



MEMOIRE

Présenté au DEPARTEMENT des ENERGIESRENOUVELABLES

Par : BENGHALIA ZAKARIA

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN ENERGIES RENOUVELABLES

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES ET HABITAT BIOCLIMATIQUE

THEME :

**Étude de faisabilité d'un système PV-éolien-hydrogène pour
l'alimentation d'un ensemble d'habitation bioclimatique**

Soutenu le 22 juin 2017

Devant le jury composé de :

Dr DOUMAZ TOUFIKPrésident

Mr LAFRI DJAMELExamineur

Mme GUEBLI WASSILA.....Examinatrice

Dr LILIA AICHE HAMANEPromotrice

2016 – 2017

Résumé

La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Dans ce papier, nous présentons l'étude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage par hydrogène pour un immeuble contient 6 appartements situé dans les régions d'Oran et Bouzareah. Cette étude comprend le dimensionnement du système, l'évaluation de ses performances. La simulation dynamique se fera à l'aide du logiciel Trnsys .Les résultats de la simulation définissent la taille des panneaux photovoltaïques, la puissance de l'éolienne et la capacité de stockage par hydrogène qui alimenteront en électricité l'immeuble.

Abstract

Electricity production from stand alone power system offer a safety supply to the consumer with respecting the environment.

In this paper the design and simulation of hybridstand alone system for application in two different locations Oran and Bouzareah are arried out. This study include a sizing of the system the evaluation of the performance. The simulation is make with TrnsysThe results of the simulation define the optimal type and size of the renewable-based system to be applied in each of the locations examined at the minimum system cost.

ملخص

انتاج الكهرباء من الطاقة المتجددة يوفر قدرا أكبر من الأمن لعرض المستهلك مع احترام البيئة.

في هذا الورقة، نقدم دراسة نظام هجين لطاقة الرياح ولطاقة

الشمسية مع تخزين الهيدروجين لمبنى يحتوي على 6 شقق تقع في مناطق قوهرا نوبوزريعة. وتشمل

هذه الدراسة التحجيم النظام وتقييم

أدائها. وسوف يتم المحاكاة الديناميكية باستخدام برنامج Tmsys. نتائج المحاكاة تحدد حجم الأل

واح الشمسية وطاقة الرياح والقدرة على تخزين الهيدروجين التي ستزود المبنى بالكهرباء.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en Energies Renouvelables, option Energies Renouvelables et habitat bioclimatique au Département des Energies Renouvelables de l'université Saad Dahlab de Blida 1, sous la direction du, *Dr* Lilia Aiche Hamane, que je remercie vivement pour toute l'aide qu'il m'a apportée durant toute la durée de préparation du présent mémoire.

Tout comme je remercie l'ensemble du personnel du personnel du Département des énergies renouvelables pour l'aide qu'ils m'ont apportée durant la préparation du présent travail.

Mes plus vifs remerciements vont au DR Toufik Doumaz, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

Je remercie vivement, Mr Lafri Djamel et Mme Guebli Wassila pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant au jury en qualité d'examineurs.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des enseignants personnes, qui ont largement contribué à son aboutissement.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale.....	1
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides.....	3
1.3. Les systèmes hybrides autonomes (éolien-photovoltaïque) avec stockage (hydrogène).....	4
1.3.1. Avantages et limites des systèmes hybrides (éoliens-photovoltaïques) avec stockage d'hydrogène	5
1.4. Composants d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage d'hydrogène	6
1.4.1. Système photovoltaïque	6
1.4.1.1. Caractéristiques d'un module photovoltaïque	9
1.4.1.2. Avantages du système photovoltaïque	9
1.4.1.3. Limite des systèmes photovoltaïques.....	10
1.4.2. Système éolien	10
1.4.2.1. Composants d'un système éolien	11
1.4.2.2. Avantages de l'énergie éolienne	12
1.4.2.3. Limite des systèmes éoliens	12
1.5. État de l'art.....	13
1.6. Contribution.....	15
1.7. Conclusion.....	16
2.1. Introduction	17
2.2. L'hydrogène	17
2.2.1. Utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique	19
2.2.1.1. Moteurs à combustion interne et turbines à gaz	19
2.2.1.2. Les applications mobiles	19
2.2.1.3.2 Les applications stationnaires	19
2.3. Système PV/Eolienne /pile à combustible	20
2.3.1. Electrolyseur	21
2.3.2. Pile à combustible	22
2.3.2.1 Description de la pile hydrogène/oxygène	22
2.3.2.2. Les différents types de piles à combustible.....	23
2.3.2.3. Synthèse.....	26
2.4. Stockage de l'hydrogène.....	26
2.4.1 Les procédés physiques	27
2.4.1.1 La compression	27
2.4.1.2 La liquéfaction	28

2.4.1.3 Adsorption sur des matériaux carbonés.	28
2.4.2. Les procédés chimiques	29
2.4.2.1. Les hydrures	29
2.4.2.2 NaBH ₄ : Hydrogène on demand	29
2.5. Conclusion	32
3.1. Introduction	33
3.2. Caractéristiques climatiques de l'Algérie	33
3.4. Présentation du logiciel METEONORM	34
3.5. Caractéristiques climatiques des régions choisies	35
3.5.1 Caractéristiques de la région d'Oran	36
3.5.3. Caractéristiques de la région de Bouzareah	36
2.6. Définition de la maison d'étude	39
3.7. Détermination du profil de consommation	40
3.8. Conclusion	43
4.1. Introduction.....	44
4.2. Présentation du logiciel TRNSYS	44
4.3. Modèles des différents composants du système hybride.....	44
4.3.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque	44
4.3.2 Modèle d'une Eolienne	47
4.3.4 Modèle du convertisseur de tension	48
4.3.5 Contrôleur pour SAPS.....	48
4.3.6 Electrolyseur.....	49
4.3.7 Stockage de gaz comprimé.....	50
4.3.8 Pile à combustible alcaline.....	50
4.4. Modèles de rayonnement solaire.....	50
4.5 Simulation sur TRNSYS	52
4.5.1 Configuration du système hybride dans Trnsys.....	52
4.5.2 Les modules utilisés pour simuler le système	52
4.6. Définition de la charge	54
4.7. Dimensionnement du système hybride	54
4.7.1. Choix de l'éolienne	54
4.8. Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	56
4.8.1. Détermination du nombre de panneaux photovoltaïque.....	57
4.9. Dimensionnement du système de stockage par hydrogène.....	58
4.9.1. Dimensionnement de l'électrolyseur.....	58

4.9.2. Dimensionnement de la cuve de stockage	59
4.9.3. Dimensionnement de la pile à combustible.....	59
4.10. Résultats de la simulation du système hybride	60
4.11. Conclusion	65
Conclusion générale.....	66

Introduction générale

Depuis quelques années, le monde est confronté à des enjeux énergétiques et climatiques sans précédent pour lesquels de fortes alternatives sont attendues. Relever ces défis devra passer par une période de transition où le recours aux énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique, et la modération de la consommation dans les comportements seront les principaux vecteurs du changement. Les efforts à entreprendre dans le domaine des énergies renouvelables sont considérables car leur part dans l'énergie finale n'est pas suffisant. Différents facteurs climatiques, énergétiques ou économiques telles que le réchauffement climatique, la raréfaction des énergies fossiles, la libéralisation du marché de l'énergie soutiennent une prise de conscience accrue dans le domaine des énergies renouvelables de la part des usagers ou des décideurs politiques. [7]

D'un point de vue économique, les installations à base d'énergies renouvelables ne sont pas encore compétitives mais il est raisonnable de penser qu'elles le deviendront à court terme, en particulier avec le renchérissement du prix des énergies fossiles. De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès, la tendance est donc de consommer au niveau local l'énergie produite. Dans un tel contexte, il convient de lever les difficultés liées à l'emploi des énergies propres. L'une de ces difficultés est l'optimisation de la combinaison de plusieurs énergies (comme par exemple le soleil, le vent, ...) et l'utilisation des dispositifs de stockage pour pallier au caractère intermittent de ces énergies. [7]

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. Le jumelage des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ... peut constituer un complément ou une alternative aux générateurs diesels utilisés généralement pour la génération d'électricité dans les régions isolées. [7]

L'utilisation de l'énergie hybride (solaire-éolien) est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés telles l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération ou le pompage. [7]

En ce qui concerne notre pays, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance

nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la santé, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie. [2]

Ainsi de part sa situation géographique, l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies solaire et éolienne .En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu (169.440 TWh/an), le plus important de tout le bassin méditerranéen , qui représente 5.000 fois la consommation Algérienne en électricité , notre pays couvre certains de ses besoin en énergie solaire ,Tandis que l'énergie éolienne qui représente un potentiel important dans certaines régions , donne une autre extension pour notre pays pour diversifier sa production d'électricité d'origine renouvelables dans les décennie à venir. [2]

L'objet de ce travail est d'étudier la possibilité de couvrir les besoins électriques d'ensemble d'habitation à partir d'un aérogénérateur et de panneaux photovoltaïques. A partir des données horaires de vitesse du vent, de rayonnement solaire et de la consommation horaire journalière nous allons simulé à l'aide de l'outil TRNSYS la production énergétique du système hybride pour deux différentes régions de notre pays.

Ce travail sera organisé de la façon suivante :

Dans **Le chapitre 1** nous présenterons de façon générale les systèmes hybrides de production d'énergie et plus particulièrement le système éolien- photovoltaïque ou nous définirons et détaillerons ces différents composants ensuite nous ferons un résumé des principaux travaux scientifiques faits sur l'application des systèmes hybrides PV-éolien dans l'habitat.

Le chapitre 2 définit l'hydrogène et ses utilisation et ses application et comment utilise pour stocke l'énergie électrique.

Le chapitre 3 définit le système étudié c'est-à-dire la description de l'ensemble d'habitation, son architecture, son orientation, le profil de consommation. Ensuite nous parlerons du potentiel énergétique des 2 différentes régions sera dédié à la modélisation et la simulation.

Le chapitre 4 on introduira les différentes équations mathématiques qui ont servi à modéliser chaque composant du système, ensuite nous expliquerons le fonctionnement du logiciel TRNSYS ainsi que toutes les étapes nécessaires à la simulation.

Ce chapitre aussi consacré aux résultats de la simulation et à leurs interprétations et nous finirons par une conclusion générale sur le travail que nous avons fait.

Nomenclature

Vco :Tension en circuit ouvert (Volt)

Icc : Courant de court-circuit (Ampère)

LPSP :Loss of Power supply probability. (%)

Gh: Irradiation global sur un plan horizontal (KWh/m²)

Dh: Irradiation diffuse sur un plan horizontal (KWh/m²)

Bn: Irradiation direct sur un plan incliné (KWh/m²)

Ta: Température ambiante (C°)

Soc :état de charge

eqd: Tension de circuit ouvert à la charge maximum (Volt) **gc**,

IL,ref: Photocourant (Ampère)

Io,ref :Courant de saturation inverse au condition de ref (Ampère)

γ :Paramètre de la courbe I(v)

Rs : Résistance série du module pv (Ω)

B: Inclinaison des panneaux pv (°)

Isc:Courant de court circuit (Ampère)

Imp:Courant au mpp (Ampère)

K :Constante de boltzman($m^2Kg s^{-2}K^{-2}$)

Tc:Température du module (C°)

R_s : Résistance shunt du module (Ω)

U_0 :Vitesse du vent en amont (m/s)

P_0 :Pression (Pascal)

A_1 :Surface de balayage du rotor en amont (m²)

U_r : Vitesse à travers le rotor (m/s)

P_{R+} : Pression en amont du rotor (Pascal)

P_{R-} :Pression en aval du rotor (Pascal)

U_w : Vitesse du vent en aval (m/s)

A_w :Surface de balayage du rotor en amont (m²)

ρ :Masse volumique de l'air (kg/m³)

P_{in} : Puissance d'entrée (KJ/h)

P_{out} :Puissance de sortie (KJ/h)

P_{nom} :Puissance nominal (KJ/h)

δ :Déclinaison solaire (°)

TSV : Temps solaire vrai (heures)

TU :Temps universel. (heures)

ω_s : L'angle horaire.

(°) **ψ** :La latitude du lieu. (°)

G_{sc} :La constante solaire (w/m²)

HT :L'irradiation globale sur un plan incline. (KWh/m²)

H_d : La composante diffuse. (KWh/m²)

H_b : La composante directe (KWh/m²)

AFC: pile à combustible alcaline.

ELY: Electrolyseur

PFC,min: la puissance de la pile à combustible minimale (W)

P_{busbar} : la puissance de contrôleur (W)

P_{tot} : la charge totale délivre par les pv et les éoliennes (W)

P_{Load} : La puissance de la charge (W)

P_{Ely,min} : la puissance délivre par d'électrolyseur minimale (W)

P_{Ely,max} : la puissance délivre par d'électrolyseur maximale (W)

A1 : Domaine de la c.v. En amont du rotor.

UR : Vitesse à travers le rotor

PR : Pression juste en amont du rotor

U_w: Velocity far downstream in the rotor wake

A_w : Zone très en aval du sillage du rotor

Liste des tableaux

Chapitre 2 : L'hydrogène

Tableau 2.1. Caractéristiques actuelles des différents types de piles à combustibles	26
--	----

Chapitre 3 : Définition du système et des sites

Tableau 3.1 Moyennes mensuelles du rayonnement, température et vitesse du vent d'Oran issus de Meteonorme.....	37
--	----

Tableau 3.3 Moyennes mensuelles du rayonnement, température et vitesse du vent à Bouzareah.....	38
---	----

Tableau 3.4 Listes des appareils électrique et leurs puissances.....	40
--	----

Profil journalier de consommation pour la période d'hiver.....	41
--	----

Profil journalier de consommation pour la période d'été.....	42
--	----

Chapitre 4 : Modélisation par le logiciel TRNSYS, Résultats et discussions

Tableau 4.1 Modules utilisés dans Trnsys.....	53
---	----

Tableau 4.4 Caractéristiques de l'éolienne de 10kw.	55
---	----

Tableau 4.5 Données constructeur du panneau photovoltaïque	57
--	----

Tableau 4.6 Contribution du photovoltaïque et l'éolienne 10kw dans la charge totale de la semaine pour la région de Bouzareah.....	57
--	----

Tableau 4.7 Contribution du photovoltaïque et de l'éolienne 500 w dans la charge totale de la semaine pour la région d'Oran	57
---	----

Liste de figures

Chapitre 01 : Généralités et états de l'art

Figure 1.1. Schéma général d'une installation hybride éolien-pv autonome avec système de stockage (hydrogène).....	4
Figure 1.2. Coupe transversale d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure 1.3 étapes de fabrication d'un panneau pv au silicium cristallin.....	8
Figure 1.4 panneaux PV au silicium cristallin (à droite monocristallin) a (gauche polycristallin)	8
Figure 1.5. Schéma explicatif d'une éolienne à axe horizontal.....	11
Figure 1.6 types d'éoliennes à axe vertical.....	11

Chapitre 02 : Hydrogène

Figure 2.1 : La filière Hydrogène.....	18
Figure 2.2 : utilisation de l'hydrogène.....	20
Figure 2.3 : système hybride PV/éolien hydrogène.....	20
Figure 2.4 : schéma de fonctionnement d'un électrolyseur.....	22
Figure 2.5 : pile à combustible.....	22
Figure 2.6. Schéma d'une pile à combustible de type AFC.....	23
Figure 2.7 : cuve de stockage d'hydrogène.....	27
Figure 2.8. Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de	30

l'hydrogène.....

Chapitre 03 : Définitions du système et des sites

Figure 3.1 Moyenne annuelle de l'irradiation globale sur une surface horizontale.....	33
Figure 3.2 : Carte de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 50 m du sol.....	34
Figure 2.3 Vue des stations météo algériennes disponible sur le logiciel METEONORM	35
Figure 3.4 Emplacement de la station météo Essenia dans la région d'Oran.....	36
Figure 3.6 : Emplacement du CDER à Bouzareah (Alger).....	38
Figure 3.7 :Plan détaillé de la maison.....	39
Figure 3.8 : Vue de façade de la maison.....	40

Chapitre04: Modélisation par le logiciel TRNSYS, résultat et discussions

Figure 4.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire pour le modèle à 4 paramètres.....	45
Figure 4.2 Modélisation du système hybride dans Trnsys studio.....	52
Figure 4.3 Profil de charge horaire pour une journée caractéristique en été.....	54
Figure 4.4 : courbe de puissance de l'éolienne de 10kw marque AEOLOS.....	55
Figure 4.5 : puissance fournie par l'éolienne de 10kw du 1 au 7 décembre dans la région de Bouzareah.....	55
Figure 4.6 : puissance fournie par l'éolienne de 10kw du 1 au 7 décembre dans la région d'Oran.	56
Figure 4.8 Production de chaque source et le total pour la région de Bouzareah du 1 au 7 décembre.....	60
Figure 4.9 Production de chaque source et le total pour la région d'Oran du 1 au 7 décembre.....	60
Figure 4.10 Production de l'électrolyseur et la production total, la charge pour la région de Bouzareah du 1 au 7	61

décembre.....	
Figure 4.11 Production de l'électrolyseur et la production total, la charge pour la région d'Oran du 1 au 7 décembre.....	62
Figure 4.12 Consommation par AFC et la production totale, la charge pour la région de Bouzareah du 1 au 7 décembre.....	63
Figure 4.13 Consommation par AFC et la production totale, la charge pour la région d'Oran du 1 au 7 décembre.....	63
Figure 4.14 Etat de charge du ballon de stockage H ₂ pour la région de Bouzareah.....	64
Figure 4.15 Etat de charge du ballon de stockage H ₂ pour la région d'Oran.....	65

1.1 Introduction

L'énergie électrique provenant de sources renouvelables, en particulier le vent et le soleil, est considérée comme une alternative de production intéressante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui. Cependant Les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources énergétiques disponibles. Pour surmonter cette limite, la solution à retenir, pour les sites isolés, est certainement le recours et la combinaison de plusieurs sources, telles que les systèmes hybrides éolien-photovoltaïques avec stockage (batterie chimique, pile à combustible...).

