

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة

Université SAAD DAHLEB Blida



Faculté de technologie

Département de Mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en :

Optimisation des systèmes énergétiques

Thème

Etude d'un système hybride « éolien–photovoltaïque–pile à combustible »

Proposé et encadré par :

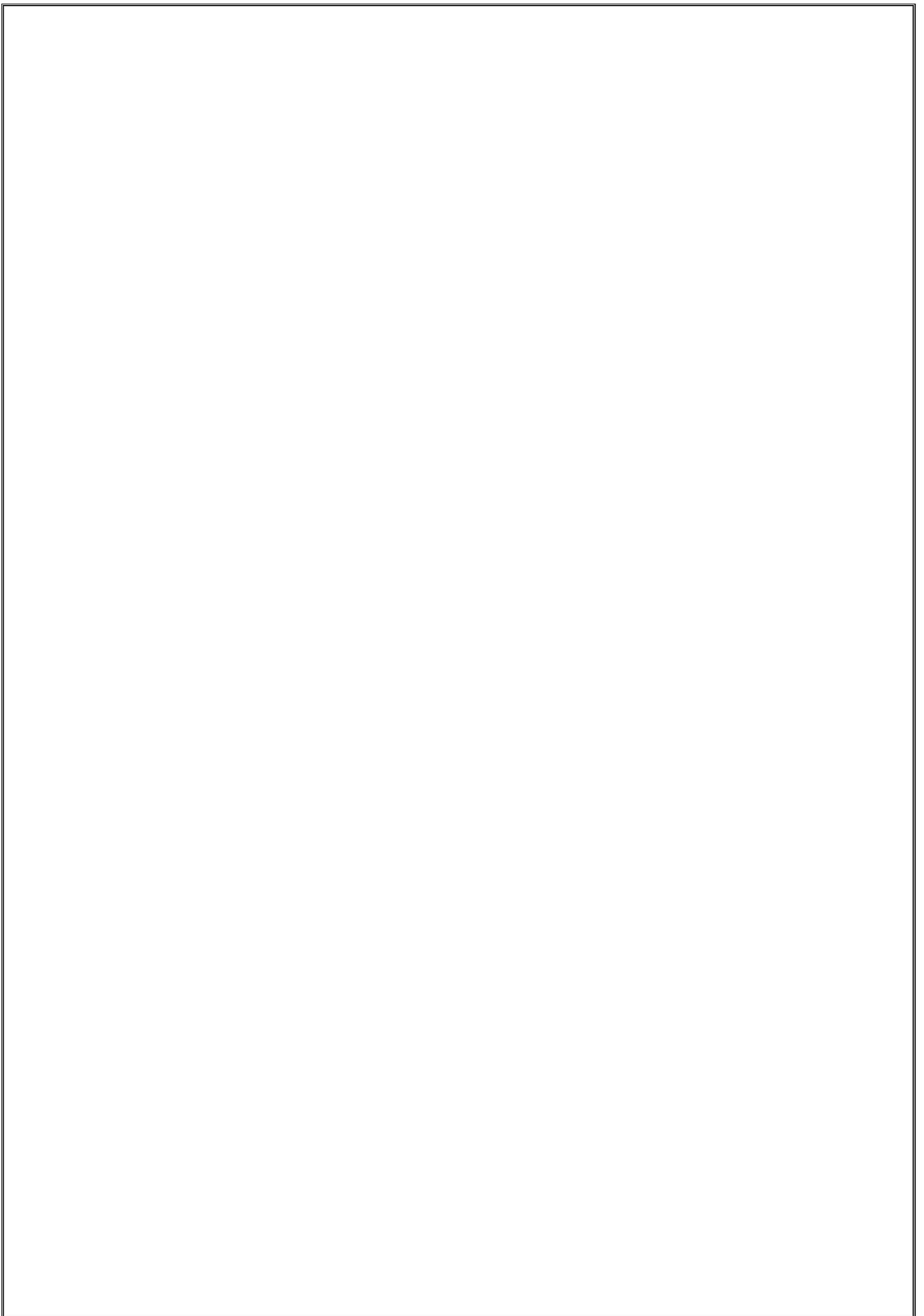
Mme HAMANE AICHE L

Soutenu par :

BENKHEROUF Yasmina

MOUFFOK Imane

2016/2017



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

L'objectif de ce travail est d'effectuer une étude d'un système hybride EnR/H₂ afin d'alimenter une charge de 200 kWh/j. Les systèmes hybrides EnR/H₂ sont une solution innovante au problème du stockage des énergies renouvelables. Ces systèmes comprennent une ou plusieurs sources renouvelables d'énergie, un électrolyseur pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène lorsque la source renouvelable fournit un excédent d'énergie, à l'inverse, lorsque la demande excède la capacité de la source renouvelable, une pile à combustible consomme les gaz afin de fournir le complément d'énergie nécessaire. Les données du rayonnement solaire et la vitesse du vent de la région d'Adrar sont utilisées pour la simulation. Les configurations : Eolien- PAC et Eolien-PV-PAC sont simulées et optimisées à l'aide du logiciel HOMER, et les résultats ont montrées que la deuxième configuration est la mieux adaptée pour la région d'Adrar en termes de production.

Mots clés :

Système Photovoltaïque, Système éolien, PAC, Système hybride Photovoltaïque-éolien-PAC, Dimensionnement.

ABSTRACT

The objective of this work is to carry out a study of an RE/H₂ hybrid system in order to supply a load of 200 kWh/d. RE /H₂ hybrid systems are an innovative solution to the problem of storage of renewable energies. These systems include: one or several renewable sources of energy, an electrolyser to produce hydrogen and oxygen when the renewable source provides excess energy. conversely, A fuel cell consumes the gases in order to provide the additional energy required. The solar radiation data and the wind speed of the Adrar region are used for the simulation. The configurations: Wind-FC and Wind-PV-FC are simulated and optimized using the HOMER software. And the results showed that the second configuration is best suited for the Adrar region in terms of production.

Key words

Photovoltaic system, Wind power system, Fuel Cell (FC), Photovoltaic-wind-FC hybrid system, Dimensioning.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة لنظام هجين طاقات متجددة /هيدروجين لتغذية الحمولة من 200 كيلوواط ساعي/يوم. الأنظمة الهجينة طاقات متجددة /هيدروجين تعتبر حل مبتكر لمشكلة تخزين الطاقة المتجددة. حيث تشمل هذا الانظمة واحد أو عدة مصادر من الطاقة المتجددة، فهي نظام كهربائي لتوليد الهيدروجين والأكسجين عندما يوفر فائض في مصدر الطاقة المتجددة. على العكس من ذلك، عندما يتجاوز الطلب على قدرة المصدر، خلية وقود تستهلك الغاز من أجل توفير الطاقة الإضافية اللازمة. تستخدم بيانات الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح في منطقة أدرار في عملية المحاكاة. المكونات : نظام طاقة الرياح - خلايا الوقود و نظام الألواح الشمسية- خلايا الوقود - نظام طاقة الرياح أجريت محاكاة وتحسين وتطوير الانظمة باستخدام برنامج HOMER وأظهرت النتائج أن التكوين الثاني هو الانسب لمنطقة أدرار من حيث الإنتاج.

الكلمات المفتاحية :

نظام الألواح الشمسية- ، نظام طاقة الرياح، خلايا الوقود، النظام الهجين الألواح الشمسية-نظام طاقة الرياح، التحجيم

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Etat de l'art des systèmes hybrides énergies renouvelables	
1.1.Introduction :.....	3
1.2.L'origine de la notion du système:.....	3
1.3.Définition de système hybride	3
1.4. Les avantages des systèmes hybrides	3
1.5. Présentation du système hybride :.....	4
1.5.1. Principaux Composants des systèmes hybrides :	4
1.5.1.1. Générateurs photovoltaïques :.....	4
1.5.1.2. Aérogénérateur :.....	4
1.5.1.3. Piles à combustibles :.....	4
1.5.1.4. Systèmes de stockage :.....	5
1.5.1.5. Convertisseurs :.....	5
1.5.1.6. Charges :	5
1.6. Classification :.....	6
1.6.1. Le régime du fonctionnement :.....	6
1.6.2. La structure du système hybride :.....	6
1.7. Etudes des systèmes hybrides :	7
1.7.1. Critères d'optimisation du système hybride :	7
1.7.2. Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides :	8
1.8. Etat de l'art des systèmes hybrides Energies renouvelables hydrogène :	8
1.9. Contribution.....	16
Chapitre II: Généralités sur les technologies de l'hydrogène	
2.1. Introduction :	17
2.2. Intérêt de l'hydrogène :	17

2.3. Historique	17
2.4. Propriétés de l'hydrogène :	18
2.5. Production de l'hydrogène :	19
2.5.1. Energies fossiles :	19
2.5.2. Décomposition de l'eau :	19
2.5.3. Energies renouvelables :	20
2.5.3.1. Electrolyseur alcalin :	20
2.5.3.2. Electrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM) :	20
2.5.3.3. Electrolyseurs de la vapeur d'eau à haute température (EHT) :	20
2.6. Stockage et transport de l'hydrogène	21
2.6.1. Le stockage de l'hydrogène :	21
2.6.1.1. Stockage gazeux :	21
2.6.1.2. Stockage liquide (cryogénique) :	22
2.6.1.3. Stockage moléculaire :	22
2.6.2. Le transport de l'hydrogène :	22
2.7. Applications de l'hydrogène	23
2.7.1. L'industrie chimique et pétrochimique :	23
2.7.2. Hydrogène comme vecteur énergétique :	23
2.7.2.1. Application stationnaire :	24
2.7.2.2. Application mobile :	24
2.8. Conclusion :	28

Chapitre III: Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne

3.1. Introduction :	29
3.2. Généralités sur l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque :	29
3.2.1. Le gisement solaire :	29
3.2.1.1. Les composantes solaires:	30

3.2.1.2. Les angles :	31
3.2.2. Système de conversion de l'énergie solaire :	33
3.2.2.1. Historique du photovoltaïque:	34
3.2.2.2. Les composants d'un système solaire photovoltaïque :	35
3.2.2.3. Différents types des cellules photovoltaïques :	36
3.2.2.4. Caractéristiques des panneaux photovoltaïques :	37
3.2.2.5. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque:	37
3.2.2.6. Principe de fonctionnement du système photovoltaïque :	38
3.2.2.7. Estimation de la production d'énergie d'un système photovoltaïque:	38
3.3. Généralités sur l'énergie éolienne et les systèmes de conversion :	41
3.3.1. Le gisement éolien :	41
3.3.2. Système de conversion de l'énergie éolienne :	42
3.3.2.1. Historique des éoliennes:	43
3.3.2.2. Les différents types d'éoliennes :	43
3.3.2.3. Principe de fonctionnement du système éolien :	45
3.3.2.4. Estimation de la production d'énergie d'un système éolien:	47
3.4. Conclusion :	49

Chapitre IV: Dimensionnement et simulation du système hybride

4.1. Introduction :	50
4.2. Description du logiciel HOMER:	50
4.3. Présentation du système hybride :	51
4.4. Données d'entrées :	52
4.4.1. Les données du vent :	52
4.4.2. Les données solaires :	53
4.4.3. La charge électrique :	54
4.4.4. L'aérogénérateur :	55
4.4.5. Le générateur photovoltaïque :	56

4.4.6. L'électrolyseur :.....	56
4.4.7. La pile à combustible :.....	56
4.4.8. Le convertisseur :.....	57
4.4.9. Le réservoir d'hydrogène :	57
4.5. Dimensionnement :	58
4.6. Simulation des systèmes considérés:.....	60
4.6.1. Simulation du système éolien-pile à combustible :	60
4.6.1.1. Production énergétique du SEH :.....	60
4.6.1.2. Comparaison entre la production électrique et la consommation de l'électrolyseur:	67
4.6.2. Simulation du système éolien-photovoltaïque-pile à combustible :.....	69
4.6.2.1. Production énergétique du SEH :.....	69
4.6.2.2. Comparaison entre la production des différentes sources et celle consommé par l'électrolyseur :	76
4.7. Comparaison entre les deux configurations étudiées:.....	77
4.8. Conclusion :.....	79
Conclusion Générale.....	80
Références Bibliographiques.....	81

Liste des Figures :

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes hybrides énergie renouvelable

Figure 1.1: Classification des systèmes hybrides.....	7
Figure 1.2 : Classification des études.....	8
Figure 1.3: diagramme du système de stockage d'énergie installé.....	9
Figure 1.4: Diagramme du système hybride éolien photovoltaïque.....	10
Figure 1.5: Système de production de l'hydrogène à partir de l'énergie éolienne.....	11
Figure 1.6: schéma complet du système hybride	11
Figure 1.7: Schéma complet du système hybride Pv-petites éolienne	13
Figure 1.8: Système de conversion éolienne hydrogène	14
Figure 1.9: Élément du système éolien électrolyseur.....	14

Chapitre II : Généralités sur les technologies de l'hydrogène

Figure 2.1: Principe de fonctionnement d'une cellule d'une PAC H ₂ /O ₂ en milieu acide	25
Figure 2.2: Schéma des différents types de PAC.....	25

Chapitre III : Généralités sur l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne

Figure 3.1: Les composantes du rayonnement solaire	30
Figure 3. 2: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale et normal au mois de juillet. 33	
Figure 3. 3: La filière de l'énergie solaire	33
Figure 3.4: cartes saisonnières de la vitesse moyenne à 50 m du sol.....	42
Figure 3.5: Configuration a axe horizontale.....	44
Figure 3.6: Éolienne de type Savonius.....	45
Figure 3.7: Éolienne de type Darrieus.....	45
Figure 3.8: Conversion de l'énergie cinétique du vent	45
Figure 3.9: Principaux composants de l'éolienne moderne	46
Figure 3.10: Coefficient de puissance de Cp en fonction de la vitesse spécifique λ pour différents types d'éoliennes	49

Chapitre IV : Dimensionnement et simulation du système hybride

Figure 4.1: Bibliothèque HOMER	51
Figure 4.2: Architecture des configurations 1 et 2 respectivement.....	52
Figure 4.3: Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d'Adrar à 10m du sol	52
Figure 4.4: Variation de la fréquence des vitesses du vent mesurées pour la région d'Adrar	53
Figure 4.5: Rayonnement horizontal global et indice de clarté.....	53
Figure 4.6: Simulation de la charge à alimenter.....	54
Figure 4.7: Charge électrique moyenne horaire	54
Figure 4.8: Caractéristiques de l'aérogénérateur PGE 20/25	55

Figure 4.9: Courbe de puissance de l'aérogénérateur PGE 20 /25.....	55
Figure 4.10: tableau des configurations possibles.....	59
Figure 4.11: Dimensions choisis par HOMER pour la configuration 1 et 2 respectivement.....	60
Figure 4.12: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de janvier.....	60
Figure 4.13: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de février.....	61
Figure 4.14: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mars.....	61
Figure 4.15: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'avril.....	61
Figure 4.16: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mai.....	62
Figure 4.17: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de juin.....	62
Figure 4.18: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de juillet.....	62
Figure 4.19: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'aout.....	63
Figure 4.20: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de septembre.....	63
Figure 4.21: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'octobre.....	63
Figure 4.22: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de novembre.....	64
Figure 4.23: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de décembre.....	64
Figure 4.24: Production horaire de l'aérogénérateur et de la PAC.....	65
Figure 4.25: Production électrique moyenne mensuelle.....	66
Figure 4.26: Evolution du stockage de l'hydrogène en fonction de la production de l'aérogénérateur.....	66
Figure 4.27: Comparaison entre le stockage d'hydrogène et la production de l'éolienne pour le mois de février.....	67
Figure 4.28: Comparaison entre le stockage d'hydrogène et la production de l'éolienne pour le mois de novembre.....	67
Figure 4.29: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de février.....	68
Figure 4.30: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de mai.....	68
Figure 4.31: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois d'aout.....	68
Figure 4.32: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de novembre.....	69

Figure 4.33: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de janvier	69
Figure 4.34: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de février.....	70
Figure 4.35: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mars	70
Figure 4.36: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'avril	70
Figure 4.37: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mai	71
Figure 4.38: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de juin	71
Figure 4.39: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de juillet.....	71
Figure 4.40: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'août.....	72
Figure 4.41: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de septembre.....	72
Figure 4.42 Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'octobre.....	72
Figure 4.43: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de novembre	73
Figure 4.44: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de décembre.....	73
Figure 4.45: Production horaire du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et de la PAC	74
Figure 4.46: Production électrique moyenne mensuelle	75
Figure 4.47: Evolution du stockage de l'hydrogène en fonction de la production du générateur photovoltaïque et l'aérogénérateur	75
Figure 4.48: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de février	76
Figure 4.49: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de mai.....	76
Figure 4.50: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois d'août	77
Figure 4.51: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de novembre	77
Figure4. 52: comparaison entre le cumul des deux configurations pour chaque mois de l'année.....	78

Liste des tableaux :

Chapitre II : Généralités sur les technologies de l'hydrogène

Tableau 2.1: Comparaison des différentes technologies d'électrolyse de l'eau21

Chapitre IV : Dimensionnement et simulation du système hybride

Tableau 4.1: Caractéristiques géographiques de la station de mesure d'Adrar52

Tableau 4.2: Données statistiques de la vitesse du vent.....53

Tableau 4.3: Propriétés du champ photovoltaïque56

Tableau 4.4: Propriétés de l'électrolyseur56

Tableau 4.5: Propriétés de la PAC57

Tableau 4.6: Caractéristiques des convertisseurs57

Tableau 4.7: Propriétés du réservoir d'hydrogène58

Tableau 4.8: Fiche de consommation des appareils électrique pour une seule maison.58

Tableau 4.9: Production du SEH.....65

Tableau 4.10: Consommation électrique.....65

Tableau 4.11: Production du SEH.....74

Tableau 4.12: Consommation électrique.....74

Tableau 4.13: Comparaison de la production mensuelle moyenne entre les deux configurations78

L'augmentation de la demande en énergie liée à la croissance démographique et à l'émergence de certaines économies en développement accroît davantage notre dépendance aux ressources fossiles dont les réserves sont limitées. L'utilisation massive de ces ressources émet de grandes quantités de CO₂, gaz considéré comme principal responsable du changement climatique. Satisfaire à cette demande sans dégrader notre environnement, tel est le défi à relever.

Les énergies renouvelables se présentent alors comme les ressources potentiellement capable d'offrir des énergies propres et d'assurer un développement durable. L'exploitation de ces ressources, en particulier de celle issue de l'astre solaire, et du vent afin d'assurer un approvisionnement durable en services énergétiques, s'est considérablement accrue durant ces dernières décennies.

La production électrique, à partir des sources renouvelables d'énergies, à l'avantage de ne pas émettre de GES. Cependant les énergies renouvelables présentent certaines limites. En effet, en plus de leurs caractères dilués et intermittents, il y a également un décalage entre l'offre et la demande d'énergie. Pour parer à cet inconvénient, ces sources doivent être couplées avec des systèmes de stockages. Un des moyens très prometteur, puisque non polluant, est l'hydrogène. On appelle généralement ce type de couplage : systèmes hybrides EnR/H₂.

La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les régions, isolées et éloignées des réseaux

L'objectif de notre travail est l'étude d'un système hybride EnR/H₂. Deux configurations ont été proposées pour l'électrification d'un ensemble d'habitat situé à Adrar. La première est constituée d'un aérogénérateur, et d'une PAC et la seconde configuration se constitue d'un aérogénérateur, d'une PAC, et d'un générateur photovoltaïque.

Pour atteindre cet objectif, nous avons divisé notre mémoire en quatre chapitres :

Le premier chapitre, présente l'état de l'art des systèmes hybrides EnR/H₂ ;

Le deuxième chapitre présente les divers aspects liés aux technologies de l'hydrogène à savoir, la production, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène afin de montrer que l'hydrogène représente le vecteur d'énergie d'avenir ;

Introduction Général

Le troisième chapitre présente et expose les deux sources d'énergies renouvelables, que sont l'énergie solaire et éolien, ainsi que le principe de fonctionnement des systèmes qui les entraînent ;

Le quatrième chapitre sera consacré au dimensionnement et la simulation de notre système hybride EnR/H₂, ces différentes simulations effectuées sous le logiciel HOMER pour évaluer les performances de l'installation choisie, dans des conditions de fonctionnement autonome.

1.1. Introduction :

Le terme « Système d'Energie 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 « propreté » et de durabilité.

1.2. L'origine de la notion du système [1]:

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.

1.3. Définition de système hybride [2]:

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 et 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.

1.4. Les avantages des systèmes hybrides [3]:

- 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.

1.5. Présentation du système hybride :

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles [4].

1.5.1. 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 [1]:

1.5.1.1. 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.

1.5.1.2. 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.

1.5.1.3. Piles 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.

1.5.1.4. 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.

1.5.1.5. 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.

1.5.1.6. 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.

1.6. Classification [5]:

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

1.6.1. 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.

1.6.2. 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.

1.7. 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.

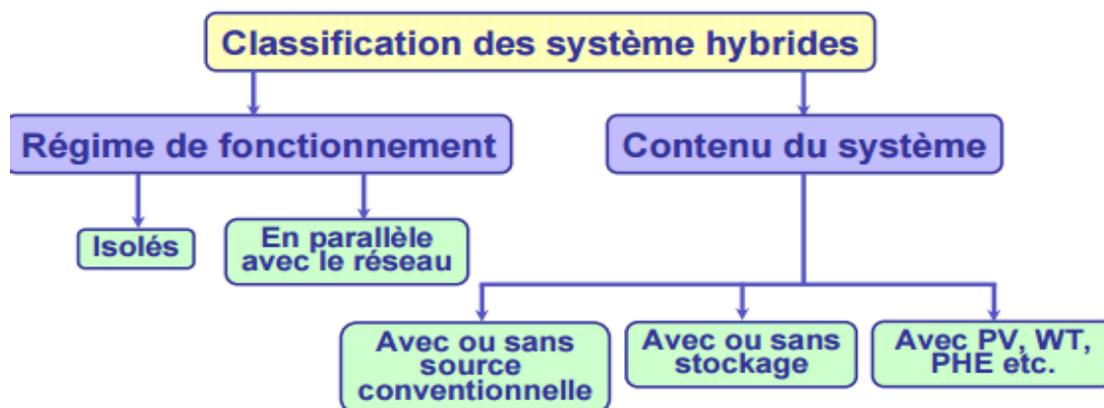


Figure 1.1: Classification des systèmes hybrides

1.7.1. 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.

1.7.2. 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** (HybridOptimization 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 1.2.

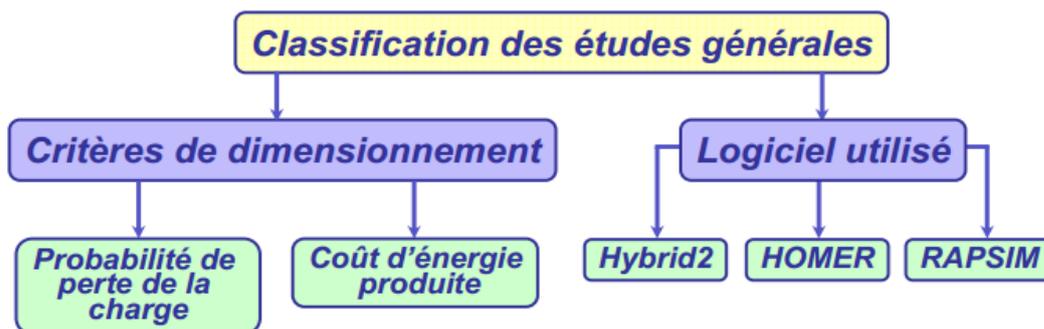


Figure 1.2 : Classification des études

1.8. Etat de l'art des systèmes hybrides Energies renouvelables hydrogène :

Plusieurs études ont été faites et se poursuivent jusqu'à présent sur les systèmes à énergies renouvelables basées sur le stockage sous forme d'hydrogène.

