jusqu'à son point d'utilisation.

Le transport de l'hydrogène dépend de son conditionnement:

- Le transport liquide de l'hydrogène se fait par train, bateau et dépendant d'isolation et de système maintenant de très basse température.
- L'hydrogène gazeux à basse, moyenne et haute pression, de 1 jusqu'à 700 bars. Le transport se fait en gazoduc, ou en camion.
- L'hydrogène peut être solide par absorption dans des hydrures. Suivant le matériau utilisé le transport peut se faire à très basse température, et transporté dans des réservoirs.

I.5.4.7. Applications de l'hydrogène :

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique permet d'obtenir de l'énergie sans production de gaz à effet de serre. De même, selon le mode de production utilisé, il est possible d'obtenir de l'hydrogène propre et de réaliser une chaîne d'approvisionnement en énergie propre.

Depuis longtemps, L'hydrogène est déjà une matière de base dans l'industrie chimique et pétrochimique. Il peut être fabriqué spécifiquement pour répondre aux besoins d'une industrie ou être un sous-produit dans une autre fabrication (fabrication d'éthylène ou de chlore par exemple).

Il est également utilisé dans l'industrie agroalimentaire (hydrogénation de graisses ou de sucre), la pharmacologie, l'électronique (fabrication des semi-conducteurs), l'industrie verrière et la métallurgie (traitement réducteur des métaux).

I.5.4.7.1. L'industrie chimique et pétrochimique :

Les utilisations industrielles de l'hydrogène sont principalement la fabrication d'ammoniac NH_3 , qui sert de matière première pour l'industrie des engrais. La quantité d'hydrogène utilisée

aujourd'hui pour la fabrication de produits chimiques tels que les amines, le méthanol, l'eau oxygénée, ...etc., est très inférieure à celle nécessitée par la fabrication d'ammoniac.

I.5.4.7.2. Hydrogène comme vecteur énergétique :

L'hydrogène peut être converti en électricité, en chaleur ou en force motrice selon l'usage final. Il a l'avantage de présenter une capacité de stockage intéressante (problématique avec l'électricité) et de pouvoir être produit sans émission de CO₂. En tant que vecteur énergétique, il trouve ainsi une multitude d'applications.

I.5.4.7.2.1. Application stationnaire :

Il permet le stockage d'énergie dans les bâtiments en assurant une fourniture d'électricité et de chaleur grâce à la cogénération, ce qui permettrait le développement des bâtiments à énergie positive.

I.5.4.7.2.2. Application mobile :

L'hydrogène peut alimenter des véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Par ailleurs, un réservoir d'hydrogène peut-être associé à une pile combustible pour améliorer l'autonomie de véhicules électriques (électro-mobilité de 2^e génération, la première correspondant aux véhicules électriques actuellement en cours de développement).

I.5.4.7.2.2.1. Moteurs à combustion interne :

Dans un moteur à combustion interne traditionnel, l'hydrogène peut être utilisé comme combustible. Sa présence, combinée avec de l'oxygène, va alors provoquer une explosion et faire tourner un piston qui actionnera un moteur. C'est donc de l'énergie mécanique qui est ici créée. Le secteur des transports est concerné par cette application

I.5.4.7.2.2.2. Pile à combustible :

Une pile à combustible est une pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air.

Pour fonctionner correctement, une pile à combustible a besoin de circuits auxiliaires comme un circuit de refroidissement, d'hydratation des gaz, de contrôle de pression (absolue et différentielle) des gaz et autres circuits de sécurité.

Chaque cellule élémentaire est constituée de deux compartiments disjoints alimentés chacun par les gaz réactifs. Les deux électrodes, ainsi que l'électrolyte, complètent le dispositif. L'électrolyte peut être solide ou liquide ; celui-ci a pour fonction d'assurer le transport des ions d'un compartiment à l'autre. Certains électrolytes ne sont efficaces qu'à hautes températures. De façon générale, le fonctionnement électrochimique d'une cellule unitaire de pile à combustible peut se schématiser sous la forme donnée dans la figure I 13 :

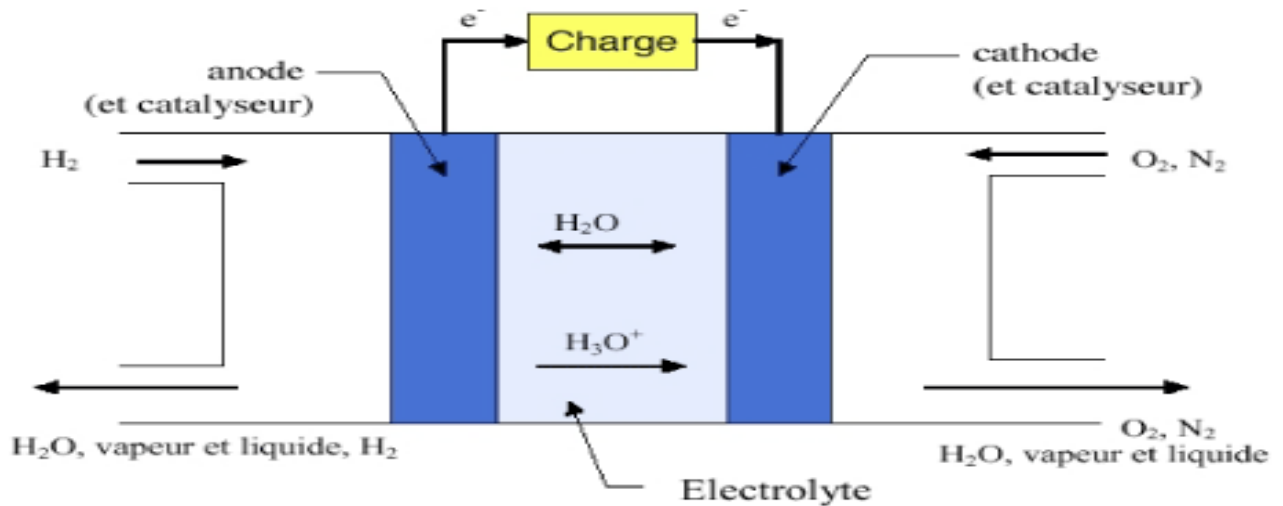


Figure I 13: Principe de fonctionnement d'une cellule d'une PAC H₂/O₂ en milieu acide

Il existe plusieurs types de piles à combustible fonctionnant avec de l'hydrogène comme carburant. Chacune étant caractérisée par son électrolyte : les piles alcalines (AFC), les piles ayant pour électrolyte des membranes polymères (PEMFC), les piles à méthanol (DMFC), les piles à acide phosphorique (PAFC), les piles à carbonates fondus (MCFC) et les piles à oxydes solides (SOFC).

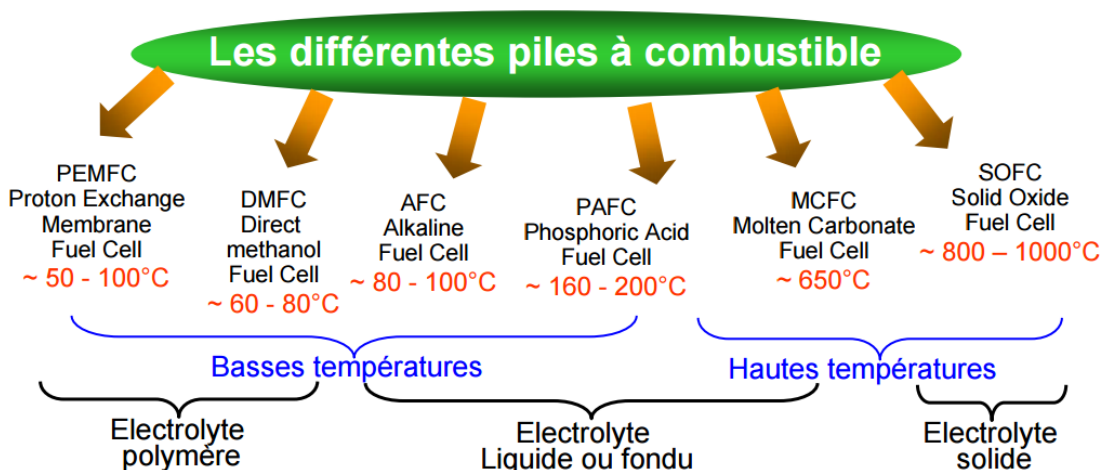


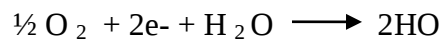
Figure I 14 : Schéma des différents types de PAC

➤ Les piles alcalines (AFC, Alkaline Fuel Cell) : La Pac alcaline est la première pile à combustible étudiée pour une utilisation réelle, celle-ci se trouvait à bord du premier vaisseau spatial habité dans les années 1960. Les réactions qui se produisent à l'anode et à la cathode sont les suivantes :

A l'anode, avec un catalyseur au nickel, ou au platine-palladium, on a :

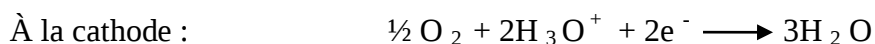
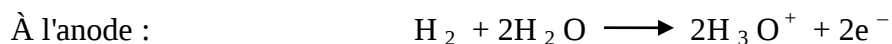


A la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a :



Dans ce cas, l'électrolyte (potasse, KOH) est conducteur d'hydroxyde (OH⁻). L'électrolyte peut réagir avec le dioxyde de carbone pour former un composé de carbonate, ce qui nécessite l'emploi de filtres. Les électrodes sont habituellement une combinaison de nickel et de charbon actif.

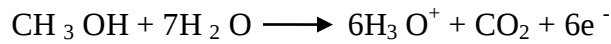
➤ Les piles à membranes (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell – DMFC, Direct Methanol Fuel Cell) : Ce type de pile est celui sur lequel sont actuellement concentrés les plus gros efforts de développement. La pile PEM est en effet retenue par tous les grands constructeurs automobiles comme convertisseur électrochimique des véhicules légers du futur. La PEMFC fonctionne à une température entre 60° et 120°C où les réactions suivantes se produisent :



L'électrolyte est une membrane polymère solide à base de fluor mince qui permet le passage des protons (H⁺). Un catalyseur à base de platine est utilisé aux électrodes. Le monoxyde de carbone peut empoisonner ce type de catalyseur et diminuer l'efficacité de la pile à combustible.

De nombreux centres sont à la recherche de catalyseurs plus robustes et moins chers, et d'électrolytes polymères plus efficaces. Les plaques bipolaires peuvent être faites à partir de feuilles de graphite, de composites ou de métaux à base de carbone.

Dans le cas de la DMFC, le combustible est un mélange d'eau et de méthanol, il réagit directement à l'anode selon :

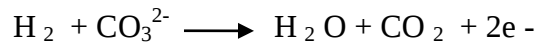


La cathode est alimentée en air comme dans le cas de la PEMFC. Les effluents de la pile contenant du CO_2 nécessitent l'épuration des gaz d'échappement par traitement post catalytique avant leur rejet à l'atmosphère. Il peut ainsi être lavé par de l'eau obtenue par condensation de celle qui se trouve dans l'oxygène ou dans l'air en sortie de pile.

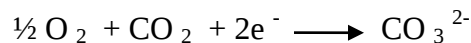
➤ Les piles à acide phosphorique (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell) : Les réactions sont les mêmes que dans le cas de la pile PEMFC. Le carburant peut contenir jusqu'à 1% de CO sans endommager la pile. Les composants de ces deux dernières piles à combustible (PAFC et PEMFC) sont très semblables, sauf pour ce qui est de l'électrolyte. Dans le cas de la PAFC, l'électrolyte est de l'acide phosphorique liquide (qui est aussi un électrolyte conducteur de protons). Les deux types de pile utilisent des électrodes de carbone avec catalyseur au platine qui permettent la diffusion des gaz.

➤ Les piles à carbonates fondus (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) : Les réactions sont les suivantes (à des températures de fonctionnement entre 600 et 700°C),

À l'anode, avec un catalyseur fait d'un alliage nickel-chrome / nickel-aluminium :



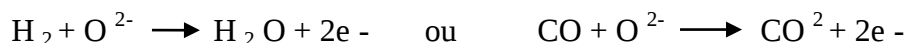
A la cathode, avec un catalyseur d'oxyde de nickel :



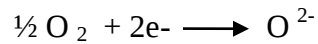
On peut aussi utiliser du CO comme carburant. Le dioxyde de carbone produit à l'anode est recyclé à la cathode tandis que l'ion carbonate (CO_3^{2-}) voyage de la cathode à l'anode à travers l'électrolyte. C'est un mélange de carbonates de métaux alcalins (carbonates de lithium, de potassium et de sodium) retenus par une matrice céramique d'oxyde d'aluminium et de lithium (LiAlO_2). Les plaques bipolaires sont faites d'acier inoxydable recouvert de nickel du côté de l'anode. Le choix des matériaux est extrêmement important, en raison de la nature hautement corrosive de l'électrolyte et des hautes températures.

➤ Les piles à oxydes solides (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) : Les réactions sont les suivantes pour des températures de fonctionnement entre 650 et 1000°C,

A l'anode, avec un catalyseur au cermet de zirconium et nickel :



A la cathode, avec un catalyseur au manganite de lanthane dopé au strontium :



Ce système est muni d'un reformeur interne et utilise aussi le monoxyde de carbone comme combustible. L'électrolyte de la SOFC est constitué de Zircone (céramique solide) dopée de 8 à 10 % d'ytterbium (Y^{3+}), laquelle joue le rôle de conducteur pour l'ion oxygène (O^{2-}).

I.5.5. Stockage inertiel

Un volant d'inertie moderne est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone ou en métal entraînée par un moteur électrique. L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8000 et 16000 tour/min pour le modèle ci-contre) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente.

L'énergie est alors stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique, elle pourra ensuite être restituée instantanément en utilisant le moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie.



Figure I 15 : volant d'inertie

Ce stockage se fonde sur la conversion instantanée de l'énergie mécanique en énergie électrique et, réciproquement, conversion dont les machines électriques sont naturellement le siège suivant qu'elles sont génératrices (si elles sont entraînées) ou motrices (si elles sont entraînantes). Le rendement est de l'ordre de 80% à 95 %.

Le principal avantage est sa rapidité de mise en service (utile en cas de micros coupures). L'énergie stockée W (en J) = $\frac{1}{2} \cdot J \cdot \Omega^2$ (le volant, dont l'inertie est J en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, tourne à la vitesse angulaire Ω en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) avec $J = \frac{1}{2} m \cdot r^2$ pour un cylindre en rotation (m = masse en Kg, r = rayon en mètre).

I.5.6. Stockage à l'aide de condensateurs

Le stockage par condensateurs est utilisé principalement en électronique, c'est-à-dire en basse tension et en faible énergie, dans les alimentations à tension continue (redressement).

Accessoirement, le stockage par condensateurs peut être utilisé comme source de puissance impulsionnelle. Sa limitation est la durée de vie réduite des condensateurs, qui supportent mal un trop grand nombre de cycles de charge/décharge.

Les supers condensateurs de puissance :

Apparu vers 2000, le super condensateur de puissance est un composant électrotechnique dédié au stockage de puissance plutôt qu'à celui d'énergie. Il se présente sous la forme d'une

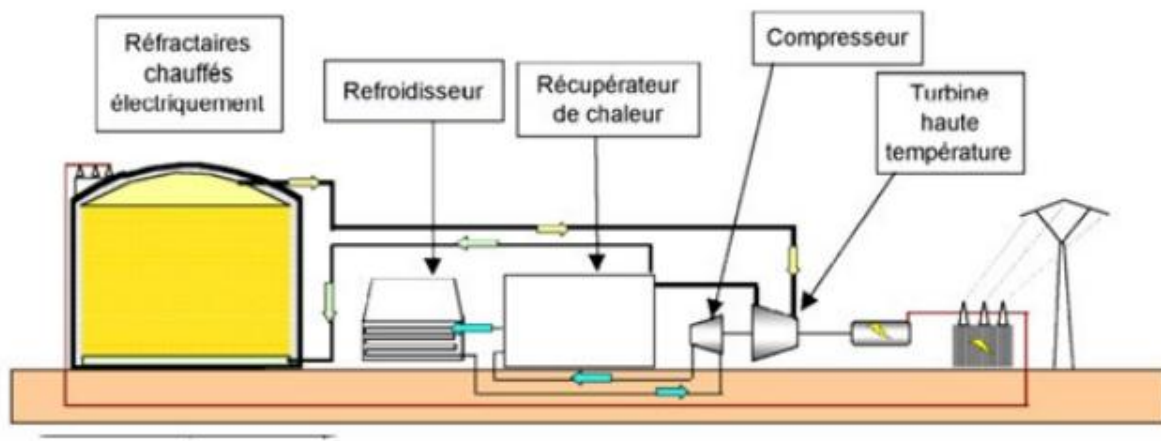
cellule élémentaire (ressemblant physiquement à un condensateur électrolytique), dans laquelle le stockage est de type électrostatique et non pas électrochimique. Cela permet d'obtenir des puissances massiques élevées (de l'ordre de 10 kW/kg) et supportant de 500 000 à 1 million de cycles de charge/décharge.

Les cellules élémentaires des super condensateurs peuvent fournir ou absorber des puissances unitaires très élevées avec une constante de temps de quelques dizaines de secondes.

L'énergie stockée W (en J) = $\frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$ (C est la capacité du condensateur en Farad F et V la tension à ses bornes en V).

I.5.7. Stockage thermique :

De nombreuses solutions de stockage de froid (glace, liquides cryogéniques) et de chaud (sels fondus) existent. Par exemple on chauffe des sels fondus et quand on a besoin de récupérer l'énergie on récupère la chaleur de ces sels pour en faire de l'électricité. A l'heure actuelle leur



utilisation n'est pas répandue.

Figure I 16: schéma d'une installation de stockage thermique

Ces installations ont un potentiel important en termes de compétitivité pour les activités tertiaires et industrielles et en matière d'impact sur la demande en électricité à la pointe. En effet, en stockant la chaleur ou le froid en période de faible demande d'électricité, le potentiel de décalage des appels de puissance est important. Sur les réseaux de chaleur, le stockage de chaleur permet d'optimiser le dimensionnement des installations, notamment dans le cadre d'extension de réseaux existants.

I.6 Généralités sur Les systèmes électriques hybrides SEH

I.6.1 Introduction :

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels. Les

systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quant aux notions de « ropreté » et de durabilité.

I.6.2 L'origine de la notion du système :

Un système est un ensemble d'objets organisés en fonction d'un but et immergé dans un environnement.

- Le système est un outil conceptuel,
- L'ensemble doit former une identité ou une unité cohérente et autonome,
- Les objets ou éléments peuvent être réels ou conceptuels.

I.6.3 Définition de système hybride : (31)

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables.

Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue.

Les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit.

I.6.4 Les avantages des systèmes hybrides : (32)

- Diminution de la consommation de carburant et des contraintes d'approvisionnement
- Indépendance énergétique et visibilité à long terme du coût de l'énergie
- Durée de vie des groupes électrogènes allongée, maintenance allégée
- Réduction des nuisances sonores et de la pollution de l'air du site.

I.6.5 Présentation du système hybride : (33)

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles.