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à ce type de systèmes, nous présenterons de manière détaillée les systèmes hybrides éolien-photovoltaïques avec stockage (hydrogène), Nous en décrivons ensuite les principaux composants, avantages et inconvénients. Ensuite, nous exposons une revue des travaux de recherche récents appliqués à ces systèmes particuliers.

1.2. Généralités sur les systèmes d'énergie hybrides

Le terme « Système d'Energie Hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé.

Les systèmes d'énergie hybrides peuvent être connectée aux réseaux électriques ou autonomes, pour le premier cas La production énergétique hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. La connexion des sources hybrides aux réseaux électriques doit respecter certaines normes qui ne sont pas forcément spécifiques au domaine d'énergies renouvelables.

Dans les sites isolés où le réseau n'existe pas, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire que le système hybride possède une autonomie totale. Il est donc impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou hydrogène au système dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées.

Dans les applications existantes, ce sont quasi-systématiquement des systèmes de petite puissance avec des batteries d'accumulateurs au plomb mais ressèment un nouveau type de stockage qui connait un développement considérable c'est le stockage par hydrogène.

Cependant, le stockage représente une part très importante du coût et de l'entretien de l'installation, Dans ce cas particulier, le surcoût est acceptable en comparaison du prix qu'il aurait fallu allouer à l'installation d'une nouvelle ligne électrique. [1]

1.3. Les systèmes hybrides autonomes (éolien-photovoltaïque) avec stockage (hydrogène)

La figure 1.1 donne un exemple typique d'une unité de production hybride non raccordée au réseau couplant deux sources d'énergie éolienne et solaire avec un stockage de l'énergie sous forme d'hydrogène , c'est un réseau électrique complètement autonome à courant continu DC et/ou à courant alternatif AC

Les systèmes hybrides sont souvent classés en deux filières selon le type de nœud électrique et des convertisseurs associés. La première est caractérisée par un couplage des sources autour d'un bus commun alternatif AC, la seconde topologie des systèmes hybrides est fondée sur un couplage avec un bus commun continu DC , La majorité de ces systèmes sont utilisés en sites isolés où l'énergie est produite et directement consommée sur place .

Il existe plusieurs types de stockage mais parmi ces systèmes le plus rentable c'est le stockage d'électricité sous forme d'hydrogène

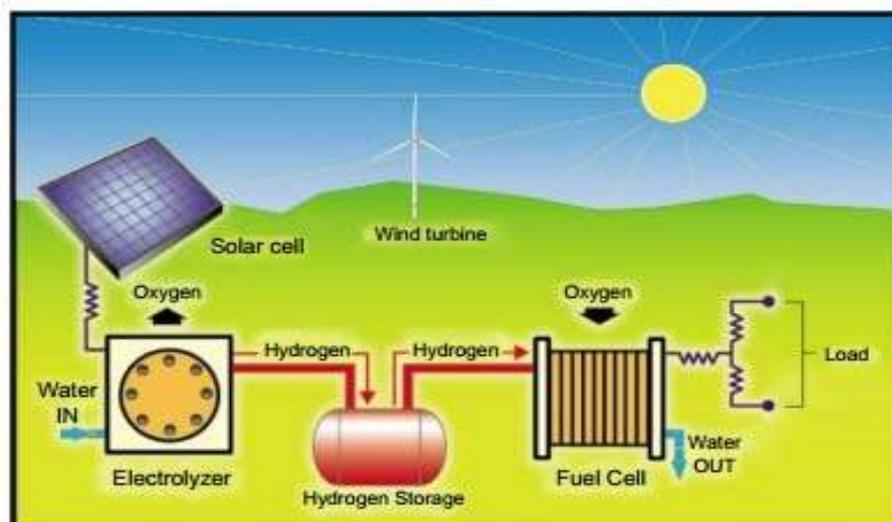


Figure 1.1. Schéma général d'une installation hybride éolien-pv autonome avec système de stockage (hydrogène)

1.3.1. Avantages et limites des systèmes hybrides (éoliens-photovoltaïques) avec stockage d'hydrogène

Les systèmes hybrides les plus répandus sont caractérisés par un couplage éolien-photovoltaïque. L'intérêt de la combinaison de ces deux sources énergétiques est justifié par le fait qu'ils présentent les ressources les mieux partagées. La complémentarité de ces deux ressources est très significative que ce soit à l'échelle annuelle ou à l'échelle journalière. En effet, le rayonnement solaire le plus intense se situe pendant l'été. De même, sur une journée, le rayonnement solaire est plus fort pendant le jour alors que le vent peut souffler aussi la nuit. Cette complémentarité saisonnière et journalière des ressources solaires et éoliennes permet par exemple au site isolé d'avoir une disponibilité de l'énergie plus fiable, laquelle, bien entendu, dépend du site d'implantation. Ainsi, le fait de mettre en place un système hybride en combinant un panneau photovoltaïque et un aérogénérateur avec un générateur de secours à moteur diesel pourrait traiter les besoins en énergie pendant toute l'année. Cependant, le moteur diesel demande un approvisionnement en carburant. Son utilisation dans des sites isolés peut ainsi être polluante, bruyante et économiquement moins viable en comparaison avec les sources d'énergies renouvelables. Dans plusieurs applications, le moteur diesel est évité en incluant dans les systèmes un dispositif de stockage d'énergie par accumulateur électrochimique ou par stockage d'hydrogène synthétisé par électrolyse de l'eau, l'avantage de ce dernier et qu'il est très abondant sur la terre et sa combustion ne génère que de l'eau.

Il permet aussi un stockage à long terme de l'énergie, à l'opposé de la batterie qui ne peut stocker que sur de courtes périodes.

Un autre avantage des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques consiste en leur efficacité environnementale. Au cours de leur fonctionnement, Ils ne génèrent, ni émissions nocives, ni gaz polluants. Ils utilisent seulement l'énergie du soleil et du vent comme « carburant », donc ils créent un impact environnemental faible et contribuent activement à réduire le réchauffement climatique. L'éolienne générerait un peu de bruit selon la distance d'implantation mais sans effet gênant pour l'utilisateur.

Néanmoins, l'hybridation de ces sources d'énergies renouvelables pose certains problèmes. D'abord, compte tenu de leur nature discontinue, Il y a une difficulté à pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. En plus, si l'excès d'énergie ne peut être éliminé, la production doit alors être limitée ou même arrêtée. Cela implique une évaluation précise des ressources renouvelables du site et une conception adaptée du système, optimisant

ainsi les ressources énergétiques et conduisant à une quantité minimale d'énergie non fournie, Ensuite l'hybridation pose le problème de l'interconnexion et de la gestion énergétique. La commande de ces systèmes est fait en fonction de l'état de stockage, Les deux générateurs doivent limiter leurs puissances de sortie lorsque la cuve de stockage de H₂ est complètement chargée et ne peuvent donc plus stocker d'énergie. De même, l'onduleur et la charge doivent atténuer leurs puissances pour arrêter la consommation d'hydrogène quand leur état de stockage atteint un niveau limite inférieur prédéfini.[1]

La dynamique des générateurs d'énergies renouvelables peut aussi causer des problèmes dans le fonctionnement des systèmes hybrides. Citons à titre d'exemple, le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée : en l'occurrence, la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur et de tels changements rapides dans la production d'énergie peuvent générer des problèmes de qualité d'énergie (variation de tension et de fréquence) et même l'arrêt complet du système. Il y'a lieu aussi d'évoquer les effets négatifs d'une surtension que provoquent un court-circuit ou l'arrêt d'une charge importante. [1]

1.4. Composants d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage d'hydrogène

1.4.1. Système photovoltaïque

Le système photovoltaïque convertit le rayonnement solaire en électricité. Il est composé de :- cellules qui sont l'élément de base de l'unité collectant la lumière du soleil.

- modules ou panneaux rassemblant un grand nombre de cellules au sein d'une Unité.

La cellule est constituée de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (S Cd) ou de tellure de cadmium (Cd Te). Elle se présente sous la forme de deux fines plaques [type n et type-p] en contact étroit [jonction n-p], Quand la lumière atteint la cellule cela crée un champ électrique à travers les couches, créant ainsi un flux électrique voir Figure1.2 , Plus la lumière est intense, plus le flux électrique est important. [2]

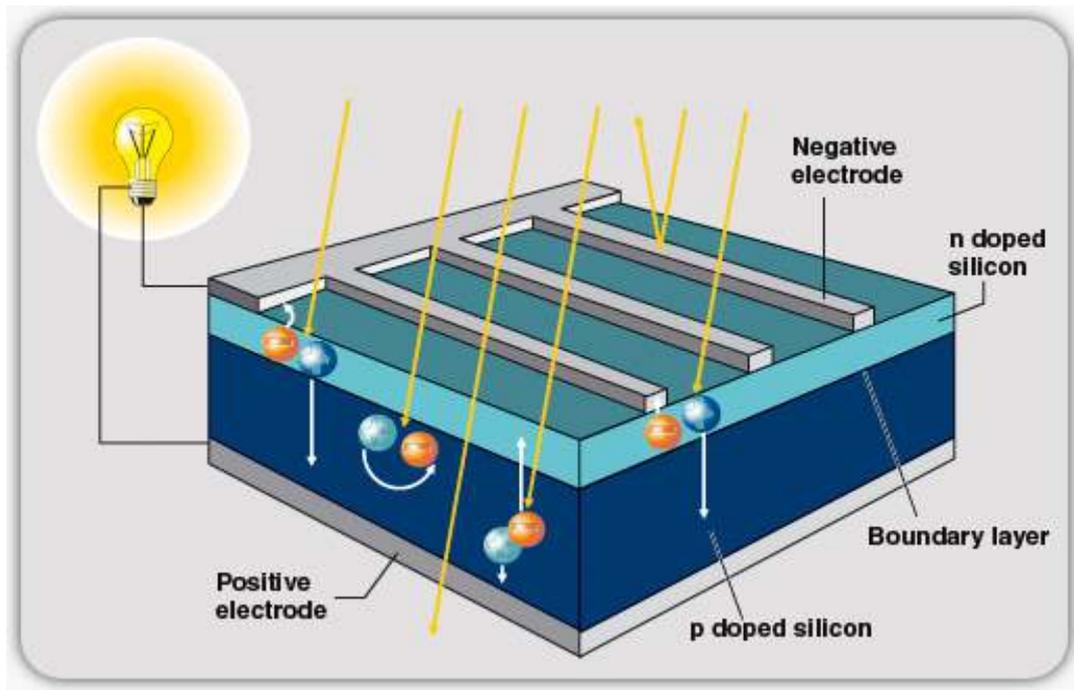


Figure 1.2. Coupe transversale d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée d'une ou deux couches de matériau semi-conducteur, le plus souvent le silicium. Elle est soit tranchée à partir de lingots, soit sous forme de rubans de silicium, soit en couches minces déposées sur un support à bas coût voir figure 1.3 Sa performance se mesure en termes de rendement de transformation de la lumière du soleil en électricité. Dans le commerce, les cellules solaires les plus répandues ont un rendement de 13- 15%, Ce qui signifie qu'environ un sixième de la lumière du soleil frappant une cellule produit de l'électricité. [2]

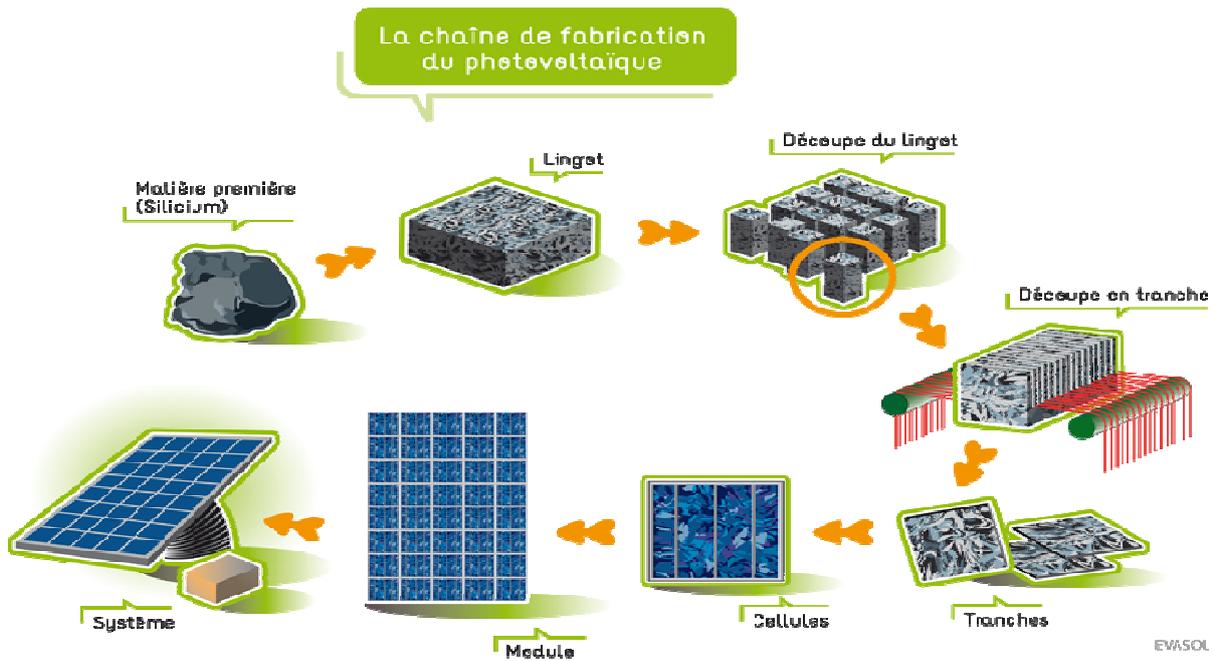


Figure 1.3 étapes de fabrication d'un panneau pv au silicium cristallin

Il existe différentes technologies des cellules solaires:

A-Technologie du silicium cristallin Les cellules en silicium cristallin sont composées de fines tranches coupées à partir d'un seul cristal de silicium (monocristallin) ou d'un bloc de cristaux de silicium (poly cristallin). Figure 1.4. Leur rendement varie entre 12% et 17%. Il s'agit de la technologie la plus répandue, représentant aujourd'hui environ 90% du marché.



Figure 1.4 panneaux PV au silicium cristallin (à droite monocristallin) a (gauche poly cristallin)

B- Technologie des couches minces (Thin Film) Les cellules en couches minces sont constituées de très fines couches d'un matériau photosensible déposées sur un support à bas coût tel que le verre, l'acier inoxydable ou le plastique. Les coûts de production du procédé des couches minces sont inférieurs à ceux de la technologie cristalline qui nécessite davantage de matière première. Cet avantage en termes de prix est toutefois contrebalancé par des rendements généralement moins élevés (entre 5% et 13%).

C- Autres types de cellules Il existe d'autres types de technologies photovoltaïques actuellement commercialisées ou encore à l'étude comme les cellules à concentration, les Cellules flexibles ... etc.

1.4.1.1. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

-Puissance crête : puissance maximale produite par un module dans les conditions standards ensoleillement de 1000 w/m² à l'horizontale, température de 25 c et masse d'air optique de 1,5.

-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 cours circuit.

1.4.1.2. Avantages du système photovoltaïque

Il est très sûr et d'une grande fiabilité. L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Au-delà, la puissance d'une cellule reste néanmoins supérieure à 80% de la puissance initiale. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs par des standards de qualité très élevés au niveau européen.

Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance. Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments, Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique.

Le temps de retour énergétique d'un module diminue constamment. Cela signifie que le temps mis par un module photovoltaïque pour générer autant d'énergie qu'il en a fallu pour le produire est assez court. Sur sa durée de vie, un module produit plus d'énergie qu'il n'en faut pour le fabriquer.

1.4.1.3. Limite des systèmes photovoltaïques

On peut en citer le coût de la technologie de fabrication et la taille de l'installation doit être en accord avec la surface du toit de l'habitat ou du lieu où elle sera implantée.

1.4.2. Système éolien

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

Le système éolien transforme l'énergie du vent en énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome couplé avec un système d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal. [2]

A-Aérogénérateurs à axe Horizontal

L'axe de leur rotor est parallèle au sol voir figure 1.5, Elles sont Les plus utilisées car elles délivrent plus de puissance. Mais elles nécessitent un dispositif d'orientation pour suivre la direction du vent et elles doivent être placées dans des endroits dégagés et espacés de la maison à cause de leur très grande sensibilité au vent turbulent et de la vitesse très grande de ses pales qui peuvent engendrer un vrai problème de sécurité en cas de leur rupture .