Nous présentons des études qui ont été mené depuis 2014, dans différentes régions :

An integrated energy storage system based on hydrogen storage Process configuration and case studies with wind power 2014 [6]:

Cet article a pour objectif de maintenir l'équilibre entre la demande et la production par l'intégration d'un système de stockage d'énergie basé sur le stockage d'hydrogène et le cycle combiné hydrogène-oxygène.

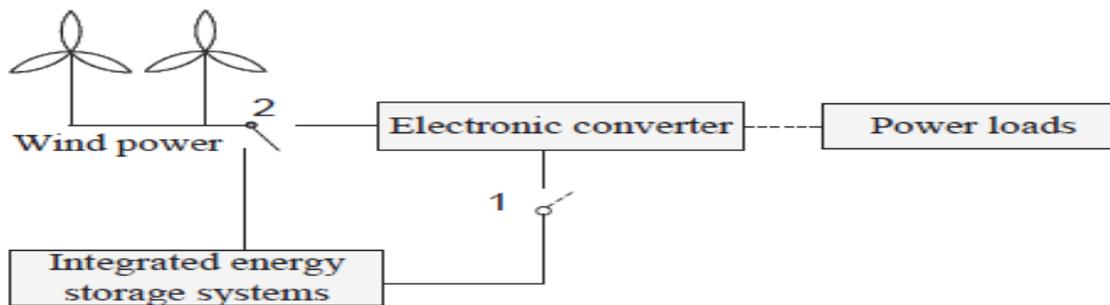


Figure 1.3: diagramme du système de stockage d'énergie installé

Dans cette étude, une comparaison du stockage intégré et d'autres moyens de stockage d'énergies a été effectuée, de même le cas d'études avec l'énergie éolienne pour les modes opératoires intermittent et continu.

Les résultats montrent que le système intégré présente un outil adéquat pour le développement des énergies renouvelables, le système de stockage permet la réduction des caractéristiques intermittente et variable du vent. L'efficacité nette moyenne du système intégré peut atteindre jusqu'à 50% et son cout est aux alentours de 2000\$/kW.

A hybrid wind PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer 2014 [7]:

Dans cette étude, une estimation de la production d'Hydrogène d'une installation autonome effectué en 03 configurations possibles utilisant les systèmes éolien et PV :

Système Eolien (A), Système Photovoltaïque (B), et le système Hybride Eolien-PV (C).

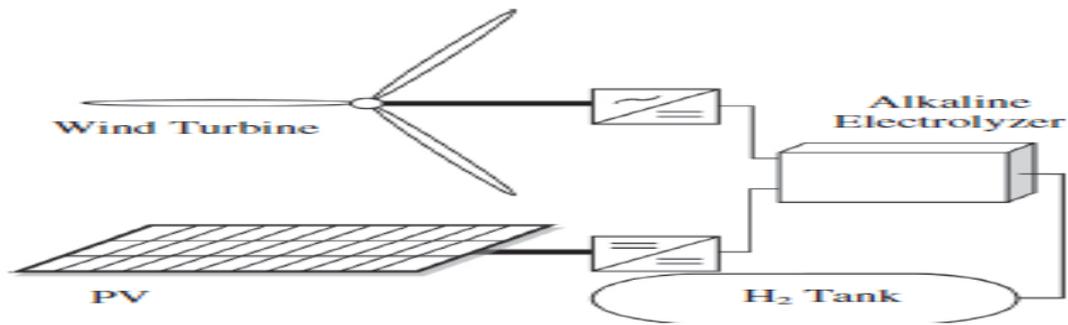


Figure 1.4: Diagramme du système hybride éolien photovoltaïque

Un dimensionnement de l'installation a été effectué dans le but de produire le maximum d'Hydrogène possible en alimentant un électrolyseur de 10 KW, puis le stocker en une durée d'une semaine.

Le logiciel MATLAB Simulink est utilisé pour la simulation des différents éléments constituant le système.

Les résultats ont montrés que le système (c)est le mieux adapté pour la région de Sahand, Iran. La contribution du photovoltaïque est faible par rapport à l'éolien, mais pour une faible vitesse du vent le système Hybride reste plus fiable qu'un système a une seule source.

A preliminary assessment of wind generated hydrogen production potential to reduce the gasoline fuel used in road transport sector of Sweden 2015 [8]:

Cette étude consiste en l'évaluation préliminaire du potentiel d'Hydrogène produit par l'énergie éolienne, pour réduire l'utilisation des carburants fossiles dans le transport routier de la Suède.

L'éolienne Vestas 112 et l'électrolyseur PEM sont les principaux éléments qui constituent le système.

Cette évaluation a permis l'estimation du taux de réduction de la consommation des carburants fossiles et les émissions du CO₂ jusqu'à 50%, par l'utilisation de 2% seulement du total du potentiel d'Hydrogène produit par l'énergie éolienne local.

Estimation of hydrogen production using wind energy in Algeria- 2015 [9, 10, 11]:

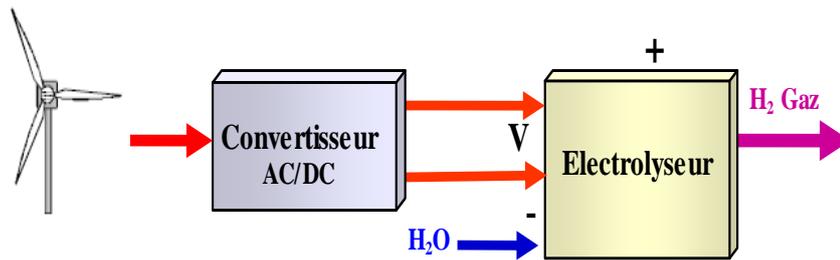


Figure 1.5: Système de production de l'hydrogène à partir de l'énergie éolienne [9, 10]

L. Aiche Hamane a proposé une configuration d'un système de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne. Ce système comprend une éolienne, d'un convertisseur AC/DC et enfin d'un électrolyseur alcalin amélioré fournissant de l'hydrogène comprimé à 30 bars. Deux approches ont été utilisées pour la simulation. La première est statistique, elle est basée sur l'estimation de valeurs moyennes. La seconde, quant à elle, est dynamique, elle est basée sur une simulation horaire grâce au logiciel TRNSYS.

Electrolyzer modèle pour la production d'hydrogène à partir des systèmes énergétiques éolienne 2015 [12] :

Le but de ce document est de traiter le fonctionnement couplé d'un électrolyseur et d'une éolienne. Quatre modèles différents d'électrolyseur sont présentés et évalués dans ce travail. Ces modèles sont étudiés sous MATLAB/Simulink. Les quatre évaluations sont étudiées et leurs résultats comparés pour des vitesses de vents et des demandes de réseau variables.

Cette tâche est effectuée par le SCS, qui place les références de puissance active et réactive pour les deux dispositifs, afin d'accomplir les demandes variables de réseau. Par conséquent, on peut observer deux sous-systèmes différents : l'Actif et le réactif.

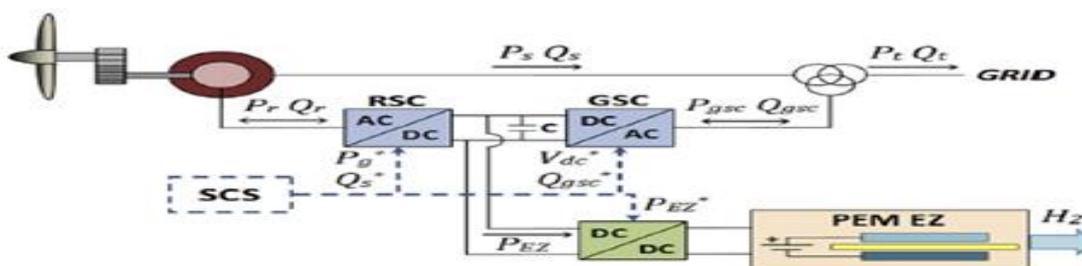


Figure 1.6: schéma complet du système hybride

L'utilisation d'électrolyseurs semble comme étant l'option idéale pour profiter de l'énergie éolienne excessive qui autrement serait gaspillée. L'hydrogène produit peut être employé plus tard comme porteur d'énergie pour la production d'électricité des piles à combustible ou de combustible pour le transport dans différents véhicules, ou dans l'industrie chimique.

Economic analysis of standalone wind powered hydrogen refueling stations for road transport at selected sites in Sweden 2015 [13]:

Les auteurs Shahid Hussain Siyal, Dimitris Mentis, Mark Howells ont effectué une analyse économique de la production autonome d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne en Suède. Cette analyse est faite en utilisant le logiciel HOMER.

Le logiciel HOMER Revalue le système d'énergie éolienne afin d'alimenter des stations à hydrogène situés sur trois sites.

HOMER permet également d'analyser les effets de variation dans des paramètres d'apport choisis sur les paramètres de production d'un système énergétique.

Les résultats spécifient qu'aux sites choisis le carburant hydrogène renouvelable peut être produit tout au long de l'année et permet de ravitailler en combustible 200 véhicules quotidiennement.

Finalement, il peut être dit que dans le proche avenir le changement du fossile au secteur des transports alimenté renouvelable pourrait être le sujet plus populaire en Suède en raison de l'énergie future et des cibles d'environnement mises par le gouvernement suédois.

Economic evaluation of hybrid off-shore wind power and hydrogen storage system 2015 [14]:

Cette recherche mène une évaluation économique d'une centrale hybride, se composant d'une ferme d'éoliennes en off-shore et d'un système de production-stockage d'hydrogène dans la région française du Pays de la Loire.

Cette recherche étudie le cas où la puissance a employé pour produire de l'hydrogène vient de l'énergie renouvelable. L'étude de cas consiste dans un arrangement contractuel qui est spécifique du système hybride, où les deux les opérateurs de vent et d'hydrogène partagent leurs coûts et avantages. L'évaluation économique est basée sur l'opération optimale de l'énergie éolienne et de la production d'hydrogène au moyen d'une dynamique établie.

Analysis of hydrogen production from wind energy in the southeast of Iran 2016 [16]:

Le but de cette étude est d'examiner la capacité de l'énergie éolienne pour la production d'Hydrogène, dans 05 localisations en la Province de Sistan & Baluchestan, Iran. Par Quatre différents types d'éoliennes ont été étudiés d'une capacité allant de 300-900 KW (Vestas V47, AWE 52-900, EWT Directwind 500/54, et Nordtank-300).

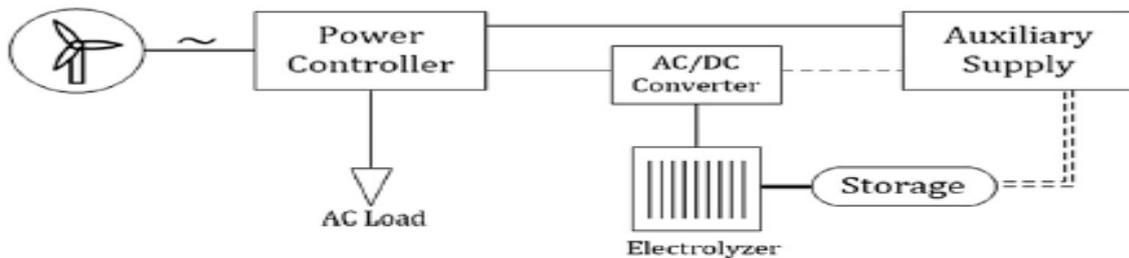


Figure 1.8: Système de conversion éolienne hydrogène

Les résultats ont montré que le model AWE 52-900 détient les meilleures performances en terme de production totale d'énergie.

A review on wind energy and wind hydrogen production in Turkey A case study of hydrogen production via electrolysis system supplied by wind energy conversion 2016 [17]:

Dans la figure ci-dessous le système éolienne-électrolyseur est considéré comme une installation de production d'hydrogène et l'énergie en excès est vendue au réseau pour réduire les couts de production.

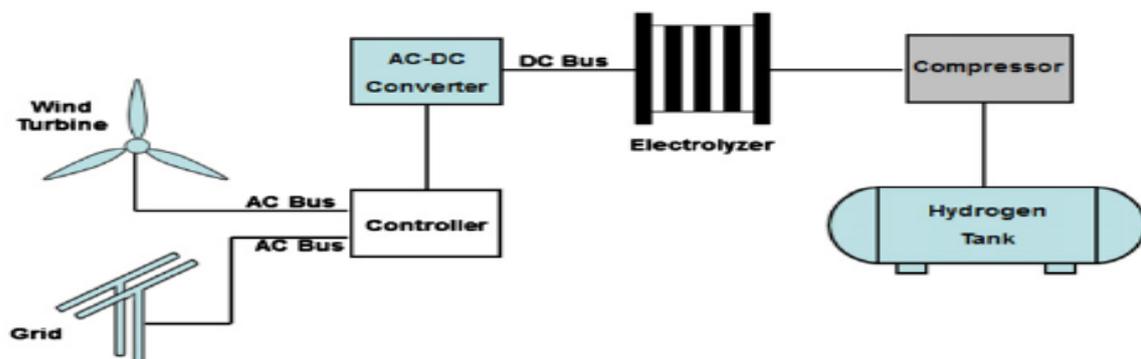


Figure 1.9: Élément du système éolien électrolyseur

L'objectif de cette revue est d'établir une comparaison de la production d'hydrogène et les variations des couts de production dans 05 localisations différentes situées dans le centre Anatolien

en Turquie, pour 03 scénarios différents avec 04 systèmes de conversion d'énergie éolienne à 03 différentes hauteurs du moyeu.

Les résultats ont montré que le maximum d'hydrogène est requis pour le 3ème scénario, et un système de conversion de 1300kW a une hauteur du moyeu de 100m, et le minimum coût de production est atteint pour un système de conversion de 2300kW dans la même région.

Evaluating the wind energy potential for hydrogen Production 2016 [18]:

Dans cette étude, le potentiel de développement d'énergie éolienne pour le but de production d'hydrogène dans la province Fars de l'Iran. Les caractéristiques d'énergie éolienne ont été statistiquement analysées pour déterminer le potentiel d'énergie éolienne pour produire l'hydrogène comme carburant de voitures dans différentes villes examinées d'Abadeh, Juyom, Eqlaed et Marvdasht.

Les performances de quatre éoliennes à grande échelle différentes pour produire l'énergie éolienne dans Abadeh sont évaluées. Il est trouvé que l'hydrogène de l'énergie éolienne dans Abadeh alimenterait environ 22 voitures par semaine. De ce fait, la ville d'Abadeh a le meilleur potentiel pour exploiter l'énergie éolienne que les autres villes.

A techno economic assessment of large scale wind hydrogen production with energy storage in Western Canada 2016 [19]:

La production d'hydrogène via la méthode du reformage de la vapeur de méthane (SteamMethane Reforming-SMR) domine le marché mondial et génère des gaz à effet de serre. De nos jours, il y a une forte demande de production d'hydrogène propre et compétitive financièrement. Le développement d'un modèle éolien-hydrogène intégré avec stockage d'énergie est proposé. Le modèle utilise des données en ligne en temps réel de l'énergie éolienne afin de calculer la taille optimale des électrolyseurs, du nombre d'unités et de la capacité des batteries (stockage d'énergie) générant ainsi un coût de production minimum d'hydrogène.

La configuration optimale consiste en 81 unités de 3496 kW (760Nm³/hr) d'électrolyseur et d'une capacité de batterie de 360 MWh (60 unités). Pour un coût de production d'hydrogène minimum de (\$9.00/kg H₂), le champ d'éolien vaut 63% de ce coût.

En conclusion de ce papier, les coûts de production d'hydrogène à partir des énergies éoliennes par électrolyseurs valent de \$3.37 à \$9.00/kg H₂ et sont selon cette étude moins compétitifs que la production par le Steam Methane Reforming (SMR).

1.9. Contribution :

Après avoir défini les systèmes hybrides, puis passés en revue les travaux publiés pour les systèmes éolien -Pv-pile à combustible. Nous proposons dans le présent travail d'étudier, simuler et dimensionner un système hybride éolien-Pv-pile à combustible dans la région d'Adrar. Pour cela les données de vitesse du vent ainsi que celle du rayonnement solaires sont utilisées pour la simulation. Le logiciel utilisé est celui d'HOMER qui est particulièrement destiné à la simulation des systèmes hybrides contenant des sources d'énergies renouvelables.

2.1. 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.

2.2. 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.

2.3. Historique [4]:

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 *Ûôrop (hudôr)*, «eau» et *ysvvâv (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).

2.4. Propriétés de l'hydrogène :

Élément 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 [9]:

- 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.

2.5. Production de l'hydrogène :

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.

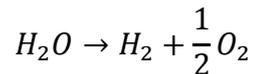
L'hydrogène peut être produit à partir de nombreuses sources, telles que, l'eau, la biomasse et les hydrocarbures. Les modes de production sont également variés. Il peut être produit à partir :

2.5.1. 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.

2.5.2. 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 [9].

2.5.3. 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 :

2.5.3.1. 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.

2.5.3.2. 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.

2.5.3.3. 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 2.1 compare les trois technologies selon la température de fonctionnement, les réactions électrochimiques au niveau des électrodes ainsi que les charges transportées [9].

Tableau 2.1: Comparaison des différentes technologies d'électrolyse de l'eau

Technologie	Température [°C]	Réaction cathode	Charge transporté	Réaction anode
Alcaline	40-90	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	OH^-	$2OH^- \rightarrow 1/2O_2 + H_2O + 2e^-$
PEM	20-100	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	H^+	$H_2O \rightarrow 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^-$
Haute température	700-1000	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$	O^{2-}	$O^{2-} \rightarrow 1/2O_2 + 2e^-$

2.6. Stockage et transport de l'hydrogène [20]:

2.6.1. 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 :

2.6.1.1. 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/m³ contre 0.090 kg/m³ 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.

2.6.1.2. 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.

2.6.1.3. 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.

2.6.2. 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.

2.7. Applications de l'hydrogène [9] :

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).

2.7.1. 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.

2.7.2. 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 CO_2 . En tant que vecteur énergétique, il trouve ainsi une multitude d'applications.

2.7.2.1. 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.

2.7.2.2. 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).

2.7.2.2.1. 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

2.7.2.2.2. 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 2.1 :

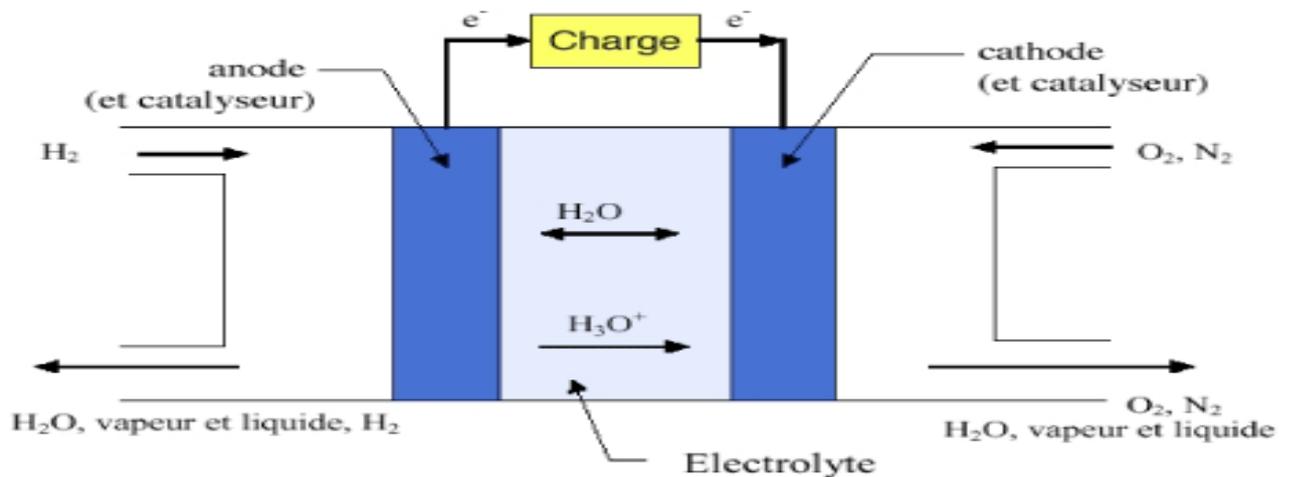


Figure 2.1: Principe de fonctionnement d'une cellule d'une PAC H2/O2 en milieu acide

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).

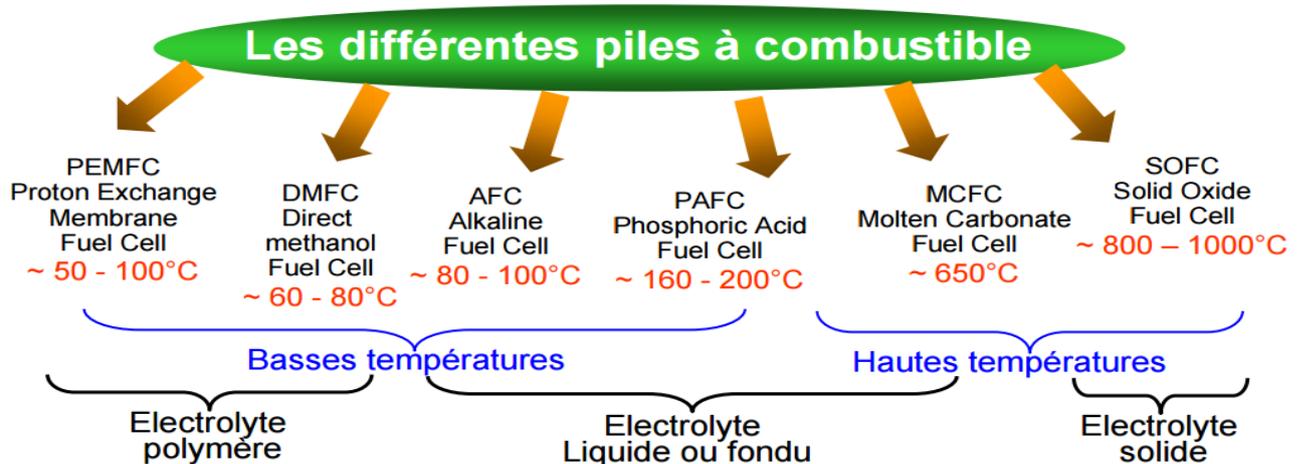


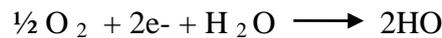
Figure 2.2: Schéma des différents types de PAC

➤ **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 :

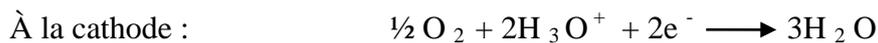
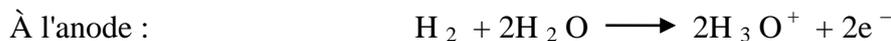


A la cathode, avec un catalyseur à l'oxyde de nickel, à argent ou au platine-or, on a :



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 CO₂ 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.