I.6.5.1. Principaux Composants des systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride sont généralement constitués de sources d'énergie classique, de sources d'énergie renouvelable. Ils peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydroélectrique, marémotrice, géothermique, etc., des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage des charges principales et un système de surveillance.

Le système qui nous intéresse comprend :

I.6.5.1.1. Générateurs photovoltaïques :

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau. La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule PV de fonctionner comme un générateur. Les cellules PV sont combinées ensemble pour former un module PV qui peut produire une certaine quantité d'énergie sous des conditions d'éclairement et de température variables. Par la suite les modules PV peuvent être regroupés à leur tour afin de former un générateur PV. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée.

I.6.5.1.2. Aérogénérateur :

Aérogénérateur ou éolienne, un dispositif qui permet de capter l'énergie cinétique du vent afin de la transformer en électricité. Le vent fait tourner les pales du rotor des éoliennes qui sont reliés à une génératrice pour permettre la production de l'électricité. Celle-ci est soit stockée dans des batteries, soit directement envoyée sur le réseau électrique.

I.6.5.1.3. Pile à combustibles :

Parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse. Ce convertisseur d'énergie, à la fois propre et efficace, permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène, vecteur énergétique en énergie électrique, utilisable directement, et une énergie thermique qu'il est possible de valoriser. L'utilisation de cette cogénération permet d'atteindre des rendements très intéressants, jusqu'à 80% dans certains cas. Les piles à combustibles (PAC), générateurs statiques d'électricité et de chaleur.

I.6.5.1.4. Systèmes de stockage :

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont

d'habitude du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie.

L'hydrogène est le candidat le plus apte à combler les lacunes des accumulateurs. Le surplus de courant alimente un électrolyseur qui produit de l'hydrogène à partir de l'eau. Une pile à combustible emploie ensuite ce gaz pour générer de la chaleur et des électrons.

I.6.5.1.5. Convertisseurs :

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu (CC) en à courant alternatif (CA) et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.

Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge.

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

I.6.5.1.6. Charges :

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

I.6.6 Classification : (34)

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues.

I.6.6.1. Le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes :

Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique.

Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

I.6.6.2. La structure du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

✓ **Le premier critère** est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

Exemples des Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle :

- Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle
- Systèmes éolien/source conventionnelle

Exemples des systèmes hybrides sans source conventionnelle

- Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage
- Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage
- Système hybride éolien/stockage

✓ **Un second critère** possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

✓ **La dernière classification** possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la

source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc.

I.6.7. Etudes des systèmes hybrides :

Au vue de ces nombreux critères, il est aisé d'imaginer la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles. Une synthèse non exhaustive des études réalisées sur ces systèmes est présentée dans ce paragraphe.

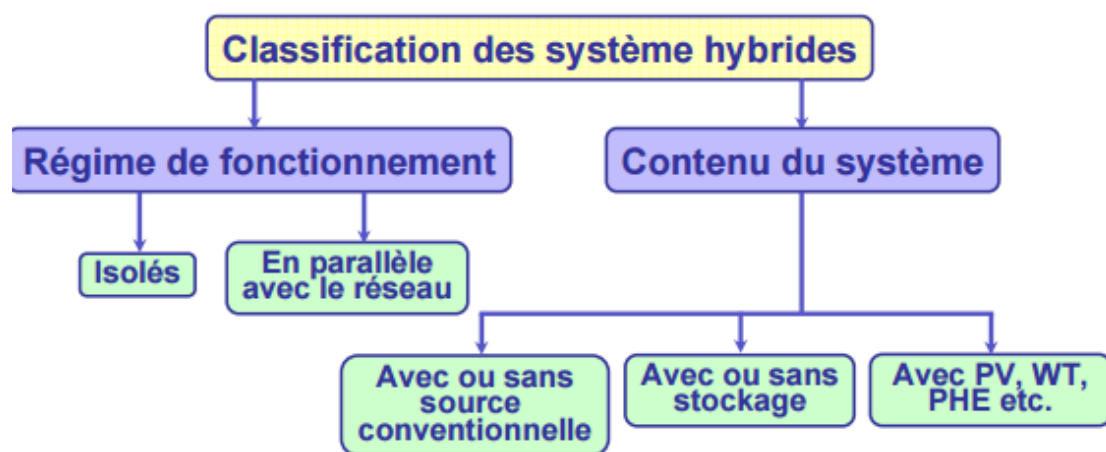


Figure I 17: Classification des systèmes hybrides

I.6.7.1. Critères d'optimisation du système hybride :

Différents critères sont utilisés pour optimiser les systèmes en fonction du site d'installation. Les critères les plus fréquemment utilisés sont :

➤ **La probabilité de perte de la charge** ou la probabilité de perte d'approvisionnement, ces deux critères sont univoques et rendent compte du rapport énergie non satisfaite et énergie totale consommée sur la période d'étude choisie.

➤ **Le coût d'énergie produite** Diverses approches sont utilisées pour le calcul du coût : il dépend de l'énergie demandée par le consommateur, du coût d'investissement initial pour l'achat des composants du système, du coût de leur installation, du coût de maintenance et de remplacement (pour les éléments qui ont une vie d'exploitation plus courte que celle de l'élément qui définit la vie d'exploitation du système hybride) etc.

I.6.7.2. Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides :

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement parmi lesquels les plus connus sont :

➤ **Hybrid2** – ce logiciel est destiné à l'étude de différents systèmes hybrides avec divers éléments. Il dispose d'outils pour effectuer une analyse économique. La présentation des résultats peut être réalisée de deux manières – des résultats synthétisés ou des résultats détaillés avec variation dans le temps ;

➤ **HOMER** (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) – avec 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 ;

➤ **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.

La classification des études générales est schématisée sur la Figure 1..

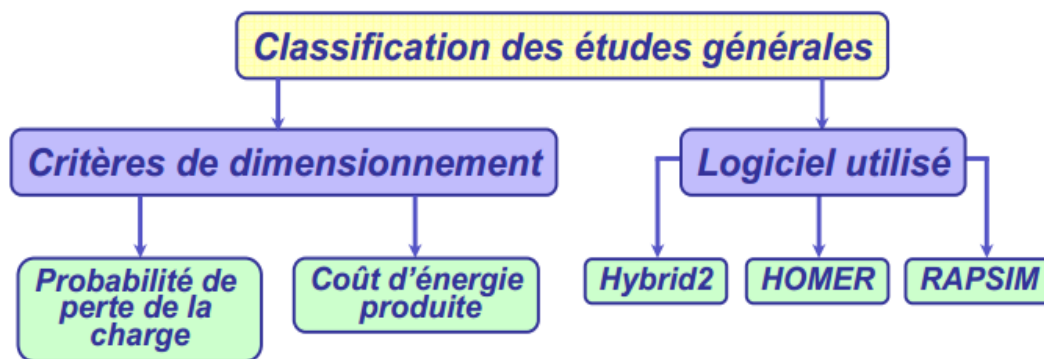


Figure I 18: Classification des études

I.7 Description du logiciel HOMER: (35)

Le logiciel de modélisation énergétique HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybrides, composés de groupes électrogènes, de systèmes de cogénération, d'éoliennes, de systèmes photovoltaïques, de systèmes hydrauliques, de batteries, de piles à combustible, de la biomasse et bien d'autres.

HOMER a été initialement développé dès 1993 par le National Renewable Energy Laboratory pour les programmes d'électrification rurale.

C'est un logiciel de simulation fonctionnant sur une base horaire. La durée de simulation est basée sur une année. Ainsi il est possible de prendre en compte la variation de paramètres comme la demande en électricité, l'apport d'énergie solaire ou d'énergie éolienne. Il est même possible d'importer des données expérimentales à partir de fichiers formatés correctement.

HOMER est avant tout un modèle économique. Vous pouvez utiliser le logiciel pour comparer les différentes combinaisons de tailles et de nombres de composants, et d'étudier comment les variations de la disponibilité des ressources affectent le coût d'installation et d'exploitation des différentes solutions de systèmes.

Pour simuler un système hybride de génération d'énergie, il faut définir tous les éléments de ce dernier, en utilisant les composants définis dans la bibliothèque du logiciel comme les éoliennes, les panneaux photovoltaïques, les groupes électrogènes et les convertisseurs statiques etc. S'il est nécessaire d'ajouter un composant qui n'existe pas dans la liste des éléments définis par défaut, le logiciel nous permet de l'ajouter en introduisant toutes ces caractéristiques techniques ainsi que son coût. On peut aussi modifier les caractéristiques d'un composant déjà existant dans la bibliothèque.

Simuler une installation hybride avec HOMER permet d'obtenir de nombreuses informations. En particulier :

- Pour chaque composant : la production utile, le taux d'utilisation, les horaires d'utilisation, la durée de vie moyenne ;
- Les coûts associés à l'utilisation de chaque composant du système.

A ceci s'ajoute la possibilité de comparer très rapidement des architectures et des configurations, sur la base du coût du kWh par rapport à des paramètres de sensibilités. Les analyses de sensibilité permettent ainsi d'appréhender les facteurs de risque lié au choix de la configuration.

Chapitre II : Etude du site d'Adrar

II.1 Introduction

L'énergie solaire et l'énergie éolienne dépendent fortement des conditions météorologiques (Ensoleillement, vitesse du vent) du site d'installation du système hybride.

Dans ce chapitre nous allons donner une brève description de la région sur laquelle l'étude a été réalisée ainsi que les caractéristiques climatiques du site .

II.2 Caractéristiques climatiques de l'Algérie (36)

L'Algérie dispose d'un gisement solaire très important à cause de sa situation privilégiée, dont la durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert. Le total de l'énergie reçue est estimé à 169400 TWh/an.

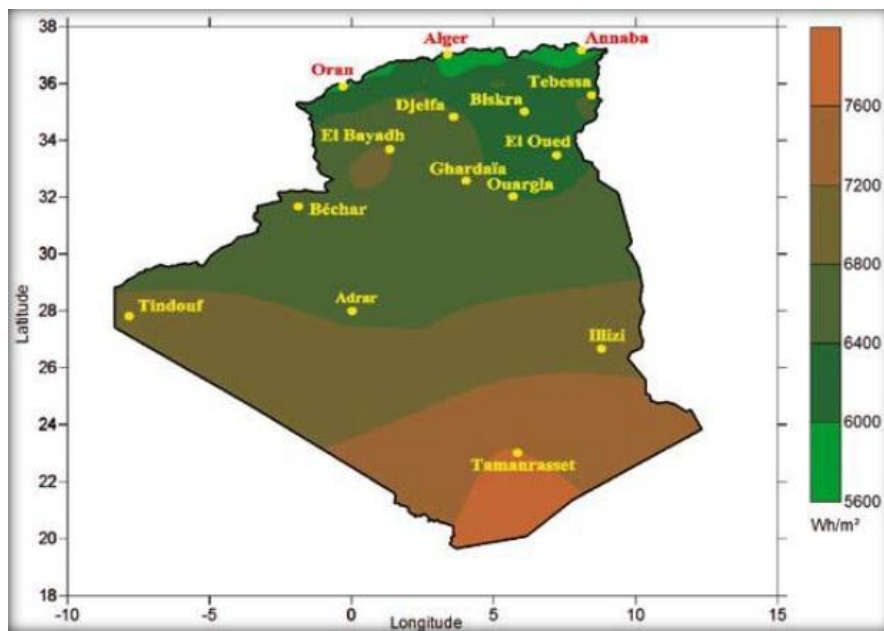


Figure II 1 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale sur une surface horizontale

La ressource éolienne de l'Algérie varie considérablement d'un endroit à un autre. Ceci est Principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. La figure II.2 représente la carte de la répartition géographique de la vitesse du vent à 50 m du sol. Cette carte a été établie à partir des données de vitesse du vent mesurées à 10 m du sol au niveau de 75 stations du réseau de l'ONM (L'Office National de la Météorologie).

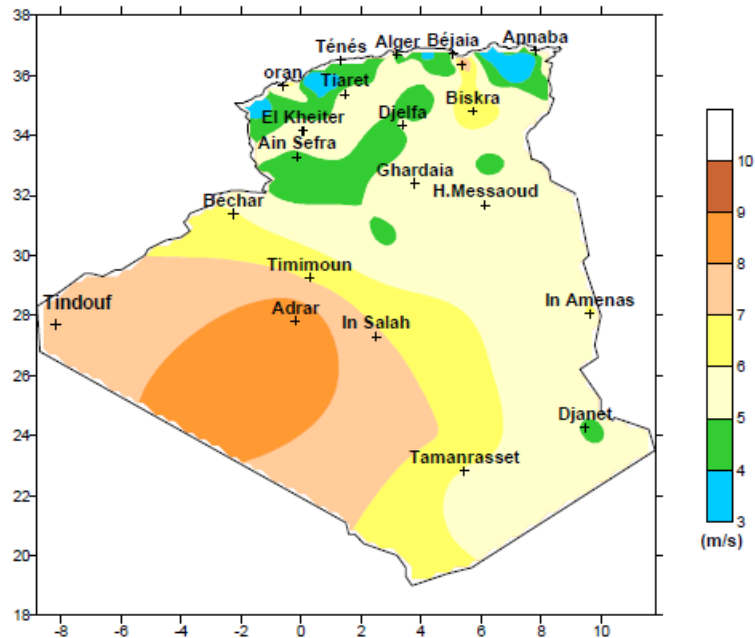


Figure II 2: Carte de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 50 m du sol

Il est à noter que le sud algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers de Oran , Bejaia et Annaba ,sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud.

II.3. Choix des sites

Nous avons choisi le site d'Adrar parce que cette région appartient à une zone climatique très favorable et dispose d'un potentiel renouvelable non négligeable comme en a déjà vu sur les figures II.1 et II.2 et aussi parce que nous disposons des données horaires de vitesse de vent, la température et l'irradiation extraites du logiciel Homer Pro version 3.11.12

II.4 présentation du logiciel Homer pro

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources) est un logiciel de simulation et d'optimisation destiné à l'étude d'installations de production d'énergie multi-sources (PV, éolien, réseau, stockage, diesel...). Il est principalement destiné à la simulation de mini-réseaux connectés ou non-connectés, Il a été développé en premier lieu par le National Renewable Energy Lab dépendant lui-même du ministère américain de l'énergie. L'entreprise Homer Energy LLCa été spécialement créé pour sa commercialisation et la suite de son développement. Il compte près de 100000 utilisateurs.

Il contient une base très exhaustive de données météorologique issues de la stations (NASA surface meteorology and solar energy database) , il permet donc de trouver les données horaires pour n'importe quelle zones avec plus au moins de precision a partir des moyennes mensuelles .

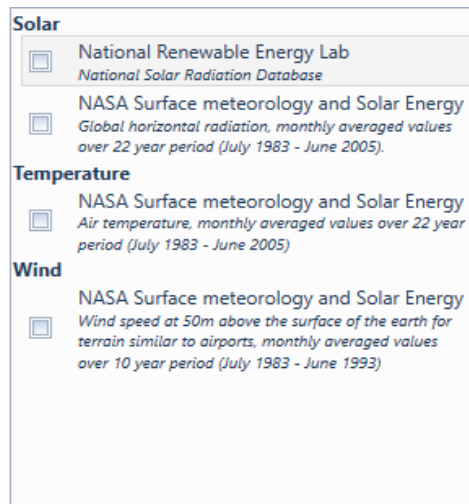


Figure II 3: base de données du logiciel Homer pro

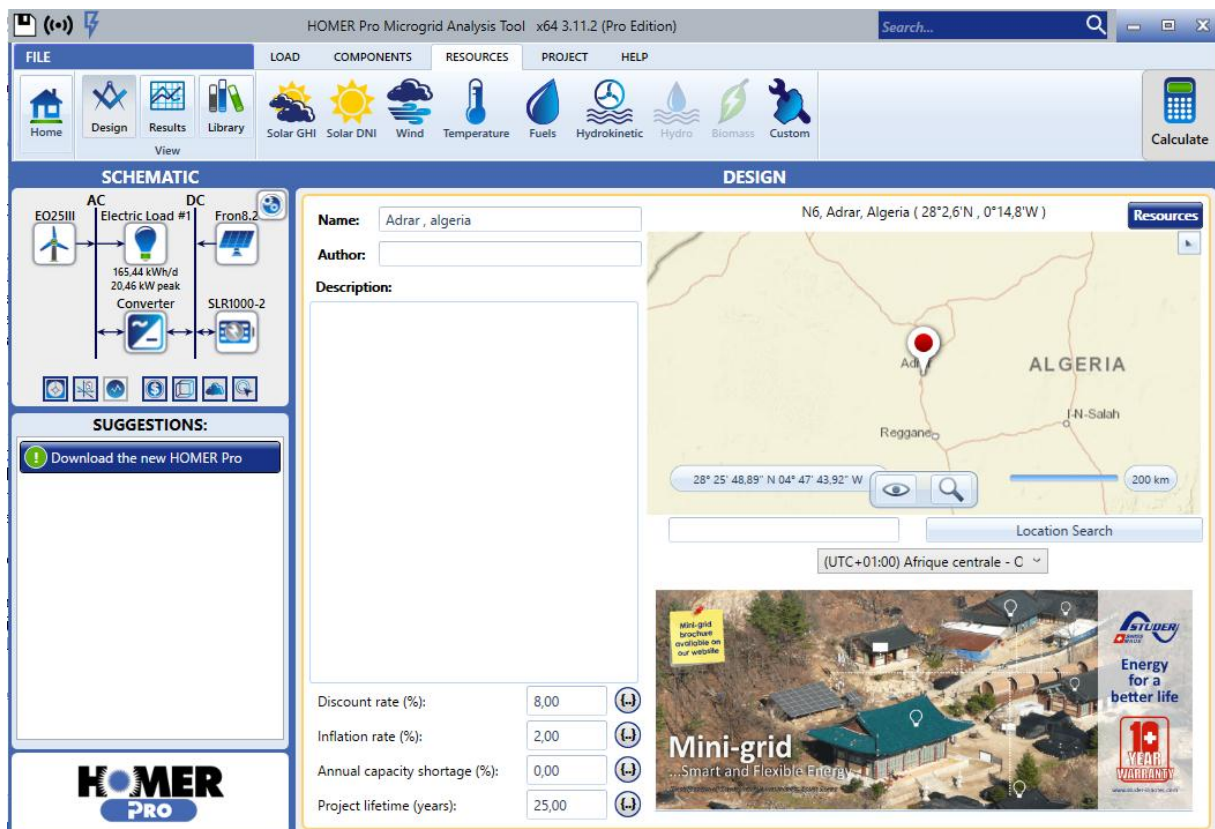


Figure II 4: Vue de la zone d'Adrar par le logiciel HOMER pro

II.5 caractéristiques climatique de la région choisi

II.5.1 Caractéristiques de la région d'Adrar

Adrar est une commune de la wilaya d'Adrar en Algérie située à 1 400 km au sud-ouest d'Alger . ses coordonnées son $28^{\circ} 2,6'$ Nord $0^{\circ} 14,8'$ West sa hauteur est de 279 m et elle est habitée par 64 781 habitants (2008).