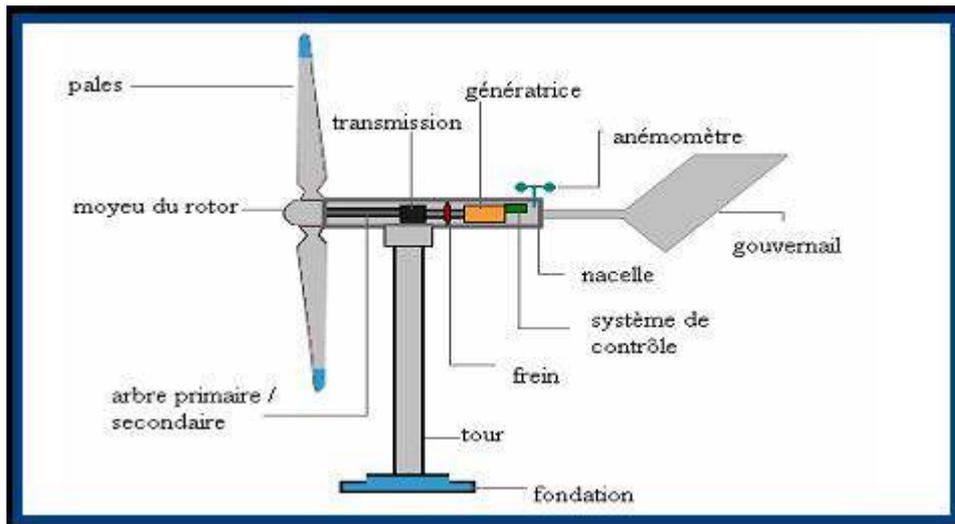


Figure 1.5. Schéma explicatif d'une éolienne à axe horizontal

B-Aérogénérateurs à axe vertical

L'axe de leur rotor est perpendiculaire au sol voir figure 1.6 , Ces éoliennes captent le vent quelle que soit sa direction et ne nécessitent donc aucun dispositif d'orientation mais leur Puissance est faible , ces éoliennes sont plus adaptées à une utilisation sur des toits d'immeubles ou de maison car elles sont moins sensible à l'incidence du flux .

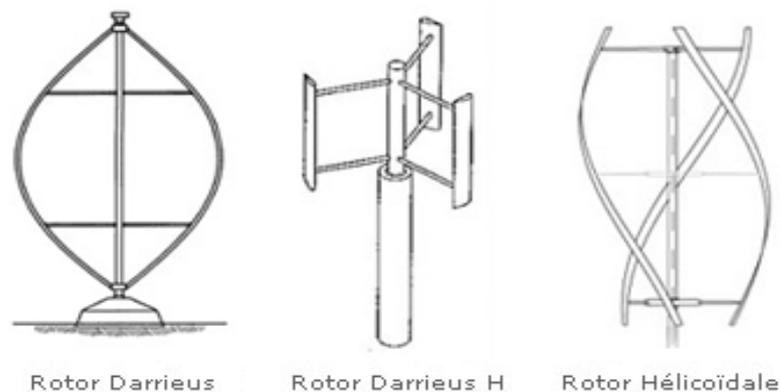


Figure 1.6 types d'éoliennes à axe vertical

1.4.2.1. Composants d'un système éolien

-**Les pales** : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor. Elles peuvent être fabriquées en bois, en lamellé-collé, en alliages d'aluminium ou en matériaux composites.

-Le moyeu : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation. C'est en général, une pièce d'acier moulée.

-L'arbre primaire (ou arbre lent) : il relie les pales au multiplicateur.

-Le multiplicateur: il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.

-L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.

-Le générateur électrique : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut être un dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

-Le mât : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure, Sa hauteur est importante plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente. Pour les éoliennes à axe horizontale il est fixé au sol grâce à des pylônes en acier ou en béton armé. Ces supports peuvent être autoporteurs, haubanés, rabattables, carénés ou à treillis.

-Les outils de mesure du vent : la girouette pour la direction et les anémomètres pour la vitesse.

1.4.2.2. Avantages de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux énergies fossiles c'est une énergie propre qui n'a aucun impact néfaste sur l'environnement, Elle constitue un bon complément du système photovoltaïque et elle est bien adaptée pour les sites isolés ventés.

1.4.2.3. Limite des systèmes éoliens

- La sécurité : le mât doit être robuste et l'éolienne bien fixée pour éviter les accidents. Dans les régions froides, la glace peut s'accumuler sur les pales des éoliennes, causer de fortes vibrations et être projetée à grande distance.

-Voisinage : avant de faire l'acquisition d'un système éolien il faut prendre en compte l'aspect esthétique et le bruit qui peut déranger le voisinage.

-Faune ailée locale : il faut éviter d'installer le système éolien sur un parcours migratoire ou à un endroit où de nombreux oiseaux font leurs nids ou se nourrissent.

-Interférences électromagnétiques : les systèmes éoliens produisent parfois des interférences électromagnétiques qui compromettent la réception des programmes radiophoniques ou de télévision.

1.5. État de l'art

Markvart(1996) [3] a utilisé une simple méthode de construction graphique pour dimensionner de façon optimale un système hybride PV-éolien, pour cela il a considéré les moyennes mensuelles de l'irradiation et de la vitesse du vent. Cependant seulement deux configurations ont été prises en compte (le système PV et batterie seul ou le système PV et éolien seul), plusieurs facteurs importants comme l'inclinaison des modules PV ou la hauteur de l'éolienne n'ont pas été pris en compte, les résultats ont montré que le système hybride est plus rentable que les systèmes PV seul ou éoliens seul.

A. D. Babul et al (1996) [4] ont proposé une méthode qui utilise une approximation de trois densités de probabilité au lieu de deux, qui sont la diminution de l'énergie stockée, l'augmentation de celle-ci ou le fait qu'elle reste constante, L'approximation de trois densités de probabilité augmente la précision du dimensionnement du système sans augmenter l'effort ou le temps de calcul de l'ordinateur.

S. Diaf et al (2006) [5] ont fait une Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar en utilisant les données des moyennes mensuelles et le mois le plus défavorable. Les résultats montrent que la méthode du mois le plus défavorable présente un coût du système plus élevé par rapport à celle de la moyenne des valeurs mensuelles par an, mais elle est plus fiable.

L. Aïche-Hamane et al (2007) [6] ont fait une étude qui donne une estimation de la production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne deux aspects ont été considérés. L'estimation de la production par trois types d'aérogénérateur et l'énergie requis par le processus d'électrolyse. Les données de sept sites du sud algérien ont été utilisées. Les résultats montrent que pour la même vitesse mais avec des éoliennes de puissances différentes on n'obtient pas la même production d'hydrogène pour les différents sites.

Dhaker Abbes et al (2010) [7] ont utilisé un algorithme évolutionnaire (génétique) pour déterminer l'impact économique et écologique du cycle de vie du système. L'analyse a montré qu'il faut 4 ans pour amortir le coup écologique de fabrication du système. Les résultats

montrent aussi que l'éolienne est plus efficace énergétiquement et moins polluante que les panneaux PV.

Hatti Mustapha(2010)[8] : il a fait une modélisation et contrôle des systèmes hybride PV/pile à combustible, après une introduction du contexte énergétique et des principes énergétique fondamental, le logiciel qui a été utilisé c'est matlab/simulink les résultats est utilisé pour vérifier les performances du système sous différents scénarios au moyenne de donnée climatique réelles et des profils de charge pratique.

E. Akyuz et al (2011) [9] ont étudié un système hybride constitué d'un aérogénérateur de 10 kw et de panneaux photovoltaïque de 1kw pour alimenter un site d'élevage d'animaux qui consomme 20.33 kWh/jour, les données solaire de radiation et les vitesses du vent sont utilisé pour dimensionné le système hybride ,la production d'hydrogène à partir du surplus d'énergie électrique est aussi étudié. Les résultats sur Matlabsimulink ont montré que l'efficacité énergétique du système (eolien-electrolyseur) est meilleur que celle du (PV-electrolyseur).

Jing Li et al [2012] [10] ont élaboré un algorithme simplifié utilisant une méthode itérative pour le dimensionnement d'un système hybride PV/éolienne /Batteries. La simplification consiste à fixer la puissance de l'éolienne et de dimensionner juste les panneaux PV en considérant que la charge de la batterie est constante. La configuration optimale peut être trouvée en essayant toutes les configurations pour atteindre un cout du système minimum.

GregorisPanayiotou et al (2012) [11] ont utilisé l'outil de simulation TRNSYS pour modéliser un système hybride PV-EOLIEN autonome pour électrifier une maison sur deux sites différents mais qui présentent le même type de climat méditerranéen (Nicosie à chypre et Nice en France).Les résultats montrent que le site de Nice présente de meilleurs résultats que Nicosie à cause d'un meilleur profil de vent.

Chong Li et al (2013) [12] ont utilisé l'outil HOMER pour étudier la faisabilité technico-économique d'un système hybride autonome éolien /PV pour une maison en Chine. Les résultats ont montré que 72% de l'énergie électrique provient du solaire et que 28% proviennent de l'éolienne mais que le cout de installation hybride est plus important que le cout du photovoltaïque ou l'éolienseul.

Akbar Maleki et al (2015) [13] ont dans leurs travaux évalué les performances de différents algorithmes évolutionnaires pour satisfaire la demande en énergie en tenant compte du LPSP

,les résultats montrent que l' algorithme ABSO a montré de meilleurs résultats que les autres (IHSBSA, IHS, IPSO, PSO, TS, and SA) et que le systèmes PV-éolien-batterie a le cout le plus élevée pour des LPSP de (0%, 0.3% et 1%) alors que le système PV-batterie et plus adéquat pour un LPSP de l'ordre de 5 % .

FontinaPetrakopoulou et a (2015) [14] ont fait une simulation d'une centrale électrique hybride autonome pour alimenter une ile méditerranéenne isolé .la centrale combine des panneaux photovoltaïque avec des éoliennes couplé avec un stockage électrique et un système de génération d'hydrogène. Les résultats ont montré que le surplus de production annuelle d'électricité et de 17,9 %, sans compté la production en hydrogène de l'électrolyseur qui constitue une autre source de revenu pour la communauté

Pei-Hsing Huang et al (2015)[15] ont fait une simulation de la production d'hydrogène pour un véhicule électrique à pile à combustible (FCEV) en examinant la production d'un système d'électrolyse de l'hydrogène alimenté par un système hybride (PV-EOLIEN). Les résultats de la simulation sur Matlab- simulink ont montrés que la production d'hydrogène augmente lorsque l'électrolyseur est chauffé à une température de 60 c°, la production de l'hydrogène augmente de 0,1% par rapport à une température de l'électrolyseur à 40°

Xiangmin Pan et al (2016) [16] ont fait une étude statistique d'évaluation des risques pour une station de ravitaillement de véhicules électrique construite en chine .le système est constitué de panneaux photovoltaïque et d'aérogénérateur couplé à un système de stockage d'hydrogène, les résultats ont montré que la défaillance du compresseur constitue la majeure partie des problèmes rencontré ,et que pour réduire le risque de rupture du réservoir en cas de flammes, tous les réservoirs à hydrogène doivent être refroidis Avec des quantités importantes en eau.

1.6. Contribution

Notre travail consiste à dimensionner une installation hybride constituée de panneaux photovoltaïques et d'un aérogénérateur pour couvrir les besoins électriques d'un immeuble.

A partir des données horaires de vitesse de vent, du rayonnement solaire et de la consommation horaire journalière nous allons simuler à l'aide de l'outil TRNSYS la production énergétique du système hybride pour deux différentes régions de notre pays.

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre une brève description des systèmes d'énergie hybride a été présentée. Les principales notions liées à la technologie utilisée dans les systèmes à énergies hybrides ont été données, ainsi que les avantages et les inconvénients de ces systèmes, les principaux travaux faits sur les systèmes hybrides ont aussi été abordés.

2.1. Introduction

Un problème qui accompagne toutes les énergies renouvelables est le stockage.

L'utilisation de l'énergie électrique est toujours plus efficace pour la consommation une fois produite. Le réseau électrique est une sorte d'espace de stockage pour cela. Avec le développement et la disponibilité des systèmes de conversion énergétique solaire et éolienne, il y aura un besoin de stocker l'énergie électrique, pour une utilisation nocturne. L'hydrogène peut stocker de l'énergie comme elle est stockée aujourd'hui par le pétrole et le gaz naturel. C'est pourquoi l'hydrogène est appelé un vecteur d'énergie secondaire, l'énergie primaire étant celle avec quoi l'hydrogène est produit. Propulser par l'avènement des énergies renouvelables la production d'hydrogène en vue d'utilisation énergétique semble avoir le plus d'avenir.

C'est une nouvelle solution énergétique crédible pour une très large palette d'usages (notamment le stockage énergétique à grande échelle et à longue durée)

Ce système est composé en générale d'un électrolyseur, d'une cuve de stockage et d'une pile à combustible.

2.2. L'hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers avec 75 % en masse et 90 % en nombre d'atomes. Il est le carburant du soleil : 600 millions de tonnes d'hydrogène sont dont l'énergie provient de réactions de fusion thermonucléaire de l'hydrogène. Relativement à son abondance dans l'univers, l'hydrogène est très rare dans l'atmosphère terrestre. Sur terre, l'hydrogène n'existe pas à l'état libre mais seulement à l'état combiné dans l'eau dont les molécules sont composées de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.

L'atome d'hydrogène est composé d'un proton et d'un électron. C'est le plus léger des atomes. Il se présente le plus souvent sous la forme d'un gaz : le dihydrogène (H₂).

L'hydrogène est aussi un gaz non toxique et très énergétique capable de produire de la chaleur et de faire fonctionner des moteurs par combustion directe (moteurs à combustion interne) avec de l'eau pure comme résidu. Il peut même produire directement de l'électricité dans les piles à combustible avec, là encore, comme seul résidu, de l'eau.

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. Il est donc nécessaire de

le produire. De plus, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir de l'électricité fournie par les énergies renouvelables (éoliennes, capteurs photovoltaïques) permettrait sans polluer, à la fois de stocker, de transporter et de réutiliser ces énergies, c'est-à-dire de compenser leurs deux principaux inconvénients d'être intermittentes.[1]

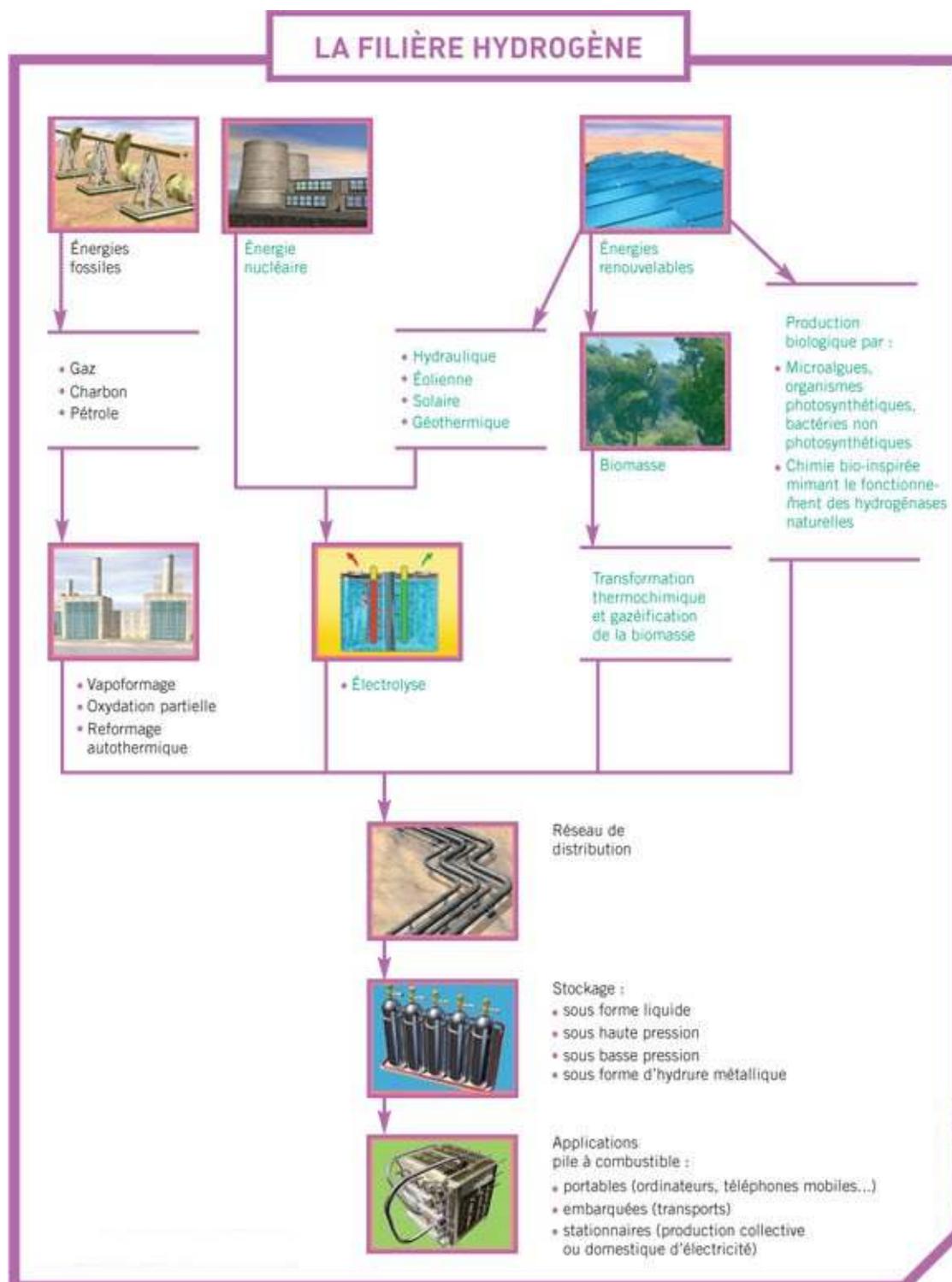


Figure 2.1 : La filière Hydrogène

2.2.1. Utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique

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

2.2.1.1. Moteurs à combustion interne et turbines à gaz

Dans un moteur à combustion interne traditionnel, l'hydrogène peut être utilisé comme combustible [5]. 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. La combustion de l'hydrogène dans un moteur à explosion produit également de la chaleur, sous forme de vapeur d'eau, ainsi qu'une faible part d'oxyde d'azote. On peut produire aussi de l'électricité en alimentant un moteur à combustion interne ou une turbine à gaz en hydrogène ou en un mélange hydrogène/carburant fossile afin de réduire les émissions en CO₂ de ce type de machines énergétiques

2.2.1.2. Les applications mobiles

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, dite 2G, la première correspondant aux véhicules électriques actuellement en cours de développement).