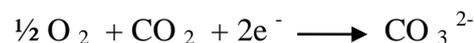
➤ **Les piles à acide phosphorique (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell)** : Les réactions sont les mêmes que dans le cas de la pile PEMFC. Le carburant peut contenir jusqu'à 1% de CO sans endommager la pile. Les composants de ces deux dernières piles à combustible (PAFC et PEMFC) sont très semblables, sauf 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'yttrium (Y^{3+}), laquelle joue le rôle de conducteur pour l'ion oxygène (O^{2-}).

2.8. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce présent chapitre d'une part la production, l'utilisation, le transport, le stockage et les différentes technologies de l'hydrogène. Et d'autre part nous avons évoqué son intérêt dans le développement.

Nous avons vu que malgré son abondance sur terre, on le trouve pas à l'état libre donc il faut le produire, on dit que l'hydrogène est un vecteur énergétique propre lorsque ce dernier est produit à partir des sources propres et renouvelable.

L'hydrogène présente un moyen très efficace pour le stockage des EnR, qui sera restitué grâce à la PAC pour satisfaire le besoin en énergie.

3.1. 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.

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

3.2.1. 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 [21]. Grâce à ces multiples usages elle tend à être l'une des ressources énergétiques majeures du 3^{ème} millénaire, avec un gigantesque gisement solaire qui équivaut à 10 000 fois la consommation énergétique de l'humanité entière [22].

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 photons forme des ondes électromagnétiques qui se propagent sans perte d'énergie dans toutes les directions de l'espace, et notamment vers la Terre [23].

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 [24].

Le rayonnement émis par le soleil constitue un spectre allant des ultraviolets à l'infrarouge en passant par le spectre visible ou 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.

3.2.1.1. Les composantes solaires [25] : 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.

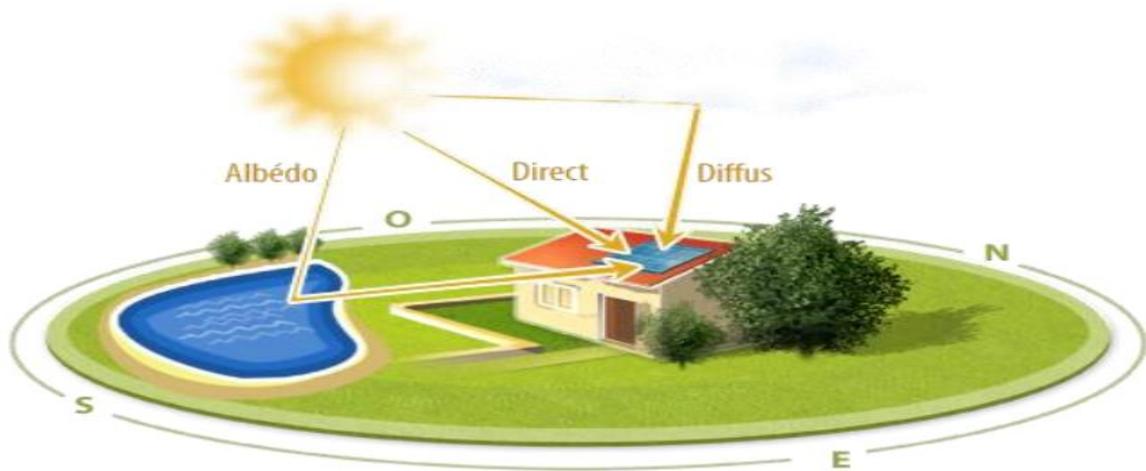


Figure 3.1: Les composantes du rayonnement solaire

✓ 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

définit 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).

3.2.1.2. Les angles : Dans le calcul du rayonnement solaire global, différents angles doivent être pris en compte.

✓ 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 :

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + j) \right] \quad (3.1)$$

➤ 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 :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (3.2)$$

Avec :

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

$$TSV = TSL + \Delta t \quad (3.3)$$

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

$$\Delta t = 229.2 [0.000075 + 0.001868 \cos \beta - 0.0032077 \sin \beta - 0.014615 \cos 2\beta - 0.04089 \sin 2\beta] \quad (3.4)$$

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

$$\beta = (j - 1) \frac{360}{365} \quad (3.5)$$

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

$$TSL = TU + \frac{24}{360} L \quad (3.6)$$

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

$$TU = TL - \text{Décalage} \quad (3.7)$$

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 :

$$\sin(h) = \cos(\varphi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (3.8)$$

➤ 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 :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (3.9)$$

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 [21].

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 3.2). 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 m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la grande partie du territoire national, soit près de $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au sud du pays [26].

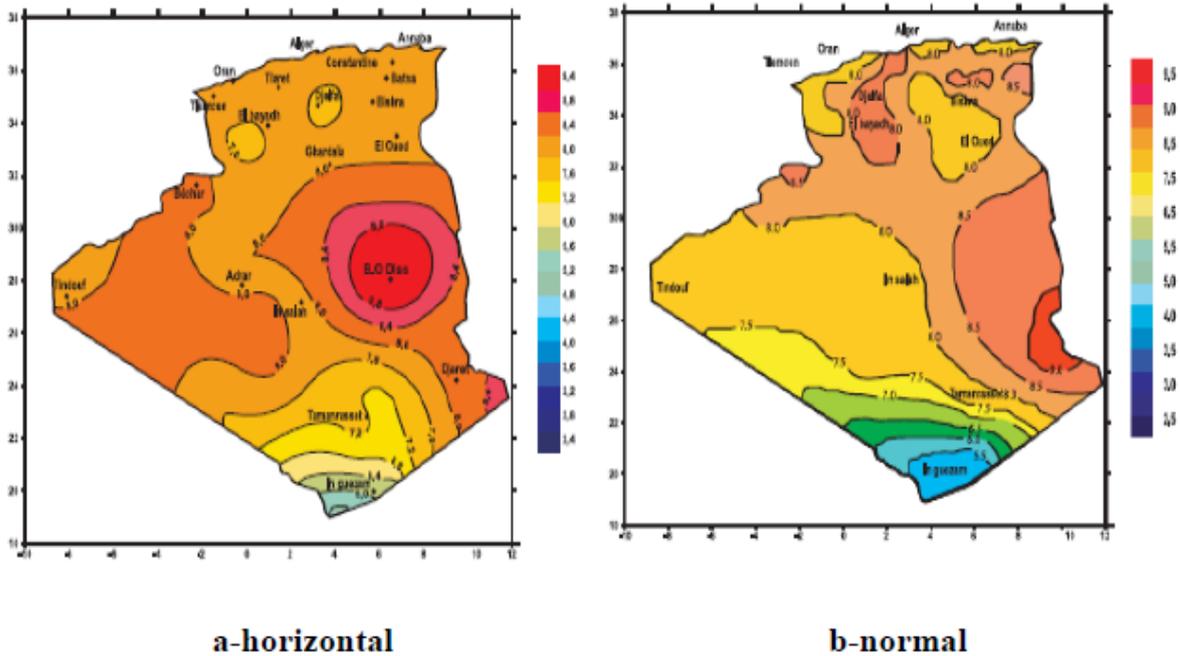


Figure 3. 2: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale et normal au mois de juillet.

3.2.2. 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 3.3.

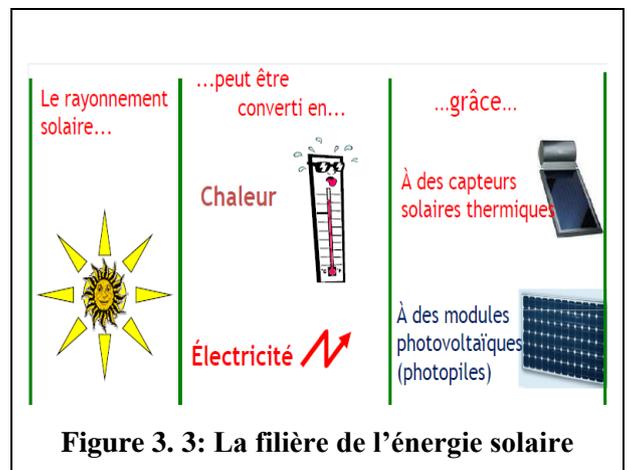


Figure 3. 3: La filière de l'énergie solaire

Selon les besoins énergétiques et les conditions présentes, trois filières d'exploitation de l'énergie solaire sont disponibles [27] :

- 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 [28].

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 [29].

3.2.2.1. Historique du photovoltaïque:

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 à 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.

3.2.2.2. Les composants d'un système solaire photovoltaïque [30] :

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
- 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.

3.2.2.3. Différents types des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par 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 [31].

➤ **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 Crète (kWc).

➤ **Cellules au silicium polycristallin (ou multicristallin) :** Les modules utilisant des cellules au silicium polycristallin 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 polycristallines 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 limités (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 : diséléniure 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.

3.2.2.4. Caractéristiques des panneaux photovoltaïques :

➤ 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.

3.2.2.5. Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque [29] :

- 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.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute 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.

3.2.2.6. Principe de fonctionnement du système photovoltaïque :

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.

3.2.2.7. Estimation de la production d'énergie d'un système photovoltaïque [32]:

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 :

$$E_{elé} = H_i \times S \times \eta \quad (3.10)$$

Avec :

- $E_{\text{éle}}$ [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.

$$\eta = \frac{E_{\text{éle}}}{E_{\text{lum}}} \quad (3.11)$$

Le rendement global peut être séparé en deux composantes :

$$\eta = \eta_{\text{stc}} \times \eta_{\text{systeme}} \quad (3.12)$$

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.

$$\eta_{\text{stc}} = \frac{P_c}{G_{\text{stc}} \times S} \quad (3.13)$$

η_{systeme} : 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'appariement des modules selon leurs caractéristiques réelles,
- 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).

$$E_{\text{élé}} = H_i \times P_c \times \eta_{\text{systeme}} \quad (3.14)$$

La production photovoltaïque dépend donc de 3 composantes :

- l'irradiation reçue,
- la puissance crête,
- le ratio de performance (η_{systeme}) (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.

$$PR = \frac{\text{Production réelle (kwh)}}{\text{Production théorique (kwh)}} \quad (3.15)$$

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

$$E_{\text{élec}} = H_i \times P_c \quad (3.16)$$

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.

3.3. Généralités sur l'énergie éolienne et les systèmes de conversion :

3.3.1. 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 [33].

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 a 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 [9].

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 peut 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.

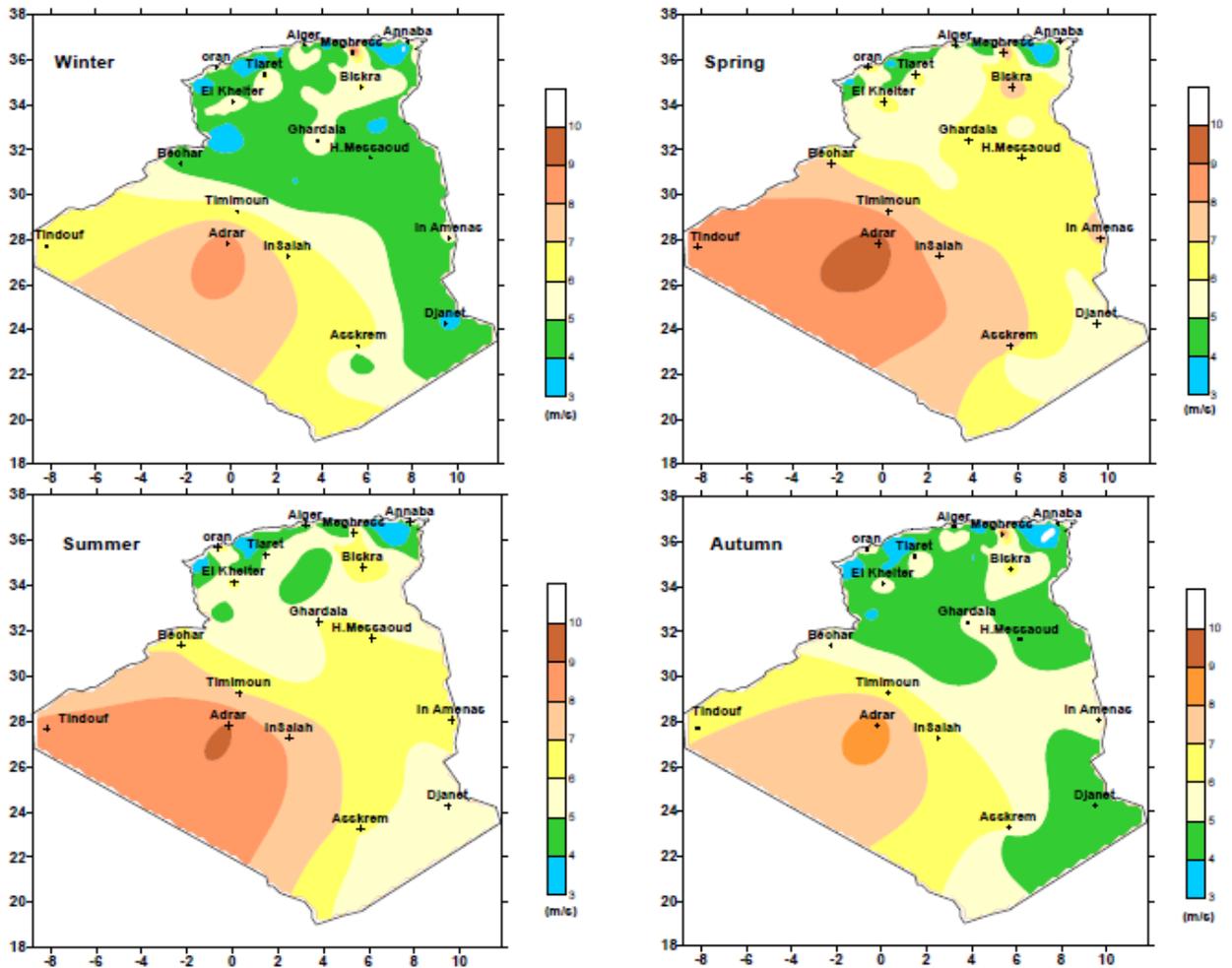


Figure 3.4: cartes saisonnières de la vitesse moyenne à 50 m du sol

3.3.2. Système de conversion de l'énergie éolienne :

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 [21] :

- 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.

3.3.2.1. Historique des éoliennes [34]:

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.

3.3.2.2. Les différents types d'éoliennes [9]:

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.

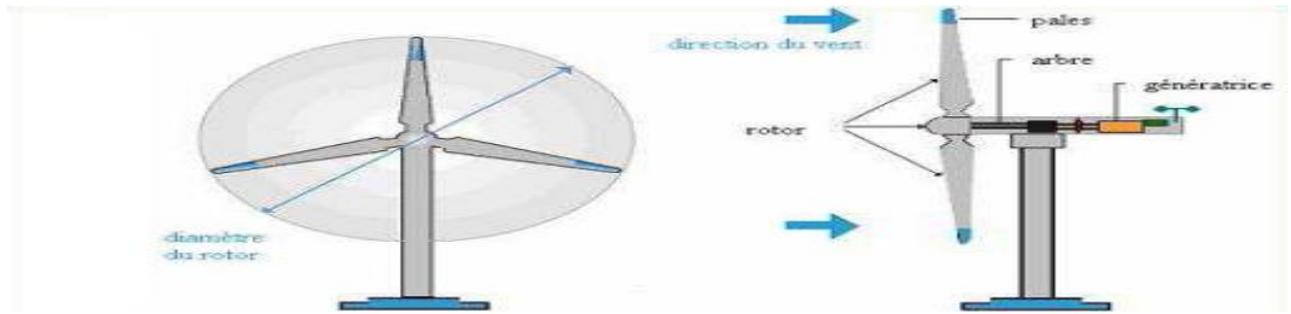


Figure 3.5: Configuration à axe horizontale

➤ 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 3.6: Éolienne de type Savonius



Figure 3.7: Éolienne de type Darrieus

3.3.2.3. Principe de fonctionnement du système éolien :

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

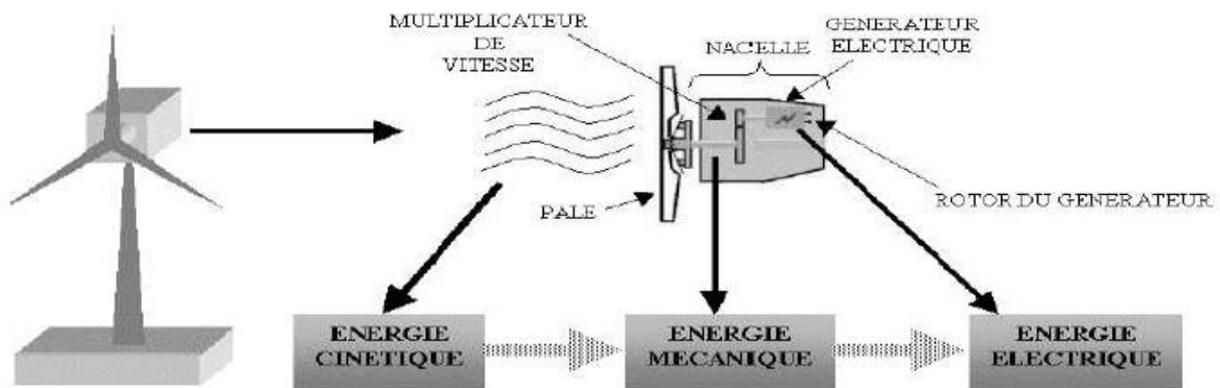


Figure 3.8: Conversion de l'énergie cinétique du vent

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.

3.3.2.3. 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 [35].

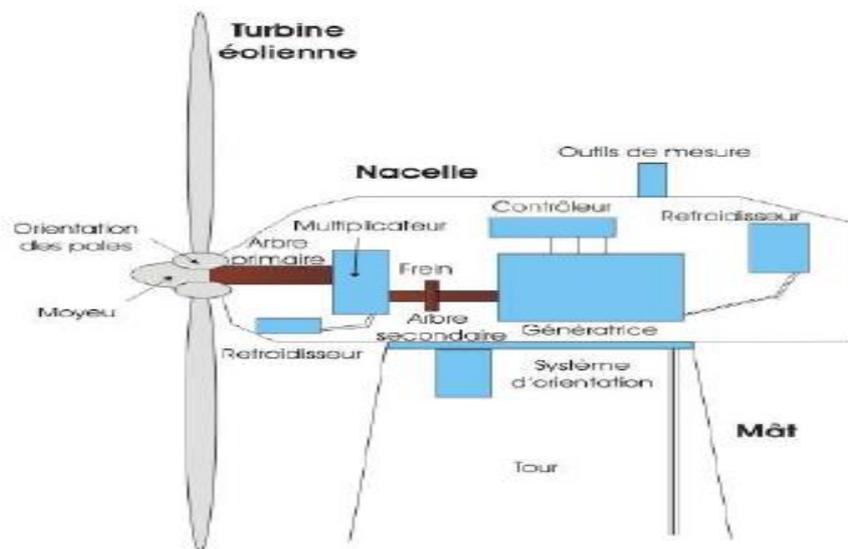


Figure 3.9: Principaux composants de l'éolienne moderne

✓ 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 haubanée, 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.

3.3.2.4. Estimation de la production d'énergie d'un système éolien [9]:

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 :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.17)$$

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:

$$P_d = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (3.18)$$

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.

$$P_r = \frac{1}{2}C_{pmax}\rho Av^3 \quad (3.19)$$

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

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (3.20)$$

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.

$$C_p = \frac{P_f}{P_d} \quad (3.21)$$

$$P_f = \frac{1}{2}C_p(\lambda)\rho Av^3 \quad (3.22)$$

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.

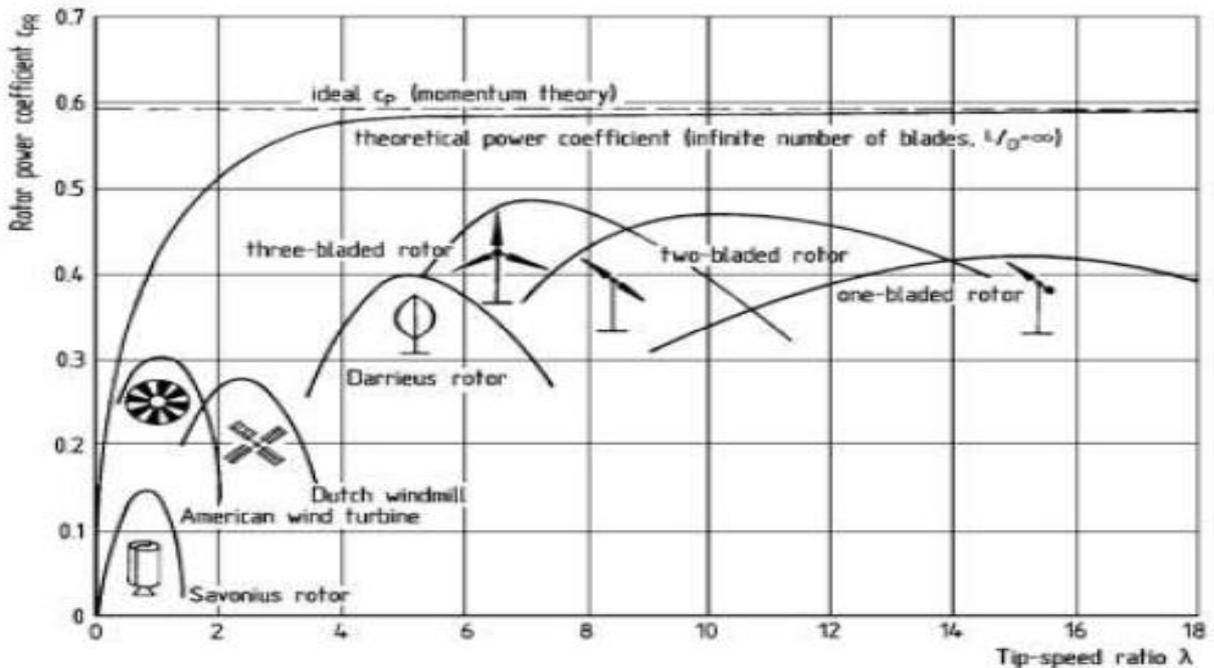


Figure 3.10: Coefficient de puissance de C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour différents types d'éoliennes

Ces variations de $C_p(\lambda)$, 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.

3.4. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce présent chapitre d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies : solaire photovoltaïque et éolienne. Et d'autre part, nous avons évoquée tous les éléments constitutifs des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que leurs principes de fonctionnements.

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre sera présenté un système hybride de production électrique à partir de différentes sources 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.

4.2. Description du logiciel HOMER [36] :

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.