Adrar a un climat désertique chaud typique de la zone saharienne hyper-aride, c'est-à-dire du cœur du Sahara, avec un été torride, très long et un hiver court, tempéré chaud. Le climat, hyper-aride, est celui d'un désert absolu, puisque la moyenne annuelle des précipitations atteint à peine 14 - 15 mm, tombant essentiellement en automne ou au printemps. À des occasions exceptionnelles, des orages violents peuvent se produire à cause de masses d'air plus frais venant du nord qui rencontre les masses d'air brûlant venues directement du désert surchauffé pendant la journée.

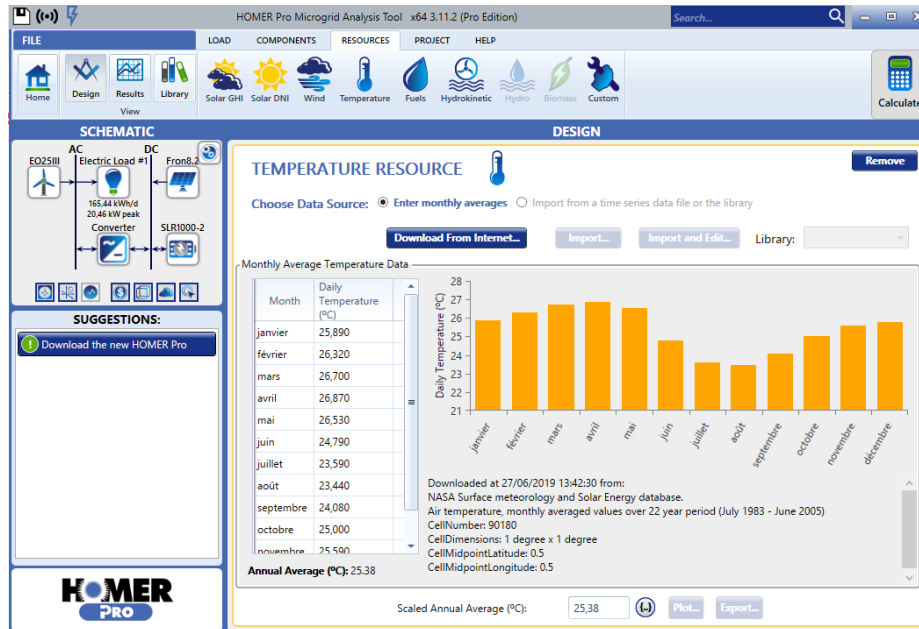


Figure II 5: les Températures données par le logiciel Homer pro pour le site d'Adrar tout au long de l'année

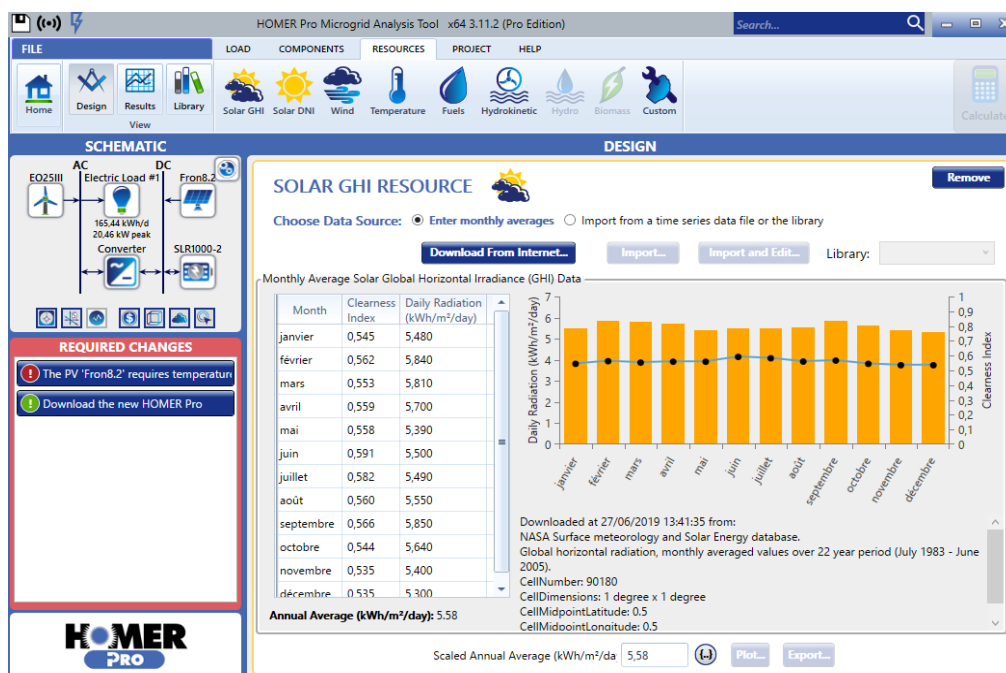


Figure II 6: l'irradiation donnée par le logiciel Homer pro pour le site d'Adrar tout au long de l'année

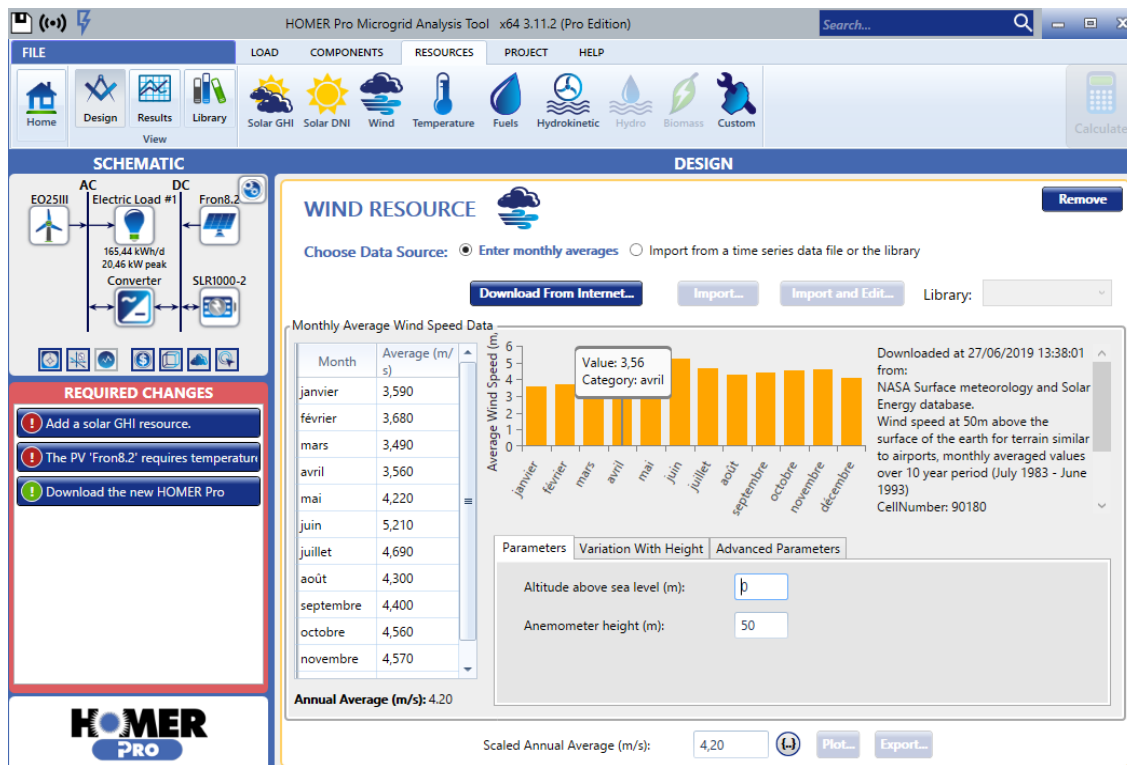


Figure II 7: la vitesse du vent donnée par le logiciel Homer pro pour le site d'Adrar tout au long de l'année.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé du gisement solaire et éolien en Algérie, ensuite nous avons défini le site qui sert pour faire l'étude avec les moyennes mensuelles du rayonnement et du vent extraites du logiciel Homer Pro qui nous ont servi à déterminer le potentielle énergétique de la région choisie.

Chapitre III : Dimensionnement et simulation

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre sera présenté un système hybride de production électrique avec différents types de stockage pour le site d'Adrar. Deux configurations seront étudiées.

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des systèmes à énergie hybride qui ont pour but de les optimiser, mais la stratégie d'optimisation diffère d'un logiciel à un autre. Nous avons opté dans notre cas pour l'utilisation du logiciel HOMER.

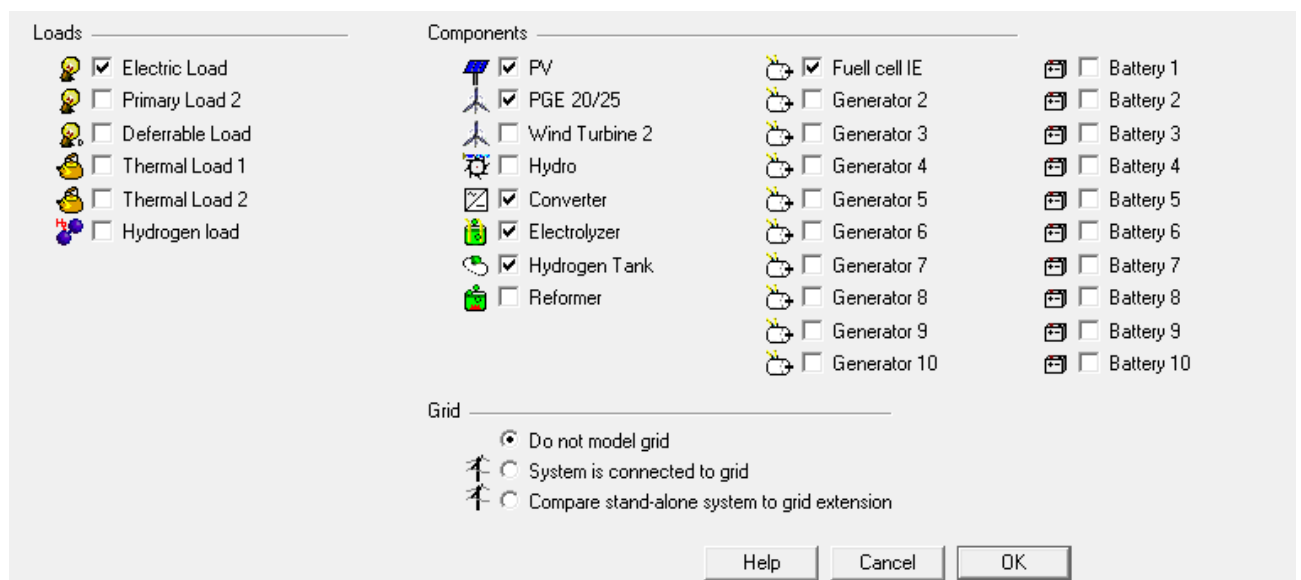


Figure III 1: Bibliothèque HOMER

La figure III 1 nous montre la bibliothèque d'Homer avec les composants d'un système hybride pour commencer le travail de dimensionnement

III.2. Présentation du système hybride :

Une étude paramétrique fait l'objet de ce travail, qui se résume en la simulation de deux différents systèmes hybrides pour la production électrique avec des différents types de stockage et Les systèmes considérés sont :

- Configuration 1 : Un système hybride éolien-photovoltaïque- batterie ;
- Configuration 2 : Un système hybride éolien-photovoltaïque-pile à combustible.

L'électricité produite sert à alimenter une certaine charge électrique, et l'énergie qui est en excès sera stocké dans des batteries pour la première configuration et pour la deuxième configuration, l'énergie qui est en excès servira à produire de l'hydrogène qui sera stocké et par la suite consommé par la pile à combustible, lorsque ses sources d'énergie sont insuffisantes pour alimenter la charge considérée.

La configuration des systèmes hybrides de génération d'énergie simulée à l'aide du logiciel HOMER sont présentés sur la figure.III 2.

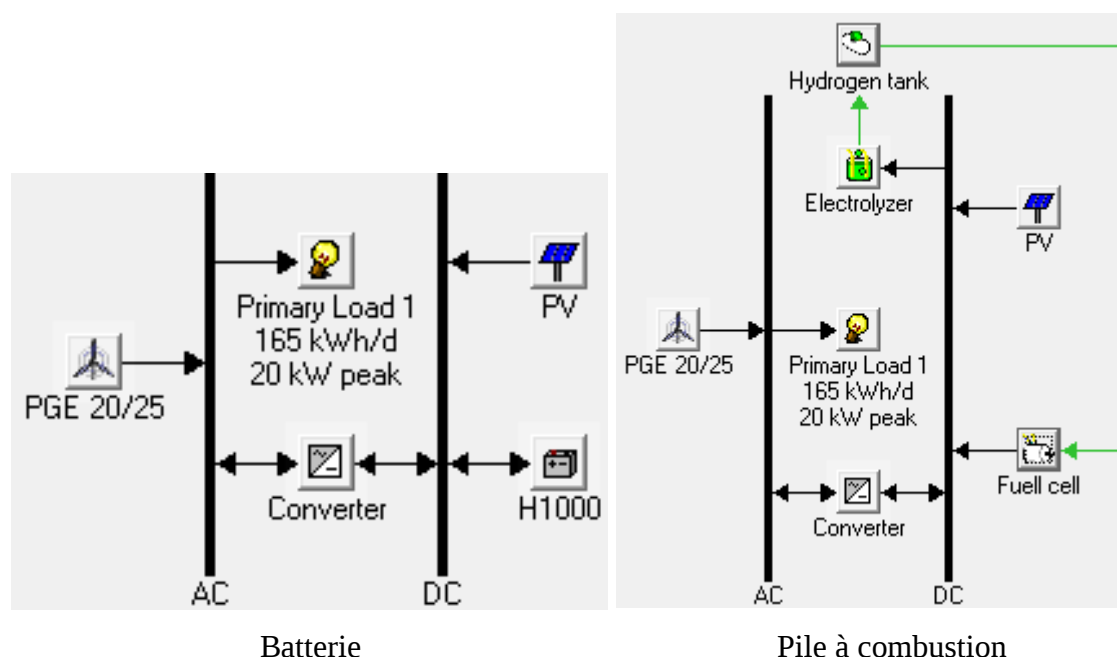


Figure III 2: Architecture des configurations 1 et 2 respectivement

III.3. Données d'entrées :

III.3.1. Les données du vent :

Les données des vitesses du vent du site d'Adrar sont utilisées pour la simulation. Elles sont constituées de vitesses mensuelles moyennes ainsi que des paramètres de Weibull k et c mesurés à la hauteur de 10 m du sol.

Nous pouvons voir sur la figure III 3, l'évolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent du site d'Adrar. On remarque que la vitesse varie en fonction des mois, elle est la plus élevée en mars avec 6,11 m/s puis viennent les mois de juillet et août, le reste de l'année elle varie autour de 5.3 m/s jusqu'à 5.99 m/s.

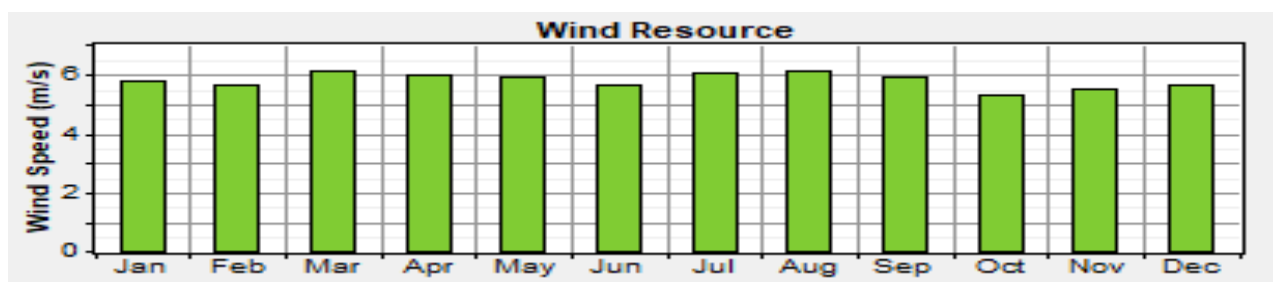


Figure III 3: Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Adrar à 10m du sol

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

La classification des fréquences du vent effectuée à l'échelle annuelle pour le site d'Adrar est représentée sur la figure III 4.

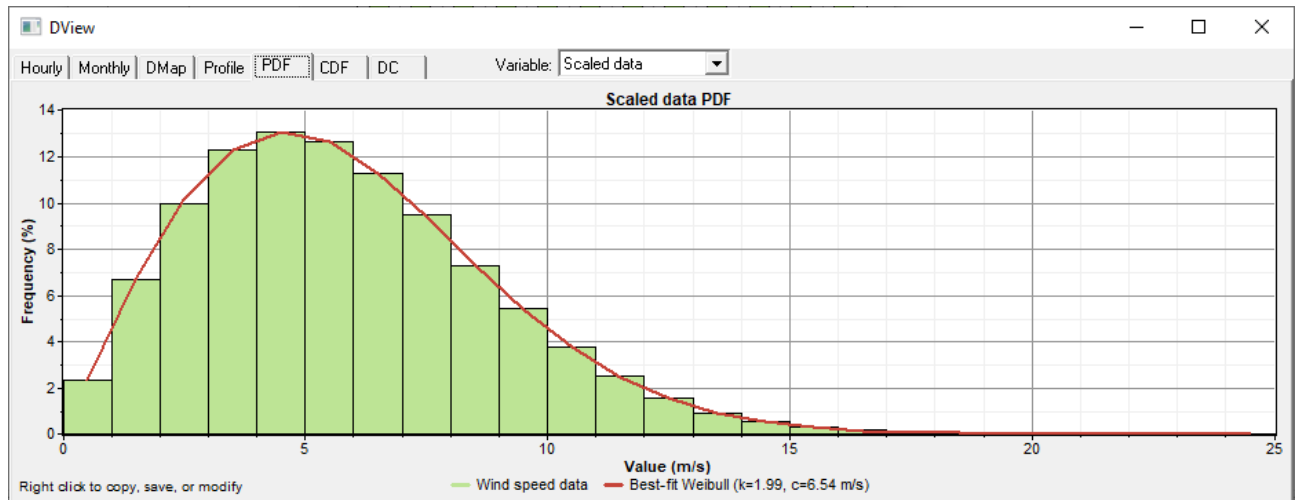


Figure III 4: Variation de la fréquence des vitesses du vent mesurées pour la région d'Adrar

III.3.2. Les données solaires :

Les données du rayonnement solaire du site d'Adrar sont utilisées pour la simulation. Elles sont constituées du rayonnement solaire journalier ainsi que l'indice de clarté comme le montre la figure III 5.