2.2.1.3. Les applications stationnaires

Pour un développement écologique et économique, le couplage d'un système photovoltaïque-éolien peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement. Mais cela reste insuffisant, donc une nouvelle technologie basée sur le couplage d'un système hybride de type (photovoltaïque-éolien) avec la pile à combustible, s'avère très intéressante. La prise de conscience de la raréfaction prochaine des ressources pétrolières, et de la nécessité d'aller vers des combustions propres ne rejetant pas ou peu de CO₂. la technologie et la rentabilité restent encore à étudier ce système car on est loin de connaître les optima technico-économiques. Il ouvre une voie nouvelle qui est celle de la

production et de l'utilisation de l'électricité à travers des piles à combustibles, comme par électricité dans les applications stationnaires comme l'habitat

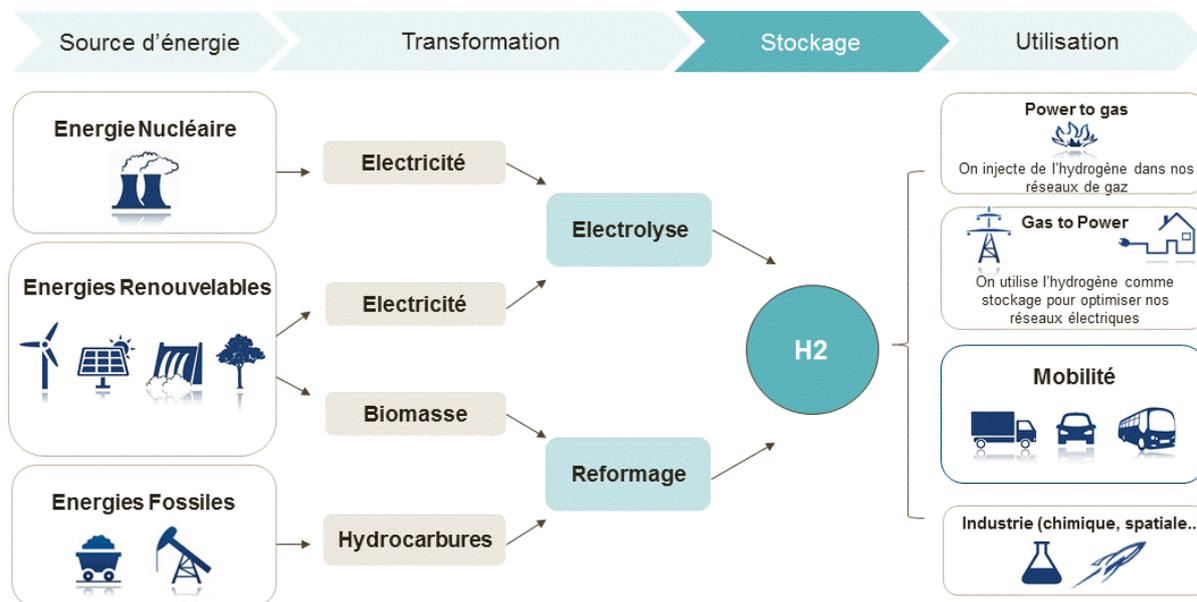


Figure 2.2 : utilisation de l'hydrogène

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.

2.3. Système PV/Eolienne /pile à combustible

Ce système est composé de système hybride PV/éolien qu'il est présente au chapitre précédent, l'énergie produite par le système PV/éolien on va la stocke sous forme d'hydrogène, on passe par l'électrolyseur, cuve de stockage, la pile à combustible.

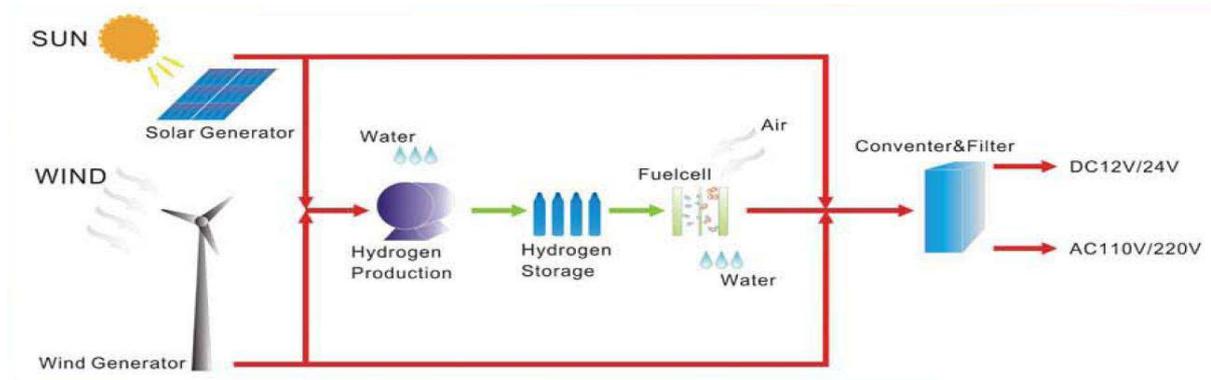
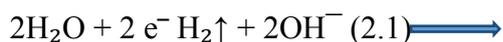


Figure 2.3 : système hybride PV/éolien hydrogène

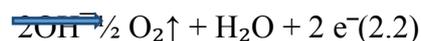
2.3.1. Electrolyseur

L'électrolyseur produit de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau. L'électrolyse de l'eau peut être considérée comme le processus inverse d'une pile à combustible alimentée par hydrogène, figure.1.23. Contrairement à la réaction électrochimique se produisant dans la pile à combustible, l'électrolyseur convertit l'énergie électrique (courant continu) en énergie chimique stockée en hydrogène. L'électrolyse de l'eau est un processus établi depuis longtemps, qui a commencé au début du dix-neuvième siècle. Nicholson et Carlisle, chimistes anglais, ont découvert la première fois en 1800 le phénomène de la décomposition électrolytique dans l'eau acidulée. Cependant, le milieu alcalin est préférable dans l'industrie de l'électrolyse d'aujourd'hui. Actuellement, il y a trois principaux types d'électrolyseur disponibles sur le marché : alcalins, PEM, et oxyde solide.[1]

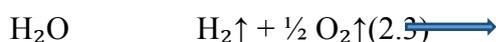
Les électrolyseurs alcalins et à technologie PEM sont des dispositifs bien établis avec des milliers d'unités en fonction, alors que l'électrolyseur de l'oxyde solide est jusqu'ici non fondé. L'électrolyse alcaline de l'eau est la technologie la plus dominante aujourd'hui. Dans cette section, le principe de l'électrolyse alcaline de l'eau est passé en revue. Un électrolyseur alcalin utilise l'hydroxyde de potassium (KOH) comme solution d'électrolyte pour le transfert des ions d'hydroxyle. La figure.1.24 montre le schéma de principe d'un électrolyseur alcalin. À la cathode, deux molécules d'eau sont réduites électrochimiquement (par les deux électrons de la cathode) à une molécule de H₂ et de deux ions d'hydroxyle (OH⁻)[1]. La réaction à la cathode peut être exprimée par:



Sous l'effet d'un champ électrique externe, les ions d'hydroxyle sont forcés de se déplacer vers l'anode par le diaphragme poreux. À l'anode, les deux ions de la molécule d'hydroxyle et les deux électrons perdus à l'anode, sont déchargés dans une 1/2 molécule de O₂ et une molécule d'eau. La réaction chimique à l'anode est :



En combinant les deux équations ci-dessus, la réaction chimique globale à l'intérieur de l'électrolyseur est :



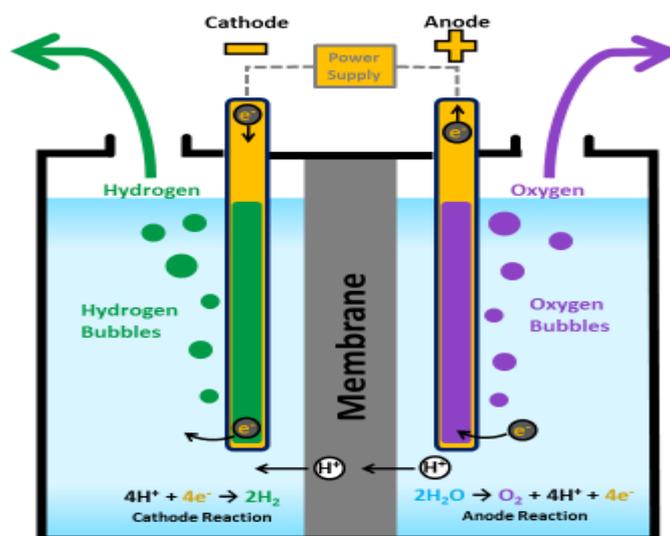


Figure 2.4 : schéma de fonctionnement d'un électrolyseur

2.3.2. Pile à combustible

L'hydrogène peut réagir avec l'oxygène pour libérer de l'énergie électrique et de la chaleur selon le procédé inverse de l'électrolyse de l'eau. La pile à combustible est donc un dispositif qui produit de l'électricité à partir de la réaction suivante :



A l'instar de toute pile électrochimique, la pile à combustible est composée de deux électrodes et d'un électrolyte. Le combustible et le comburant proviennent d'une source externe.

L'électrode négative (anode) est alimentée en hydrogène et l'électrode positive (cathode) est alimentée en oxygène. L'anode et la cathode sont ensuite mises en contact avec un électrolyte qui permet le transport des ions [1].



Figure 2.4 : pile à combustible

Différents types de piles à combustible ont été inventés. Les principes de base sur lesquels repose la technologie demeurent identiques. 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)

2.3.2.1 Description de la pile hydrogène/oxygène

Une pile à combustible est constituée des trois principaux éléments suivants:

- l'anode qui est alimentée par un combustible (hydrogène, méthanol, etc.) ;
- la cathode qui est alimentée par un comburant (oxygène) ;
- l'électrolyte, solide ou liquide, qui sépare les deux électrodes, assure la diffusion des ions intermédiaires de la réaction d'oxydation du combustible.

L'électrolyte doit empêcher le passage des électrons qui passent à travers le circuit électrique.

L'oxydation électrochimique de l'hydrogène est réalisée à une anode d'un matériau catalytique conducteur, constituant le pôle négatif de la pile :



Parallèlement la réduction électrochimique de l'oxygène se produit à une cathode catalytique (contenant également du platine dispersé), constituant le pôle positif de la pile:

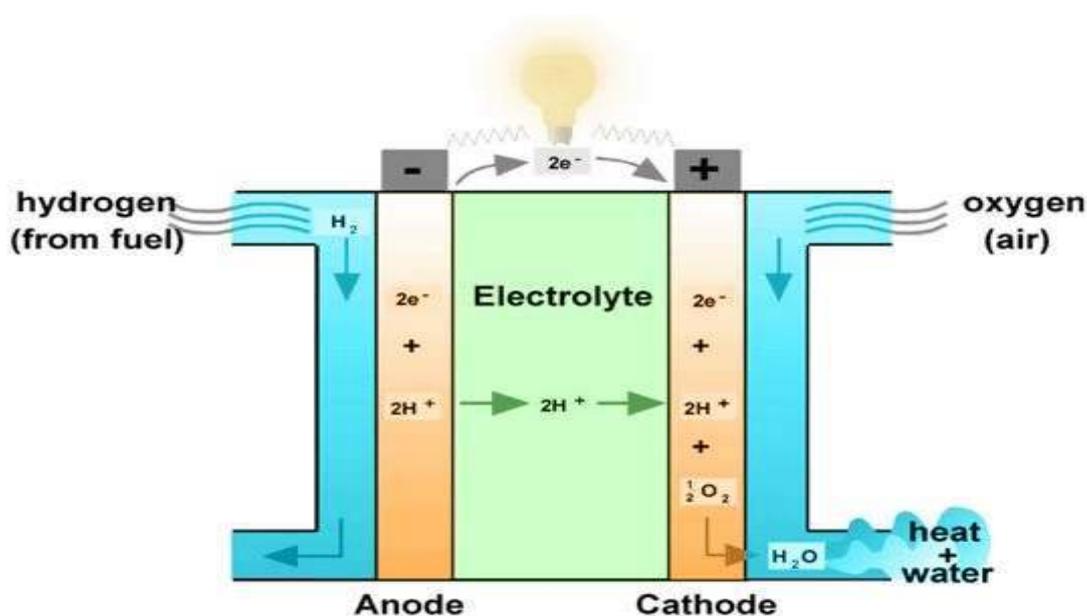


Figure 2.5. Schéma d'une pile à combustible de type AFC

2.3.2.2. Les différents types de piles à combustible

Les piles à combustible sont couramment classées selon la nature de l'électrolyte qui détermine la température de fonctionnement optimale.[17]

A) La pile alcaline (AFC)

Cette pile est la plus anciennement développée, elle a été utilisée pour les programmes spatiaux de la NASA. Elle travaille à basse température (60 à 80 °C), à pression atmosphérique et elle nécessite la présence de catalyseurs « nobles » à la cathode, mais peuvent s'en passer à l'anode. L'électrolyte est composée de potasse sous forme aqueuse et la pile doit être alimentée en gaz réactifs ne contenant ni CO (qui empoisonne les catalyseurs à base de platine), ni CO₂, pour éviter toute consommation de l'électrolyte par précipitation des carbonates. Cependant, son coût et son poids plus faibles que ceux des solutions acides laissent présager de bonnes potentialités pour les applications statiques.

B) Les piles à carbonate fondu (MCFC)

Ces piles ont pour électrolyte des carbonates de lithium et de potassium fondus. Elles fonctionnent à haute température (entre 600 et 700 °C sous 1 à 6 atmosphères) et elles ont l'avantage d'avoir des rendements théoriques élevés, et de pouvoir transformer directement un composé hydrogéné (reformage interne) tel qu'un hydrocarbure. Elles sont insensibles aux polluants, et peuvent même consommer du CO comme carburant. Elles permettent de récupérer de la chaleur à un haut niveau de température, pour des applications industrielles. Leurs principaux inconvénients sont aussi liés à la température et se répertorient suivant des critères qui sont la tenue et le coût des matériaux. La longue montée en température est assurée par des moyens auxiliaires.

C) Les piles à oxyde solides (SOFC)

Ce sont celles qui travaillent à la plus haute température (de 850 °C à 1000 °C). Cette température est obligatoire pour permettre à l'électrolyte composé d'oxyde de zirconium ZrO₂ et d'Ytterbium Y₂O₃ de posséder une conductivité protonique suffisante. Actuellement, les efforts de développement se concentrent sur la baisse de température de fonctionnement en dopant l'électrolyte d'autres composés. Les catalyseurs utilisés sont à base de nickel et d'oxydes et les combustibles admis sont très variés avec possibilité ou non de reformage interne. Les plus gros efforts de recherche sont destinés à cette pile car il est envisageable d'avoir des densités de puissance élevées et des rendements proches de 60 % en génération

d'électricité. De plus, la chaleur dégagée peut être récupérée à un niveau de température suffisant pour envisager des utilisations industrielles et domestiques suffisantes. Les prototypes les plus puissants sont actuellement de 250 kW mais des projets à 2 MW sont à l'étude.

D) Les piles à acide phosphorique (PAFC)

Avec un électrolyte sous forme gélifiée, elles fonctionnent à une température égale à 210 °C, pour des pressions allant jusqu'à 6 atmosphères. La PAFC est peu sensible au CO : la pile admet jusqu'à 1% en volume. Le combustible le plus souvent utilisé est un mélange riche en hydrogène, issu du reformage du gaz naturel, au moyen de techniques conventionnelles. Cette pile apparaît comme la plus utilisée pour des applications commerciales, et près de 200 installations de ce type (d'environ 200 kW) sont en fonctionnement dans diverses parties du monde (USA : 70 unités, Japon : 100 unités, Europe : 23 unités).

E) Les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC)

Ce sont des piles à électrolyte polymère solide, parfois appelées SPFC (Solid Polymer Fuel Cell), fonctionnant dès la température ambiante, mais avec des conditions optimales autour de 80 °C pour des pressions de 1 à 4 atmosphères. Elles sont très sensibles à la présence de CO qui doit être limitée à quelques ppm. De nombreux prototypes pour le domaine des transports ont été développés, et il commence à y avoir des installations de cogénération basées sur des PEMFC, jusqu'à 250 kW. Leurs principaux avantages sont des temps de démarrage quasiment instantanés avec, à température ambiante, près des deux tiers de la puissance nominale en quelques secondes, ce qui les rend compatibles avec les besoins des véhicules de transport. De plus, elles mettent en œuvre des technologies moins délicates et faciles à développer dans le cadre des séries industrielles. Le combustible le plus utilisé est l'hydrogène, sous une forme très pure, nécessitant un reformage externe très poussé des carburants classiques (gaz naturel, méthanol...).

F) Les piles à méthanol direct (DMFC)

Ces piles ont fait office de recherches afin qu'elles soient adaptables au méthanol (sans reformage). Si de telles piles s'avéraient techniquement réalisables, elles seraient économiquement viables pour les applications embarquées sur un véhicule. Pour ces raisons, ces piles pourraient être utilisables pour la traction automobile, mais pour l'instant, les densités de courant obtenues restent faibles.