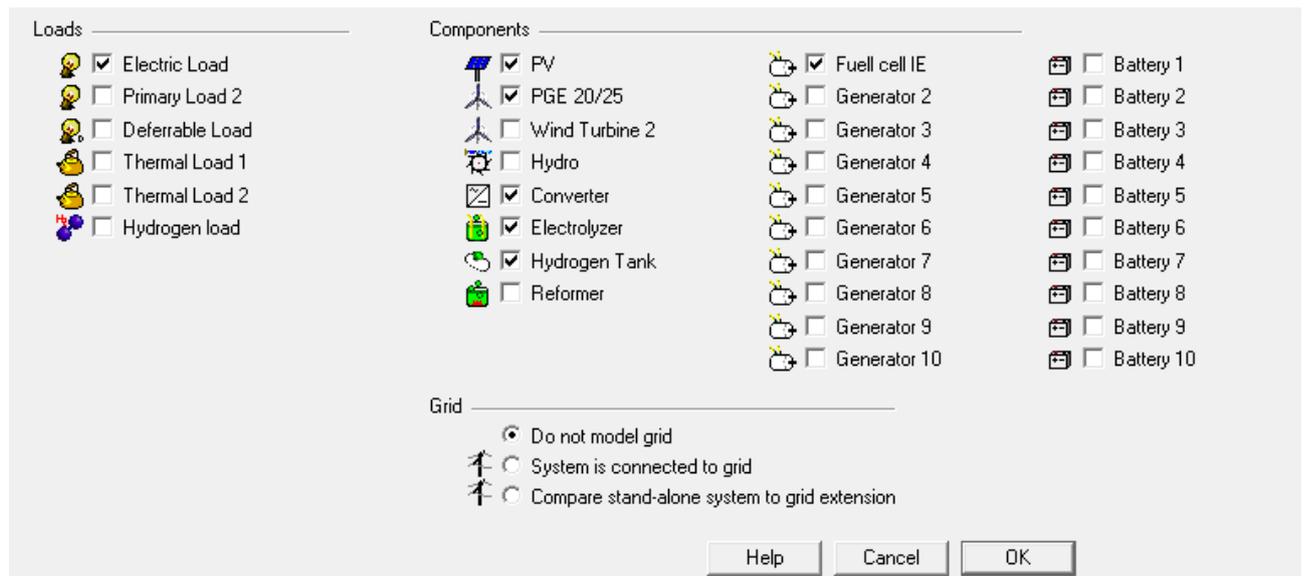


Figure 4.1: Bibliothèque HOMER

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.

4.3. 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. Les systèmes considérés sont :

- Configuration 1 : Un système hybride éolien-pile à combustible ;
- 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 servira à produire 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.4.2.

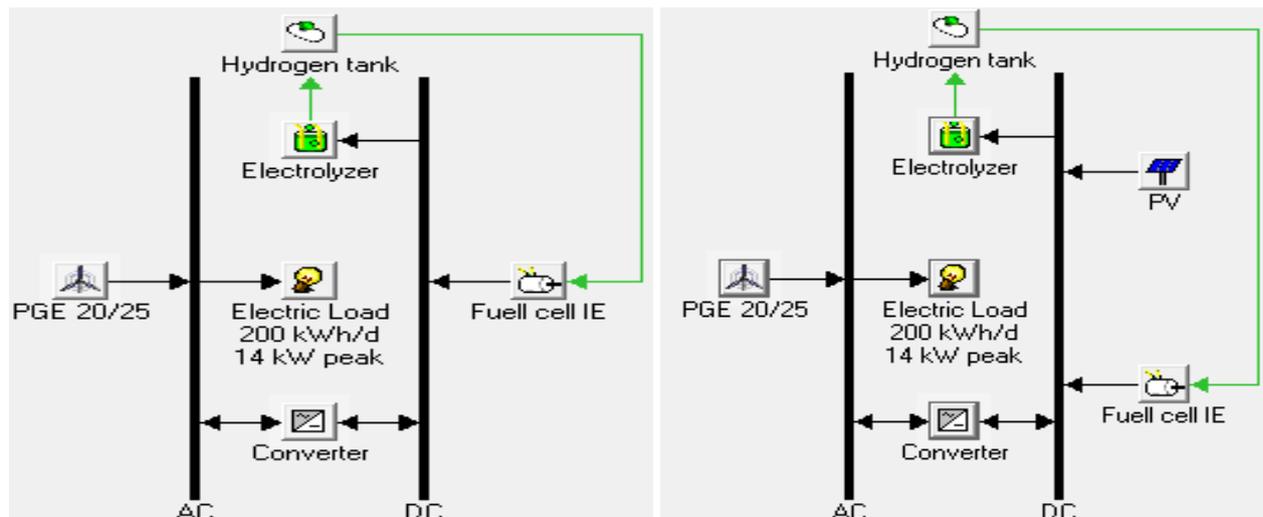


Figure 4.2: Architecture des configurations 1 et 2 respectivement

4.4. Données d’entrées :

4.4.1. 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.

Le tableau 4.1 représente les caractéristiques géographiques de la station de mesure d’Adrar

Tableau 4.1: Caractéristiques géographiques de la station de mesure d’Adrar

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

Nous pouvons voir sur la figure 4.3, 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 juillet avec 6,5 m/s puis viennent les mois de mars, aout et septembre avec 6.1 m/s, mais à part le mois de janvier et décembre le reste de l’année elle varie autour de 5.7 m/s.

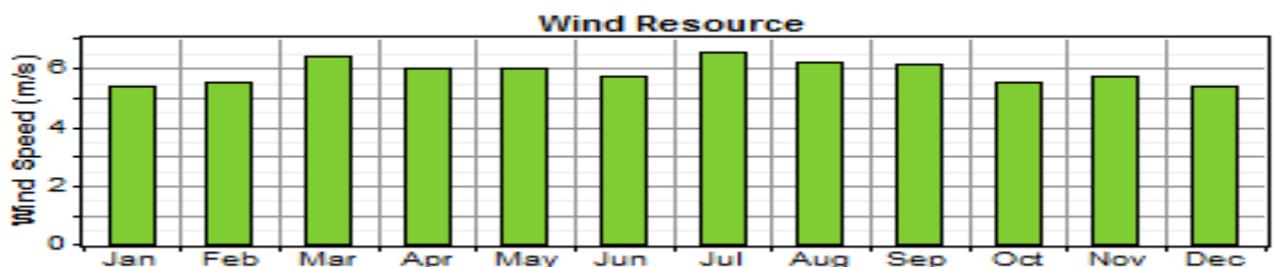


Figure 4.3: Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent pour la région d’Adrar à 10m du sol

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 4.4.

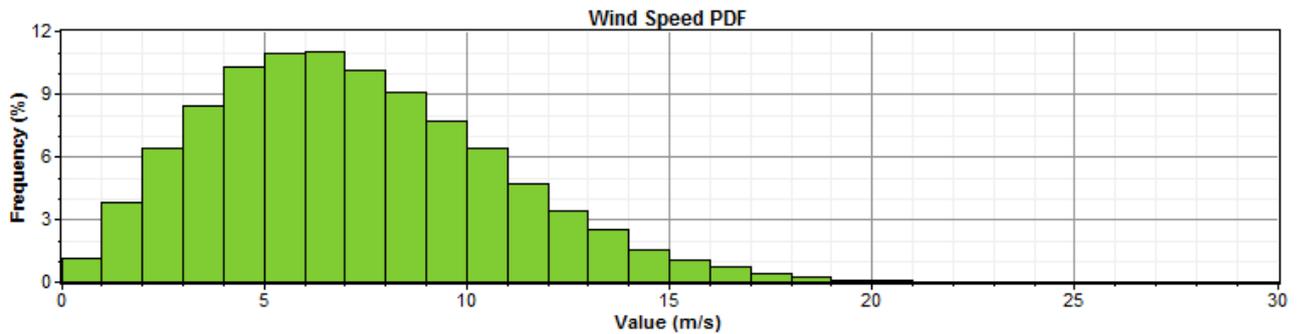


Figure 4.4: Variation de la fréquence des vitesses du vent mesurées pour la région d’Adrar

Les valeurs des paramètres de weibull k et c ainsi que la vitesse moyenne du vent pour la station de Adrar sont données au Tableau 4.2.

Tableau 4.2: Données statistiques de la vitesse du vent

k	c	$\langle v \rangle$
2,15	7,2 m/s	5,87 m/s

4.4.2. Les données solaires :

Les données du rayonnement solaire du site d’Adrar sont utilisées pour la simulation. Elles sont constituées de l’irradiation solaire mensuelle ainsi que l’indice de clarté comme le montre la figure 4.5.

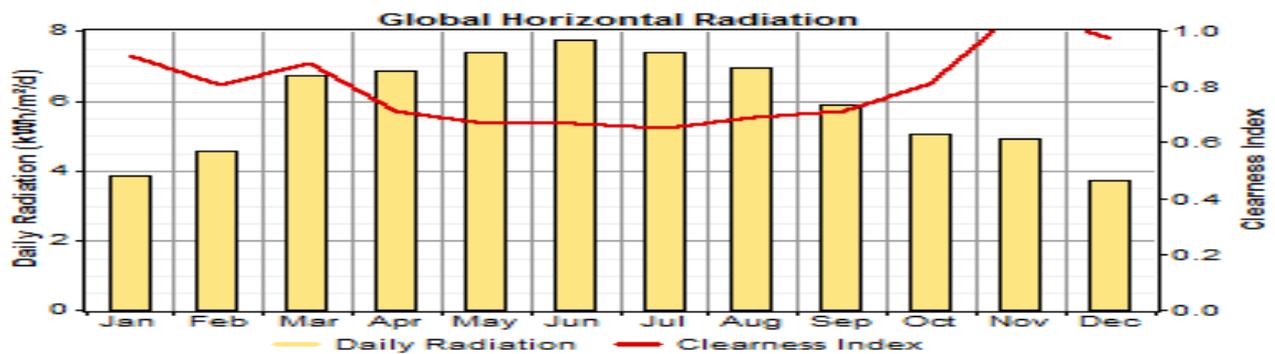


Figure 4.5: Irradiation horizontale globale et indice de clarté

Les données du rayonnement solaire ne sont pas disponibles, ces informations moyennes mensuelles ont été prises du logiciel METEONORM 5 en introduisant les caractéristiques géographiques citées précédemment du site d’Adrar.

4.4.3. La charge électrique :

Assurer une production continue et alimenter une charge électrique de 200 kWh/j sept jours sur sept sans arrêt tel est le défi que doit relever notre système hybride.

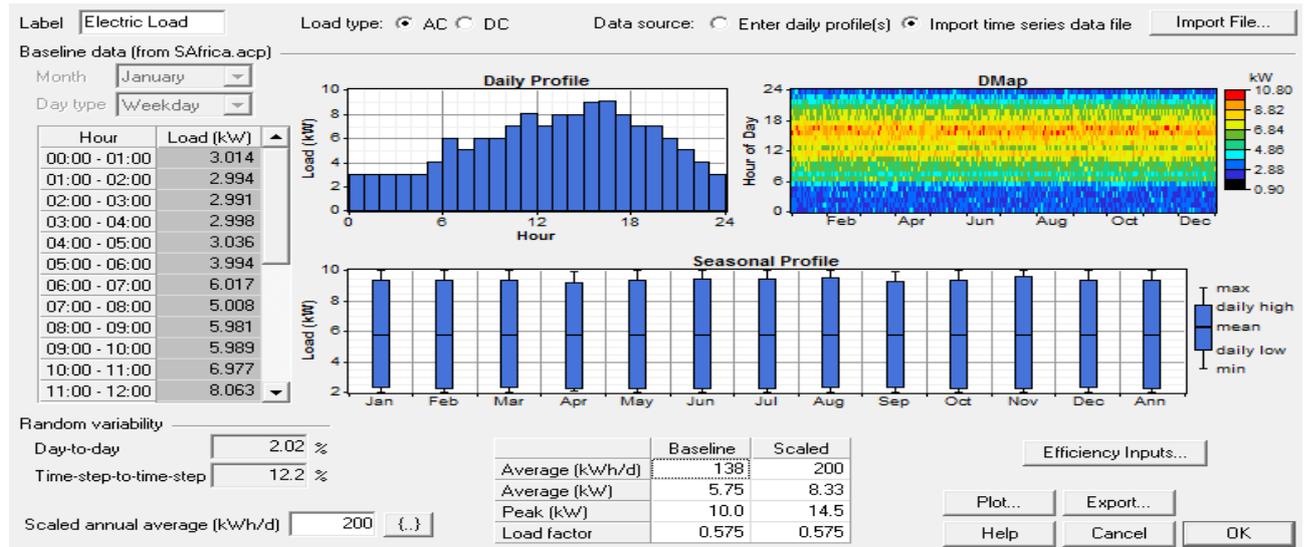


Figure 4.6: Simulation de la charge à alimenter

Le tableau situé tout en bas dans la figure 4.6 les puissances maximale (peak) et minimal fourni par le système pour atteindre la charge considérée.

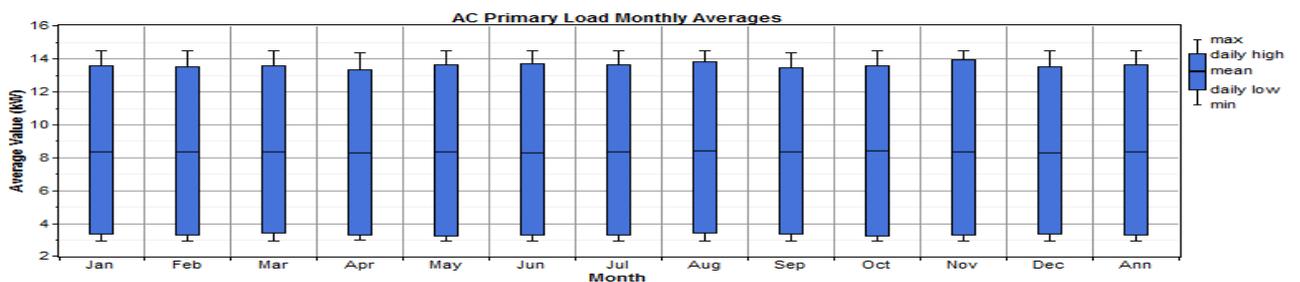


Figure 4.7: Charge électrique moyenne

La figure 4.7 représente la charge électrique moyenne pendant une année. On note une variation mensuelle, on remarque que la charge atteint son maximum aux mois de juillet et aout et un minimum au mois d’octobre.

4.4.4. L'aérogénérateur :

L'aérogénérateur utilisé dans ce système est le PGE 20/25 de 25 kW dont les caractéristiques sont présentés 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 4.9.



Figure 4.8: Caractéristiques de l'aérogénérateur PGE 20/25



Figure 4.9: Courbe de puissance de l'aérogénérateur PGE 20 /25

4.4.5. Le générateur photovoltaïque :

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

Tableau 4.3: Propriétés du champ photovoltaïque

Propriétés	Valeurs
Puissance	10 kW (CC)
Durée de vie	20 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	47°C
rendement dans les conditions standards.	13%

4.4.6. 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 suivant :

Tableau 4.4: Propriétés de l'électrolyseur

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

4.4.7. 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 4.5: Propriétés de la PAC

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

4.4.8. 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 [4]: 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 4.6 représente les caractéristiques techniques du convertisseur utilisé.

Tableau 4.6: Caractéristiques des convertisseurs

Caractéristiques	Valeurs
Puissance	40 kW
Durée de vie	15 ans
Rendement CA/CC	85%
Rendement CC/CA	90%

4.4.9. 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 4.7: Propriétés du réservoir d'hydrogène

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

4.5. Dimensionnement :

L'objectif de ce travail est d'assurer l'électrification d'un ensemble d'habitat situé à Adrar avec une charge de 200 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 [31], on a pu avoir les résultats suivants:

Tableau 4.8: Fiche de consommation des appareils électrique pour une seule maison [37].

Appareil	Nombre	Puissance (W)	Durée de fonctionnement par jours (en heures)		Nombre de jours d'utilisation par semaine	Consommation en kWh/jours
			Saison sèche	Saison des pluies		
Télévision	2	95	12	8	7	1,90
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	5	5	1	1	7	0,03
ampoules	10	75	13	10	7	8,63
routeur wifi	1	5	20	15	7	0,09
climatiseur	2	500	18	0	7	9,00
Consommation totale						25,84

D'après les résultats du tableau 4.8, on note qu'une seule maison consomme 25.84 kWh/j, donc il est possible en moyenne d'alimenter 7 maisons avec une charge de 200 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.

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

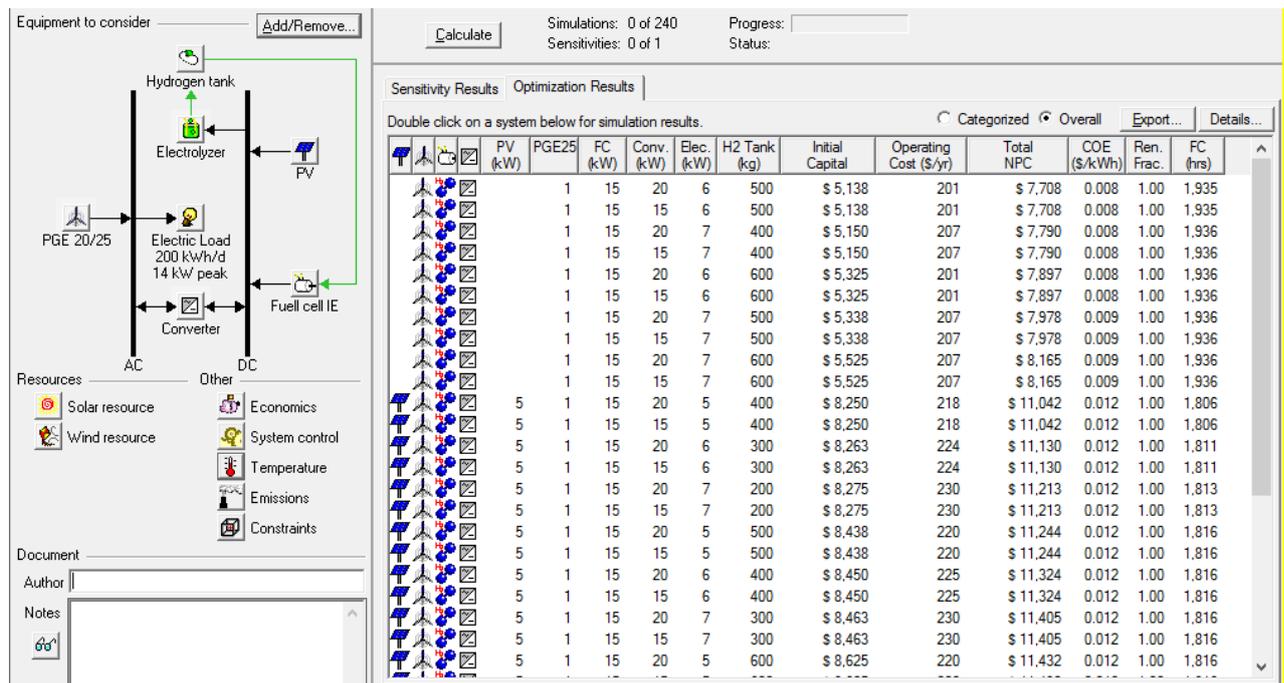


Figure 4.10: tableau des configurations possibles

Le tableau permet de visualiser toutes les configurations faisables du système proposé. Ils sont énumérés dans l'ordre de la plus rentable à la moins rentable.

Le logiciel HOMER s'utilise selon un processus itératif. On a entamé les calculs avec des données d'entrée approximatives. Après analyses des résultats, affinez les estimations et répétez le processus autant de fois que nécessaire pour obtenir des résultats raisonnablement précis.

Dans notre cas HOMER a choisi les dimensions suivantes :

	PGE25 (Quantity)	FC (kW)	Converter (kW)	Electrolyzer (kW)	H2 Tank (kg)
1	1	5.00	20.00	4.00	200.00
2		10.00	30.00	5.00	300.00
3		15.00	40.00	6.00	400.00
4		20.00	50.00	7.00	500.00
5					600.00
6					700.00
7					
8					
9					
10					

	PV Array (kW)	PGE25 (Quantity)	FC (kW)	Converter (kW)	Electrolyzer (kW)	H2 Tank (kg)
1	5.000	1	10.00	15.00	4.00	200.00
2	10.000		15.00	20.00	5.00	300.00
3	15.000		20.00	25.00	6.00	400.00
4					7.00	500.00
5					8.00	600.00
6						
7						
8						
9						
10						

	PGE25 (Quantity)	FC (kW)	Converter (kW)	Electrolyzer (kW)	H2 Tank (kg)
1	1	5	20	4	200
2		10	30	5	300
3		15	40	6	400
4		20	50	7	500
5					600
6					700

	PV Array (kW)	PGE25 (Quantity)	FC (kW)	Converter (kW)	Electrolyzer (kW)	H2 Tank (kg)
1	5	1	10	15	4	200
2	10		15	20	5	300
3	15		20	25	6	400
4					7	500
5					8	600

Figure 4.11: Dimensions choisis par HOMER pour la configuration 1 et 2 respectivement

4.6. Simulation des systèmes considérés:

4.6.1. Simulation du système éolien-pile à combustible :

4.6.1.1. Production énergétique du SEH :

4.6.1.1.1. Production énergétique mensuelle :

Les figures 4.12 à 4.23 représentent une comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour chaque mois de l'année.

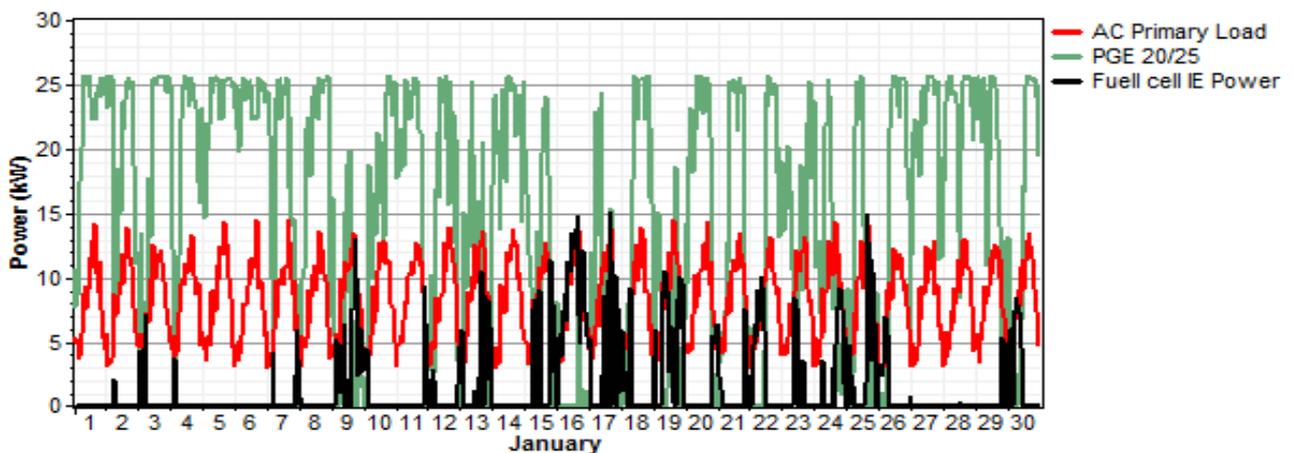


Figure 4.12: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de janvier.