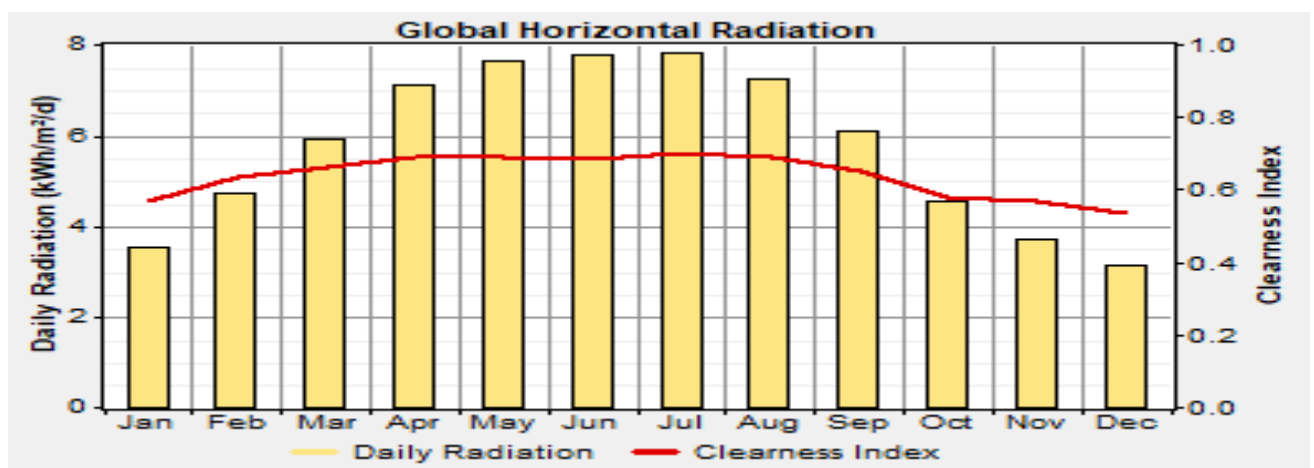


Figure III 5: Rayonnement horizontal global et indice de clarté

Ces données du rayonnement solaire ont été téléchargées par le logiciel Homer pro

III.3.3. La charge électrique :

L'objectif est d'assurer une production continue et alimenter une charge électrique de 165 kWh/j sept jours sur sept sans arrêt tel est le défi que doit relever notre système hybride.

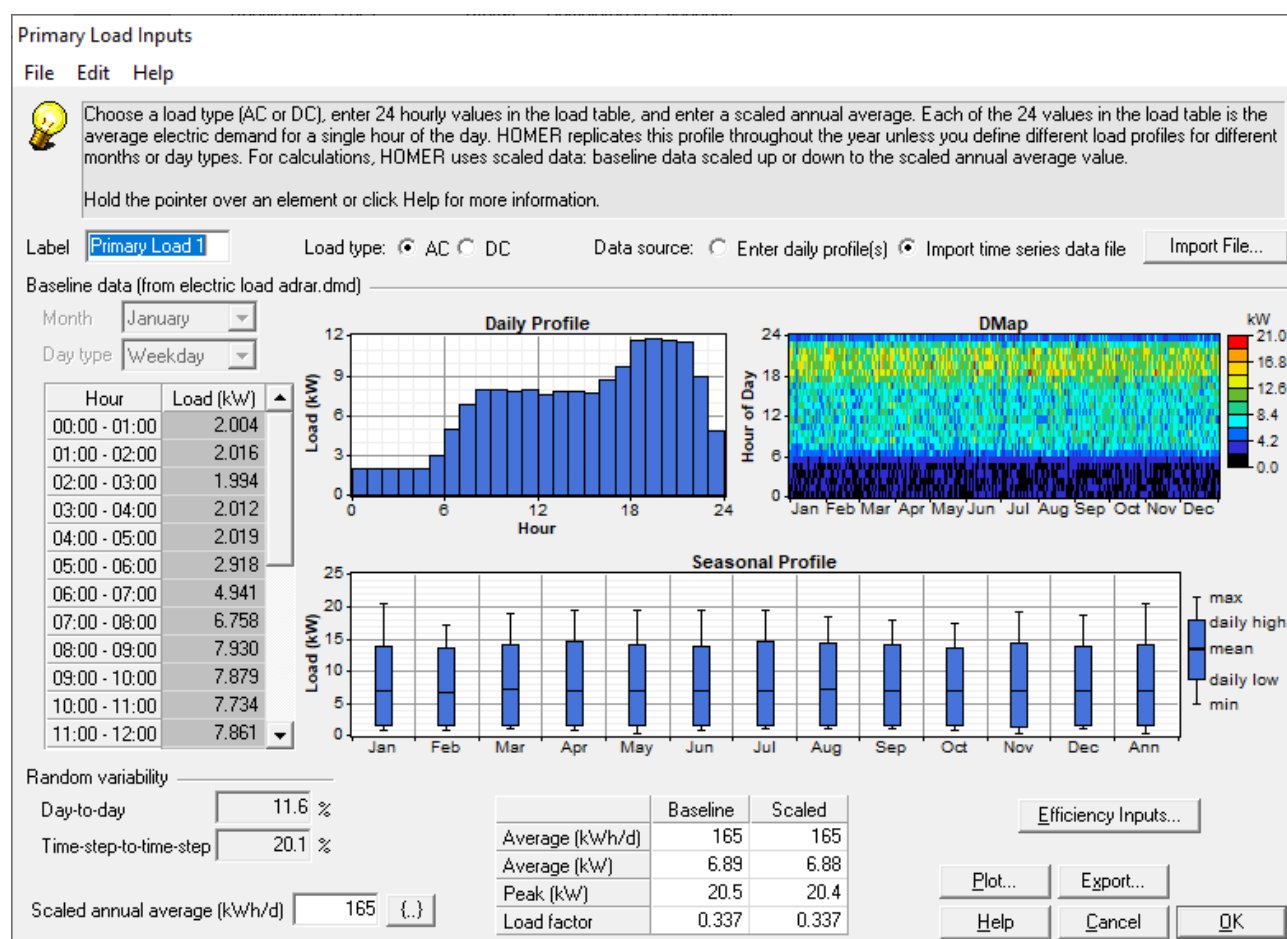


Figure III 6: Simulation de la charge à alimenter

La figure III 6 donne les puissances maximale (peak) et minimal fourni par le système pour atteindre la charge considérée.

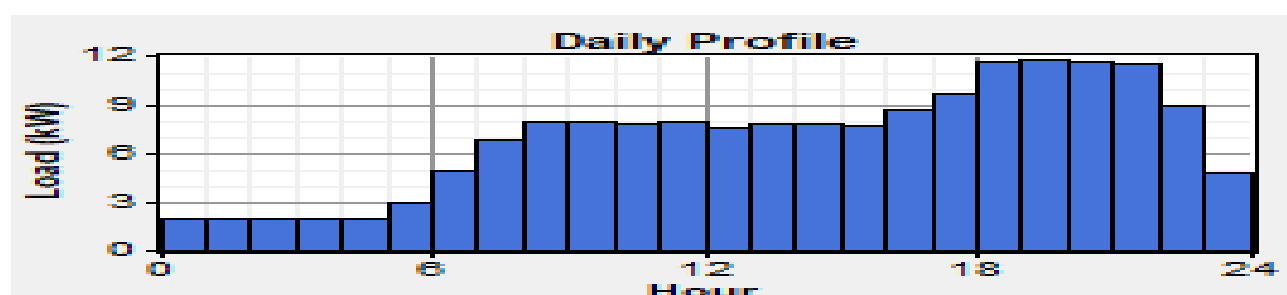


Figure III. 7: Charge électrique moyenne horaire

La figure III 7 représente la charge électrique moyenne horaire pendant une journée. On note que la charge atteint son maximum aux environs de 19h, qui représente les heures de pointe des habitants.

III.3.4. L'aérogénérateur :

L'aérogénérateur utilisé dans ce système est le PGE 20/25 de 25 kW dont les caractéristiques sont présentées sur la figure 4.8. Sa durée de vie est de 17 ans, son moyeu atteint une hauteur de 30 m et sa courbe de puissance est représentée sur la figure III 8.

	Puissance nominale	25 <u>kw</u>
	Axe de rotation	horizontal
	Vitesse nominale	9 m/s
	Vitesse de démarrage	3.5 m/s
	Vitesse de coupure	25 m/s
	Hauteur du mat	25/30/36 m
	<u>Diametre</u> du rotor	20m
	Surface balayée	305 m ²
	Nombre de pales	3
	<u>Materiel</u> de conception	Plastique renforcé en fibre de verre (FRP)
	Type de <u>generatrice</u>	Synchrone
	Gamme de vitesse	45 a 69

Figure III. 8: Caractéristiques de l'aérogénérateur PGE 20/25

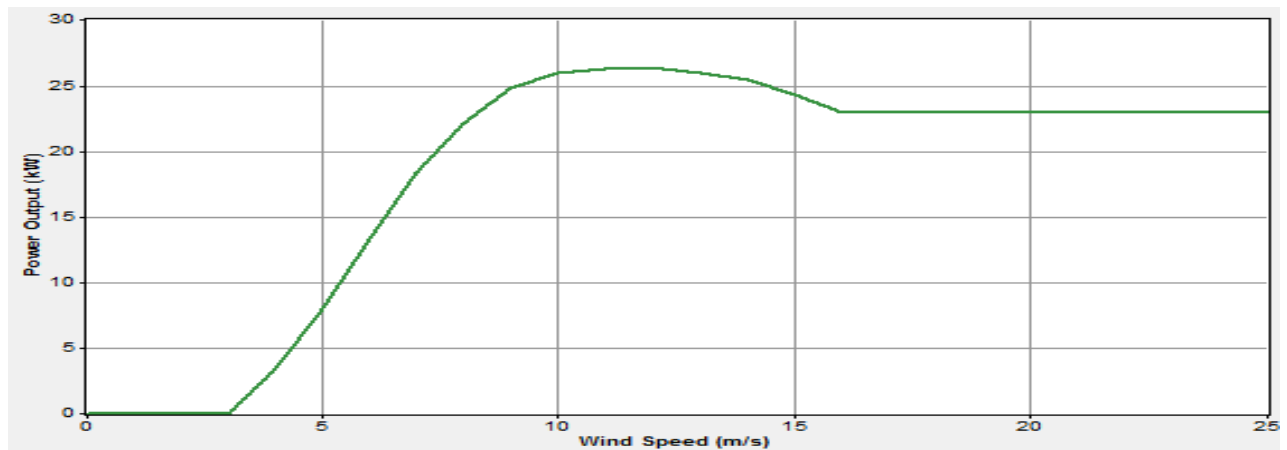


Figure III. 9: Courbe de puissance de l'aérogénérateur PGE 20 /25

III.3.5. Le générateur photovoltaïque :

Le champ photovoltaïque qui constitue notre système présente les caractéristiques suivantes :

Tableau III 1: Propriétés du champ photovoltaïque

Propriétés	Valeurs
Puissance	10 kW (CC)
Durée de vie	25 ans
Inclinaison	30°
Orientation	0° Sud
Réflectivité du sol	0.45
coefficient de perte de puissance du à la température	-0.5 % / °C
température nominale d'utilisation	45°C
rendement dans les conditions standards.	17%

III.3.6. L'électrolyseur :

L'électrolyseur est utilisé pour produire de l'hydrogène lorsque l'énergie éolienne ou photovoltaïque est produite en excès. Pour notre système l'électrolyseur choisi porte les caractéristiques cité dans le tableau III 1 :

Tableau III 2: Propriétés de l'électrolyseur

Propriétés	Valeurs
Type	Alcalin
Puissance	50 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement	100%
Mode de fonctionnement	CC
Rapport de la charge minimale	20%

III.3.7. 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 :

Tableau III 3: Propriétés de la PAC

Propriétés	Valeurs
Type	PEM
Puissance	25 KW
Mode de fonctionnement	CC
Durée de vie	87000 heures

III.3.8. Le convertisseur :

Le convertisseur est un système qui permet le conditionnement de la puissance de manière à adapter la puissance électrique de sortie d'un système à celle d'entrée d'un autre. Ce composant peut convertir un courant alternatif AC en courant continu DC et vice versa, il est destiné également à adapter la tension DC/DC sachant que les composants des systèmes renouvelables sont caractérisés par des courbes tension-courant I-V différentes.

Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les systèmes hybrides: les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Dans notre cas, nous avons besoin de convertir le CC de sortie du générateur photovoltaïque et de la pile à combustible en un courant alternatif d'entrée de la charge, et le CA de sortie de l'aérogénérateur produit en excès en CC d'entrée de l'électrolyseur. Nous nous intéressons donc à la conversion de type AC/DC et DC/AC.

Le tableau III 4 représente les caractéristiques techniques du convertisseur utilisé.

Tableau III 4: Caractéristiques du convertisseur

Caractéristiques	Valeurs
Puissance	40 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement CA/CC	96%
Rendement CC/CA	90%

III.3.9. 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.

Le réservoir utilisé se caractérise par ce qui suit :

Tableau III 5: Propriétés du réservoir d'hydrogène

Propriétés	Valeurs
Capacité de stockage	25 kg
Durée de vie	25 ans



III.3.10. batterie :

Figure III 10: représentation des batteries utilisées dans notre système

Tableau III 6: Caractéristiques des batteries

Caractéristiques	Valeurs
Capacité nominale	2 kWh
voltage nominale	2 v
quantité	24
durée de vie minimale de la batterie	4 ans

III.4. Dimensionnement :

L'objectif de ce travail est d'assurer l'électrification d'un ensemble d'habitat situé à Adrar avec une charge de 160 kWh/j.

Le dimensionnement d'une installation, nécessite la connaissance de la puissance des appareils électriques à alimenter, pour cela nous avons fait une évaluation de la consommation des appareils les plus courants pour une seule maison.

A l'aide des puissances moyennes des appareils électriques on a pu avoir les résultats suivants:

Tableau III 7: Fiche de consommation des appareils électrique pour une seule maison (35)

Appareil	Nombre	Puissance (W)	Durée d'utilisation par jours (en heures)		Nombre de jours d'utilisation par semaine	Consommation en kWh/jours
			Saison sèche	Saison des pluies		
Télévision	1	95	12	8	7	0.95
Réfrigérateur	2	200	8	8	7	3,20
Four électriques	1	2500	1	1	3	1,07
machine à laver	1	3000	2	1	2	1,29
fer à repasser	1	1000	0,5	0,5	5	0,36
sèche-cheveux	1	2000	1	1	1	0.29
chargeur de téléphone	3	5	1	1	7	0,02
ampoules	6	75	13	10	7	5.178
routeur wifi	1	5	20	15	7	0,09
climatiseur	2	500	18	0	7	9,00
Consommation totale						21,448

D'après les résultats du tableau III 7, on note qu'une seule maison consomme 21.448 kWh/j, donc il est possible en moyenne d'alimenter 7 maisons avec une charge de 160 kWh/j.

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.

III.5. Simulation des systèmes considérés :

III.5.1. Simulation du système avec les configurations 1 et 2 :

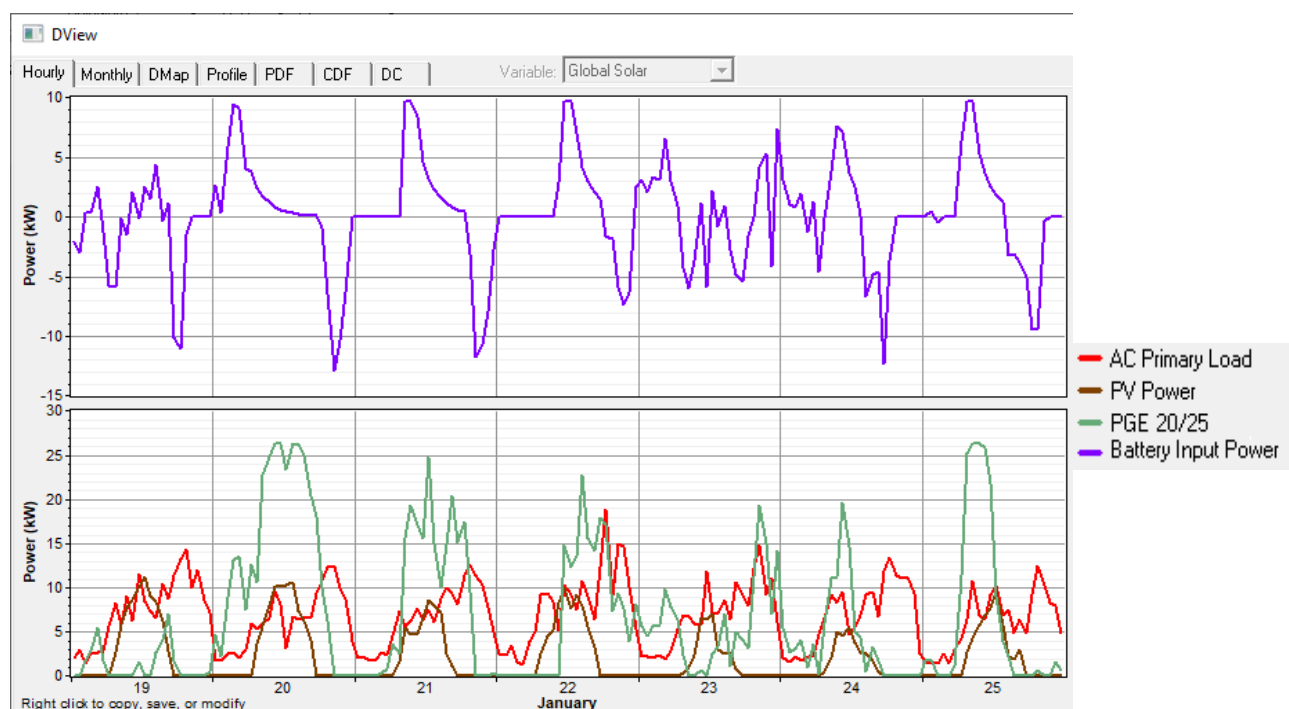


Figure III. 11: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de janvier

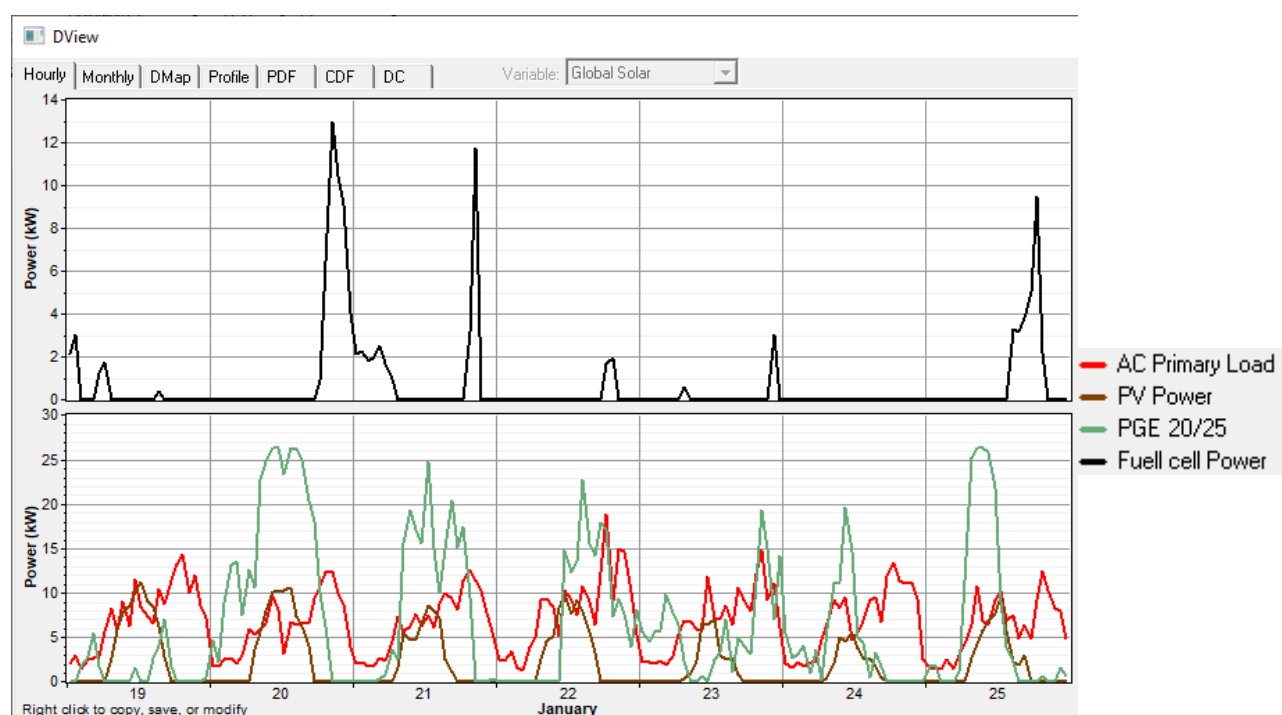


Figure III. 12 : La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de janvier