2.3.2.3. Synthèse

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des caractéristiques des différentes piles à combustible actuellement en développement.

Type	SOFC	MCFC	PAFC	PEMFC	AFC	DMFC
Electrolyte	ZrO ₂ / Y ₂ O ₃	L _{i2} (K ₂)CO ₃	H ₃ PO ₄	Membrane	KOH	H ₂ SO ₄
Température °C	800-1000	650	160-210	50-100	70-100	70
Combustibles possibles	CH ₄ , H ₂ , CO	H ₂ , CO, CH ₄	H ₂ , CO	H ₂	H ₂	méthanol
Puissances	10 kW	100 kW	250 kW	10 kW	100 kW	5 kW
Applications actuelles ou envisagées	Statiques	Statiques, bateaux	Statiques, bateaux, trains	Statiques, transport, spatial	Statiques, transport, spatial	Statiques, transport
Etat	recherche	recherche	Marché	Développement	Marché	recherche

Figure 2.6. Caractéristiques actuelles des différents types de piles à combustibles. Source

2.4. Stockage de l'hydrogène

Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène. Si les deux premiers modes des stockages (comprimé et liquéfié) sont actuellement les plus utilisés, leurs performances ne satisfont pas totalement aux critères techniques qui définissent aujourd'hui le marché du stockage d'H₂. D'autres modes sont donc étudiés. L'évaluation des performances se fait surtout au niveau des densités volumétriques et gravimétriques (de l'hydrogène et de son dispositif de stockage) et des conditions générales de stockage et de déstockage de l'hydrogène (efficacité, vitesse, dispositif auxiliaire). Enfin, les critères de sécurité et de coût sont souvent déterminants pour convenir de la viabilité du mode de stockage. [1]

Parmi les différents modes de stockage, il existe:

- des procédés physiques comme la compression, la liquéfaction ou l'adsorption sur des matériaux carbonés (charbons actifs, nano fibres et nanotubes de carbone) ;

- des procédés chimiques (NaBH_4 , hydrures métalliques, fullerènes, NH_3 , méthanol).



Figure 2.6 : cuve de stockage d'hydrogène

2.4.1 Les procédés physiques

2.4.1.1 La compression

Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisés actuellement (Air liquide, Linde Gas, Air Product) : la pression varie entre 200-350 et 700 bar pour les pressions de stockage les plus élevées.

La compression adiabatique à plusieurs étages avec un refroidissement entre chaque étage est généralement effectuée. Lors d'un remplissage rapide, on assiste à une augmentation de température. On peut évaluer à 10% du PCI de l'hydrogène l'énergie nécessaire pour comprimer ce gaz de 1 à 700 bars.

L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles de 10 litres jusqu'à des réservoirs de 10000 m³. Les bouteilles commercialisées actuellement (50 litres) permettent un stockage jusqu'à 350 bars. Il existe des réservoirs ronds ou cylindriques. Le réservoir est fait d'alliages métalliques très résistants à la corrosion. Pour réduire davantage le poids, on tente d'introduire des polymères et des fibres de carbone dans la structure.

Les principaux inconvénients dont souffre cette technique sont :

- sa faible densité volumétrique,
- pour le stockage à hautes pressions, l'adaptation des auxiliaires : valves, capteurs, détendeurs.

On peut aussi stocker l'hydrogène sous terre sous forme comprimée. De même que pour le gaz naturel, les aquifères ou les cavernes apparaissant suite à la place libérée sur les gisements de sel gemme (salt cavern) peuvent et sont déjà utilisés. En Allemagne, la ville de Kiel stocke du gaz de ville depuis 1971, en France, GdF stocke un mélange de gaz naturel riche en hydrogène et au Royaume Uni, la société ICI (Imperial Chemical Industries) le stocke dans les mines de sel. Cette méthode n'est intéressante que pour les quantités importantes d'hydrogène.

2.4.1.2 La liquéfaction

Dans cette méthode, l'hydrogène est stocké sous forme liquide à -253°C . Le réservoir a souvent deux parois séparées par un espace pour éviter les pertes thermiques par convection. Cet espace peut être sous vide, ou bien constitué de matériaux super-isolants ou enfin rempli d'air liquide (Linde Gas). Le réservoir est généralement en acier mais des matériaux composites sont développés afin de l'alléger. On atteint des densités énergétiques de 22 MJ/kg (rapporté au réservoir).

Au vu de la faible température, les pertes thermiques sont inévitables de même que l'évaporation d'une partie de l'hydrogène (phénomène de boil off). Néanmoins, les progrès techniques ont permis d'amener ce boil off à 1% d'évaporation/jour. Malgré tout, ce procédé restet très gourmand en énergie, puisque le coût énergétique de la liquéfaction de l'hydrogène est estimé à 30% de son pouvoir calorifique inférieur.

2.4.1.3 Adsorption sur des matériaux carbonés

Le stockage de l'hydrogène dans du charbon actif est connu depuis longtemps. Le remplissage se fait par adsorption. A température et pression ambiante, on atteint des densités énergétiques de 0,5 % massique, mais à très basse température (-186°C) et haute pression (60 bar), on peut atteindre des densités de 8% massique. Plus récemment, on a découvert des méthodes de stockage dans les nanofibres et dans les nanotubes en carbone dont l'efficacité reste encore à prouver. Le stockage dans les nanotubes et dans les nanofibres de carbone repose sur le principe suivant : un gaz peut être adsorbé en surface d'un solide où il est retenu par les forces

de Van der Waals. Des travaux ont prouvé que les nanotubes et les nanofibres de carbone ont des propriétés intéressantes d'adsorption.

Ce mode de stockage reste à l'état de recherche, notamment pour améliorer les performances grâce à l'utilisation de dopants et à l'amélioration de la fabrication de masse.

2.4.2. Les procédés chimiques

2.4.2.1. Les hydrures

Certains éléments ont la propriété de former des liaisons (covalentes ou ioniques) avec l'hydrogène, permettant ainsi son stockage puisque le phénomène est réversible sous certaines conditions opératoires. Il s'agit par exemple du Palladium Pd, du Magnésium Mg, de ZrMn₂, Mg₂Ni ou d'alliages comme FeTiH, LaNiH₆, Mg-Mg₂Ni. Il existe deux classes d'hydrures: les hydrures hauts et basse température.

Le stockage s'effectue à haute pression avec évacuation de chaleur. La pression de dissociation est fonction de la température : pour des températures entre 0 et 100°C, les pressions se situent entre 2 et 10 bar, mais elles atteignent 30 à 50 bar avec des températures plus élevées.

Le déstockage a lieu à basse pression avec apport de chaleur. La densité d'énergie massique est faible pour les hydrures basse température : 1,5 MJ/kg (elle est plus intéressante d'un point de vue volumique : environ 3,5 MJ/l) ; elle augmente cependant pour les hydrures haute température : 4 MJ/kg (3,5% massique). Ovonic avance même des chiffres autour de 8 MJ/kg (7% massique).

Le principal avantage de cette méthode réside dans le fait que l'hydrogène est stocké à l'état atomique, ce qui réduit considérablement les problèmes de sécurité liés à l'hydrogène gazeux.

Mais les densités énergétiques sont encore limitées, la cinétique de remplissage est encore très lente et le coût de certains hydrures est encore trop élevé. Un système de 30 Nm³ (90 kWh) coûte entre 80 et 280 € / kWh pour une masse de 230 à 420 kg et un volume de 60 à 90 litres.

2.4.2.2 NaBH₄ : Hydrogen on demand

Cette méthode de stockage est celle mise au point par 'Millenium Cell', qui envisage ce type de stockage pour des applications portables, stationnaires et automobiles. Déjà PSA avec son

prototype 'H2O' et Ford avec l' 'Explorer' et la 'Crown Victoria' utilisent cette méthode de stockage. Ford étudie la faisabilité du projet visant une autonomie de 300 miles avec un plein de 35 gallons de mélange au lieu de 50 gallons.

Le procédé est fondé sur la réaction entre le borohydrure de sodium NaBH_4 et l'eau qui produit de l'hydrogène et du borate de sodium NaBO_2 . Elle nécessite la présence d'un catalyseur qui peut être à base de cobalt ou de ruthénium.

Ce procédé permet l'utilisation d'un fluide non toxique, non inflammable, facilement manipulable qui peut être utilisé dans les applications automobiles et stationnaires, il peut d'ailleurs être stocké dans des réservoirs traditionnels. Cette technologie offre aussi l'avantage d'être à température ambiante et faible pression et surtout de produire un hydrogène totalement pur de CO et autres impuretés.

Des challenges technologiques doivent encore être relevés. Des émissions spontanées d'hydrogène sont à éviter, des catalyseurs moins coûteux que le ruthénium doit être développé (le cobalt requiert une température plus élevée). Enfin, le recyclage du NaBO_2 doit être envisagé.

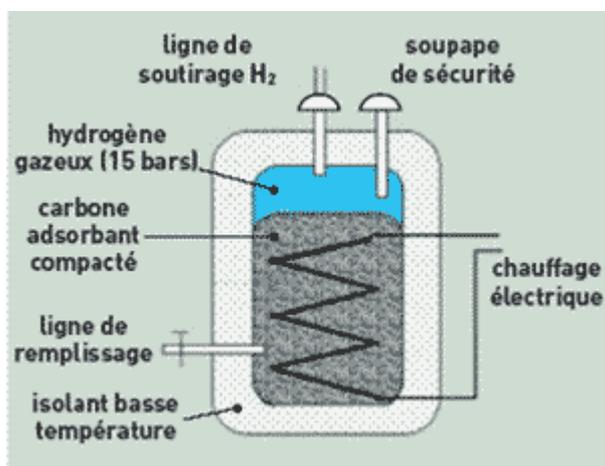


Figure 2.7. Réservoir cryogénique à charbon actif pour le stockage de l'hydrogène

2.8 Aspects sécuritaires d'utilisation de l'hydrogène

L'hydrogène est un gaz incolore et inodore, il n'est donc pas spontanément détectable par nos sens. Il n'est pas toxique mais dilué dans l'air, il est inflammable et potentiellement explosif dans certaines conditions. Il faut donc prendre toutes les mesures nécessaires pour éviter qu'il ne se répande hors des enceintes où il est stocké ou des canalisations dans lesquelles il circule. Plusieurs caractéristiques spécifiques de l'hydrogène sont de nature à augmenter le risque :

- La facilité à fuir. La petite taille de la molécule d'hydrogène et la faible viscosité de ce gaz lui permettent de circuler à travers des ouvertures de taille extrêmement faible. Le risque de fuite lorsqu'un circuit n'est pas parfaitement étanche est donc plus élevé avec l'hydrogène qu'avec la plupart des autres gaz. De ce point de vue l'hydrogène n'est comparable qu'à l'Hélium, gaz non inflammable, qui est d'ailleurs souvent utilisé pour tester sans risque l'étanchéité des installations destinées à contenir de l'hydrogène.
- La perméation à travers les matériaux. Les propriétés particulières de l'hydrogène lui permettent également de traverser certains matériaux par perméation. C'est le cas en particulier d'un certain nombre de matériaux polymères. À la différence d'un écoulement, la perméation est un phénomène de diffusion chimique à travers un matériau des atomes d'hydrogène provenant de la dissociation des molécules à la surface de ce matériau. Le moteur de cette diffusion est la différence de concentration ou de pression partielle de l'hydrogène entre les parois du matériau.
- La fragilisation de certains matériaux métalliques. Il s'agit de la propension des atomes d'hydrogène à pénétrer dans certains alliages métalliques, endommageant la structure cristalline, rendant le matériau fragile et accélérant la propagation des micro-fissures notamment sous contrainte. Ce phénomène peut aller jusqu'à provoquer des ruptures brutales du matériau bien en dessous de sa limite de rupture en l'absence d'hydrogène. Les alliages d'aluminium sont en général assez peu sensibles à la fragilisation de même que les aciers inoxydables du type 316L.

Au contraire, les aciers ferritiques sont souvent sensibles à cette fragilisation.

- La très faible énergie d'inflammation. L'énergie d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est de 20 μJ (dans les proportions stœchiométriques), soit plus de 10 fois inférieure à celle du Propane (260 μJ) ou du gaz naturel (290 μJ), et son domaine inflammable est très étendu (de 4% à 75% en volume). La probabilité d'inflammation de l'hydrogène dans l'air est donc très grande, même si des précautions sont prises pour éviter toute flamme ou étincelle à proximité de la zone à risque. Selon des sources portant sur l'analyse de 409 accidents ou incidents, seules 10% des fuites n'ont pas donné lieu à une inflammation.
- Les caractéristiques spécifiques de la flamme d'hydrogène. La flamme d'hydrogène est très peu éclairante car le rayonnement de l'hydrogène chauffé se situe essentiellement dans le domaine ultra-violet. Le rayonnement le plus visible (de couleur orangée) se situe généralement au niveau de la vapeur d'eau résultant de la combustion, tandis que le cœur de

la flamme très chaud (supérieur à 2000°C) est pratiquement invisible dans le jour. Cette caractéristique constitue un danger supplémentaire en particulier pour les équipes d'intervention en cas d'incendie.

- Le risque de détonation. Sous certaines conditions (énergie d'inflammation élevée, obstacles accélérant la flamme, niveau de turbulence important) et lorsque la concentration en hydrogène dans l'air est comprise entre 18% et 59%, il peut y avoir détonation. La détonation se caractérise par un front de flamme se déplaçant à vitesse supersonique accompagné d'ondes de choc. Elle conduit à un danger supplémentaire par rapport à la déflagration dû à de fortes surpressions capables de se propager à grandes distance et pouvant provoquer des dégâts graves sur les bâtiments et des risques très accrus pour les personnes.

2.5. Conclusion

Après avoir parcouru les principaux aspects liés à l'hydrogène, à savoir, la production, l'utilisation, le transport, le stockage et la sécurité. On peut conclure que la demande en hydrogène est une certitude avérée qui va être proportionnellement croissante avec l'amélioration des technologies de l'hydrogène et le passage éminent au stade de la production industrielle des piles à combustible en particulier avec le développement du véhicule à hydrogène.

Afin de répondre à la demande actuelle et future en hydrogène, il serait donc nécessaire d'augmenter considérablement la production d'hydrogène tout en assurant une production sans émission de gaz à effet de serre, ce qui passe par l'utilisation des énergies propre en général et des énergies renouvelables, en particulier, telle que l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque qui présentent tous les atouts puisqu'ils sont propre, renouvelable et concurrentielle.

3.1. Introduction

L'énergie solaire et l'énergie éolienne dépendent fortement des conditions météorologiques (ensoleillement, vitesse du vent) du site d'installation du système hybride. Dans ce chapitre nous allons donner une brève description des régions sur lesquelles l'étude a été réalisée ainsi que les caractéristiques climatiques de chaque site. ensuite nous présenterons la maison qui a servi à l'étude et nous calculerons la charge électrique en fonction des besoins des habitants.

3.2. Caractéristiques climatiques de l'Algérie

L'Algérie dispose d'un gisement solaire très important grâce à sa situation privilégiée, dont la durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert. Le total de l'énergie reçue est estimé à 169400 TWh/an. [2]

Moyenne annuelle de l'irradiation Globale reçue sur une surface horizontale

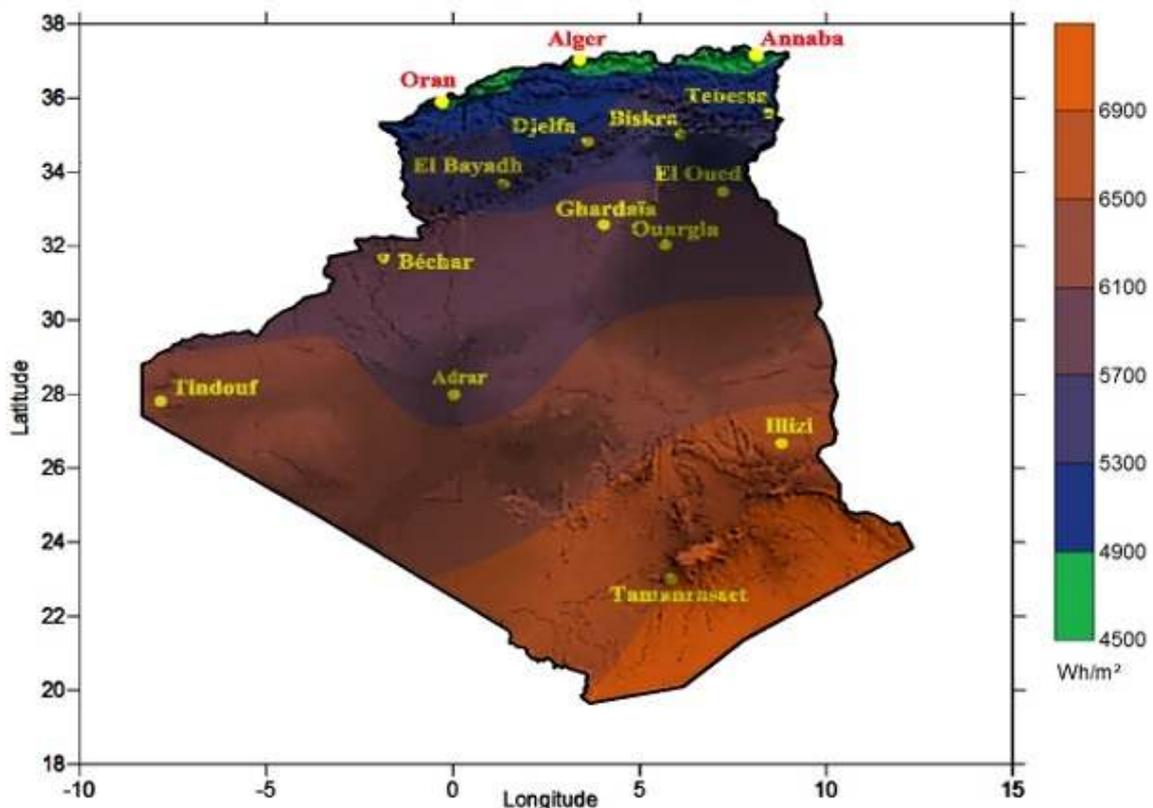


Figure 3.1 Moyenne annuelle de l'irradiation globale sur une surface horizontale

La ressource éolienne de l'Algérie varie considérablement d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. La figure 2.2 représente la carte de la répartition géographique de la vitesse du vent à 50 m du sol. Cette carte a été établie à partir des données de vitesse du vent mesurées à 10 m du sol au niveau de 75 stations du réseau de l'ONM.[2]