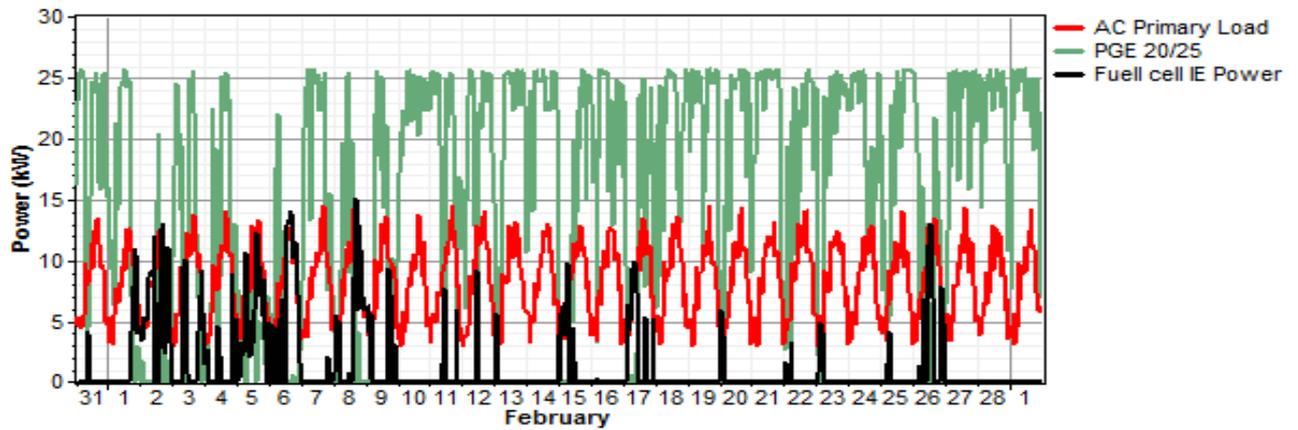


Figure 4.13: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de février.

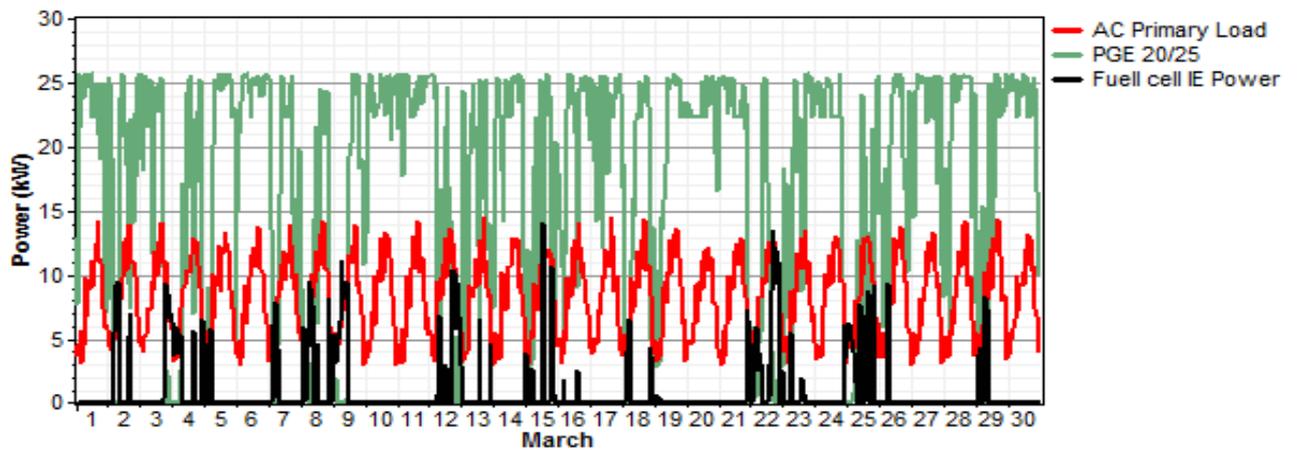


Figure 4.14: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mars.

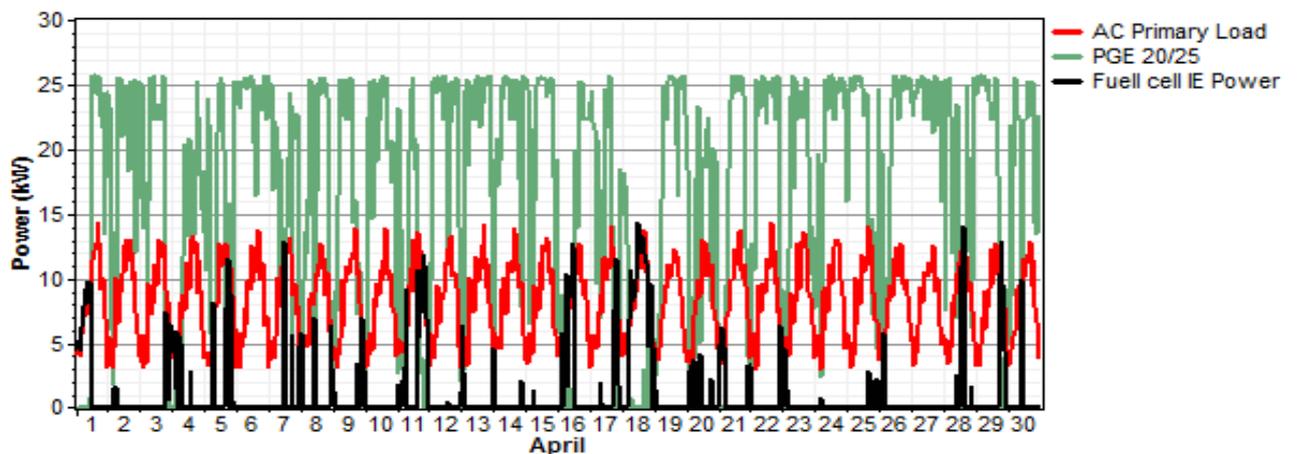


Figure 4.15: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'avril.

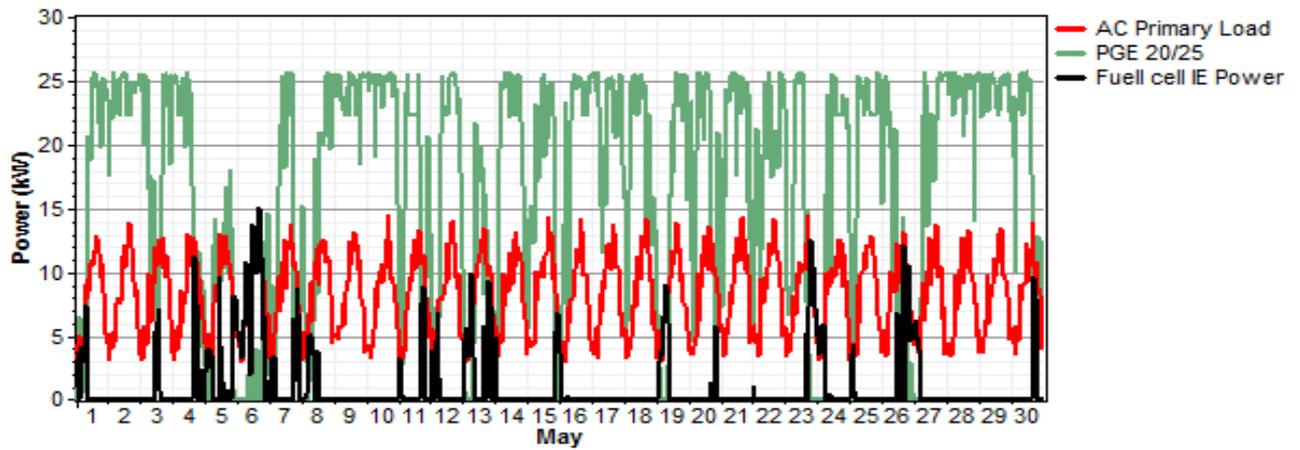


Figure 4.16: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mai.

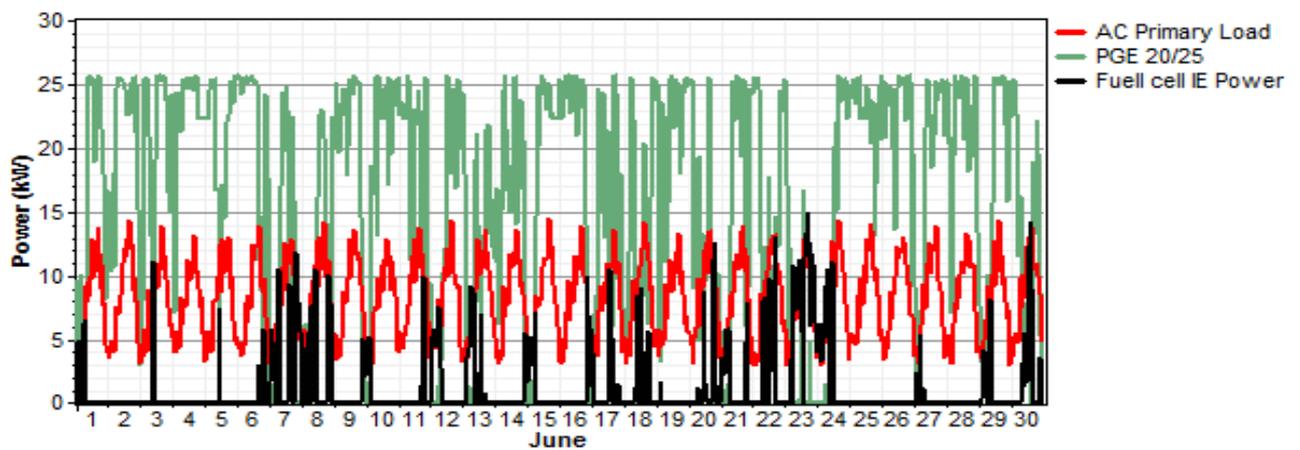


Figure 4.17: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de juin.

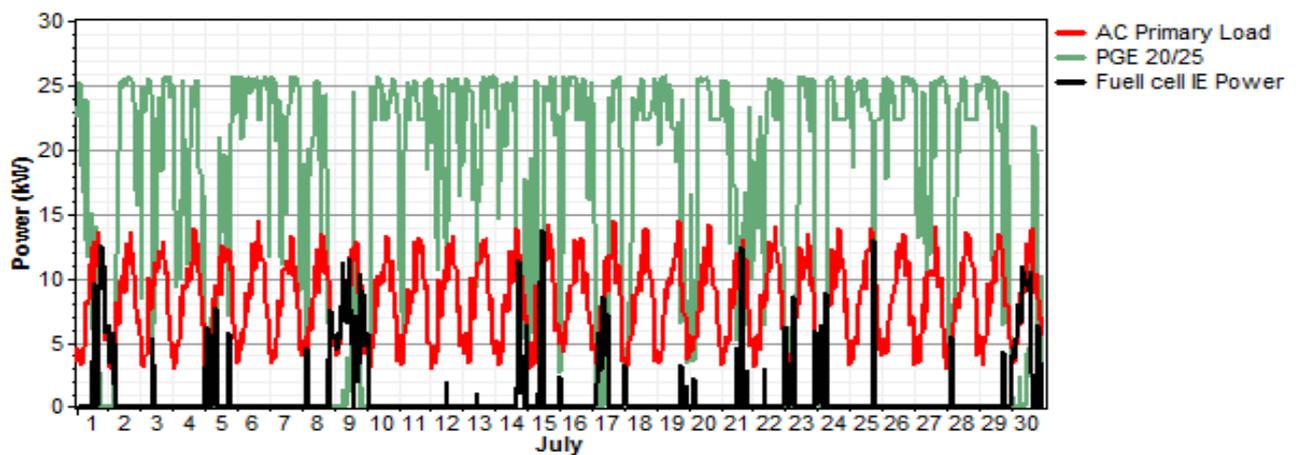


Figure 4.18: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de juillet.

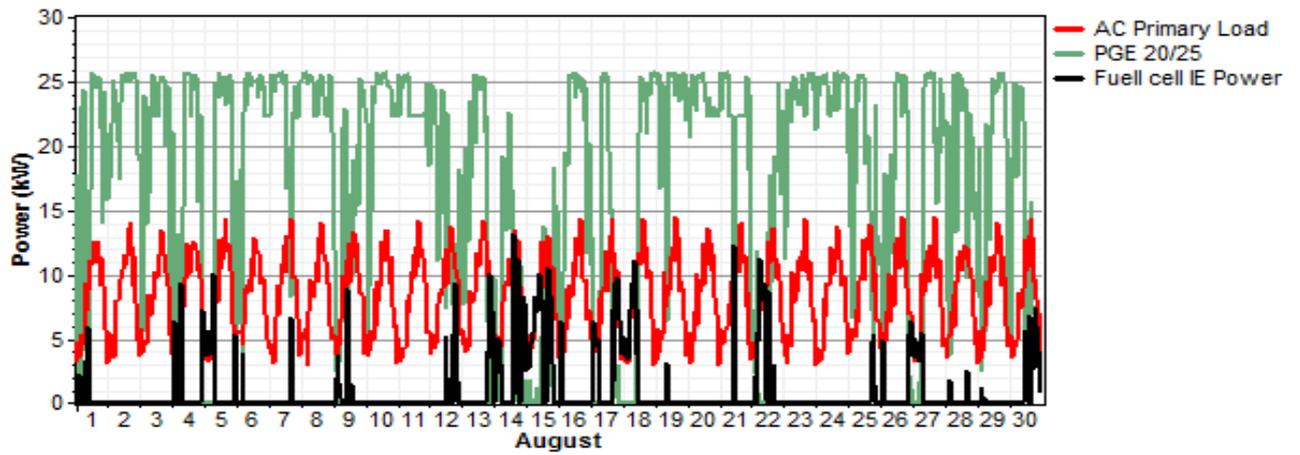


Figure 4.19: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'aout.

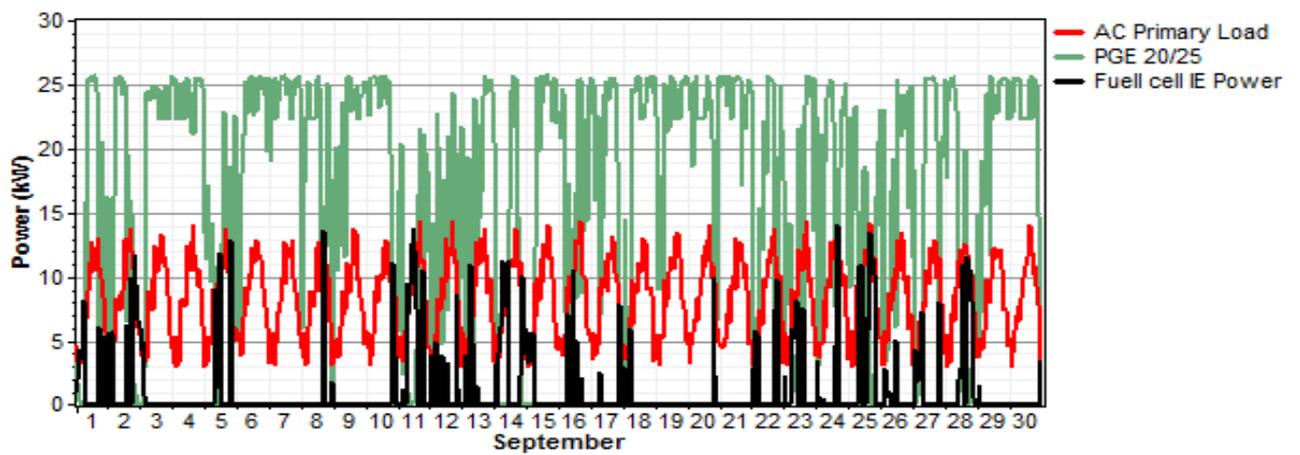


Figure 4.20: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de septembre.

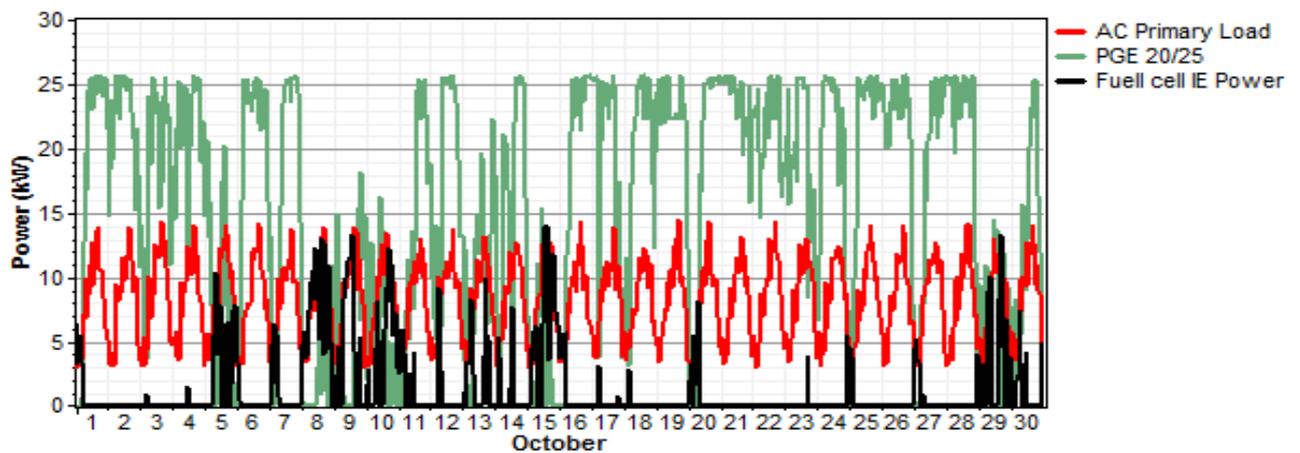


Figure 4.21: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'octobre.

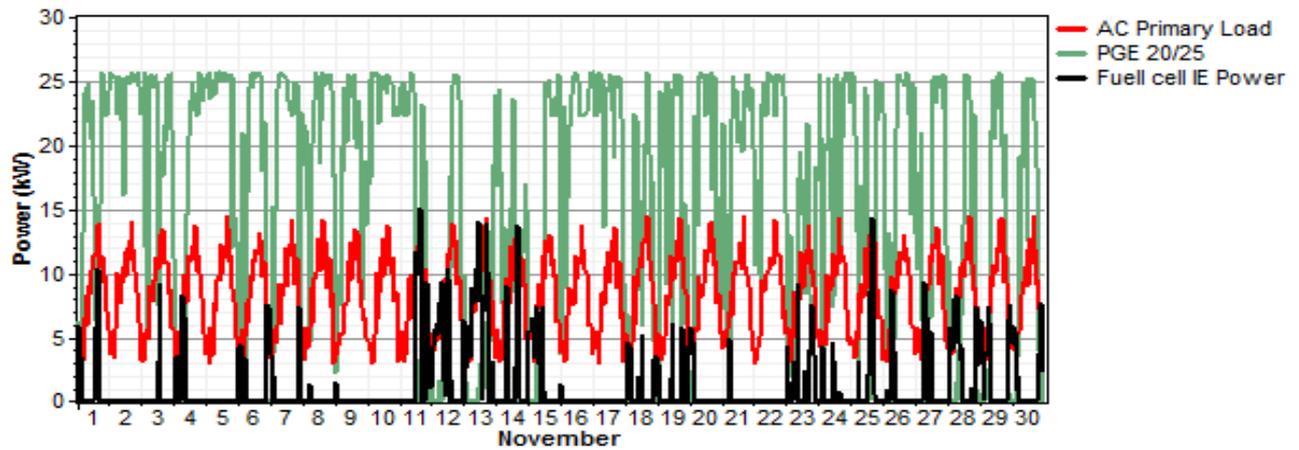


Figure 4.22: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de novembre.

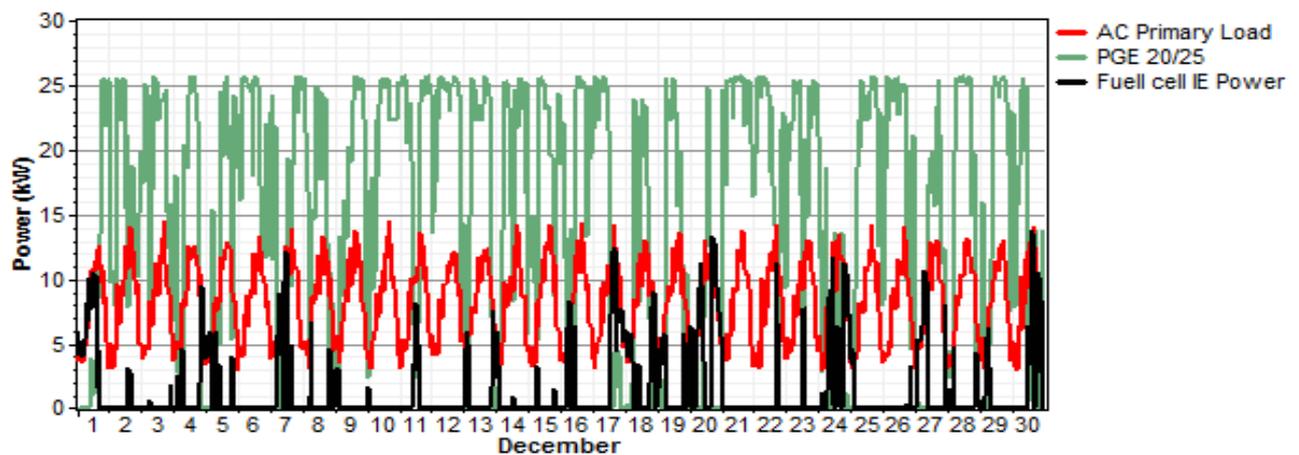


Figure 4.23: Comparaison entre la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de décembre.

D'après les Figures 4.12 jusqu'à 4.23, représentant la production électrique de l'aérogénérateur, la pile à combustible et la charge pour chaque mois de l'année, On observe une alternance entre la production de l'aérogénérateur et la PAC, on remarque bien que la production est plus élevée pour l'aérogénérateur surtout pour les mois les plus venté comme mars, juillet, août et septembre, cette production est moins importante pour une faible vitesse du vent comme cela est représenté sur les figures des mois de janvier, octobre et décembre ou la production électrique de la pile à combustible est maximale.

Pour bien voir et comprendre la complémentarité entre les systèmes on a représenté un exemple de production d'énergie moyenne pour un jour de janvier sur la figure 4.24.

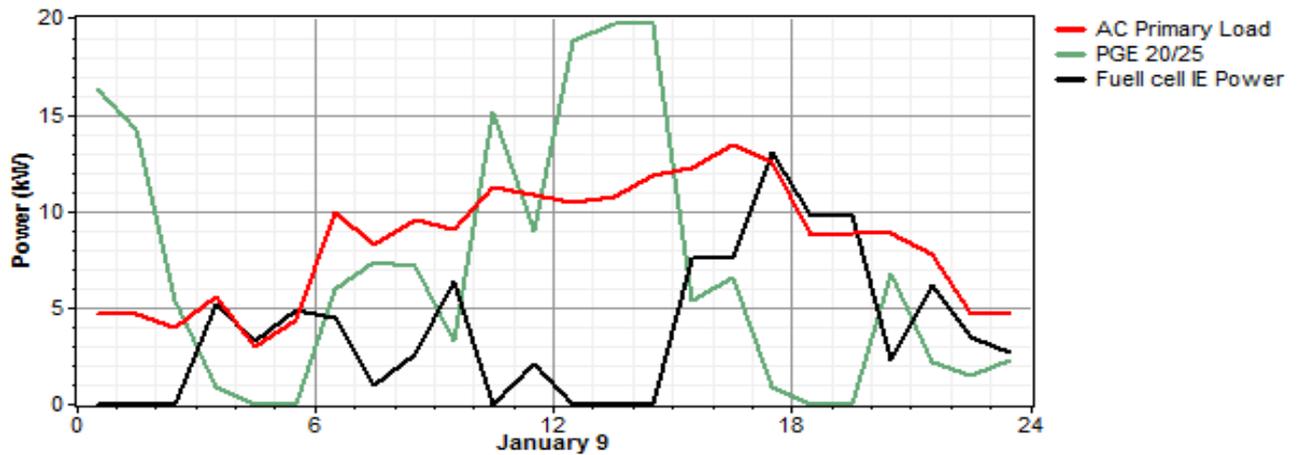


Figure 4.24: Production horaire de l'aérogénérateur et de la PAC

La figure 4.24 montre une alternance entre la production horaire des deux sources, on remarque qu'aux environs de 14h, la production éolienne passe par un maximum alors que la PAC présente une production nulle, et aux alentours de 18h l'aérogénérateur présente une très faible production ne satisfaisant pas au besoin, alors la PAC intervient pour compenser le manque.