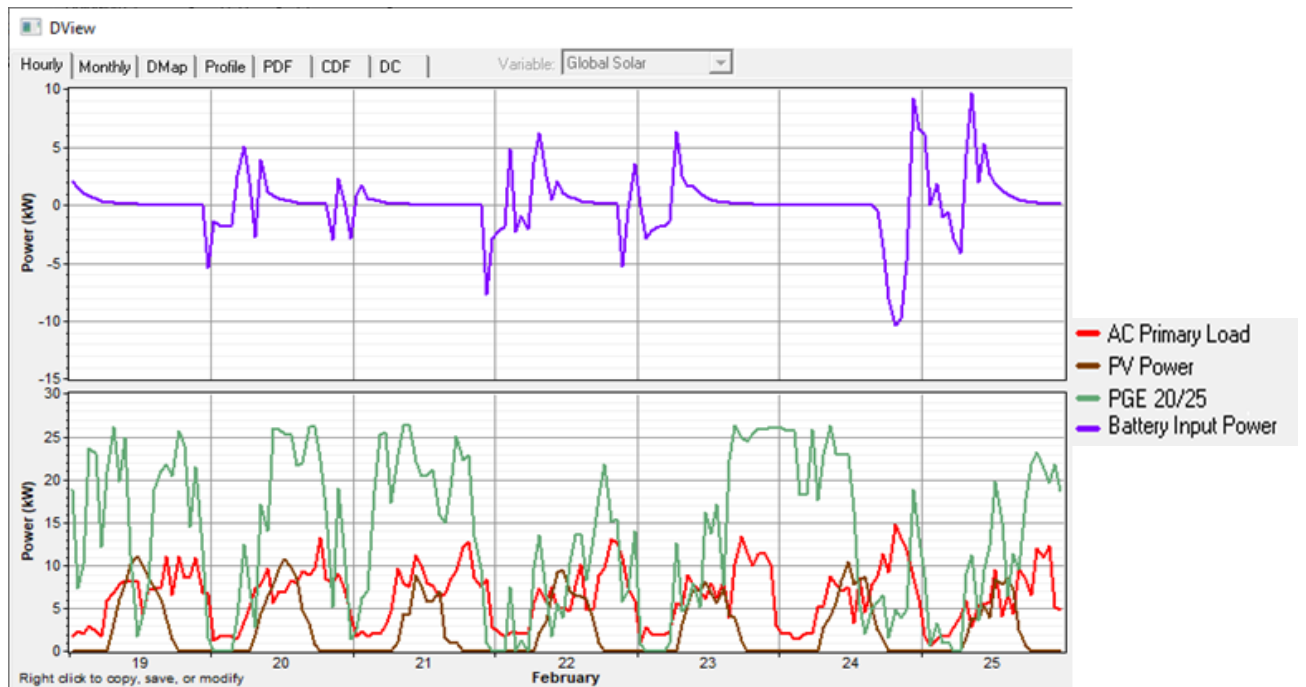


Figure III. 13: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Février

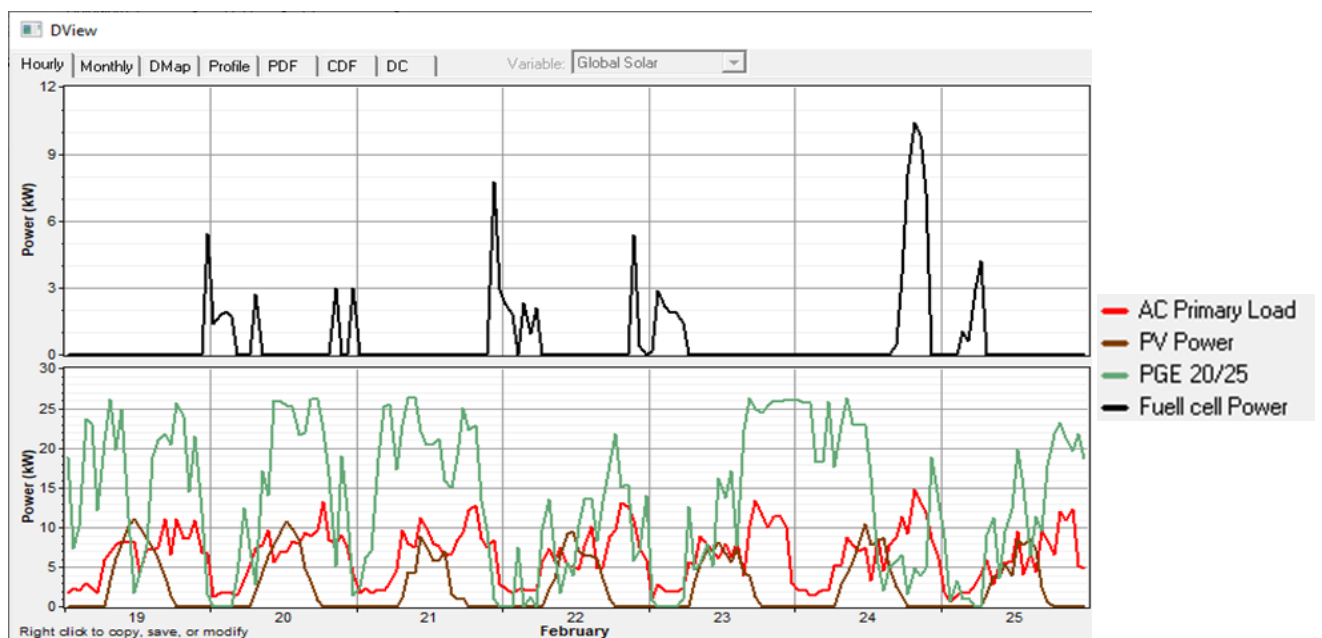


Figure III. 14: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Février



Figure III. 15: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Mars

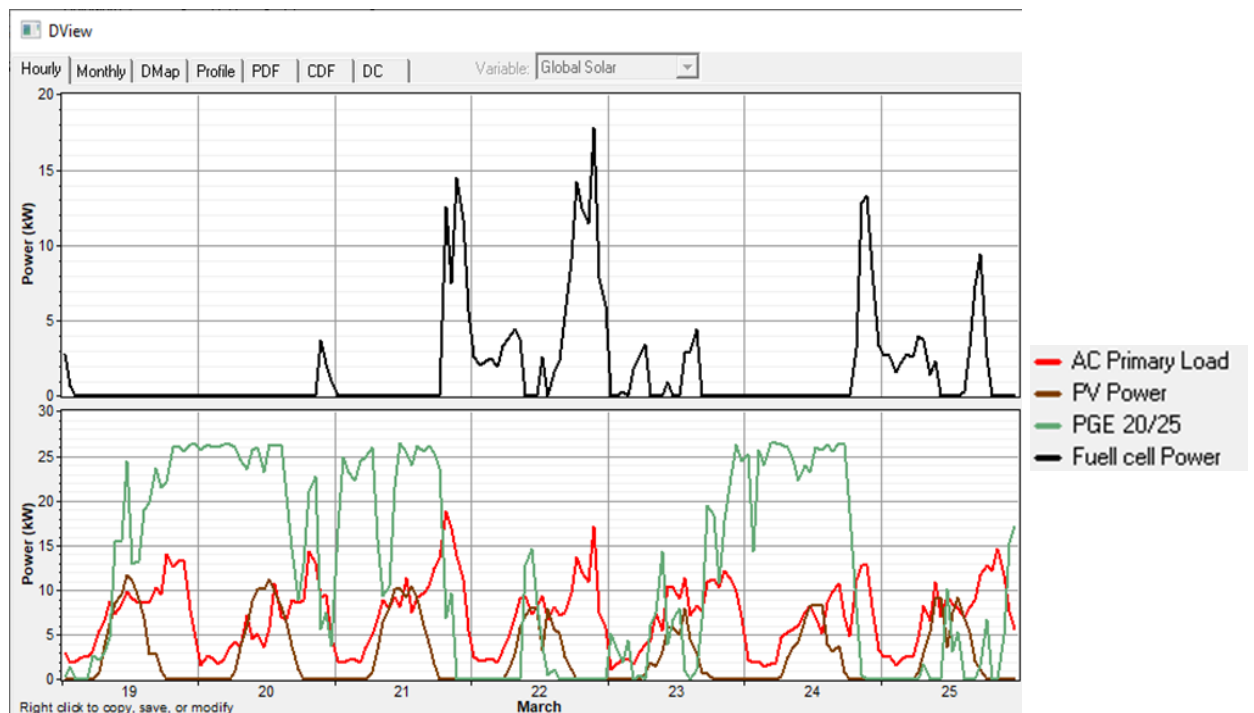


Figure III. 16: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Mars

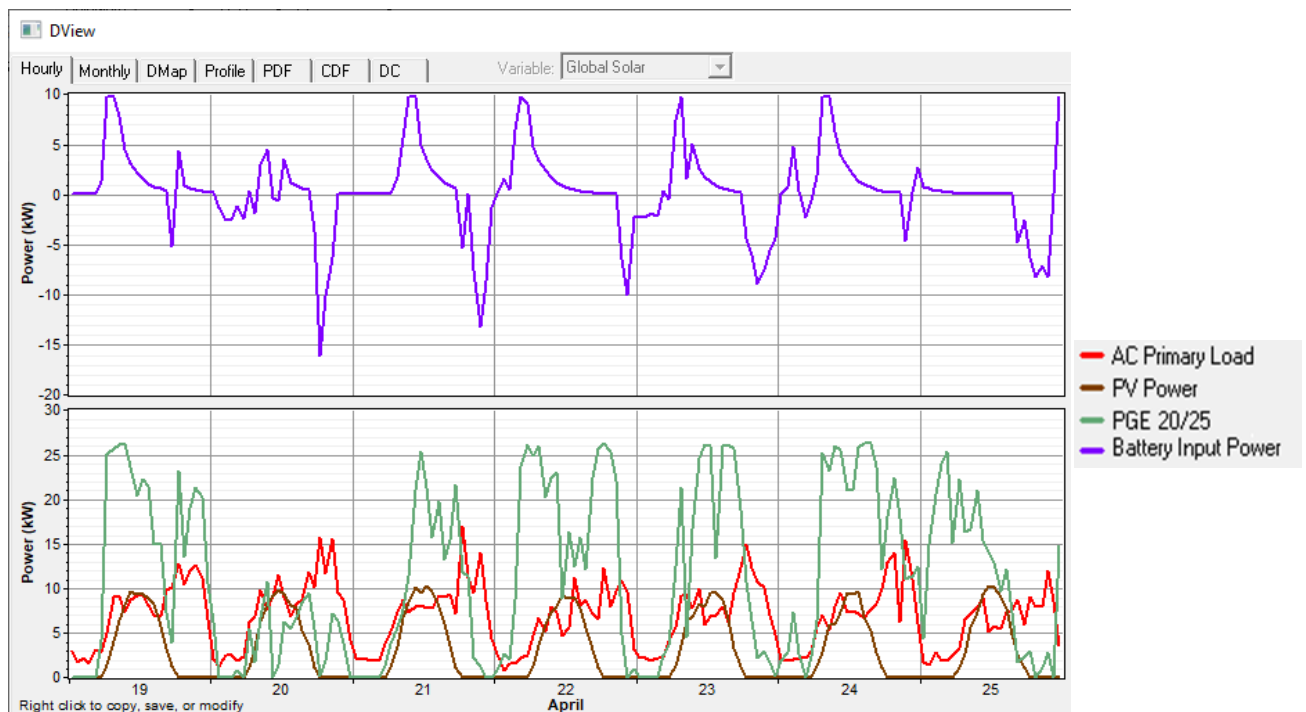


Figure III. 17: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'Avril

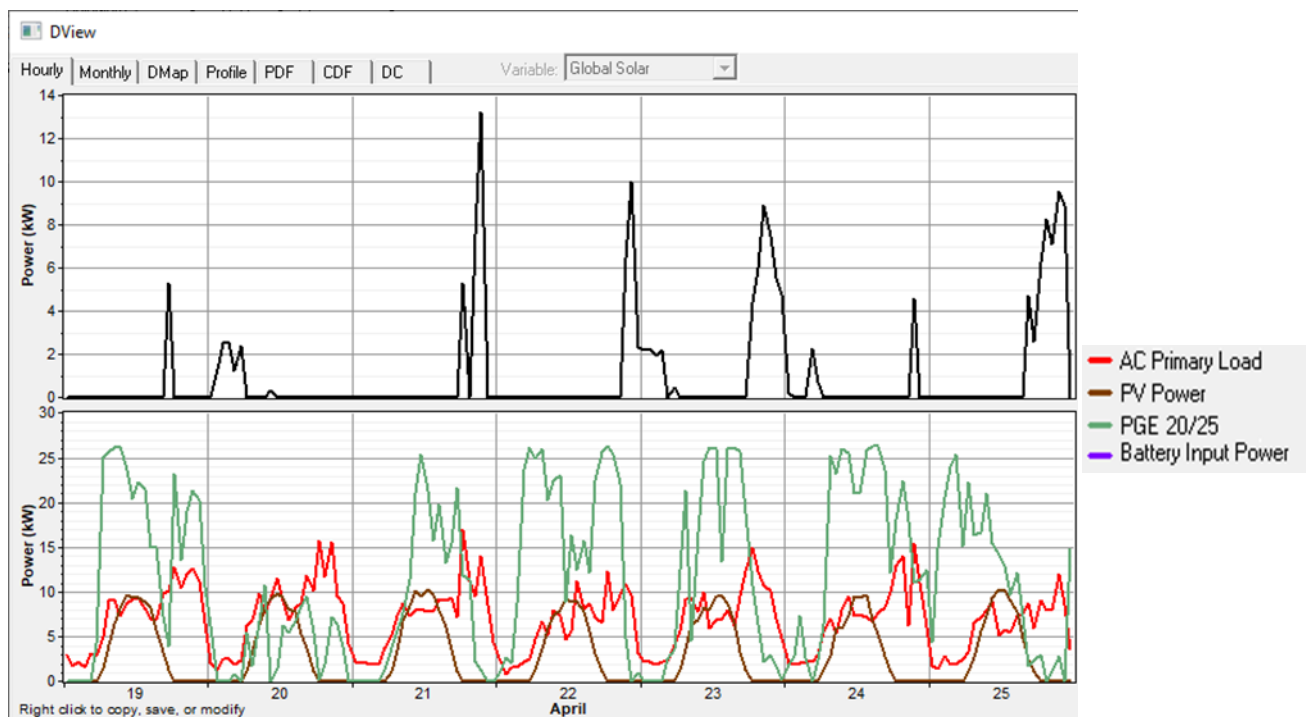


Figure III. 18: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'Avril

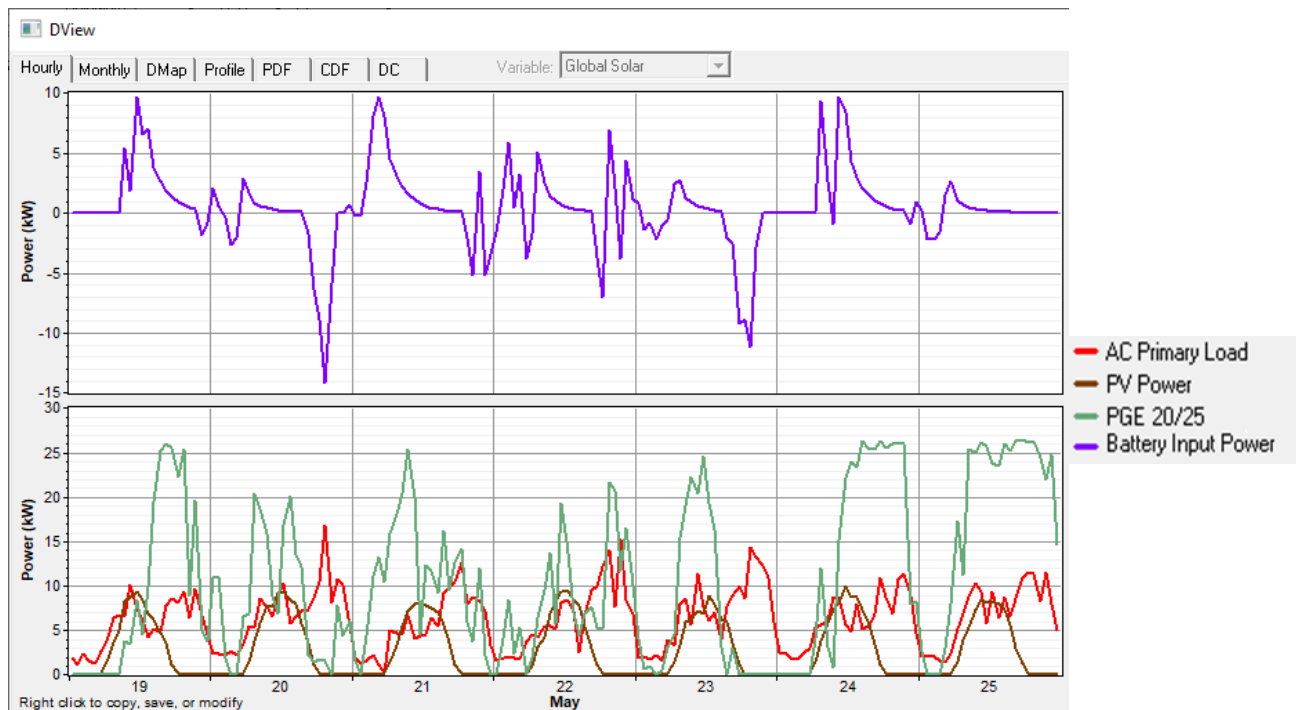


Figure III. 19: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Mai

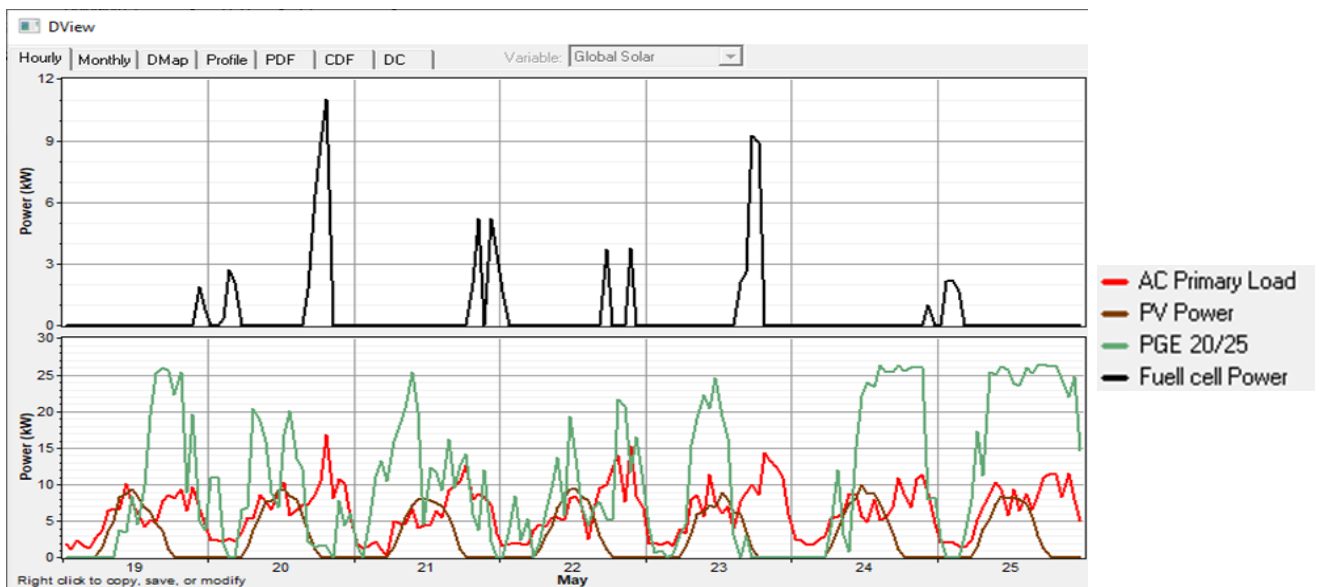


Figure III. 20: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Mai

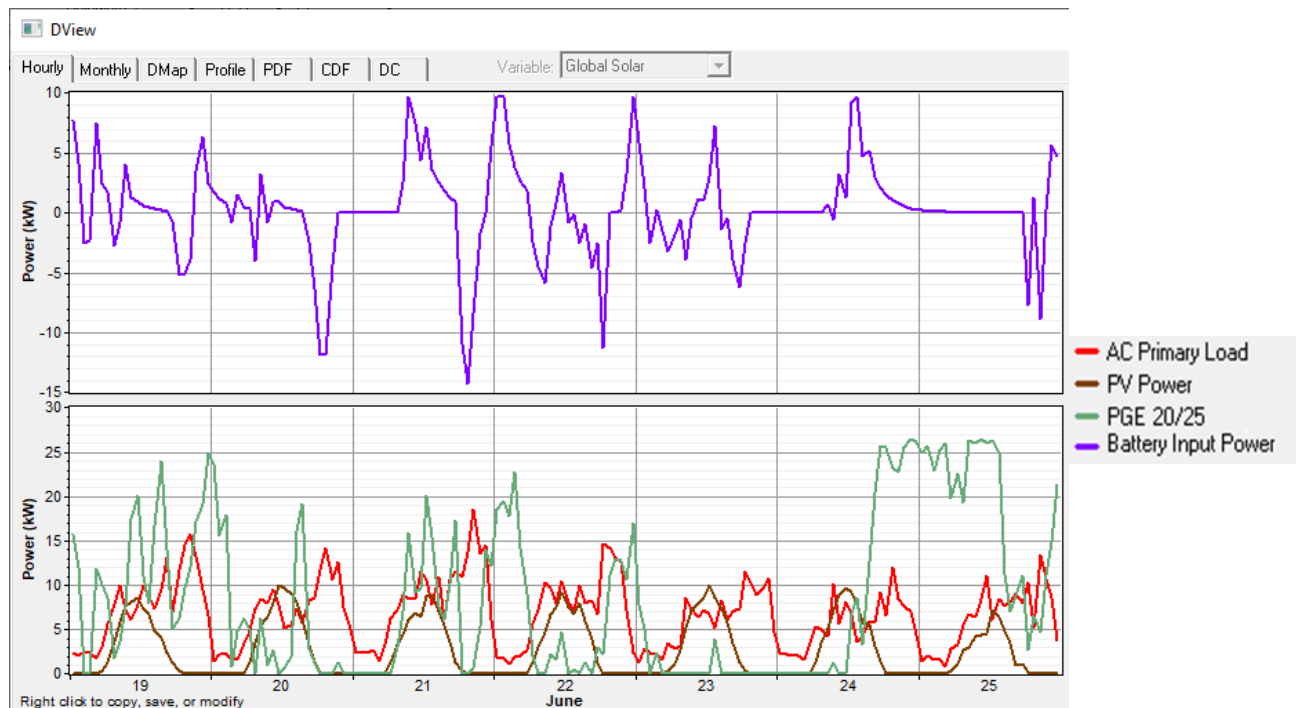


Figure III. 21: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande de d'électricité pour le mois de Juin