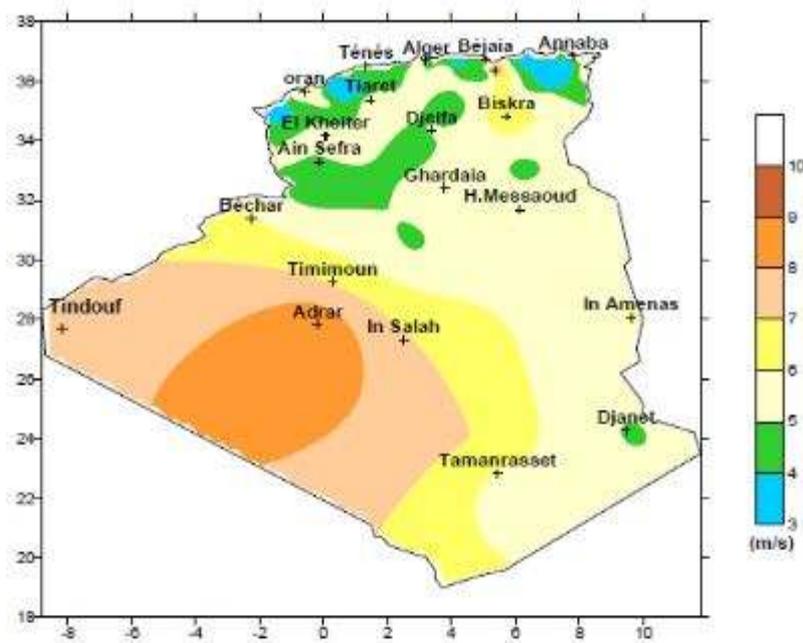


Figure 3.2 : Carte de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 50 m du sol [18]

Il est à noter que le sud algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers de Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [18].

3.3. Choix des sites

Nous avons choisi les sites de (Bouzareah, ORAN), parce que ces régions appartiennent à des zones climatiques bien distinctes du pays (le littoral) et aussi parce que comme mentionné ces régions disposent d'un potentiel renouvelable non négligeable, et enfin parce que nous disposons des données horaires de vitesse de vent, quant à la température et l'irradiation elles sont estimées par le logiciel de données météo METEONORM version 7.

3.4. Présentation du logiciel METEONORM

METEONORM est un logiciel qui contient une base très exhaustive de données météorologiques issues de stations de mesure mais il peut également calculer ces données pour des zones où il n'existe pas de station météo en faisant une interpolation à l'aide d'algorithmes spécifiques. Il permet aussi à partir des moyennes mensuelles de trouver les données horaires avec plus au moins de précision.[21]

Bases de données :

- Base de données contenant plus de 8 325 stations météo
- Paramètres mesurés : moyennes mensuelles du rayonnement global, température, humidité, précipitation, jours avec précipitation, vitesse et direction du vent, durée d'ensoleillement
- Périodes couvertes : 1961 à 1990 et 2000 à 2009 pour les données de température, d'humidité, de précipitations, de vitesses du vent.
- Données de rayonnement global mises à jour pour la période 1981- 2010
- Nouveaux paramètres dérivés : pluie battante, spectre UVA/B et rayonnement érythémateux
- Utilisation de données satellite pour régions à faible densité de stations météo
- Couvre l'ensemble du globe, y compris les régions polaires.

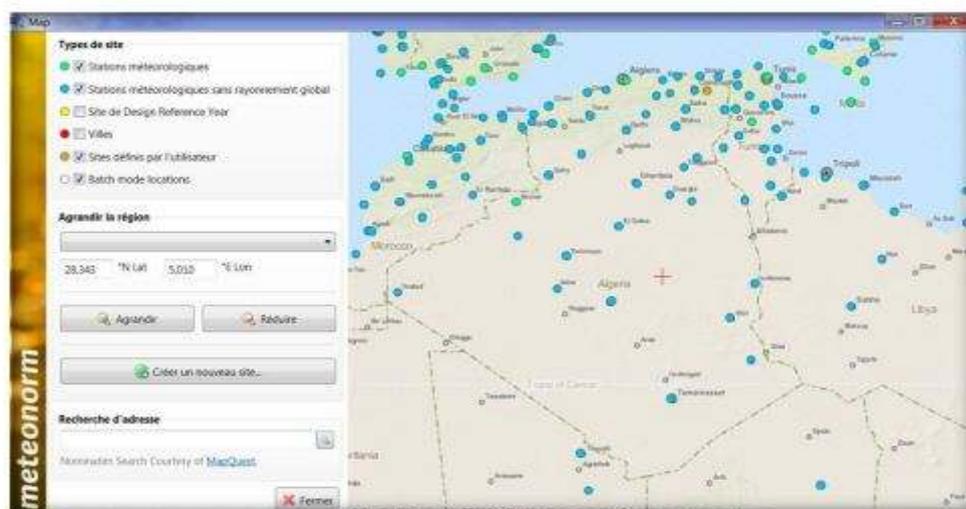


Figure 2.3 Vue des stations météo algériennes disponible sur le logiciel METEONORM

3.5. Caractéristiques climatiques des régions choisies

3.5.1 Caractéristiques de la région d'Oran

La ville d'Oran est la deuxième plus grande ville d'Algérie et une des plus importantes villes du Maghreb, c'est le chef-lieu de la wilaya du même nom, elle se trouve au bord de la rive sud du bassin méditerranéen. Située au nord-ouest de l'Algérie, à 432 km de la capitale Alger. Ces coordonnées sont 35° 42' 10" Nord et 0° 38' 57" Ouest son altitude varie entre 0 m et 429,3 m et sa population est de 1 million d'habitants.

Oran bénéficie d'un climat méditerranéen classique marqué par une sécheresse estivale, des hivers doux, un ciel lumineux et dégagé pendant les mois d'été. Les précipitations deviennent rares voire inexistantes, et le ciel est lumineux et dégagé. Les faibles précipitations (420 mm de pluie) et leur fréquence (72,9 jours par an) sont aussi caractéristiques de ce climat. [11]



Figure 3.4 Emplacement de la station météo Essenia dans la région d'Oran

	GhKWh/m2	DhKWh/m2	BnKWh/m2	Ta °C
Janvier	92	29	150	10.4
Février	101	43	118	11.8
Mars	152	54	166	14.2
Avril	183	68	176	16.1
Mai	218	80	198	19.4
Juin	230	73	227	23.4
Juillet	248	57	268	26.1
Août	217	64	221	26.3
Septembre	168	52	189	23.4
Octobre	133	46	161	20.1
Novembre	97	30	149	14.6
Décembre	82	28	130	11.9
Année	1918	624	2152	18.1

Tableau 3.1 Moyennes mensuelles d'irradiation, température et vitesse du vent d'Oran issus de Meteonorme

Nous remarquons que le rayonnement global horizontal reçu est de 1918 KWh/m² sur une année, il atteint le maximum au mois de juillet avec 248 KWh/m² reçue alors que le minimum se situe au mois de décembre avec 82 KWh/m² reçue. La température moyenne mensuelle est de 18.1 °C sur une année, le mois de janvier est le plus froid avec une température moyenne minimum de 10.4 °C alors que le mois d' Août est le plus chaud avec 26.3 °C de moyenne.

3.5.3. Caractéristiques de la région de Bouzareah

Bouzareah est une commune de la wilaya d'Alger en Algérie, située dans la proche banlieue Ouest d'Alger. Ses coordonnées sont 36° 47' 24" Nord 3° 01' 04" Est sa hauteur est de 384 m et elle est habitée par 94203 habitants. Le Climat de Bouzareah et donc d'Alger est de type méditerranéen. Elle est connue par ses longs étés chauds et secs. Les hivers sont doux et humides, la neige est rare mais pas impossible. Les pluies sont abondantes et peuvent être diluviennes. Il fait généralement chaud surtout de la mi-juillet à la mi-août. [18]



Figure 3.6 : Emplacement du CDER à Bouzareah (Alger)

	GhKWh/m2	DhKWh/m2	BnKWh/m2	Ta °C
Janvier	81	33	115	10.2
Février	91	43	100	11
Mars	141	63	132	13.5
Avril	166	75	142	15.6
Mai	198	87	163	19.1
Juin	224	81	204	23.2
Juillet	239	71	236	25.9
Août	207	73	192	26.3
Septembre	157	63	152	23.3
Octobre	124	48	144	20.2
Novembre	87	35	119	14.7
Décembre	73	27	120	11.8
Année	1784	699	1817	17.9

Tableau 3.3 Moyennes mensuelles du rayonnement, température et vitesse du vent à Bouzareah

Pour la région de Bouzareah nous remarquons que le rayonnement global horizontal reçu est de 1784 KWh/m² sur une année. Il atteint le maximum au mois de juillet avec 239 KWh/m² reçu alors que le minimum se situe au mois de décembre avec 73 KWh/m² reçu. La température annuelle des moyennes mensuelles est de 17.9 °C, le mois de janvier est le plus froid avec une température moyenne minimum de 10.2 °C alors que le mois d'Août est le plus chaud avec 26.3 °C de moyenne. Pour les vitesses du vent la moyenne annuelle est de 3.6m/s. Le mois le plus défavorable est le mois de novembre avec 3.0 m/s de moyenne alors que le mois le plus venté est le mois de mai avec 4.7 m/s.

2.6. Définition de la maison d'étude

Notre étude va porter sur un immeuble constitué de 6 appartements prototype du ministre de l'habitat qui ont été réalisés à Ain Romana Mouzaia (Wilaya de Blida). Le choix s'est porté sur ses appartements parce que d'une part ils ont une architecture bioclimatique, avec une toiture à deux versants, ce type de maisons sont très répandu surtout pour l'intégration des énergies renouvelables, et d'autre part c'est une maison à haute performance énergétique construite avec des matériaux isolants. Ce fait rend ce type d'habitation dont l'aspect thermique est optimisé, favorable à une intégration des énergies renouvelables (éolien-et solaire) réduire très fortement la dépense énergétique de celle-ci.

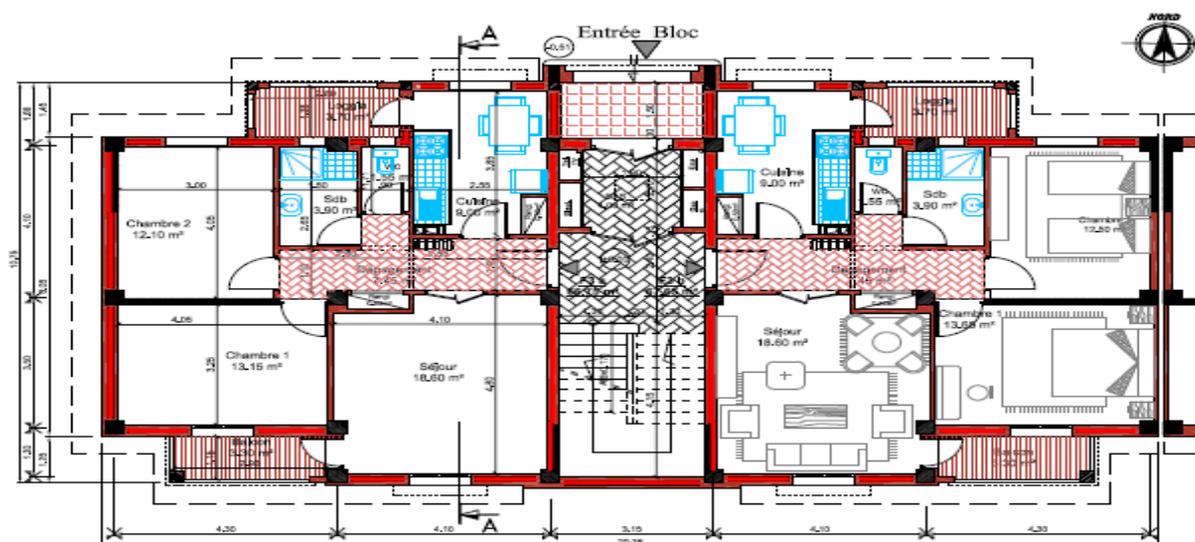


Figure 3.7 :Plan détaillé de la maison [19]

La maison contient deux chambres, une salle de séjour, une cuisine, et enfin une salle de bain et toilette.



Figure 3.8 : Vue de façade de la maison [19]

La face de la toiture possède une surface de 56 m² et une inclinaison de 40° et une orientation plein sud.

3.7. Détermination du profil de consommation

Chaque appartement est habitée par 4 personnes, un couple avec deux enfants le père travaille et les deux enfants étudient ils sont absents de la maison de 7 h à 17 h, la mère ne travaille pas.

Les deux chambres sont éclairées chacune par une lampe halogène, dans le séjour il y'a deux lampes halogènes, un téléviseur plat et un ordinateur. En cuisine on dispose d'une lampe néon, d'un réfrigérateur, et d'un ventilateur pour évacuer les odeurs de cuisson. Dans La salle de bain il y'a une lampe halogène et une machine à laver. Les WC sont éclairés par une lampe halogène. La maison dispose aussi d'un climatiseur installé au niveau du couloir.

Appareils électrique	Puissance en watt	Appareils électrique	Puissance en watt
Lampe halogène	15	Lave-linge	1500
Lampe néon	25	Réfrigérateur + congélateur	300
Téléviseur plat	43	Climatiseur	800
Ordinateur	70	Appoint électrique	1000
Table de cuisson électrique (3 foyers)	300	ventilateur de cuisine	30

Tableau 3.4 Listes des appareils électrique et leurs puissances

Pour notre étude nous avons choisi de déterminer une consommation horaire journalière. Nous choisirons le cas le plus défavorable entre deux profils de consommation établi pour une journée type en hiver et en été, la journée la plus courte en hiver (21 décembre) et la plus longue en été (21 juin).

heure	Appareils	Puissance W
0-1	Néon	25
1-2	Réfrigérateur	300
2-3	Réfrigérateur	300
3-4	Réfrigérateur	300
4-5	Néon	25
5-6	appoint	1000
6-7	3 lampes +néon + cuisinière +ventilateur	200
7-8	Néon+Réfrigérateur	325
8-9	lave-linge	1500
9-10	Réfrigérateur	300
10-11	cuisinière +ventilateur	330
11-12	Réfrigérateur	300
12-13	Néon+TV	68
13-14	TV	43
14-15	TV + Réfrigérateur	343
15-16	TV + Réfrigérateur	343
16-17	cuisinière +ventilateur	130
17-18	4 lampes +TV+PC+appoint	1173
18-19	4 lampe+ TV+PC	173
19-20	4 lampe+ néon+ TV+PC+cuisinière +ventilateur	528
20-21	Réfrigérateur+néon	325
21-22	2 lampes +TV+PC	143
22-23	TV+2 lampes	73
23-24	TV	43

Profil journalier de consommation pour la période d'hiver

heure	Appareils	Puissance W
0-1	Réfrigérateur+climatiseur+Vielleuse	1105
1-2	Climatiseur +Vielleuse	805
2-3	Vielleuse	5
3-4	Réfrigérateur + Vielleuse	305
4-5	Vielleuse	5
5-6	Vielleuse	5
6-7	Réfrigérateur+ cuisinière +ventilateur	430
7-8	Néon	25
8-9	lave-linge	1500
9-10	Réfrigér lateur	300
10-11	cuisinière +ventilateur	330
11-12	lampe	15
12-13	Réfrigérateur	300
13-14	TV+climatiseur	843
14-15	TV+climatiseur	843
15-16	Réfrigérateur+TV+climatiseur	1143
16-17	cuisinière +ventilateur	130
17-18	TV+PC	113
18-19	Réfrigérateur+TV+PC	413
19-20	TV+PC+ cuisinière +ventilateur	443
20-21	néon	25
21-22	2 lampes +réfrigérateur+TV+PC	443
22-23	2 lampes +TV+PC+climatiseur	943
23-24	Réfrigérateur+climatiseur +Vielleuse	1105

Profil journalier de consommation pour la période d'été

Le Total de consommation par jour est de 11,569kWh pour la journée d'été et de 8 ,290 kWh pour la journée d'hiver.

On 'a 6 appartement de même consommation :

-La consommation totale de l'ensemble d'habitation est 69,414 kWh pour la journée d'été.

-La consommation totale de l'ensemble d'habitation est 49,740 kWh pour la journée d'hiver.

3.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé du gisement solaire et éolien en Algérie, ensuite nous avons défini les deux sites qui serviront pour faire l'étude avec les moyennes mensuelles du rayonnement et du vent qui nous ont servi à déterminer le potentielle énergétique de chaque région. Et enfin nous avons donné les caractéristiques de la maison qui servira pour notre étude avec le profil de consommation électrique.