4.5.1.1.2. Production énergétique annuelle :

Les tableaux 4.9 et 4.10 représentent la production et la consommation d'énergie sur une année.

Tableau 4.9: Production du SEH

Production	kWh/yr	%
Wind turbine	147,270	93
Fuell cell IE	10,907	7
Total	158,177	100

Tableau 4.10: Consommation électrique

Consumption	kWh/yr	%
AC primary load	72,998	66
Electrolyzer load	37,262	34
Total	110,260	100

D'après le tableau 4.9 on voit que l'énergie éolienne produit 93% de l'énergie annuelle et que la pile à combustible produit seulement 7% d'énergie électrique avec un rendement électrique moyen de 42.9%, ce qui signifie que l'éolienne PGE 20/25 présente les bonnes caractéristiques pour la région d'Adrar.

D'après le tableau 4.10 l'électrolyseur consomme 34% de l'énergie électrique produite, afin de produire et stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène.

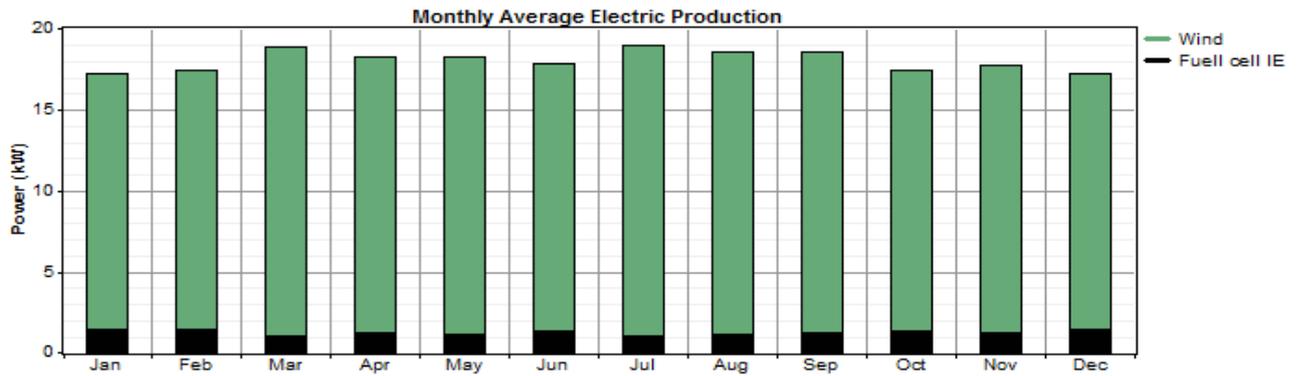


Figure 4.25: Production électrique moyenne mensuelle

Les résultats représentés en figure 4.25, montrent une nette variation saisonnière, avec une production minimale en automne et en hiver qui augmente au printemps pour atteindre un maximum en été.

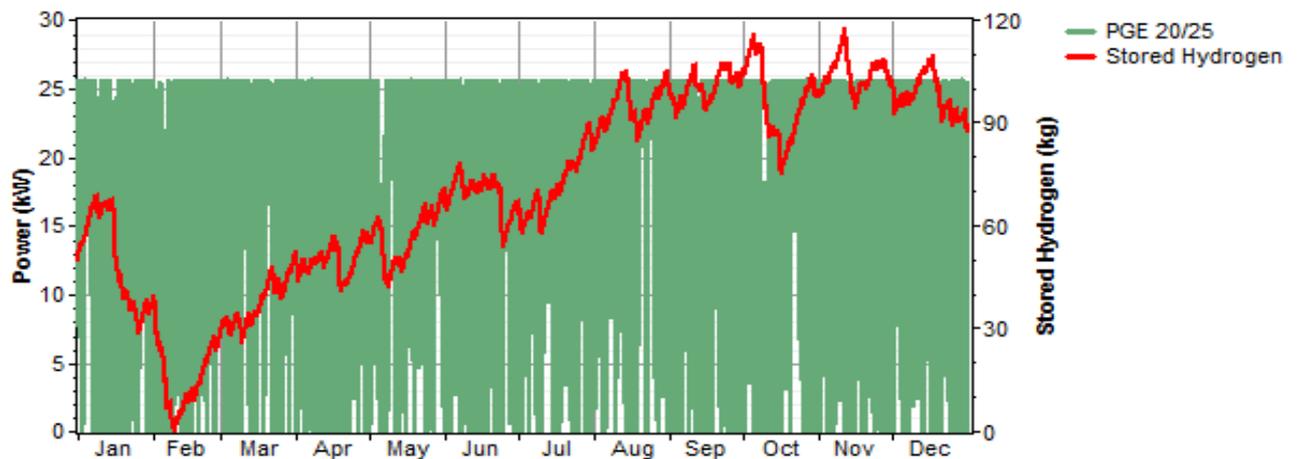


Figure 4.26: Evolution du stockage de l'hydrogène en fonction de la production de l'aérogénérateur

D'après la figure 4.26 on constate que le stockage d'hydrogène dépend de la production électrique de l'aérogénérateur, ce qui signifie que l'énergie produite en excès permet la production, d'une quantité d'hydrogène considérable, qui diminue au fur et mesure que la vitesse du vent diminue.

Pour bien comprendre la relation entre le stockage d'hydrogène et l'énergie produite par l'aérogénérateur ; on montre les figures 4.27 et 4.28 qui représentent la production minimale et maximale d'hydrogène pour les mois de février et novembre respectivement.

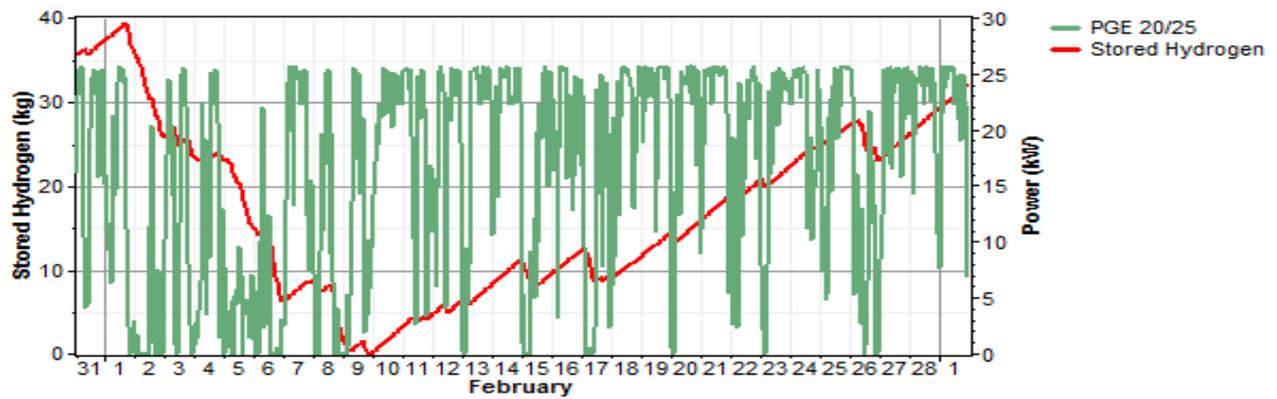


Figure 4.27: Comparaison entre le stockage d'hydrogène et la production de l'éolienne pour le mois de février

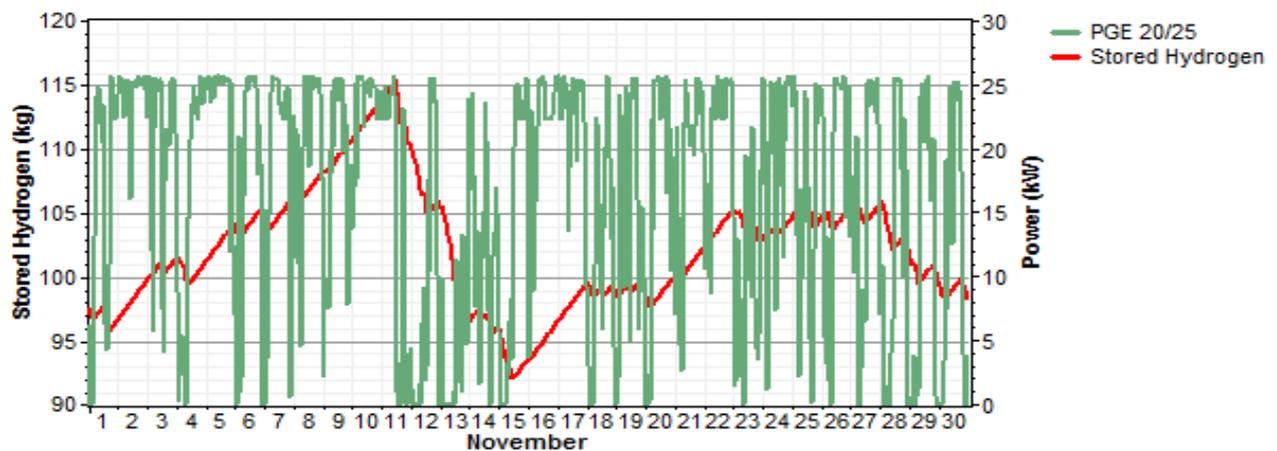


Figure 4.28: Comparaison entre le stockage d'hydrogène et la production de l'éolienne pour le mois de novembre

Les figures 4.27 et 4.28 montrent une nette variation de la quantité d'hydrogène stocké qui est dépendante de la production de l'aérogénérateur, on remarque que cette quantité passe par un minimum durant le mois de février et un maximum en novembre, cette variation est due au caractère intermittent de l'énergie éolienne.

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

Les figures de 4.29 à 4.32 représentant la production éolienne ainsi que la consommation électrique de l'électrolyseur à l'échelle horaire pour un mois de chaque saison. On remarque clairement que l'excès d'énergie éolienne est utilisé par l'électrolyseur pour la production d'hydrogène.

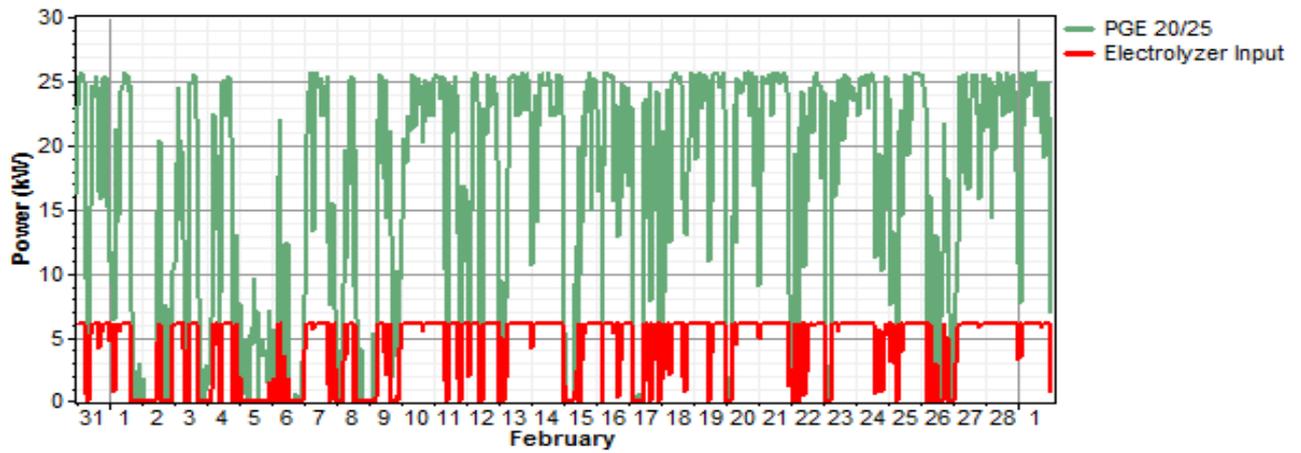


Figure 4.29: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de février

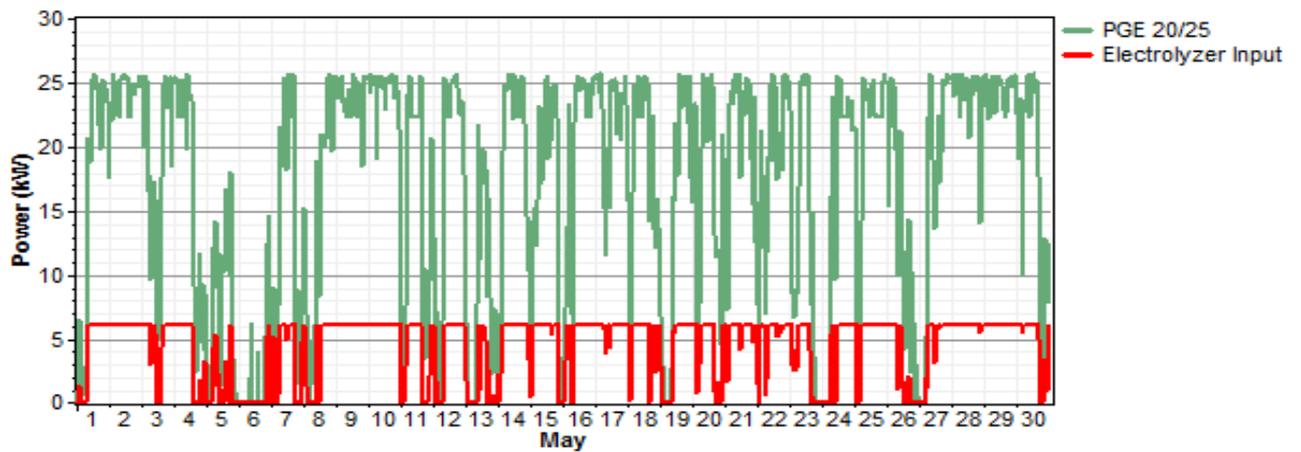


Figure 4.26: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de mai

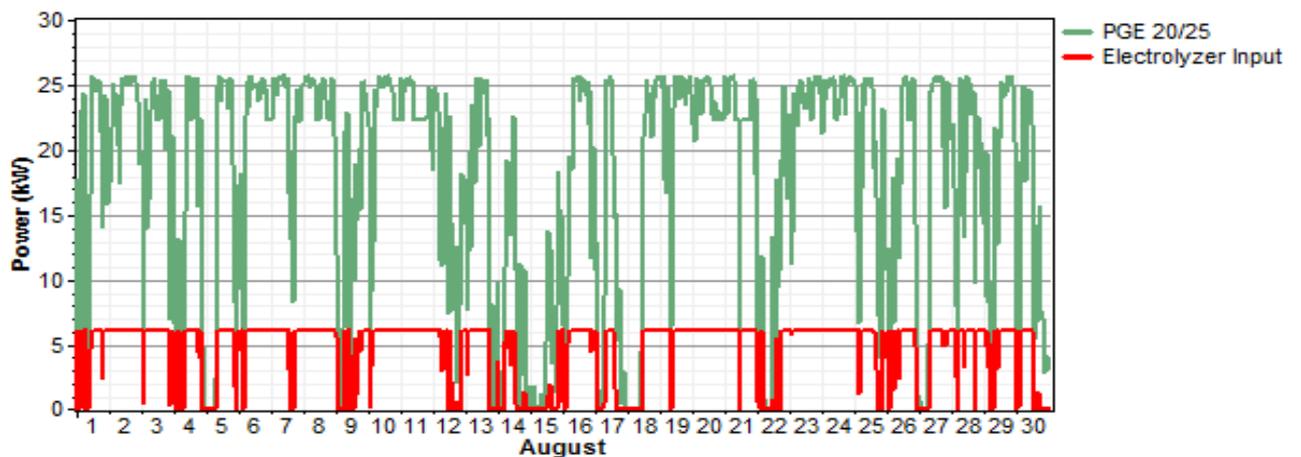


Figure 4.31: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois d'août

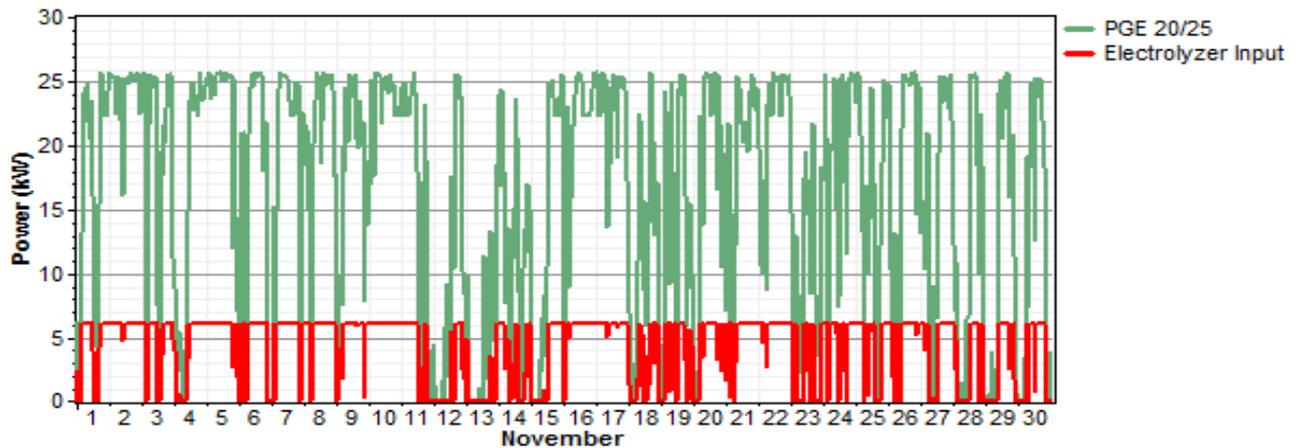


Figure 4.32: Comparaison entre l'énergie éolienne produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de novembre

Les figures de 4.29 à 4.32 représentant la production éolienne ainsi que la consommation électrique de l'électrolyseur pour un mois de chaque saison. On remarque que le déclenchement de l'électrolyseur dépend de l'énergie en excès qui est produite par l'aérogénérateur pour être stocké sous forme d'hydrogène.

4.6.2. Simulation du système éolien-photovoltaïque-pile à combustible :

4.6.2.1. Production énergétique du SEH :

4.6.2.1.1. Production énergétique mensuelle :

Les figures 4.33 à 4.44 représentent une comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour chaque mois de l'année.