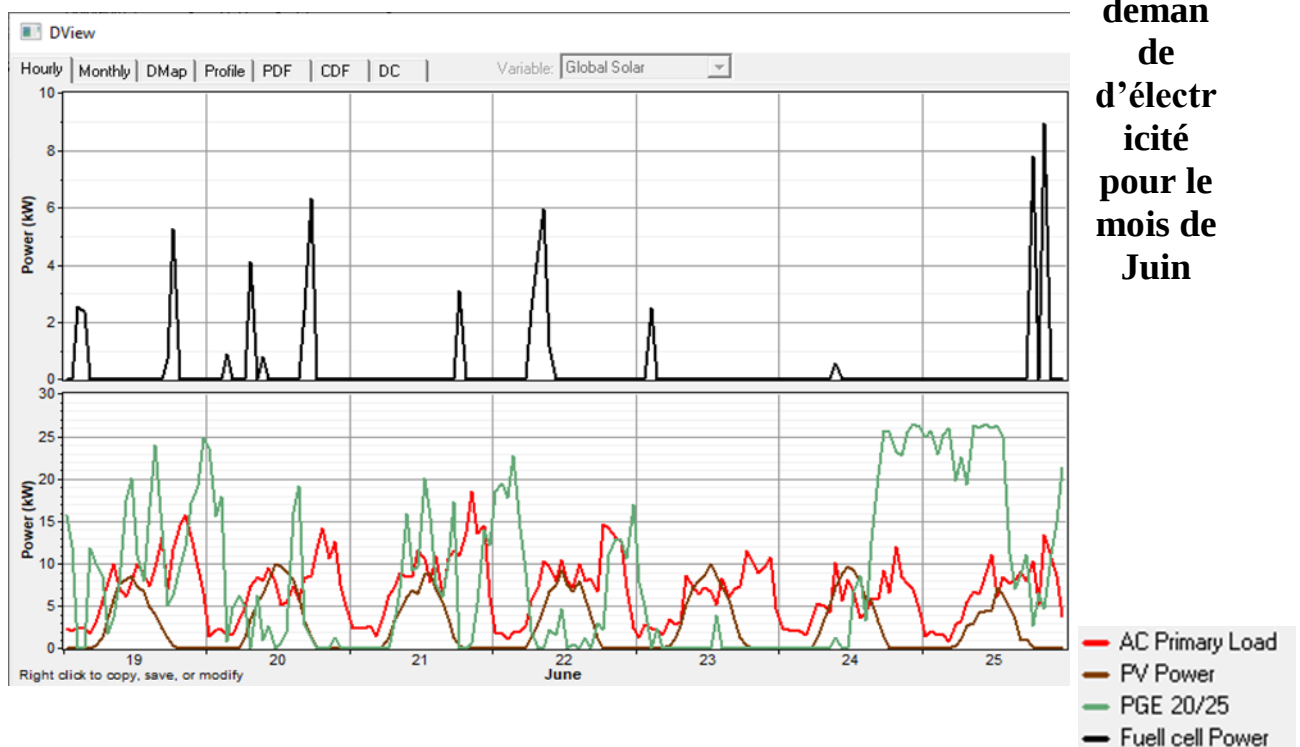


Figure III. 22: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de juin

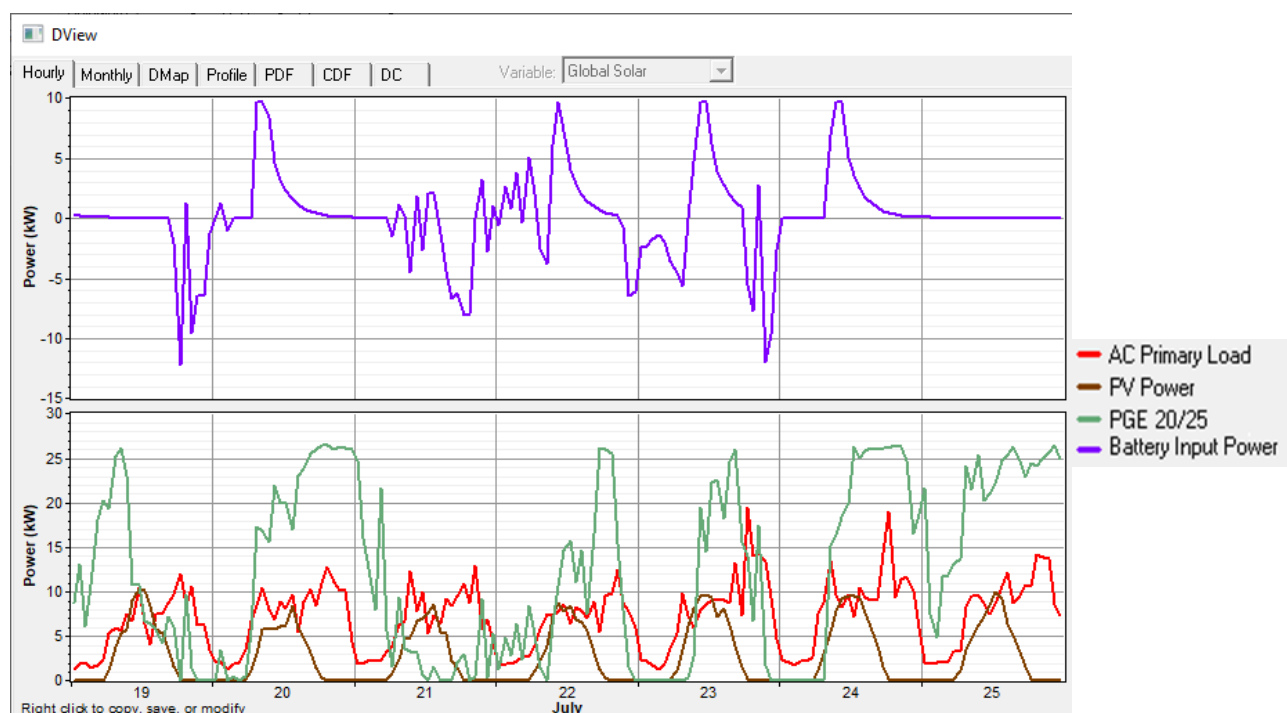


Figure III. 23: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Juillet

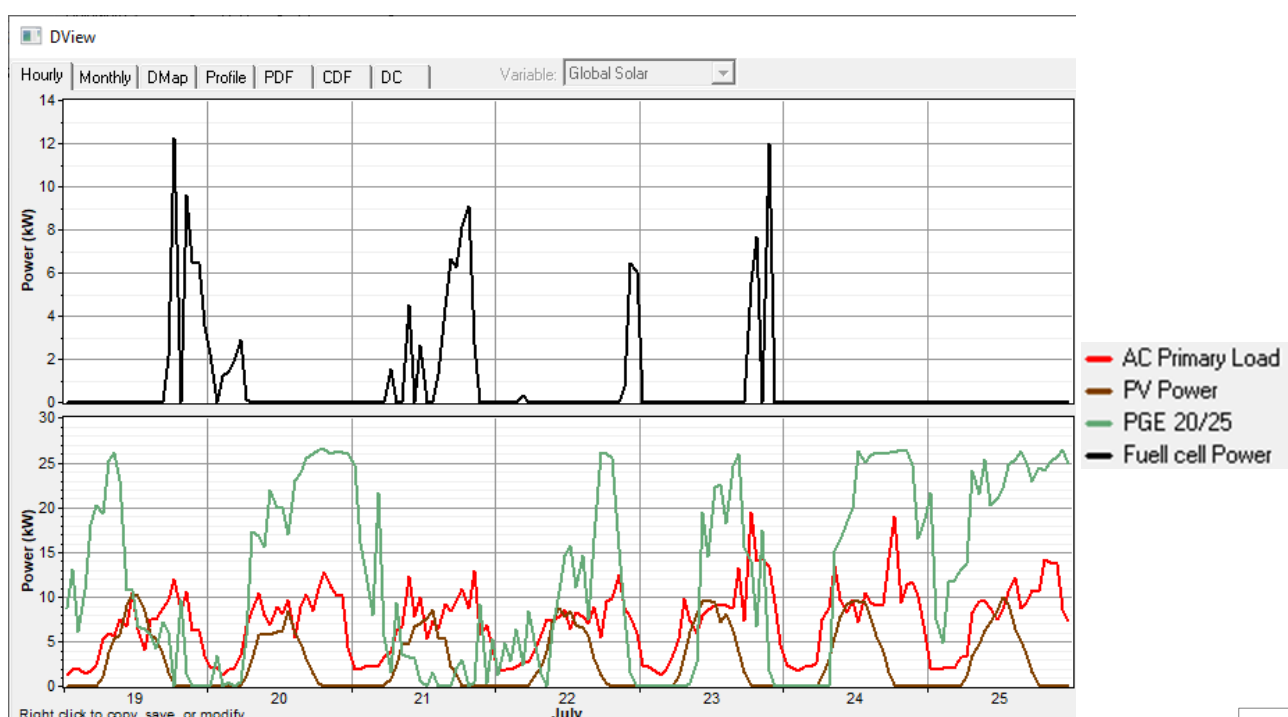


Figure III. 24: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Juillet

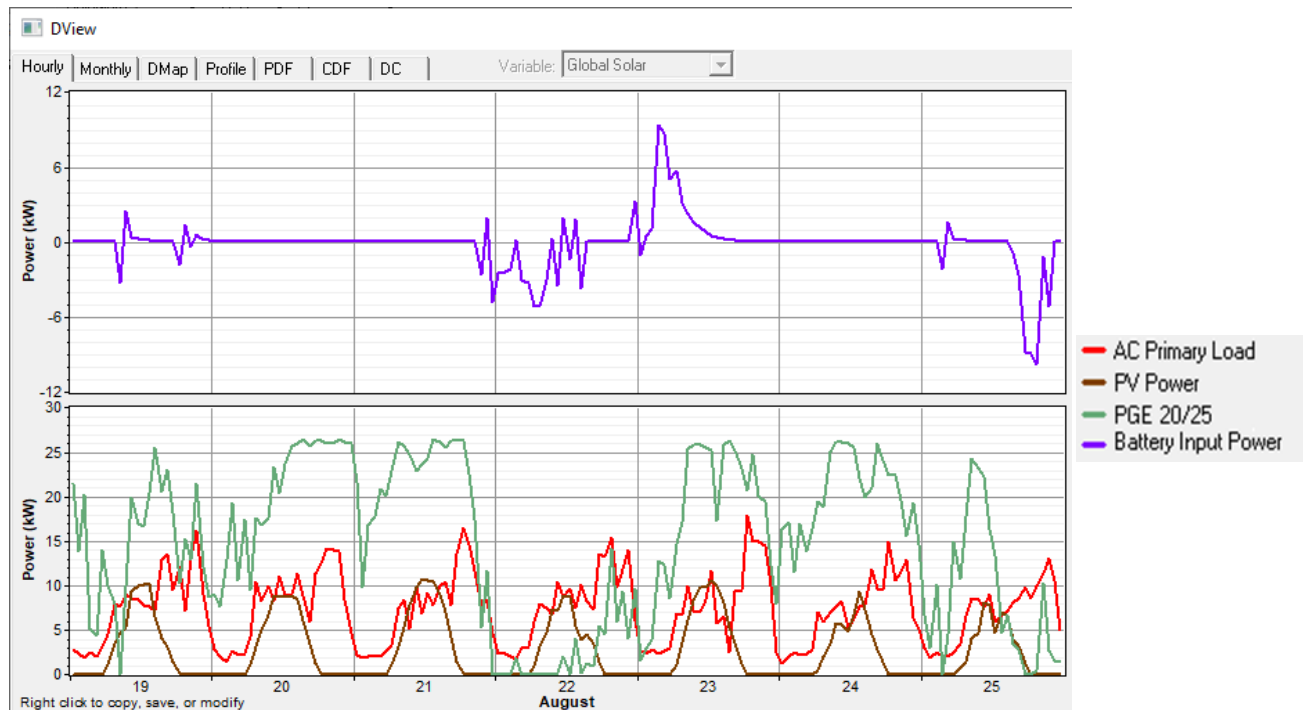


Figure III. 25: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'aout

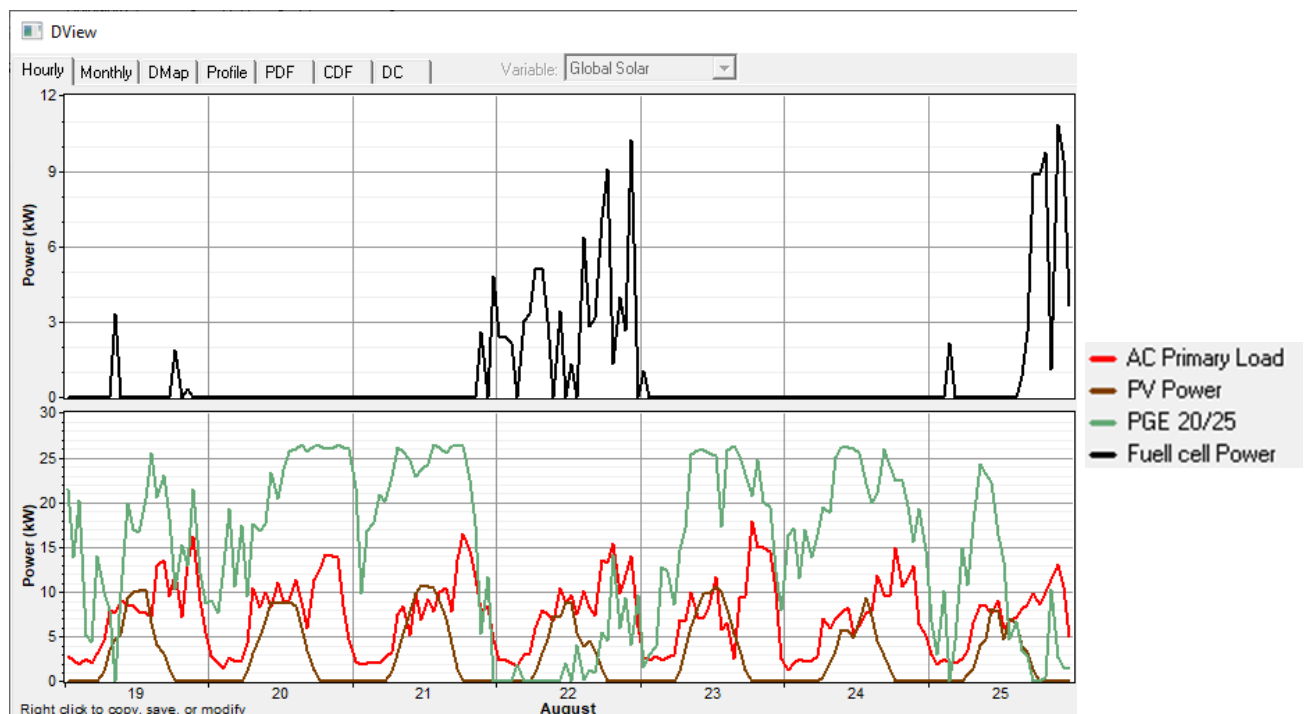


Figure III. 26: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'août

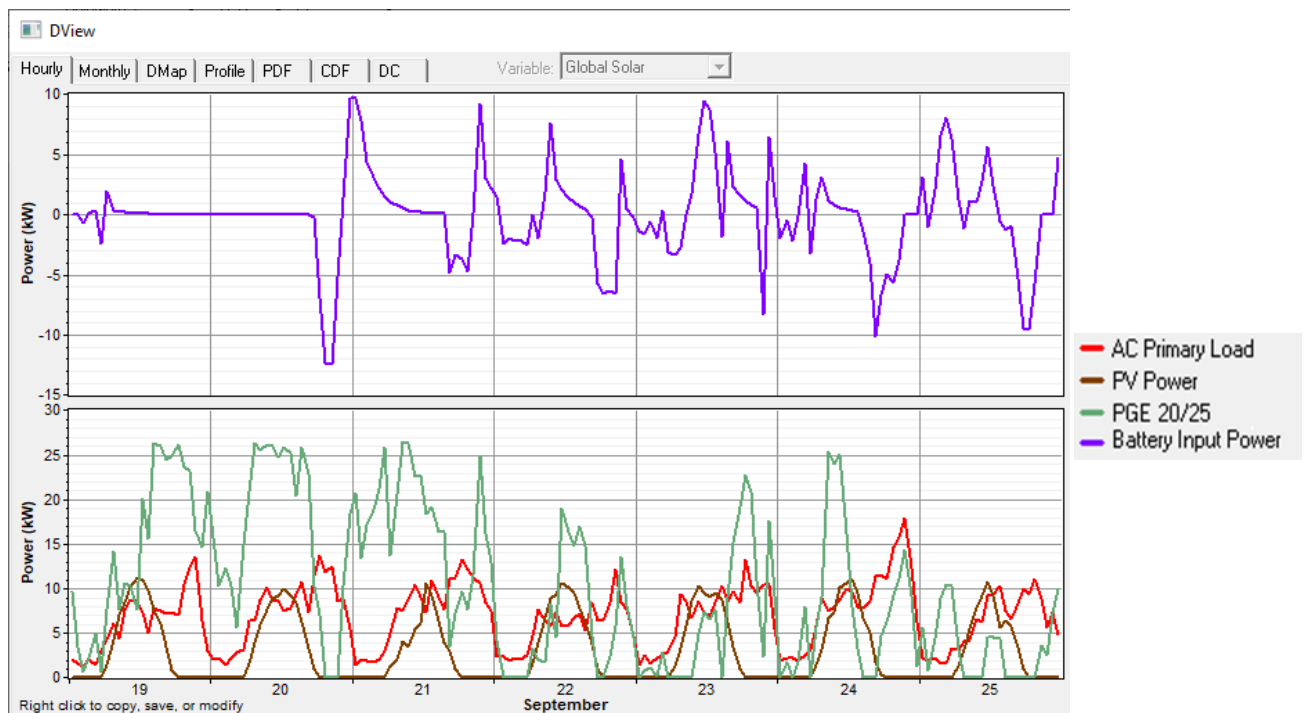


Figure III. 27: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de septembre

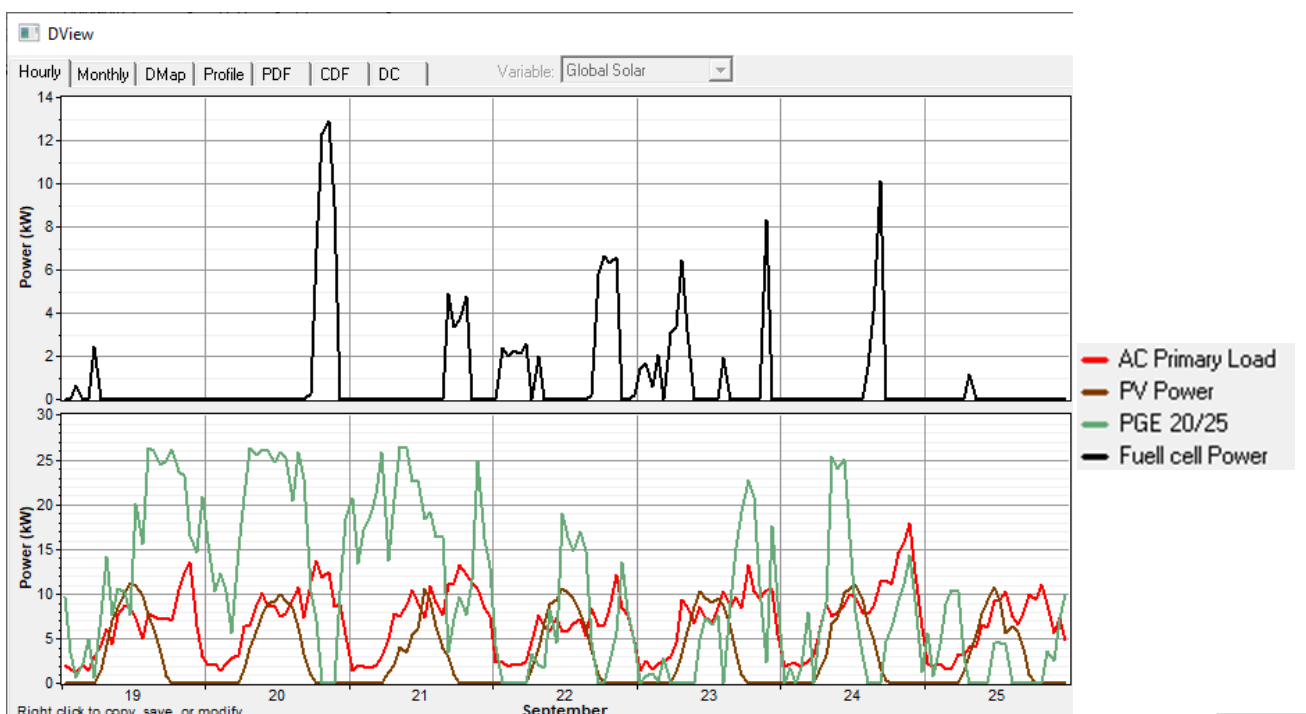