4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le logiciel Trnsys ainsi que les modèles mathématiques qui définissent chaque composant du système hybride .et aussi les modèles de calcul du rayonnement solaire. Ensuite nous expliquons les différentes étapes nécessaires pour la simulation et définissons les données d'entrées de notre modèle.

4.2. Présentation du logiciel TRNSYS

Le logiciel de simulation TRNSYS est un environnement complet et extensible, dédié à la simulation dynamique des systèmes. Développé par le CSTB dans le cadre de la collaboration internationale, il est aujourd'hui la référence au niveau mondial de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes. Plusieurs centaines de composants sont disponibles (énergie solaire, photovoltaïque, éoliennes, hydraulique, chaudières pile à combustible) ces bibliothèques peuvent être connectées pour effectuer des études pluridisciplinaires techniques et économiques. TRNSYS Studio assure l'interface entre le schéma de principe du projet à modéliser et TRNSYS, la conception modulaire de Trnsys permet aux utilisateurs un contrôle sur les organigrammes et la possibilité de créer le composant spécifique pour un problème poser.

4.3. Modèles des différents composants du système hybride

Chaque composant du système hybride est modélisé par des équations mathématiques, qui tentent de prévoir le comportement du système, plus le modèle est complexe plus on se rapproche du cas réel.

4.3.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque

Le modèle utilisé pour caractériser la cellule solaire est le circuit équivalent de quatre paramètres développés par Townsend en 1989 et détaillé par Duffie et Beckman en 1991. Il est utilisé pour modéliser les cellules photovoltaïques cristallines. Les quatre paramètres pour ce modèle sont : $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}\gamma$ et R_s . Ce sont des valeurs empiriques qui ne peuvent pas se déterminer directement de la mesure. Trnsys les calcule à partir des données du constructeur.[20]

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire est :

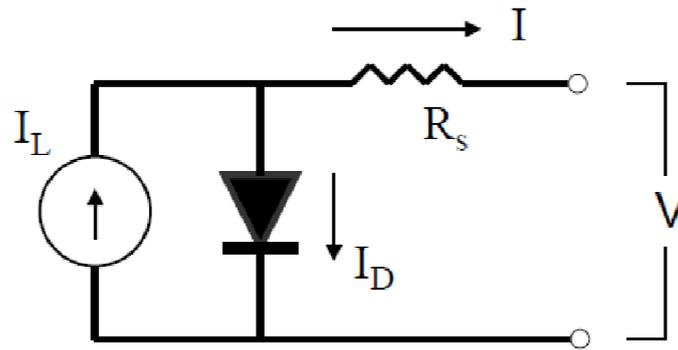


Figure 4.1 Circuit équivalent d'une cellule solaire pour le modèle à 4 paramètres

L'équation du courant en fonction de la tension de la cellule est

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{q}{\gamma k T_c} (V + IR_s)\right) - 1 \right] \quad (4.1) \quad [20]$$

R_s et γ sont des constantes. Le photocourant I_L dépend linéairement de la radiation incidente

$$I_L = I_{L,ref} \frac{G_T}{G_{T,ref}} \quad (4.2) \quad [20]$$

L'insolation de référence G_{ref} est donnée comme le paramètre 4 elle est de 1000 W/m². Le courant inverse de saturation I_o dépend de la température selon cette équation

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \quad (4.3) \quad [20]$$

Une méthode itérative est employée pour calculer le courant I_{mp} la tension V_{mp} au MMP sur la courbe des caractéristiques.

Pour déterminer $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ et R_s les équations suivantes sont utilisées avec les données constructeur

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{q}{\gamma k T_{c,ref}} V_{oc,ref}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh}} \quad (4.4) [20]$$

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{q I_{sc,ref} R_s}{\gamma k T_{c,ref}}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} R_s}{R_{sh}} \quad (4.5) [20]$$

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{q}{\gamma k T_{c,ref}} (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s)\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s}{R_{sh}} \quad (4.6) [20]$$

$$I_{L,ref} \approx I_{sc,ref} \quad (4.7) [20]$$

$$\gamma = \frac{q(V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref} R_s)}{k T_{c,ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \quad (4.7) [20]$$

$$I_{o,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{q V_{oc,ref}}{\gamma k T_{c,ref}}\right)} \quad (4.8) [20]$$

Une dernière équation est utilisée pour déterminer le dernier paramètre c'est la dérivée mathématique de la tension en fonction de la température aux conditions de référence d'un circuit ouvert.[20]

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \mu_{voc} = \frac{\gamma k}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{sc,ref}}{I_{o,ref}} \right) + \frac{T_c \mu_{isc}}{I_{sc,ref}} - \left(3 + \frac{q \varepsilon}{A k T_{c,ref}} \right) \right] \quad (4.9) \quad [20]$$

$$A = \frac{\gamma}{N_s} \quad (4.10) \quad [20]$$

4.3.2 Modèle d'une Eolienne

La théorie du moment et la conservation de la masse nous donnent en supposant que la densité de l'air ne change pas

$$A1U0 = ARUR = AwUw \quad (4.11)[20]$$

$$A1U0 - AwUw - (A1 - Aw) U0 - Q = 0 \quad (4.12) \quad [20]$$

La résolution de l'équation nous donne la formule du débit

$$Q = Aw (U0 - Uw) \quad (4.13) \quad [20]$$

La conservation du moment dans la direction horizontale nous donne après arrangement

$$D = \rho A_w U_0^2 - \rho A_w U_w^2 - \rho U_0 (A_w (U_0 - U_w)) \quad (4.14) \quad [20]$$

$$D = \rho A_w U_w (U_0 - U_w) \quad (4.15) \quad [20]$$

L'équation de Bernoulli qui calcule la différence de pression en amont et en aval est donnée comme suit

$$p_R^+ - p_R^- = \frac{1}{2} \rho (U_0^2 - U_w^2) \quad (4.16) \quad [20]$$

La force de poussé est donnée par

$$D = A_R (p_R^+ - p_R^-) \quad (4.17) \quad [20]$$

$$D = \frac{1}{2} \rho A_R (U_0^2 - U_w^2) \quad (4.18) \quad [20]$$

L'expression de la poussée de l'équation de Bernoulli combinée avec celle de la théorie du moment nous donne

$$U_R (U_0 - U_w) = \frac{1}{2} (U_0^2 - U_w^2) \quad (4.19) [20]$$

$$U_R = \frac{(U_0 + U_w)}{2} \quad (4.20) [20]$$

La puissance de sortie de l'éolienne est écrite comme le produit de la poussée et de la vitesse

$$P = D U_R \quad (4.21) [20]$$

$$P = \left(\frac{1}{2} \rho A_R (U_0^2 - U_w^2) \right) U_R \quad (4.22) [20]$$

On a déduit l'équation de la puissance

$$P = \frac{1}{2} \rho A_R U_0^3 4 a (1-a)^2 \quad (4.23) [20]$$

Et enfin le coefficient de performance

$$C_p = 4 a (1-a)^2 \quad (4.24) [20]$$

4.3.4 Modèle du convertisseur de tension

La perte de puissance d'un convertisseur de tension dépend du courant qui le traverse, Laukamp a proposé une expression mathématique qui le décrit.

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} \quad (4.25) [20]$$

$$P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = P_0 + (U_S / U_{\text{out}}) P_{\text{out}} + (R_{\text{ipn}} / U_{\text{out}}^2) P_{\text{out}}^2 \quad (4.26)[20]$$

4.3.5 Contrôleur pour SAPS

La puissance du bus est égale à :

$$P_{\text{busbar}} = P_{\text{tot}} + P_{\text{FC},\text{min}} - P_{\text{Load}} - P_{\text{Ely},\text{min}} \quad (4.27)[20]$$

Excès en énergie ($P_{\text{BUSBAR}} > 0$)

1ere cas

L'électrolyseur est arrêté

Si $SOC < EL_{low}$, le mettre en marche

Avec : $P_{ely,set} = P_{tot} + P_{FC,min} - P_{Load}$

L'électrolyseur est en marche

• Si $SOC > EL_{up}$, le mettre a l'arrêt

• avec $P_{ely,set} = P_{tot} + P_{FC,min} - P_{Load}$

Déficit en énergie ($P_{BUSBAR} < 0$)

• Mettre la pile à combustible au ralenti si elle est en marche et que le $SOC < FC_{low}$

Si la pile à combustible est à l'arrêt

• la puissance de l'électrolyseur est de $P_{Ely,set} = P_{tot} - P_{Load}$

• Si la pile à combustible est en marche.

• $P_{FC,set} = P_{Load} + P_{Ely,min} - P_{tot}$

• Si $P_{FC,set} < P_{FC,min}$ alors imposé $P_{FC,set} = P_{FC,min}$

• $P_{Ely,set} = P_{tot} - P_{load}$

4.3.6 Electrolyseur

Un électrolyseur peut être modélisé en utilisant une relation empirique (courant-tension).

$$U_{cell} = U_{rev} + r' \cdot \frac{I_{ely}}{AREA} + s' \cdot \log \left[\frac{t' \cdot I_{ely}}{AREA} + 1 \right] \quad (4.28) [20]$$

Avec

$$r' = r_1 + r_2 \cdot T_{ely}$$

$$s' = s_1 + s_2 \cdot T_{ely} + s_3 \cdot T_{ely}^2$$

$$t' = t_1 + \frac{t_2}{T_{ely}} + \frac{t_3}{T_{ely}^2}$$

L'efficacité de Faraday est définie par la ration entre la production réelle d'hydrogène et la production théorique. Elle est aussi appeler l'efficacité du courant qui le courant perdu dans les conduits de gaz.

Une expression empirique décrit ce phénomène :

$$\eta_f = \left[\frac{I_{density}^2}{a_1 + I_{density}^2} \right] \cdot a_2 \quad (4.29) [20]$$

La production totale d'hydrogène dans l'électrolyseur est exprimée comme suit:

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_f \cdot N_{cells} \cdot \frac{I_{ely}}{n \cdot F} \quad (4.30) [20]$$

4.3.7 Stockage de gaz comprimé

Selon l'équation de van der Waals, la pression P d'un gaz réel dans un réservoir de stockage est égale à :

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T_{\text{gas}}}{\text{Vol} - n \cdot b} - a \cdot \frac{n^2}{\text{Vol}^2} \quad (4.31) \quad [20]$$

Avec

$$a = \frac{27 \cdot R^2 \cdot T_{\text{cr}}^2}{64 \cdot p_{\text{cr}}} \quad (4.32) \quad [20]$$

$$b = \frac{R \cdot T_{\text{cr}}}{8 \cdot p_{\text{cr}}} \quad (4.33) \quad [20]$$

Où T_{cr} et P_{cr} sont la température et la pression critique de la substance

4.3.8 Pile à combustible alcaline

Le modèle électrochimique de la pile à combustible est basé sur la relation empirique (courant-tension) suivante :

$$U_{\text{cell}} = \frac{U_{\text{mod}}}{n_{\text{c,ser}}} \quad (4.34) \quad [20]$$

$$U_{\text{mod}} = U_0 - b \cdot \log(I_{\text{stack}}) - R_{\text{ohm}} \cdot I_{\text{stack}} \quad (4.35) \quad [20]$$

$$U_{\text{stack}} = n_{\text{m,ser}} \cdot U_{\text{mod}} \quad (4.36)$$

$$I_{\text{cell}} = \frac{I_{\text{FC}}}{n_{\text{c,par}} \cdot n_{\text{s,par}}} \quad (4.37)$$

$$I_{\text{stack}} = \frac{I_{\text{FC}}}{n_{\text{s,par}}} \quad (4.38)$$

Le flux molaire de l'hydrogène

$$\dot{n}_{\text{H}_2} = \frac{n_{\text{c,ser}} \cdot n_{\text{m,ser}} \cdot I_{\text{FC}}}{z \cdot F} \cdot \eta_{\text{F}} \quad (4.39)$$

Consommation totale de l'hydrogène

$$\dot{V}_{\text{H}_2} = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2}}{\rho_{\text{gas}}} \cdot S_{\text{H}_2} \quad (4.40)$$

4.4. Modèles de rayonnement solaire

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie entre -23.45° (le 21 décembre) et $+23.45^\circ$ (le 21 juin) et elle nulle aux équinoxes. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule (3.31)

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (4.42)$$

L'angle horaire (ω_s) étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu

$$\omega_s = 15 (TSV-12) \quad (4.43)$$

La hauteur angulaire est l'angle formé par la direction du soleil et le plan horizontal.

$$\sin(\gamma) = \sin \psi \cdot \sin \delta + \cos \psi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (4.44)$$

Par ciel clair et pendant la durée de jour d'ensoleillement S_0 (du lever au coucher du soleil), le sol reçoit le rayonnement solaire maximal.

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (4.45)$$

$$S_0 = \left(\frac{2}{15}\right) \cos^{-1}(-\tan \psi \cdot \tan \delta) \quad (4.46)$$

L'éclairement extraterrestre à la limite supérieure hors atmosphère, sur un plan horizontal, est donné par

$$I = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) (\cos \psi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \psi \cdot \sin \delta) \quad [w/m^2] \quad (4.47)$$

L'irradiation horaire est donnée par

$$I_0 = \frac{1236}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) (\cos \psi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + (\omega_2 - \omega_1) \sin \psi \cdot \sin \delta) \quad (4.48)$$

Le rayonnement solaire sur un plan incliné est estimé en fonction de l'énergie reçue sur un plan horizontal par le modèle de Liu Jordan par l'équation suivante

$$R_b = \frac{\cos(\psi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s') + \omega_s' \cdot \sin(\psi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\psi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \omega_s \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\delta)} \quad (4.49)$$

Avec

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \cdot \bar{R}_b \cdot \bar{H}_d \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) \cdot \bar{H} \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (4.50)$$

4.5 Simulation sur TRNSYS

Pour simuler notre système hybride nous devons proposer une configuration adéquate

4.5.1 Configuration du système hybride dans Trnsys

Le système est composé de modules qui représentent les panneaux photovoltaïques, l'éolienne, contrôleur, convertisseur de charge, électrolyseur, cuve de stockage et pile à combustible. Il comprend aussi des modules qui permettent de convertir les unités et d'importer les données météo.

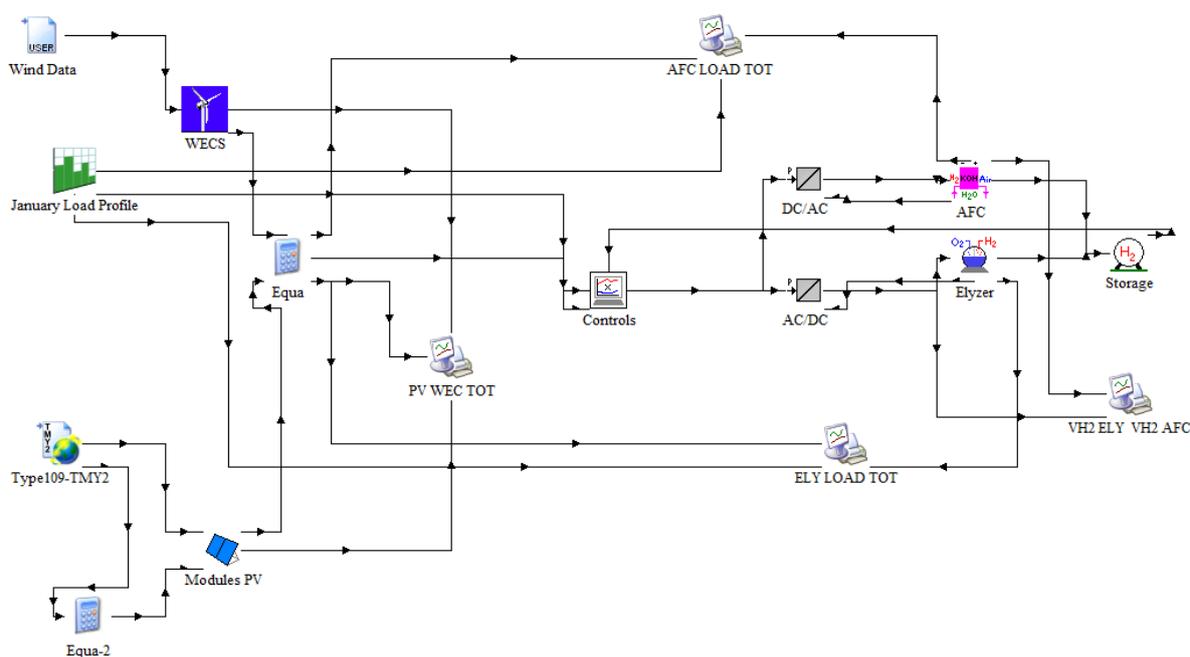


Figure 4.2 Modélisation du système hybride dans Trnsys studio

4.5.2 Les modules utilisés pour simuler le système

Nom du module	Code	Description
Panneaux photovoltaïque	Type 94a	Ce composant modélise les performances électriques d'un module photovoltaïque poly-cristallin ou monocristallin.
Eolienne	Type 90	C'est un modèle mathématique pour un système de conversion d'énergie éolienne, ce modèle calcule la puissance de sortie d'une éolienne à partir de la courbe de puissance fournie par le constructeur.