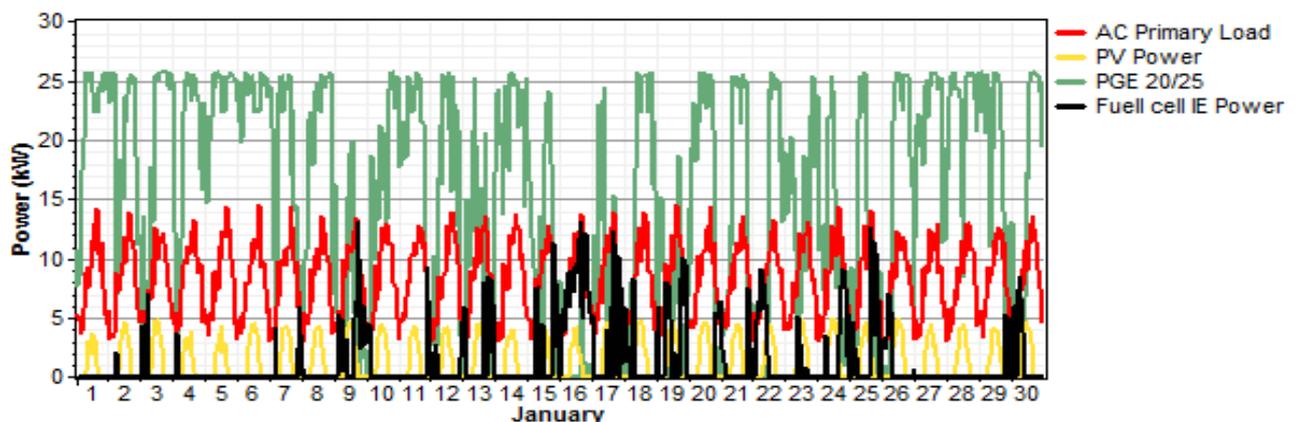


Figure 4.33: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de janvier

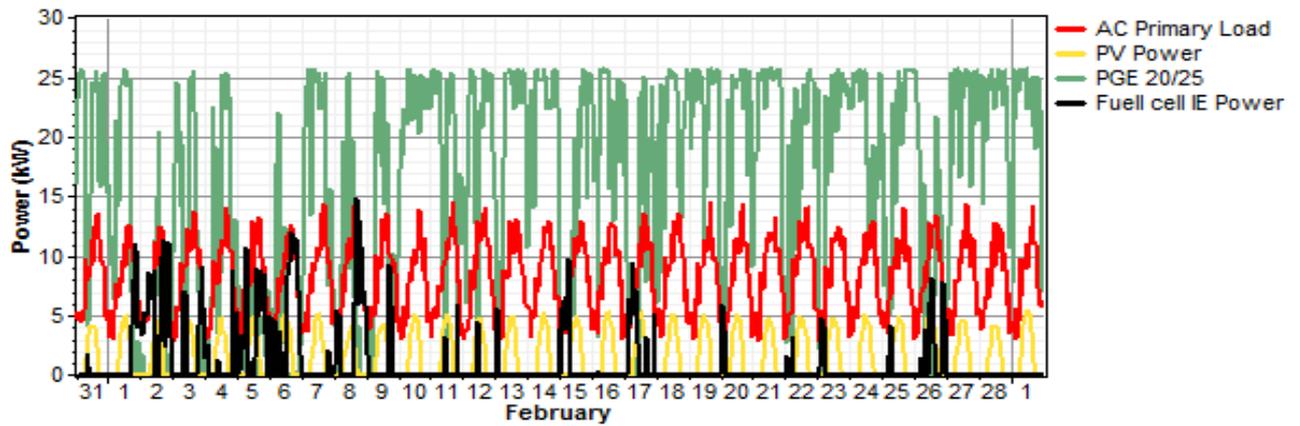


Figure 4.34: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de février

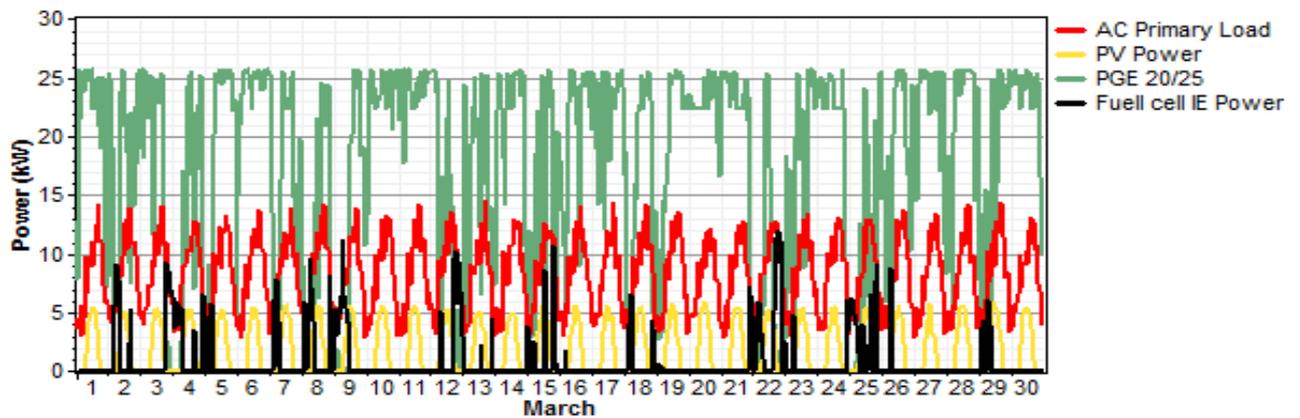


Figure 4.35: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mars

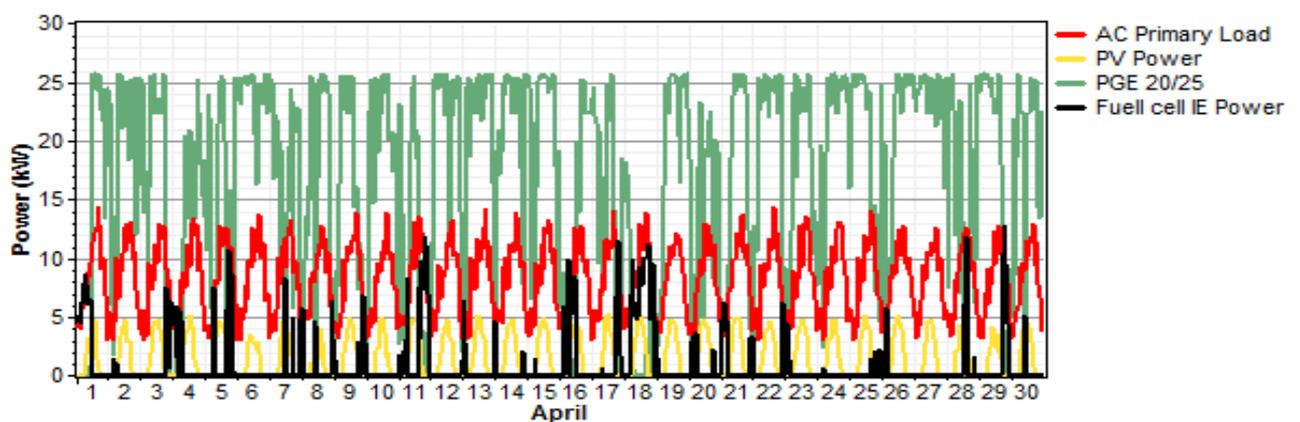


Figure 4.36: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'avril

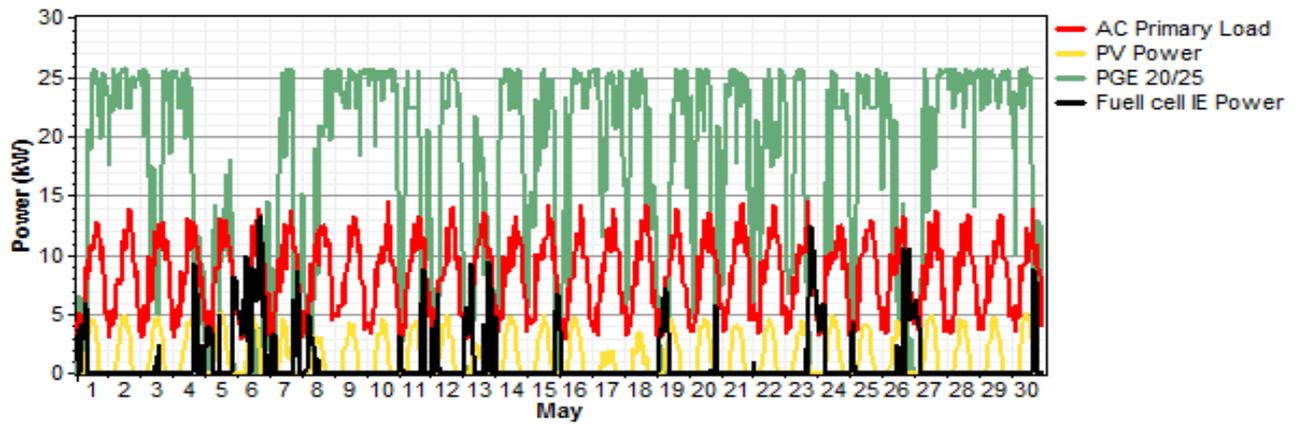


Figure 4.37: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de mai

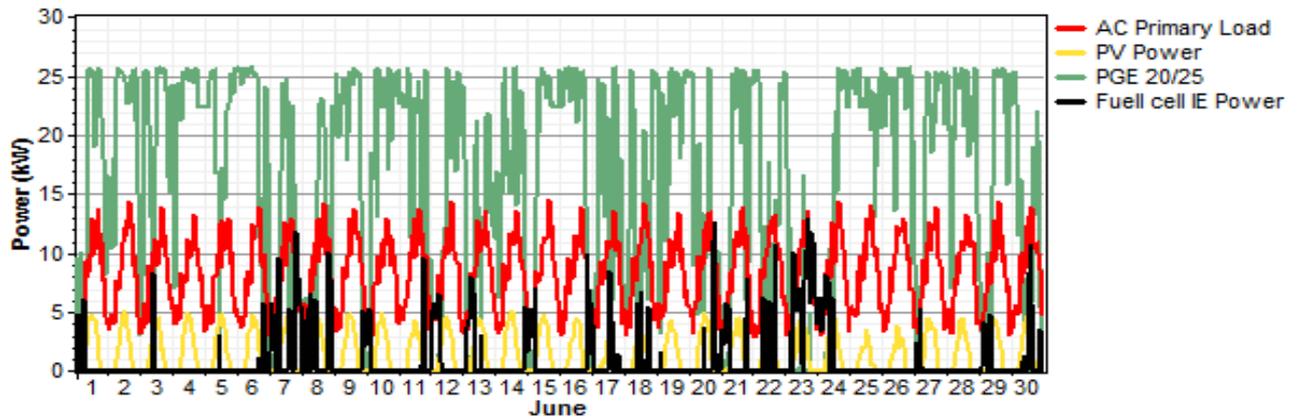


Figure 4.38: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de juin

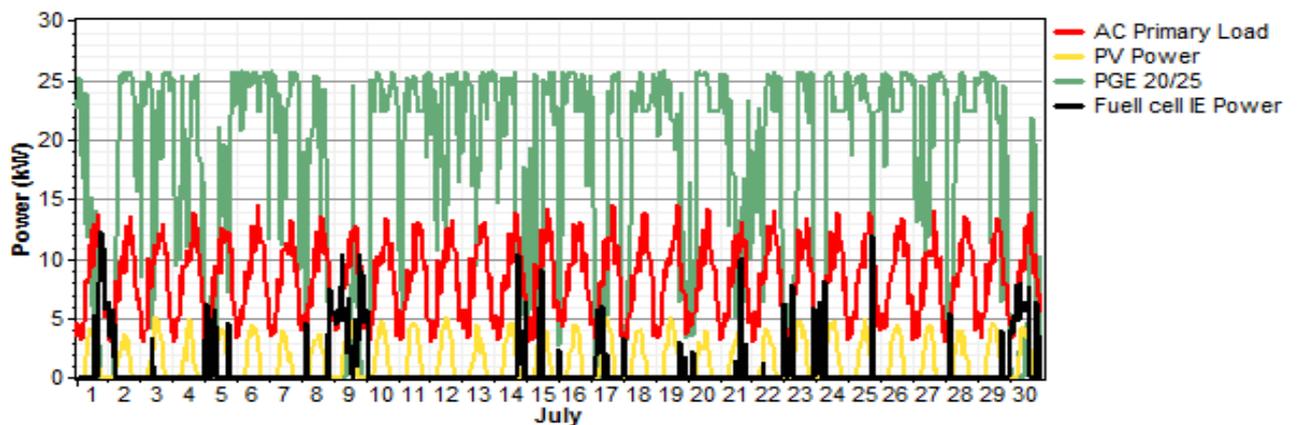


Figure 4.39: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de juillet

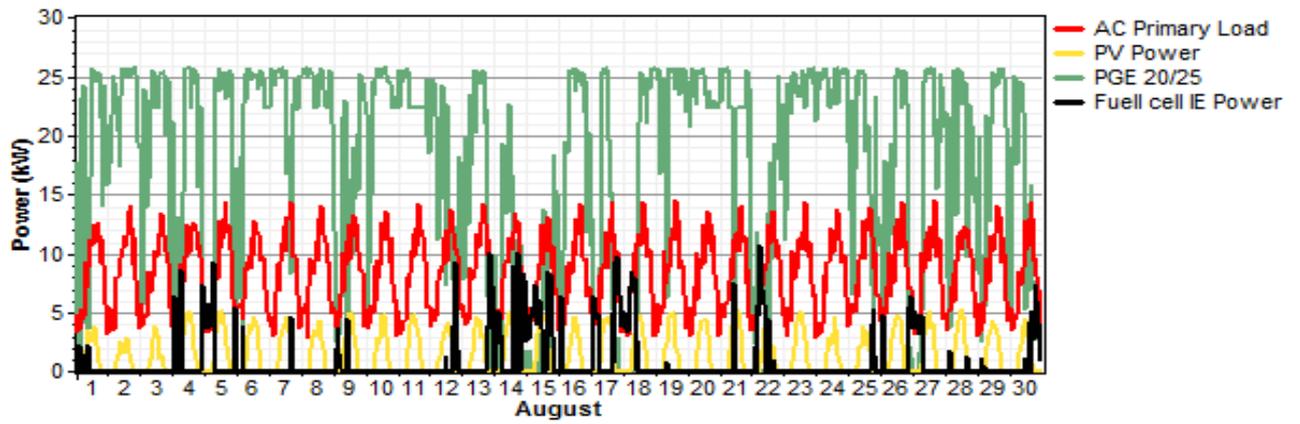


Figure 4.40: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'aout

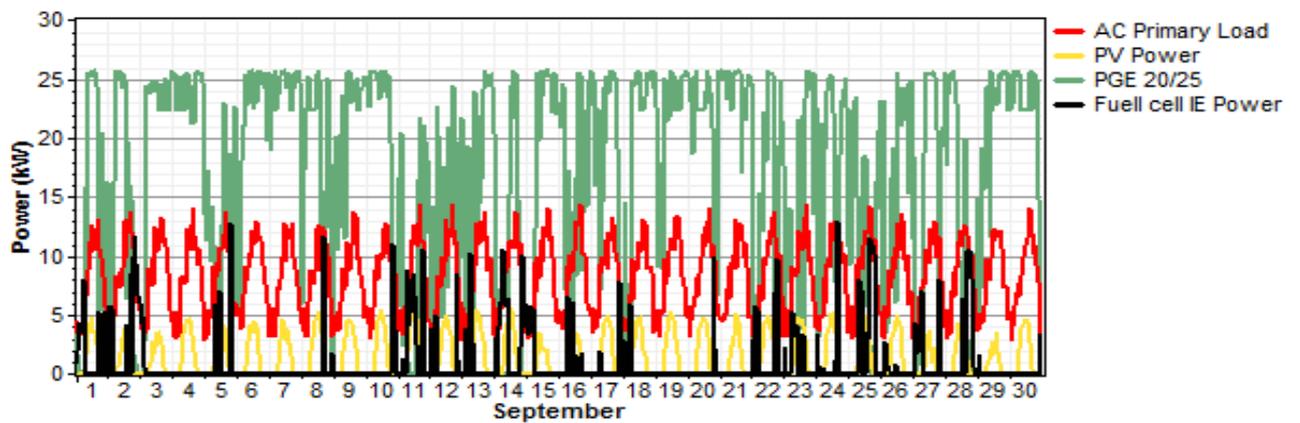


Figure 4.41: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de septembre

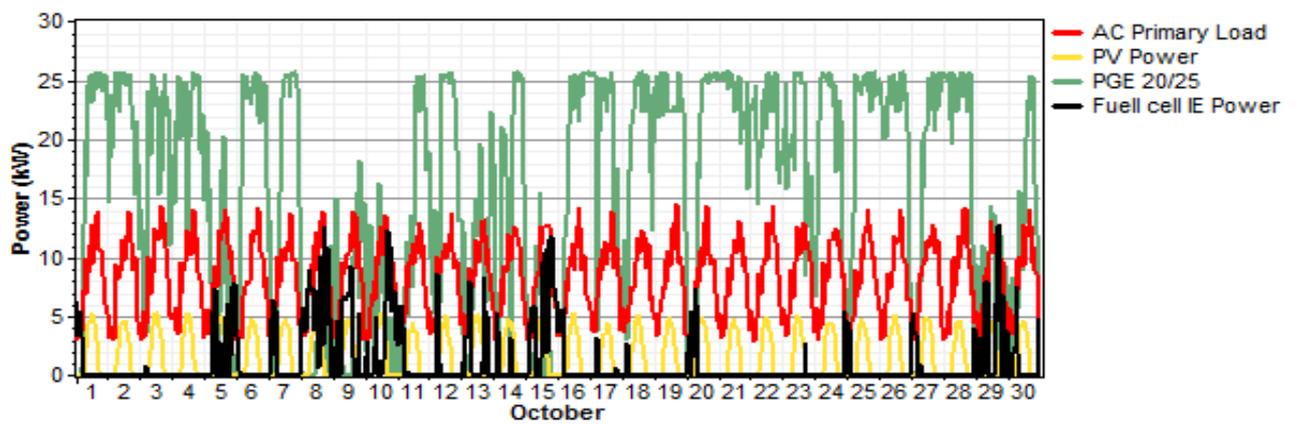


Figure 4.42: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois d'octobre

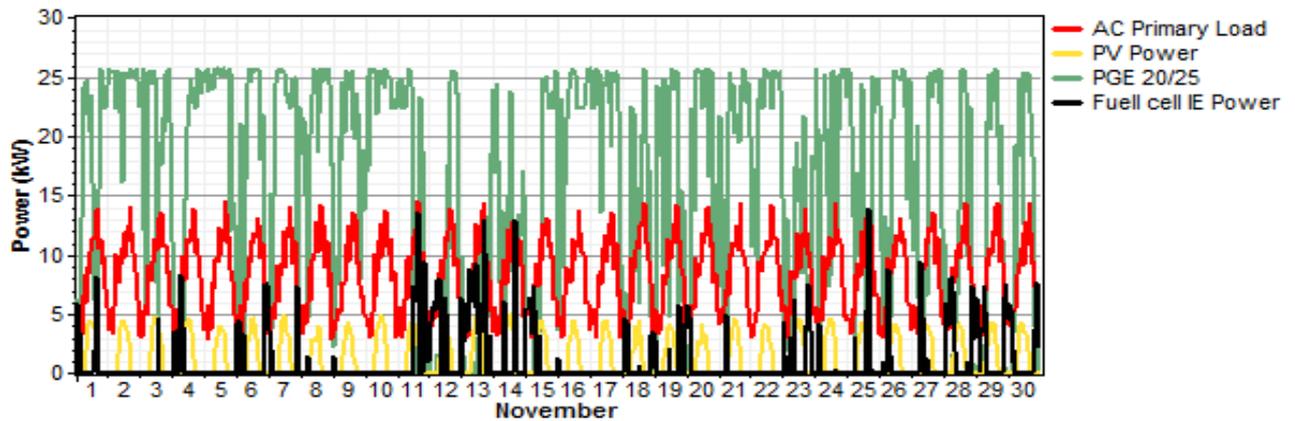


Figure 4.43: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de novembre

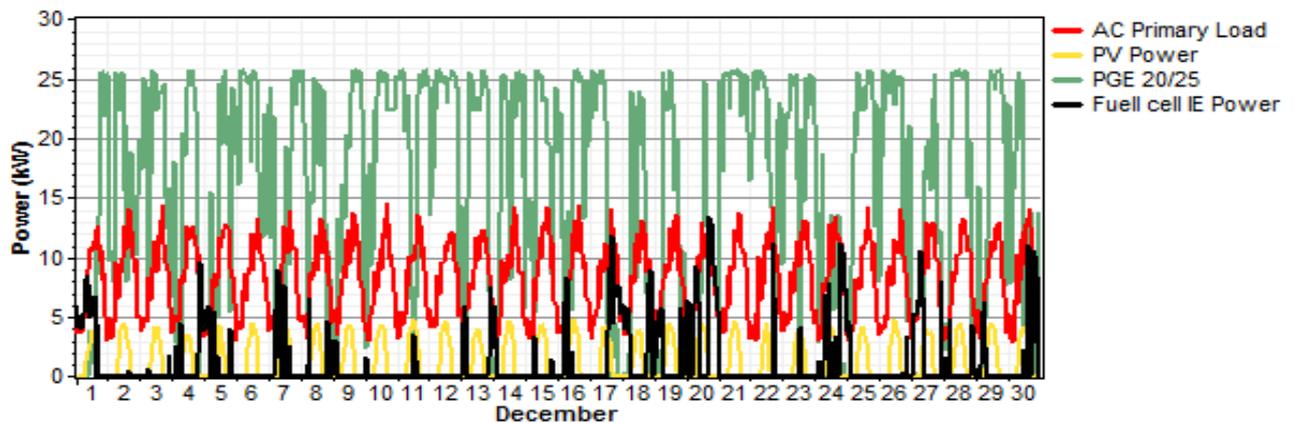


Figure 4.44: Comparaison entre la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et la charge pour le mois de décembre

D'après les Figures 4.33 jusqu'à 4.44, représentant la production électrique du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et la pile a combustible, On observe une alternance entre les différentes sources, on remarque bien que la production est toujours élevée pour l'aérogénérateur surtout pour les mois les plus venté comme mars, juillet et août, cette production est moins importante pour une faible vitesse du vent comme cela est représenté sur les figures des mois de janvier, octobre et novembre ou la production électrique de la pile à combustible est maximale.

Afin de bien comprendre la complémentarité entre les systèmes on a représenté un exemple de production d'énergie moyenne pour un jour de janvier sur la figure 4.45.

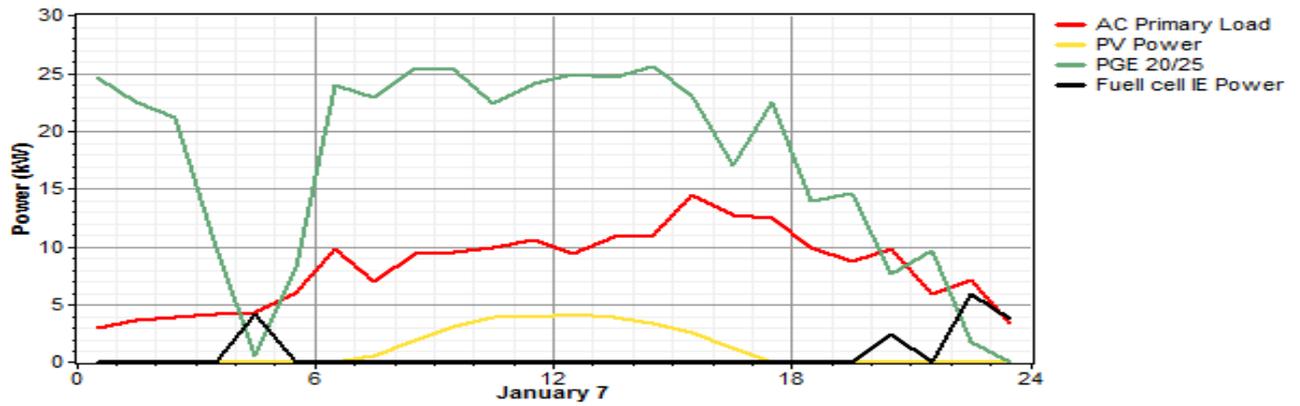


Figure 4.45: Production horaire du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et de la PAC

On remarque bien que la figure 4.45 traduit exactement le principe de fonctionnement de notre système hybride, lors de la diminution de la production de l'aérogénérateur et du générateur photovoltaïque, la PAC fournit l'énergie nécessaire pour combler la demande.

On remarque que lorsque le cumul des deux sources éolienne et PV, présente une production excédentaire, la PAC est en état d'arrêt, tel qu'il est montré sur la figure 4.45 de 1 à 4h et de 5 à 19h. Pour une production déficitaire, la PAC intervient pour satisfaire à la demande.

4.6.2.1.2. Production et consommation annuelle :

Les tableaux 4.11 et 4.12 représentent la production et la consommation d'énergie sur une année.

Tableau 4.11: Production du SEH

Production	kWh/yr	%
PV array	10,734	6
Wind turbine	147,270	88
Fuell cell IE	9,287	6
Total	167,291	100

Tableau 4.12: Consommation électrique

Consumption	kWh/yr	%
AC primary load	72,973	69
Electrolyzer load	32,553	31
Total	105,526	100

D'après les tableaux 4.11 et 4.12 on voit que l'éolienne contribue à 88% de la production d'énergie annuelle alors que le photovoltaïque et la pile à combustible chacune produit seulement 6% d'énergie électrique avec un rendement électrique moyen de la PAC de 42.9 %, Ce qui traduit le choix de l'éolienne PGE 20/25 en terme de performances.

Pour un rendement de 85%, l'électrolyseur consomme 31% de l'énergie électrique produite. Ce qui permet de produire et stocker de l'énergie sous forme d'hydrogène.

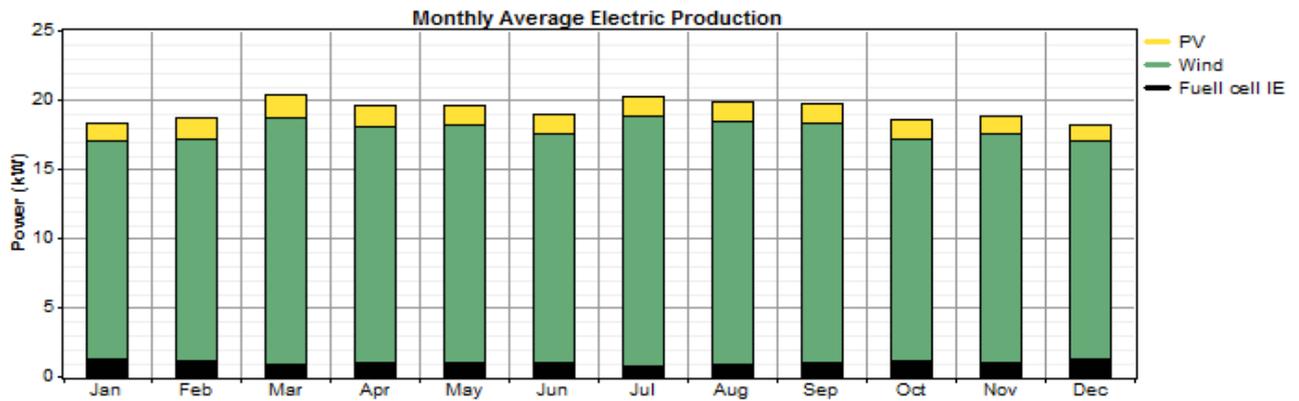


Figure 4.46: Production électrique moyenne mensuelle

On remarque que la contribution de l'aérogénérateur en la production énergétique durant les saisons de printemps et l'été est importante, cette production diminue en hiver et en automne suite à une diminution de la vitesse du vent, pour le générateur photovoltaïque on observe que la production atteint son maximum en hiver et en automne, qui se caractérisent par une production électrique de la PAC.