Figure III. 28: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois septembre

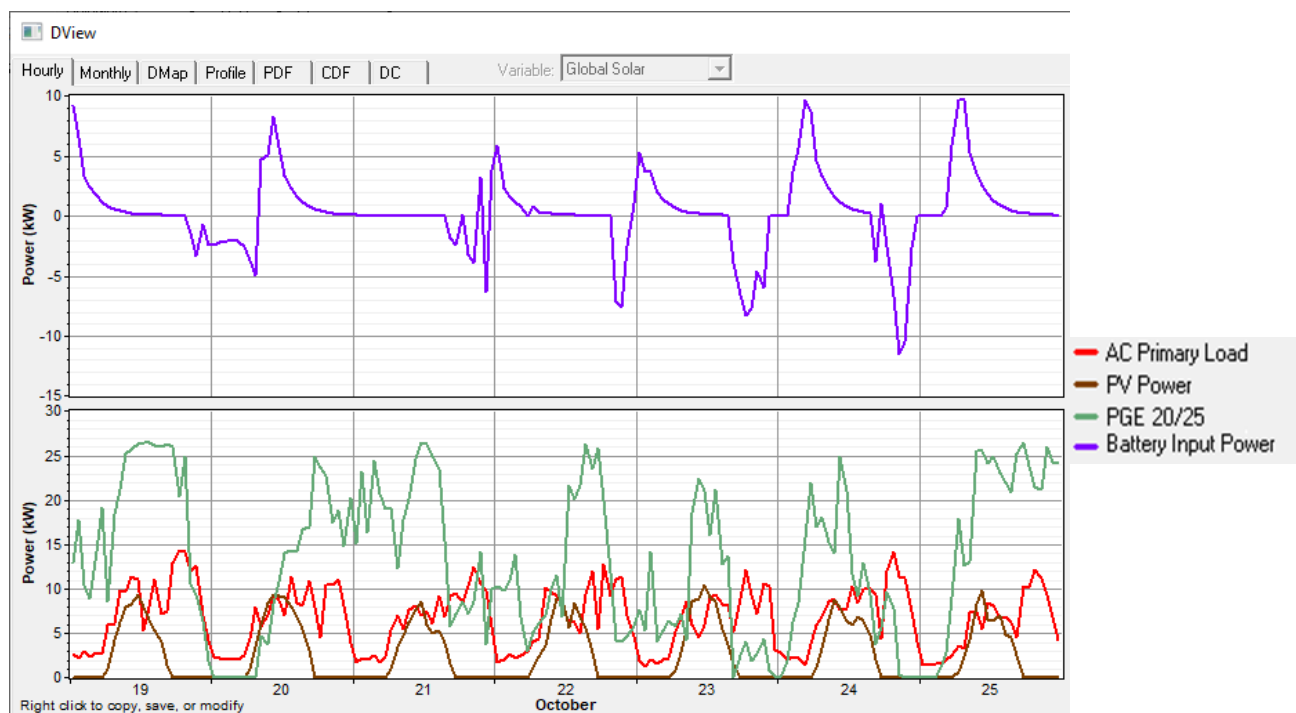


Figure III. 29: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'Octobre

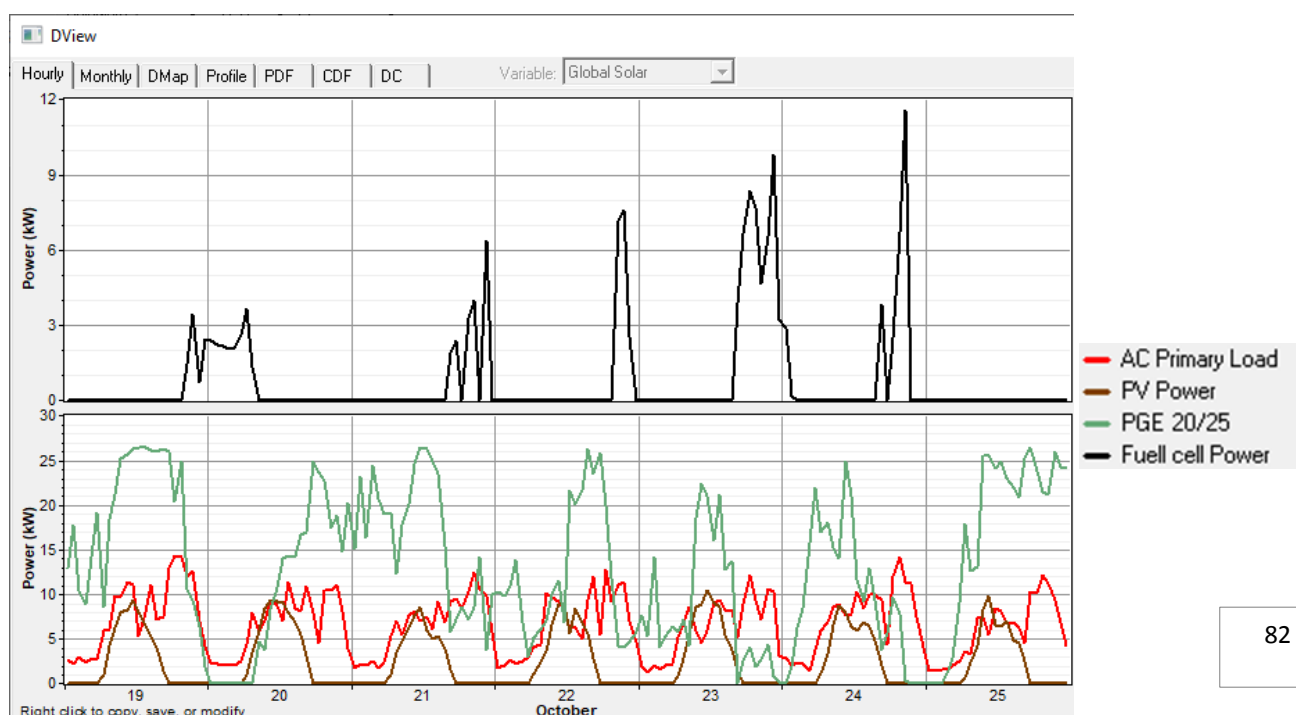


Figure III. 30: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois d'octobre

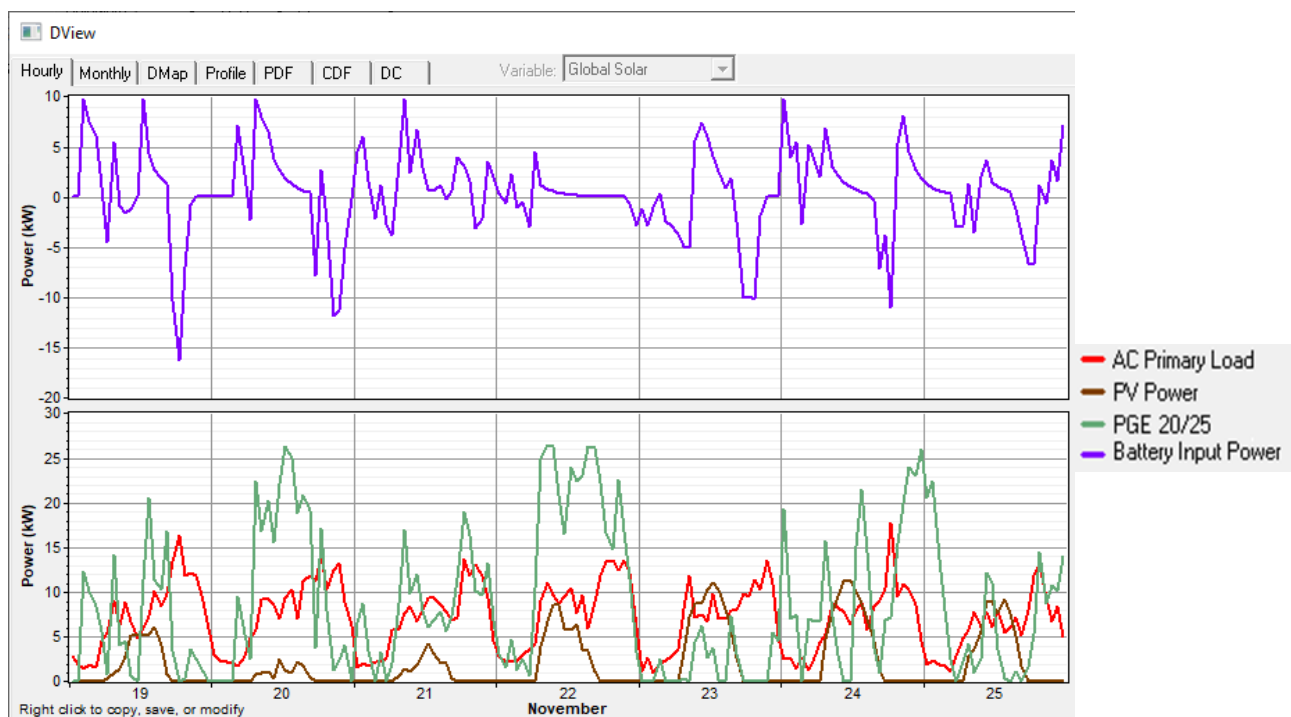


Figure III. 31: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de Novembre

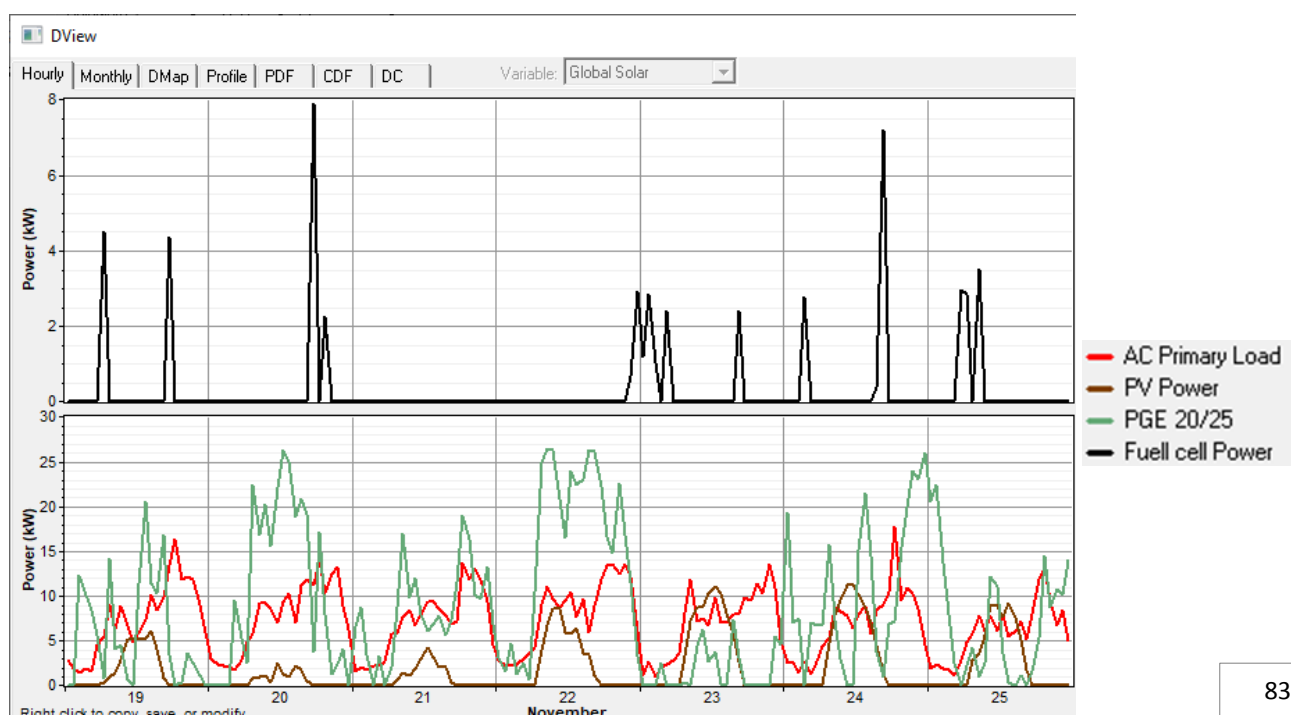


Figure III. 32: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de novembre

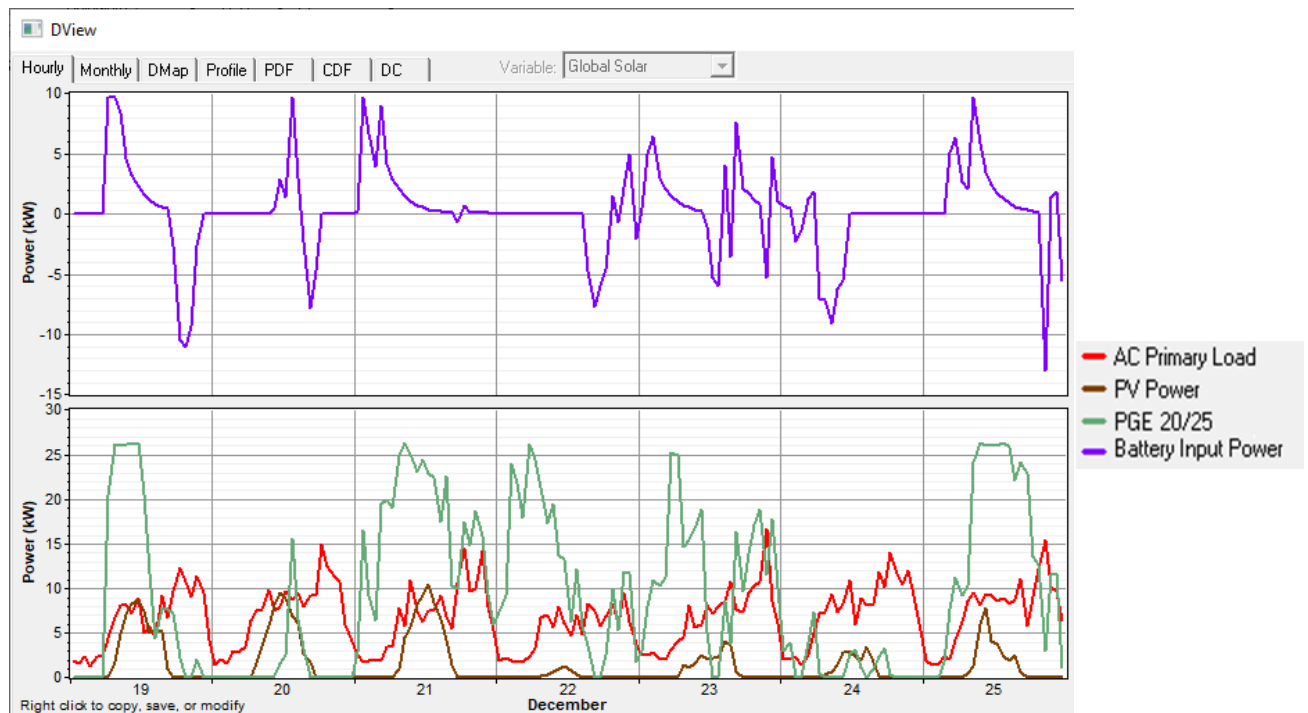


Figure III. 33: La production électrique du système PV, éolien batterie ainsi que la demande d'électricité pour le mois de décembre