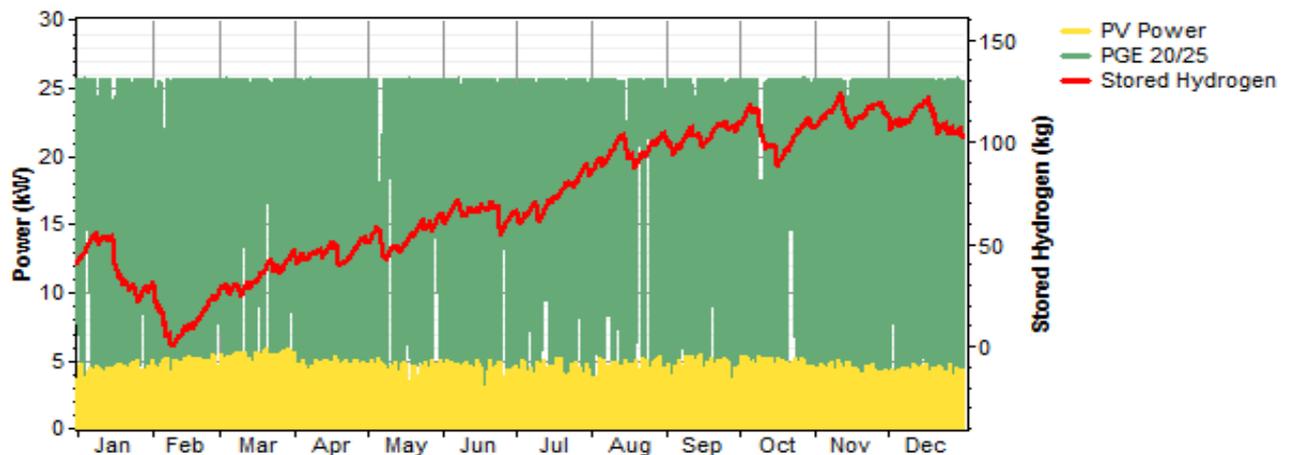


Figure 4.47: Evolution du stockage de l'hydrogène en fonction de la production du générateur photovoltaïque et l'aérogénérateur

D'après la figure 4.47 on constat que le stockage d'hydrogène est proportionnel à la production électrique à partir de l'aérogénérateur et du générateur photovoltaïque, c'est-à-dire l'énergie produite en excès grâce aux deux sources, la quantité d'hydrogène stocké devient plus importante, cette quantité diminue lorsque le cumul présente une déficience, et dans ce cas la quantité stockée d'hydrogène sera utiliser pour alimenter notre PAC.

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

Les figures 4.48 à 4.51 représentent une comparaison entre la production du générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur, la pile à combustible, et celle consommé par l'électrolyseur pour un mois de chaque saison de l'année.

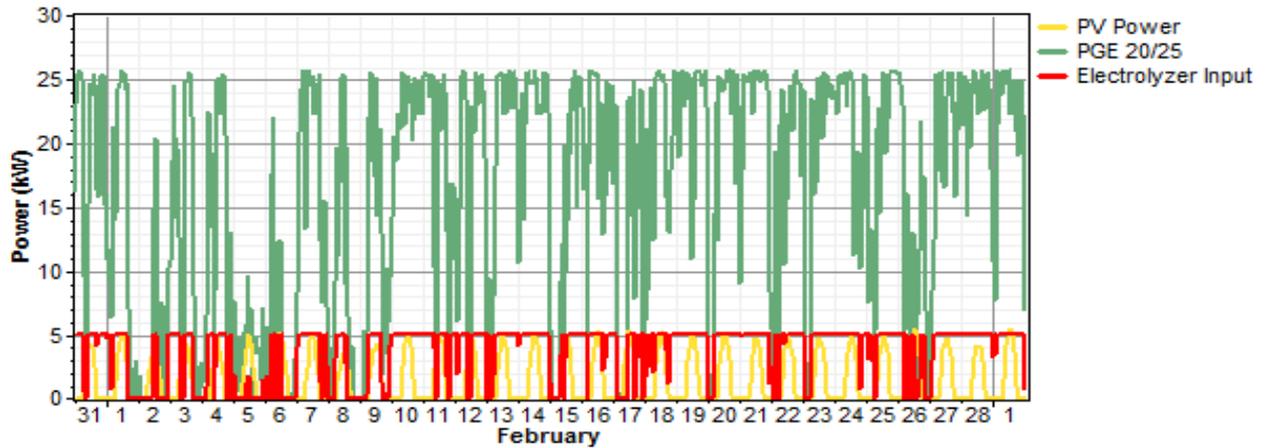


Figure 4.48: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de février

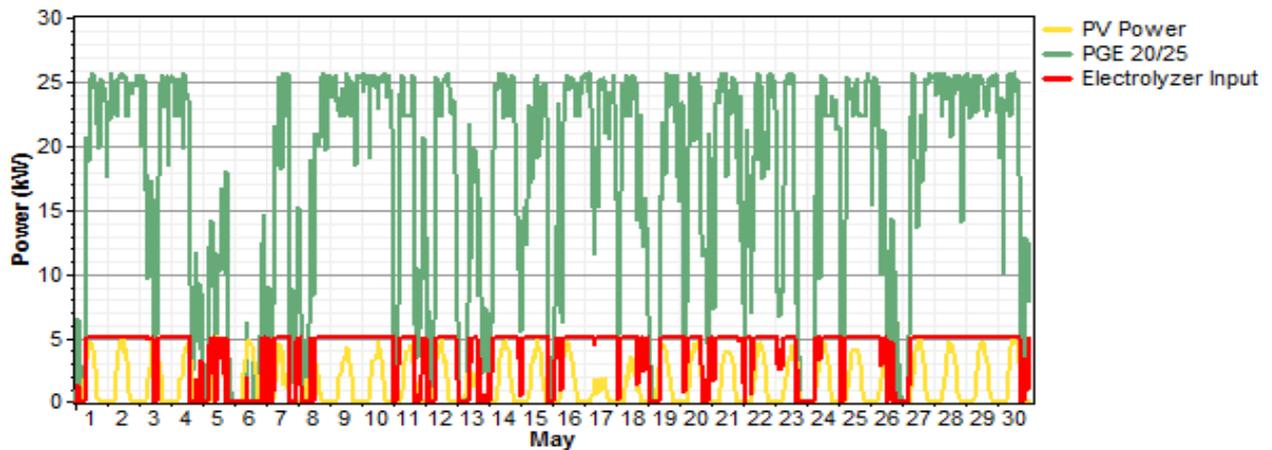


Figure 4.49: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de mai

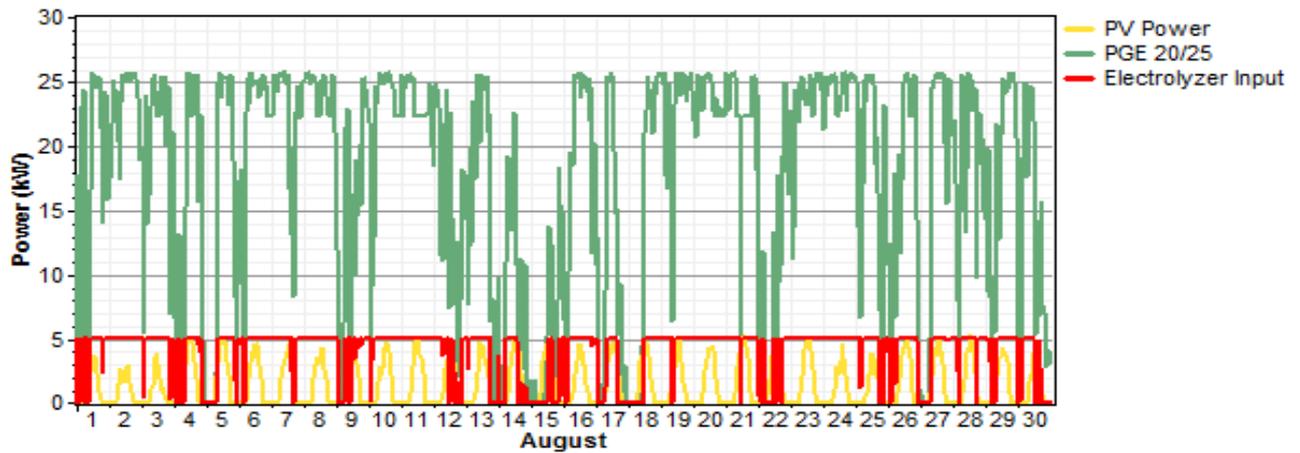


Figure 4.50: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois d'août

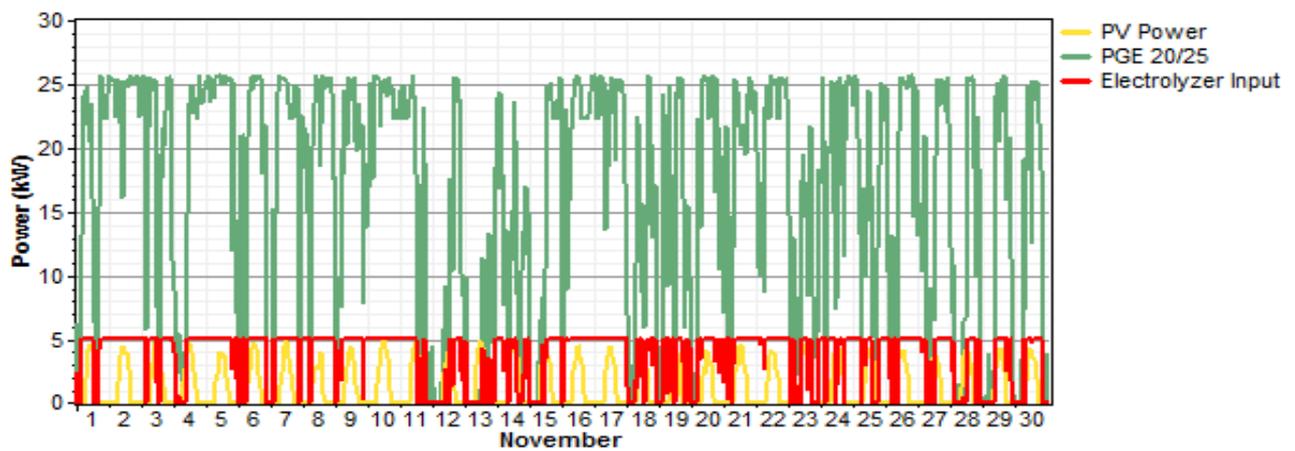


Figure 4.51: Comparaison entre l'énergie éolienne et photovoltaïque produite et celle consommée par l'électrolyseur pour le mois de novembre

Les figures de 4.48 à 4.51 représentant la production éolienne et photovoltaïque ainsi que la consommation électrique de l'électrolyseur pour un mois de chaque saison. On remarque clairement que l'excès d'énergie éolienne est utilisé par l'électrolyseur pour la production d'hydrogène. Donc l'électrolyseur est un moyen de stockage du surplus d'énergie.

Les résultats représentés en les figures 4.48 et 4.51, montrent que la consommation de l'électrolyseur dépend de l'excès du cumul des deux sources.

4.7. 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 4.13 :

Tableau 4.13: Comparaison de la production mensuelle moyenne entre les deux configurations

Mois	Configuration 1		Configuration 2		
	Wind (kW)	Fuel cell (kW)	PV (kW)	Wind (kW)	Fuel cell (kW)
janvier	15,8	1,4728	1,2435	15,8	1,2754
février	16,049	1,4241	1,4523	16,049	1,1562
mars	17,84	1,0136	1,7239	17,84	0,8785
avril	17,095	1,1947	1,4796	17,095	1,0052
mai	17,141	1,166	1,4251	17,141	1,0069
juin	16,534	1,31	1,4254	16,534	1,058
juillet	18,016	0,9958	1,3945	18,016	0,8126
août	17,502	1,0918	1,4249	17,502	0,9019
septembre	17,342	1,2032	1,3984	17,342	0,9857
octobre	16,048	1,3757	1,4797	16,048	1,1255
novembre	16,516	1,2592	1,2522	16,516	1,0402
décembre	15,791	1,4462	1,1687	15,791	1,239

D’après le tableau 4.13 On note que la production de l’aérogénérateur est la même pour les deux configurations et que le taux d’utilisation de la PAC de la deuxième configuration est moins élevé par rapport à la première, cela est dû à la présence d’une troisième source.

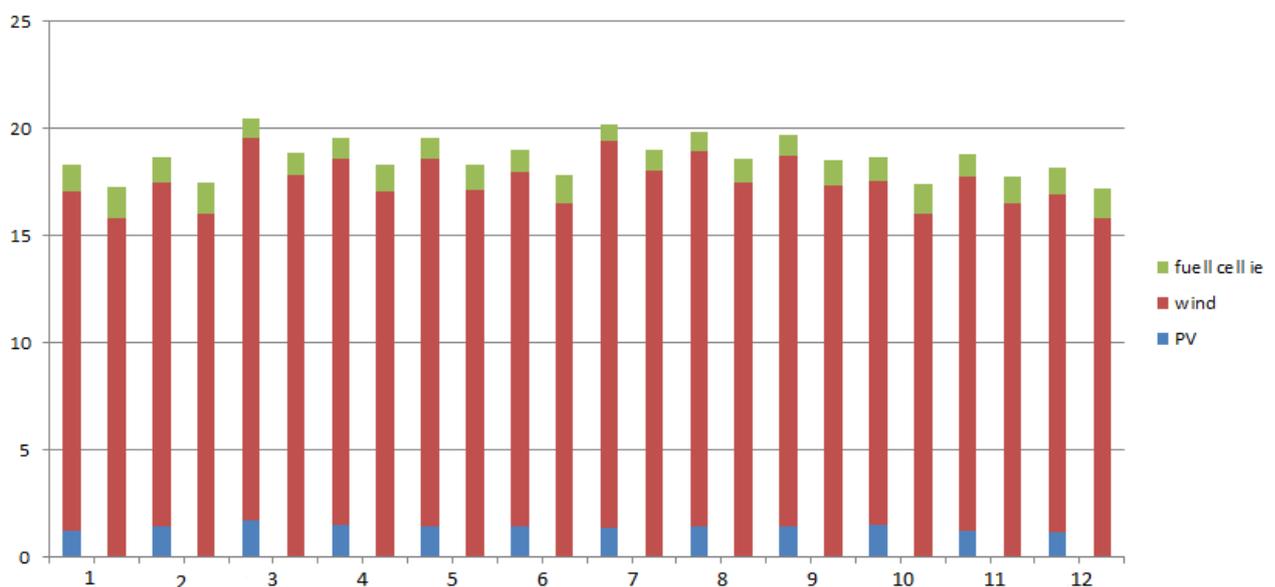


Figure 4.52: comparaison entre le cumul des deux configurations pour chaque mois de l’année

La figure 4.52 Montre que la production de la deuxième configuration eol-pv-pac présente un surplus de production saisonnière par rapport à la première éolienne-PAC. ce surplus varie le long de l’année de 3.2 en automne à 3.8 kW en hiver.

4.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons utilisées le logiciel HOMER afin de dimensionner un système hybride EnR-H2 pour assurer l'électrification d'un ensemble d'habitats situé à Adrar avec une charge de 200 kWh/j. On a trouvé que les dimensions optimales des composants répondant au site d'Adrar pour les deux configurations différent pour les composants suivant : un convertisseur de 40 et 20 kW, une capacité de stockage de 500 et 400 kg, et un électrolyseur de 6 et 5 kW, pour les configurations 1 et 2 respectivement. Par ailleurs les dimensions de l'éolienne est de 25 kW, du générateur photovoltaïque est de 5 kW, et de la PAC de 12 kW sont les mêmes pour les deux configurations.

Les résultats ont montré une bonne complémentarité entre l'énergie produite par les différentes sources et celle produite par la PAC. En effet pour les périodes de faible production, le système fait appel à la PAC pour combler le manque. Donc nous concluons que l'électrolyseur permet le stockage de l'énergie excédentaire sous forme d'un vecteur énergétique appelé hydrogène, pour enfin le restitué par la PAC afin de compenser le manque d'énergie du a l'intermittence des sources renouvelables.

D'après la comparaison effectuée entre les deux configurations, on remarque que la production saisonnière présente une différence considérable, on note que cette différence est due à la présence d'une troisième source qui contribue à la production totale d'énergie. Donc on conclue que la première configuration avec deux sources présente une production déficitaire par rapport à la deuxième configuration, d'où un système a trois sources reste plus fiable qu'un système à deux source en terme de production.

Conclusion générale

Aujourd'hui, les énergies renouvelables sont devenues une réalité mondiale incontournable. L'évolution de la capacité de production d'électricité par ces énergies ne cesse d'augmenter. Cependant, parmi les inconvénients de ces énergies demeure la puissance variable et non garantie. Peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride SEH. La production d'électricité au moyen de ce dernier, combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les régions, isolées et éloignées des réseaux. Le stockage d'énergie via l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau associé aux sources d'énergie renouvelables répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique actuel, et contribue à diminuer les émissions de gaz à effet de serre, en plus de la diversité des ressources énergétiques que présente un système hybride afin d'assurer la continuité et la disponibilité de la production d'énergie électrique.

L'étude paramétrique que nous avons effectué sur la production énergétique des systèmes hybrides EnR avec un stockage intermédiaire en hydrogène, utilisant un électrolyseur et une PAC, nous permis de bien comprends le fonctionnement de chaque élément de l'installation de notre système.

A l'aide du logiciel HOMER nous avons pu simuler notre système, et les résultats on montrés que les systèmes hybrides d'énergie renouvelables-hydrogène présentent un avantage remarquable tel que la diminution de l'utilisation de sources d'énergies fossiles polluantes et épuisables. Aussi, l'utilisation de l'hydrogène comme moyen de stockage permet d'éviter l'emploi des batteries avec tous les inconvénients qu'elles présentent (rendement, durée de vie et pollution).

Cette étude nous a permis de faire une comparaison entre les deux configurations proposé afin d'alimenter une charge de 200 kWh/j. La première présente seulement deux sources éolien-PAC, alors que la deuxième configuration comporte trois sources éolien-PV-PAC, les résultats de la simulation ont montrés qu'un système à trois sources est le mieux adapté pour la région d'Adrar en termes de production d'énergie.

Références Bibliographiques

- [1] BAGHDADI Faiza, 2011, Modelisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables, Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, p 3
- [2] M. Belhamel, S. Moussa, A. Kaabeche, 2002, «Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride Eolien- Photovoltaïque-Diesel», Centre de Développement des Energies Renouvelables, p 49.
- [3] www.systemoffgrid.com, consulté le 05/05/2017
- [4] A. Benachour, W. Boudjemaa, 2016, « Etude et simulation d'un système hybride éolien-moteur à hydrogène », Université de Blida 1, p 26, 60.
- [5] L. Stoyanov, 2011, « Etude des différentes structures du système hybride a source renouvelables », Thèse de doctorat l'Université Technique de Sofia Bulgarie.
- [6] Dan Gao, Dongfang jiang, pei Liu. Zheng Li, Sangao Hu, Hong Xu, 2014, “An integrated energy storage system based on hydrogen storage Process configuration and case studies with wind power”, Energy.
- [7] A. khalilnejad, G.H.Riahy, 2014, “A hybrid wind PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyze”, Energy Conversion and Management.
- [8] Shahid Hussain Siyal, Dimitris Mentis, Ulla Mortberg, saleem Raza Samo, Mark Howells, 2015, “A preliminary assessment of wind generated hydrogen production potential to reduce the gasoline fuel used in road transport sector of-Sweden”, International journal of Hydrogen Energy.
- [9] L. Aiche-Hamane, 2015, « contribution à l'estimation du potentiel d'hydrogène produit par l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, p 49, 50, 53, 56-60, 114-117, 135-137.
- [10] 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.
- [11] 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.

Références Bibliographiques

- [12] Raul sarrias-Mena, Luis M.Fernandez-Ramirez, Carlos Andrés Garcia –Vazquez, francisco jurado, 2015, “*Electrolyzer models for hydrogen production from wind energy systems*”, International journal of Hydrogen Energy.
- [13] Shahid Hussain Siyal, Dimitris Mentis, Mark Howells, -2015, “*Economic analysis of standalone wind -powered hydrogen refueling stations for road transport at selected sites in Sweden*”, International journal of Hydrogen Energy.
- [14] Rodica Loisel, Laurent Baranger, nezha Chemouri, Stefania Spinu, Sophie pardo, 2015, “*Economic evaluation of hybrid off-shore wind power and hydrogen storage system*”, International journal of Hydrogen Energy.
- [15] Pei-Hsing Huang, Jenn-Kun Kuo, Zong-Dain Wu, 2016, “*Applying small wind turbines and a photovoltaic system to facilitate electrolysis hydrogen production*”, International journal of Hydrogen Energy.
- [16] Omid Alavi, Ali Mostafaeipour, Mojtaba Qolipour, 2016, “*Analysis of hydrogen production from wind energy in the southeast of Iran*”, International journal of Hydrogen Energy.
- [17] Mustafa Serdar Genc, Muhammet çelik, Ilyas Karasu, 2016, “*A review on wind energy and wind hydrogen production in Turkey A case study of hydrogen production via electrolysis system supplied by wind energy conversion*”, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [18] Ali Mostafaeipour, Mohamed Khayyami, Ahmad Sedaghat, Kasra Mohammadi, Shahaboddin Shamshirband, Mohammad-Ali Sehati, Ehsan Gorakifard, 2016, “*Evaluating the wind energy potential for hydrogen Production*”, International journal of Hydrogen Energy.
- [19] Babatunde olateju, Amit kumar, Marc Secanell, 2016, “*A techno-economic assessment of large scale wind-hydrogen production with energy storage in Western Canada*”, International journal of Hydrogen Energy.
- [20] www.planete-hydrogene.com, consulté le 10/05/2017
- [21] www.urerms.cder.dz, consulté le 09/04/2017
- [22] Formation sur les Systèmes Photovoltaïques, disponible sur : www.ntc.com.tn, consulté le 09/04/2017
- [23] <https://fr.scribd.com/>, consulté le 11/04/2017
- [24] www.connaissancedesenergies.org, consulté le 14/04/2017
- [25] Mme HAMANE, 2016, Cours Energie renouvelable, Université de Blida 1.
- [26] www.energy.gov.dz, consulté le 11/04/2017
- [27] www.cea.fr, consulté le 15/04/2017

Références Bibliographiques

- [28] [http://Energie solaire photovoltaïque.doc/](http://Energie_solaire_photovoltaique.doc/), consulté le 16/04/2017
- [29] Dr. BELAID LALOUNI Sofia, 2015, Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Université A.MIRA de BEJAIA, p 5.
- [30] www.photovoltaique.info/Les-systemes-photovoltaiques-et.html, consulté le 16/04/2017
- [31] <http://energie-developpement.blogspot.com>, consulté le 16/04/2017
- [32] <http://www.photovoltaique.info/Rendement-d-un-systeme.html>, consulté le 18/04/2017
- [33] www.edf.fr, consulté le 16/05/2017
- [34] <http://www.suisse-eol.ch/>, consulté le 16/05/2017
- [35] BOUNACEUR Amin, 2015, Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie, Université Kasdi Merbah Ouergla, p22
- [36] www.homerenergy.com, consulté le 09/06/2017
- [37] www.solarmad-nrj.com, consulté le 16/04/2017