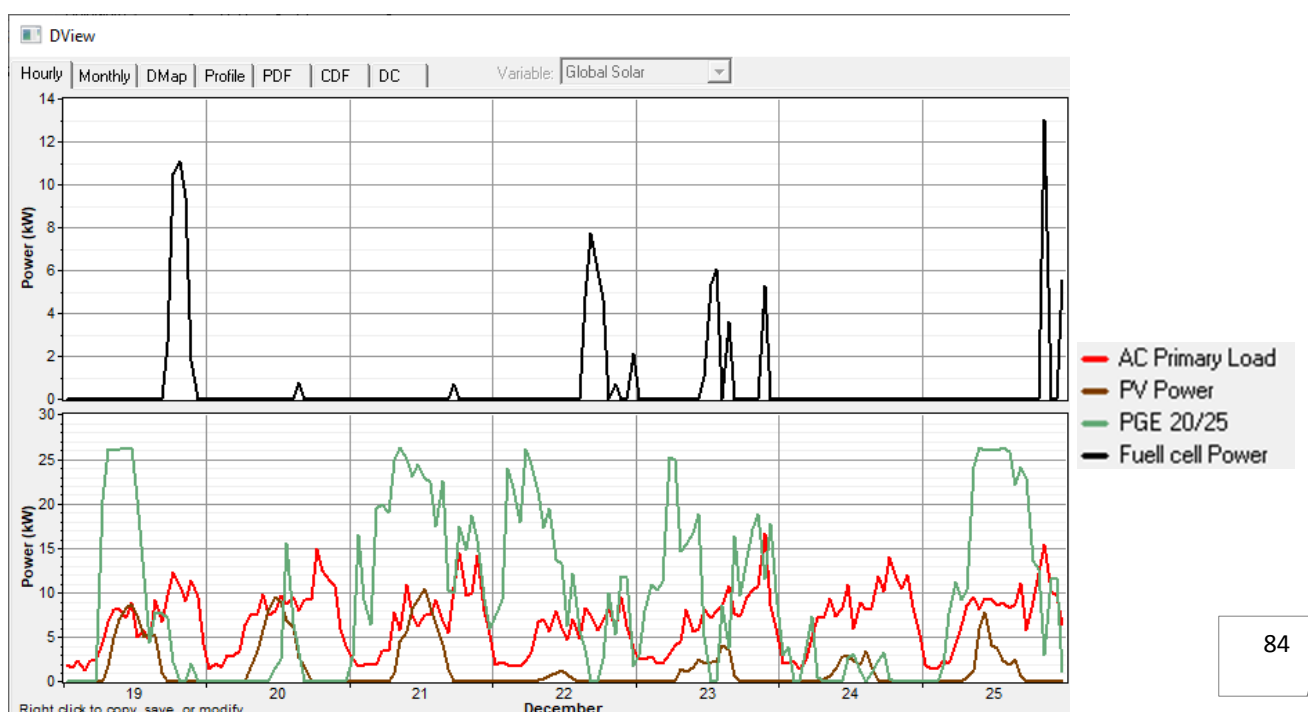


Figure III. 34: La production électrique du système PV, éolien PAC ainsi que la demande d'électricité pour le mois de décembre

D'après les figures

D'après la figures III .11 jusqu'à la figure III .34 nous avons vu la production d'électricité du système (éolien-PV) avec les 2 moyen de stockage (batterie et pile à combustion) tout au long de l'année. On voit que les batteries parviennent à combler les insuffisances de production d'électricité parfaitement alors que la pile à combustion produit une électricité insuffisante pour combler les lacunes du système hybride.

III.5.1.1. Production énergétique annuelle pour le système avec stockage par batterie :

Les tableaux III.8 et III.9 représentent la production d'énergie par les systèmes pv et éolien et la consommation d'énergie sur une année.

Tableau III 8: Production du SEH électrique

Production	kWh/yr	%
PV array	21,657	20
Wind turbine	89,166	80
Total	110,824	100

Tableau III 9: Consommation

Consumption	kWh/yr	%
AC primary load	53,721	100
Total	53,721	100

D'après le tableau III 8 on voit que l'énergie éolienne produit 80% de l'énergie annuelle et l'énergie photovoltaïque produit 20%

III.5.1.2. Production et consommation annuelle pour le système avec stockage par hydrogène :

Les tableaux III.10 et III.11 représentent la production et la consommation d'énergie sur une année.

Tableau III 10: Production du SEH électrique

Tableau III 11: Consommation

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%
PV array	21,657	18	AC primary load	52,211	47
Wind turbine	89,166	76	Electrolyzer load	59,971	53
Fuell cell	7,194	6	Total	112,182	100
Total	118,018	100			

D'après le tableau III 10 on voit que l'énergie éolienne produit 76% de l'énergie annuelle et l'énergie photovoltaïque produit 18% et la pile à combustible produit seulement 6% d'énergie électrique.

D'après le tableau III.11 l'électrolyseur consomme 53% de l'énergie électrique produite, afin de produire et stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène.

III.6. Comparaison entre les deux configurations étudiées:

Une étude paramétrique a été simulée pour le site d'Adrar à l'aide du logiciel HOMER, et les résultats sont présentés dans le tableau III 12 :

Tableau III 12: Comparaison de la production mensuelle moyenne entre les deux configurations

Mois				Configuration 1		Configuration 2	
	Wind (kW)	PV (kW)	demande l'électricité (kW)	Excès l'électricité (kW)	batterie (kW)	Excès l'électricité (kW)	Fuel cell (kW)
janvier	22	7.8	13.85	18.1	7.2	6	6.1
février	22.2	9.1	13.6	18.5	7	0	5.8
mars	23.7	9.8	14.1	20	8	0	7.8
avril	23.9	9.7	14.3	21.5	9.1	0	7.8
mai	22.7	9.05	14	20.2	6.8	0	6.1
juin	22.3	9	13.8	18.2	8.1	0	6.2
juillet	24.2	9.1	14.4	20.8	6.2	0	5.5
août	22.2	9.2	14.35	19.6	7.1	0	6.1
septembre	22.3	9.3	14	18.2	7.2	0	5.9
octobre	19.8	8.2	13.3	15.8	6.8	0	5.3
novembre	21.1	8	14.2	15.9	8.1	0	4.8
décembre	23.5	7.2	13.7	18	8.6	0.05	6.8

- D'après le tableau III 12 On note que la production de l'aérogénérateur est photovoltaïque est la même pour les deux configurations
- On voit que la production d'électricité des batteries est plus élevée que la pile à combustion même si il y a plus d'excès d'électricité.

III.7. Conclusion :

Le but de ce chapitre est d'étudier un système hybride éolien–photovoltaïque et faire une comparaison entre deux systèmes de stockage. (Des batteries) pour la 1^{er} configuration et (la pile à hydrogène) pour la 2^{em} configuration, pour trouver quelle est la meilleure solution pour alimenter des habitations en électricité.

Ce que nous avons vu dans les figures précédentes dans des différentes périodes de l'année, il y a une différence entre les deux configurations. Nous avons vu le fonctionnement des batteries et leur façons d'alimenter les maisons quand celle-ci ne sont pas alimentée par le système éolien-PV. Le résultat était très satisfaisant.

Pour la Deuxième configuration «la pile à hydrogène» on a vu que parfois l'énergie fournie s'avérait insuffisante pour alimenter les maisons en électricités.

En conclusion on peut dire que malgré la même configuration de production électrique et la même consommation électrique les batteries ont été plus efficaces que la pile à combustion tout au long de l'année.

Conclusion générale :

Pour assurer un fonctionnement continu à une installation durant toute l'année, on envisage l'utilisation d'un système d'énergie hybride avec un moyen de stockage, le travail de recherche présenté dans cette mémoire traite l'étude comparative d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) avec deux systèmes de stockage.

Le premier chapitre de ce travail porte sur un état de l'art sur le système hybride éolien-photovoltaïque. Nous avons introduit dans ce chapitre les composant d'un système hybride performant avec les différent moyen stockage possible.

Nous avons aussi présenté le logiciel de dimensionnement Homer qui nous a servie à faire notre étude comparative

Le deuxième chapitre traite l'étude du site choisie et c'est caractéristique climatique avec la présentation du logiciel Homer pro qui nous a servi à obtenir les caractéristique du site grâce à grand base de donné et ça maniabilité

Le troisième chapitre et La partie la plus important de notre travail, dans lequel nous avons fait une comparaison entre deux configurations hybrides avec des batteries comme moyen de stockage pour la première configuration et une pile à combustion d'hydrogène comme moyen de stockage pour la deuxième configuration on conservant les mêmes composant (éolien –PV) .

Nous avons constaté une production d'énergie électrique satisfaisante par les batteries malgré l'excès d'électricité reçue par le système. Et une production d'énergie électrique insuffisante par la pile à combustion d'hydrogène.

On peut dire que le système hybride avec stockage par batterie est bien meilleur et performant que le système de stockage avec la pile à combustion d'hydrogène.

Références bibliographiques :

- (1) = [www.urerms.cder.dz, consulté le 09/04/2017]
- (2) = [Rachid El Mokni,Néji AMAIMIA, 2011, Formation sur les systèmes photovoltaïque,].site
- (3) = [https://fr.scribd.com/, consulté le 11/04/2017].
- (4) = [www.connaissancedesenergies.org, consulté le 14/04/2017].
- (5) = [cours Mme HAMANE, 2016]
- (6) = [cours Mme HAMANE, 2016]
- (7) = [www.urerms.cder.dz, consulté le 09/04/2017]
- (8) = [www.energy.gov.dz, consulté le 11/04/2017]
- (9) = [www.energy.gov.dz].
- (10) = [www.cea.fr, consulté le 15/04/2017]
- (11) = [Energie solaire photovoltaïque.doc consulté le 16/04/2017].
- (12) = [Dr. BELAID LALOUNI Sofia, 2015, Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Université A.MIRA de BEJAIA, p 5].
- (13) = [https://fr-static.z-dn.net/files/d9e/1059a79cf5cb4e0ca98788107f427c43.pdf, consulté le 01/07/2019]
- (14) = (www.univ-orleans.fr/mapmo/membres/emilion/publ/OUALI.pdf ,consulté le 01/07/2019)
- (15) = (https://www.univ-usto.dz/laboratoires/laar/images/Doctorat/These_NAIM_Houcine_partie_3.pdf. consulte le 01/07/2019)
- (16) = (http://www.univ-bejaia.dz/dspace/bitstream/handle/123456789/8803/G%C3%A9stion%20d%27%C3%A9nergie%20d%27un%20syt%C3%A8me%20photovoltaïque%20avec%20batteries..pdf?sequence=1&isAllowed=y.consulte le 01/0/2019)
- (17) = (dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/12375/1/Ms.GM.Reteri%2BFentrouci.pdf.consulte le 01/07/2019)
- (18) = (abcsite.free.fr/appesa/panneaux_solaires.pdf.consulte le 01/07/2019)

(19) = (energie-developpement.blogspot.com/2012/01/production-solaire-photovoltaique.html.consulte le 01/07/2019)

(20) = (<https://www.memoireonline.com> › Sciences.consulte le 01 /07/2019)

(21) = (<https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/eolien/pompage/Manuel%20d-utilisation%20de%20la%20maquette%20Pompe%20a%20eau%20a%20energie%20eolienne.pdf>.consulte le 01/07/2019)

(22) = (<https://www.suisse-eole.ch/fr/energie-eolienne/technique/histoire/>.consulte le 01/07/2019)

(23) = (https://pmb.univ-saida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=588.consulte le 01/07/2019)

(24) = (<http://bu.univ-ouargla.dz>.consulte le 01/07/2019)

(25) = (AICHE Lilia HAMANE, 2015, Contribution à l'estimation du potentiel d'hydrogène produit par énergie éolienne, Université AboubakrBelkaïd Tlemcen ,p 114, 115, 116, 117, 136, 137)

(26) = (http://www.univ-bejaia.dz/dspace/bitstream/handle/123456789/8656/Etude%20d%E2%80%99un%20syst%C3%A8me%20hybride%20%28Eolien%20%E2%80%93Photovolta%C3%AFque%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR2sn31kiHNHb_klaAHkihTOn9kuwdcaksmiY5jdGwvsTZ2FCPfVdibTOSg.consulte le 01/07/2019)

(27) = (projet.eu.org/pedago/sin/TSTI2D/9-stockage_energie.pdf.consulte le 01/07/2019)

(28) = (<http://pile-combustible-hydrogene.e-monsite.com/pages/l-histoire-de-la-pile-a-combustible-hydrogene.html>.consulte le 01/07/2019)

(29) = (<https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/tout-niveau/tableau-periodique/eau-glace-vapeur.html>. consulte le 01/07/2019)

(30) = (L. Aiche-Hamane, 2015, « contribution à l'estimation du potentiel d'hydrogène produit par l'énergie éolienne »,Thèse de doctorat, Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, p 49, 50,53,56-60, 114-117, 135-137.

-L.Aiche- Hamane, M.Belhamel, B.Benyoucef, M.Hamane, décembre, 2010, “Study of hydrogen production from wind power in Algeria”,18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010 Parallel Sessions Book 3: Hydrogen Production Technologies – Part 2, p17-21, Detlef Stolten, Thomas Grube (Ed), Forschungszentrum Jülich GmbH

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

(31) = (https://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/BOUNACEUR_AMIN.pdf?idmemoire=2583 .
consulte le 01/07/2019)

(32) = (<http://www.systemoffgrid.com/index.php?P=95&Titre=systemes-hybrides>.consulte le
01/07/2019)

(33) = (<http://www.systemoffgrid.com/index.php?P=95&Titre=systemes-hybrides>.consulte le
01/07/2019)

(34) = (<https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/BOR6726.pdf>.consulte le 01/07/2019)

(35) = (http://www.ecreee.org/sites/default/files/event-att/homergettingstartedguide_french_homer_mode_demploi.pdf.consulte le 01/07/2019)

(36) =
(M.Belhamel,S.Moussa,A.Kaabeche,2002,«Production d'Electricité au Moyend'unSystèmeHyb
rideEolien-Photovoltaïque-Diesel», Centre deDéveloppementdesEnergiesRenouvelables, p
49.)

Résumé

L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. L'Algérie a fourni un grand effort pour l'électrification rurale et saharienne. En effet, le taux d'électrification national pour l'année 2001 est de 96%. Malgré le taux élevé, il existe toujours des foyers épars qui leurs électrifications par l'extension du réseau conventionnel est très coûteuse.

Le système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome est la solution idéale pour ce genre de problème.

Nous présentons dans ce papier, une étude comparative entre deux systèmes de stockage (batterie et pile à combustion) avec le logiciel de dimensionnement Homer.

Les résultats obtenus montrent que le système hybride éolien - photovoltaïque avec stockage par batteries est le plus performant.

Mots clés : Système hybride (éolien- photovoltaïque) - batterie –pile à combustion

ABSTRACT

The exploitation of renewable resources has been a great rise in industrialized countries and even in some underdeveloped countries. Algeria is in a great effort to provide rural electrification and Saharan Africa. Indeed, the national electrification rate for the year 2001 is 96%. Despite the high rate, there are still scattered to their homes electrification through the extension of the conventional network is very expensive.

The hybrid power generation (wind - PV) is completely autonomous solution for this problem.

In this paper, we present a comparative study between two storage systems (battery and fuel cell) with Homer sizing software.

The results obtained show that the hybrid wind - photovoltaic system with battery storage is the most efficient.

Keywords: Hybrid system (wind-PV) - battery – fuel cell

ملخص

إن استغلال الموارد المتجددة يزدهر في البلدان الصناعية وحتى في بعض البلدان المتخلفة ، تبذل الجزائر مجهودًا كبيرًا لتزويد الريف والصحراء بالكهربة. ، النسبة الوطنية لسنة 2001 هي 96 ٪. وبالرغم من هذه النسبة المرتفعة ، لا تزال هناك المنازل المتناثرة التي تكون كهربتها بتمديد الشبكة مكلفة جدًا.

يعد نظام توليد الكهرباء الهجين المستقل تمامًا (ريحي- كهر وشمسي) هو الحل الأمثل لهذا النوع من المشاكل.

في هذه الورقة، نقدم دراسة مقارنة بين نظامي تخزين (البطارية وخلية الاحتراق) مع برنامج التحجيم HOMER

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن نظام الهجين (ريحي- كهروشمسي) مع تخزين البطارية هو الأكثر كفاءة.

المصطلحات: النظام الهجين (ريحي- كهر شمسي)- البطارية- خلية الاحتراق