Convertisseur de tension	Type 175a	C'est un modèle mathématique pour une unité de conditionnement de puissance et de tension ,elle permet de choisir une tension de sortie pour des convertisseurs AC/DC , DC/AC ou AC/AC.
Contrôleur	Type 105a	Ce module détermine la puissance de la pile à combustible et Puissance de l'électrolyseur pour répondre à une charge donnée. Les puissances maximales (classées) et minimales (ilding) pour la pile à combustible et l'électrolyseur est pris en compte.
stockage de gaz comprimé	Type 164	ce modèle est pour le stockage de gaz comprimé. Cette instance du modèle calcule la pression dans le stockage en fonction de l'équation d'état de van der Waals pour les gaz réels (Çengel et Boles, 1989;Ulleberg, 1998).
Pile à combustible alcaline AFC	Type173a	Le modèle électrochimique est basé Sur une relation empirique pour la caractéristique courant-tension à la température de fonctionnement normale.
Fichier météo	Type 109	Ce module permet de lire des fichiers météo au format tmy2
Fichier de données	Type 9a	Ce module permet de lire n'importe qu'elle donnée sous un format de fichier texte, dans notre cas on l'utilise pour modéliser notre charge électrique.
Traceur de courbe	Type 65	ce modèle permet de tracer n'importe quelle courbe en choisissant le nombre de variables, l'échelle etc

Tableau 4.1 Modules utilisés dans Trnsys

4.6. Définition de la charge

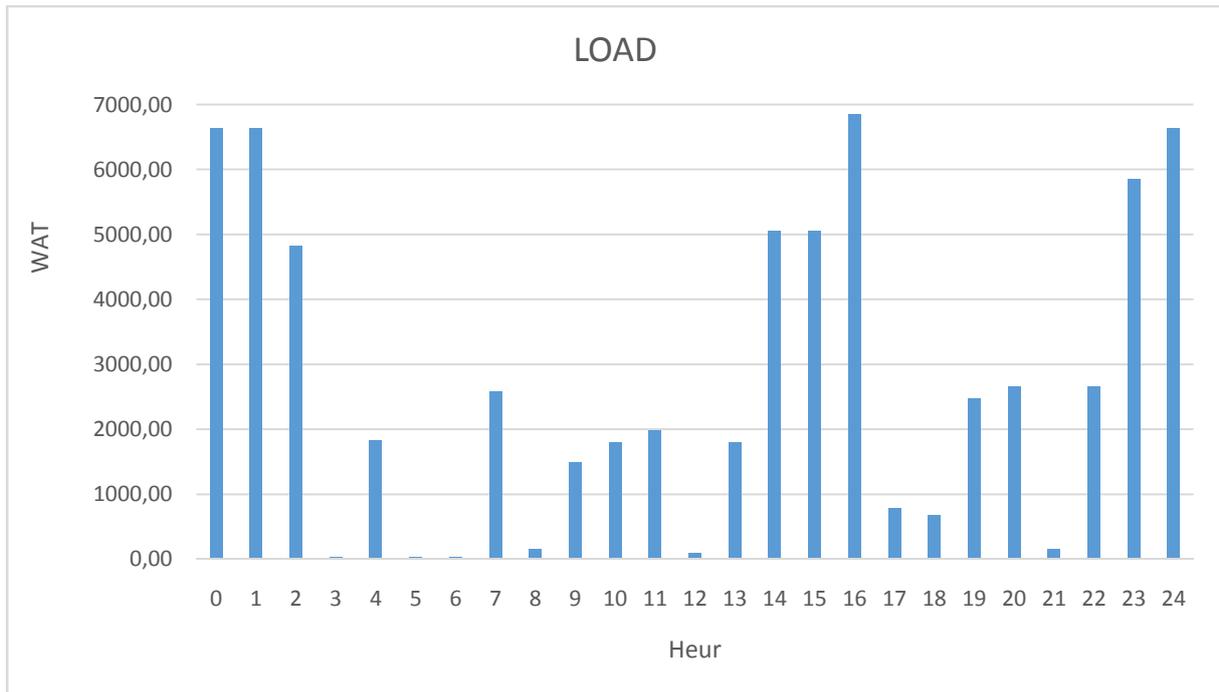


Figure 4.3 Profil de charge horaire pour une journée caractéristique en été

La figure 4.3 montre les besoins électriques de l'ensemble d'habitation (6 appartements) pour une journée entière, nous remarquons que le maximum de la consommation se situe à minuit et à 1h du matin et à 16h du qui correspond aux périodes d'utilisation du lave-linge, climatiseur, les autres pics dans la charge sont dus à l'utilisation du climatiseur et réfrigérateur.

4.7. Dimensionnement du système hybride

Pour dimensionner notre système de façon à couvrir la totalité des besoins électriques de l'ensemble d'habitation nous avons choisi de fixer la puissance de l'éolienne et de dimensionner le champ photovoltaïque pour couvrir le reste de la charge.

4.7.1. Choix de l'éolienne

Nous avons choisi une éolienne à axe horizontal de la marque AEOLOS parce qu'elles ont une vitesse de démarrage très petites < 3 m/s



Figure 4.4 : courbe de puissance de l'éolienne de 10kw marque AEOLOS

Aeolos-H 10kw
Puissance nominale 10kw
Poids 520 kg
Diamètre du rotor 8 m
Vitesse du rotor 180rpm
Hauteur du mat 18 m
Vitesse de démarrage 2.5 m/s
Vitesse nominale 10 m/s
Vitesse de coupure 25 m/s

Tableau 4.4 Caractéristiques de l'éolienne de 10kw.

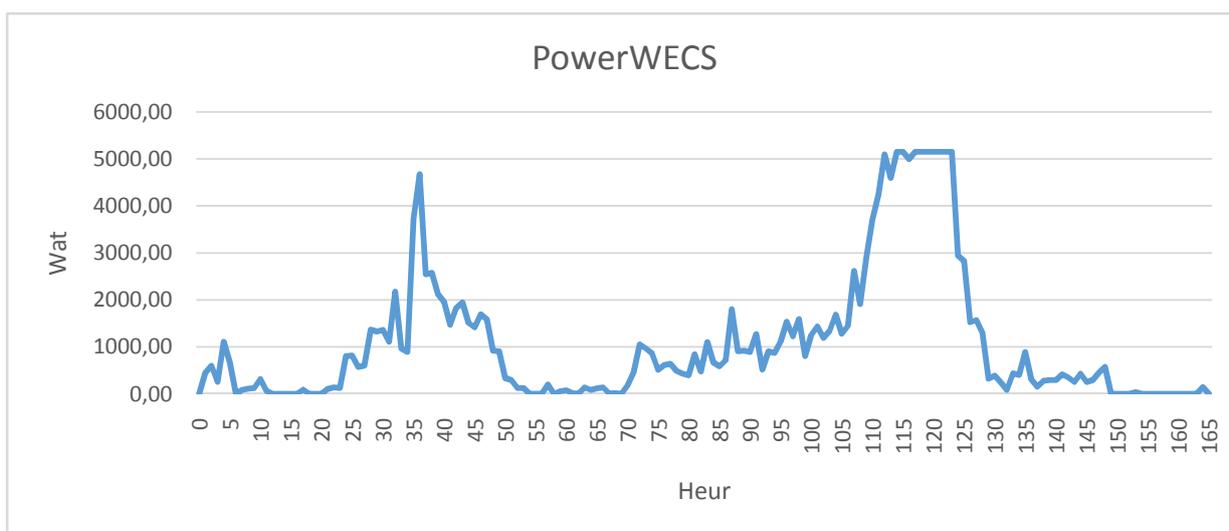


Figure 4.5 : puissance fournie par l'éolienne de 10kw du 1 au 7 décembre dans la région de Bouzareah.

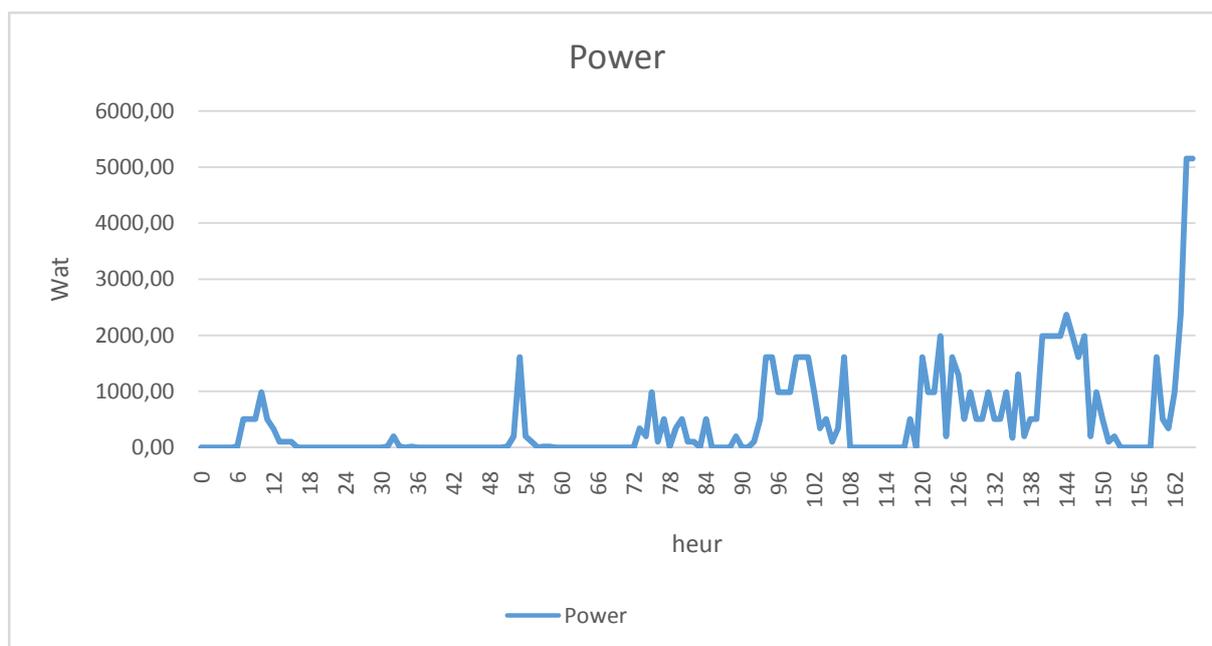


Figure 4.6 : puissance fournie par l'éolienne de 10kw du 1 au 7 décembre dans la région d'Oran.

Les figures 4.5 ,4.6 nous montrent la puissance fournie par aérogénérateur de 10kw dans le site d'Oran et Bouzareah. Nous remarquons que l'éolienne de 10kw peut produire jusqu'à 5150,95W au maximum à la région de Bouzareah et aussi jusqu'à 5150,95 à la région d'Oran.

Ces résultats nous permettent de dire que le choix d'une éolienne ne dépend pas uniquement de sa puissance nominale mais il faut prendre en considération le nombre d'heures de fonctionnement qui dépend de la vitesse de démarrage de l'éolienne.

4.8. Dimensionnement du champ photovoltaïque

Pour déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques nous avons calculé la production hebdomadaire en énergie de l'éolienne en la comparant avec le total de la consommation sur une semaine, ensuite le déficit en énergie nous permettra de déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaires.

Le modèle de panneaux photovoltaïques choisis pour cette étude est fabriqué en Algérie de la marque ENIE c'est un modèle poly-cristallin et qui présente un bon rapport qualité prix .Le tableau 4.5 résume ces principales caractéristiques.

Puissance nominale	200W
Tension de circuit ouvert	46 V

Courant de court-circuit	5.60A
Courant mppt	8.10 A
Tension mppt	36 V
Température nominale	45 C
Nombre de cellules par module	72
Dimension d'un module	1,28m ²

Tableau 4.5 Données constructeur du panneau photovoltaïque

4.8.1. Détermination du nombre de panneaux photovoltaïque

Nombre de PV	Contribution PV	Contribution éolienne 10kw	Charge totale hebdomadaire	Contribution totale
23	49,950 kwh 35.76%	277,866kwh 65 ,15%	426,48kwh	100,91%

Tableau 4.6 Contribution du photovoltaïque et l'éolienne 10kw dans la charge totale de la semaine pour la région de Bouzareah

Le nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour satisfaire la totalité de la charge hebdomadaire est de 23 modules pour la configuration avec l'éolienne de 10Kw de production 100,91%

Nb pv	Contribution pv	Contribution 2 éolienne 10kw	Charge 1 semaine	totale
35	219,603kwh 51.49%	209,776kwh 49,18%	426,48kwh	100,67%

Tableau 4.7 Contribution du photovoltaïque et de l'éolienne 500 w dans la charge totale de la semaine pour la région d'Oran

Le nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour satisfaire la totalité de la charge hebdomadaire est de 35 modules pour la configuration avec 2 éoliennes de 10Kw de production 100,67%

4.9. Dimensionnement du système de stockage par hydrogène

4.9.1. Dimensionnement de l'électrolyseur

$$P_{\text{tot}} = U_{\text{ely}} \cdot I_{\text{ely}} \quad [20]$$

Avec

$$U_{\text{ely}} = N_{\text{cells}} \cdot U_{\text{cell}}$$

Avec

$$U_{\text{cell}} = U_{\text{rev}} + r' \cdot \frac{I_{\text{ely}}}{\text{AREA}} + s' \cdot \log \left[\frac{t' \cdot I_{\text{ely}}}{\text{AREA}} + 1 \right]$$

Avec

$$r' = r_1 + r_2 \cdot T_{\text{ely}}$$

$$s' = s_1 + s_2 \cdot T_{\text{ely}} + s_3 \cdot T_{\text{ely}}^2$$

$$t' = t_1 + \frac{t_2}{T_{\text{ely}}} + \frac{t_3}{T_{\text{ely}}^2}$$

$$r_1 = 0,00007331 [\Omega \text{ m}^2]$$

$$r_2 = -1,107 \cdot 10^{-7} [\Omega \text{ m}^2 / ^\circ\text{C}]$$

$$s_1 = 0,1586 [\text{V}]$$

$$s_2 = 0,001378 [\text{V}/^\circ\text{C}]$$

$$s_3 = -0,00001606 [\text{V}/^\circ\text{C}^2]$$

$$t_1 = 0,01599 [\text{m}^2/\text{A}]$$

$$t_2 = -1,302 [\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{A}]$$

$$t_3 = 421,3 [\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^2/\text{A}]$$

$$T_{\text{ely}} = 80^\circ \text{C}$$

$$U_{\text{rev}} = 1,24 [\text{V}]$$

$$\text{AREA} = 0,25 [\text{m}^2]^*$$

$$I_{\text{ely}} = 500 \text{A}$$

$$N_{\text{cell}} = 70$$

$$\text{Donc : } P_{\text{afc}} = U_{\text{ely}} \cdot I_{\text{ely}} = 7133,42 \text{ W}$$

4.9.2. Dimensionnement de la cuve de stockage

On a une cuve de stockage de 10 litres, le gaz de la cuve est comprimé à 300 Bar.

4.9.3. Dimensionnement de la pile à combustible

$$P = I_{stack} \cdot N_{s\ par} \cdot U_{stack} [20]$$

Avec

$$U_{stack} = N_{s\ ser} \cdot U_{mod}(cellule)$$

Avec

$$U_{mod} = U_0 - b \log(I_{stack}) - R_{ohm} \cdot I_{stack}$$

Avec

$$I_{stack} = 200\text{A}$$

$$U_0 = 5,6\text{V}$$

$$b = 0,2173 \text{ [V/dec]}$$

$$R_{ohm} = 0,01168 \text{ [ohm]}$$

$$N_{s\ ser} = 70$$

$$N_{s\ par} = 20$$

DONC

$$P_{ely} = 7560 \text{ W}$$

4.10. Résultats de la simulation du système hybride

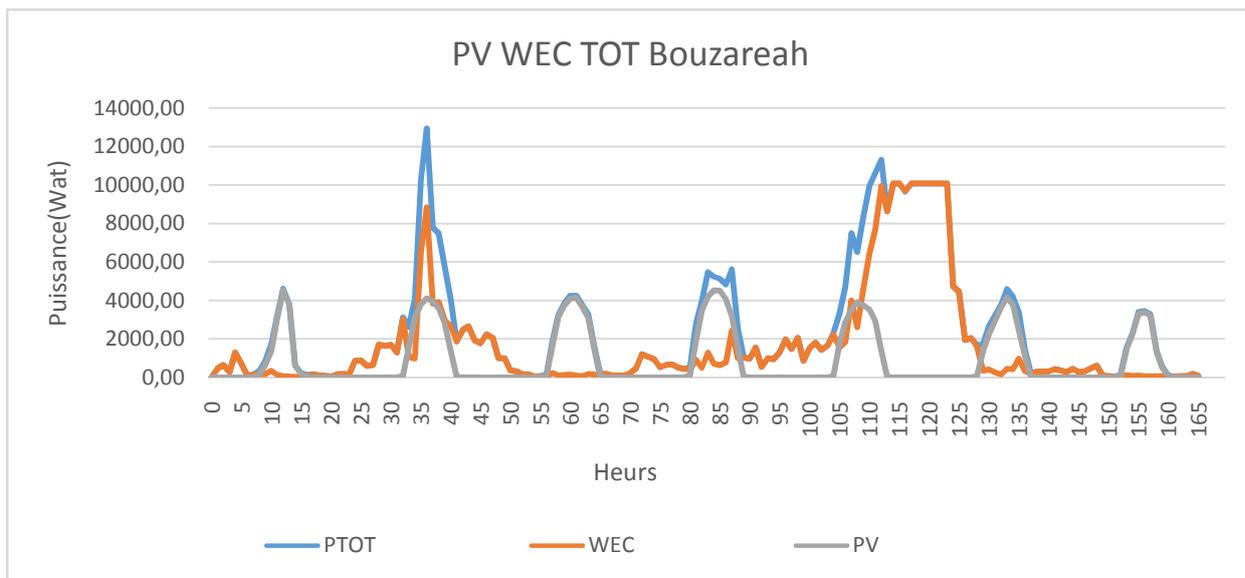


Figure 4.8 Production de chaque source et le total pour la région de Bouzareah du 1 au 7 décembre

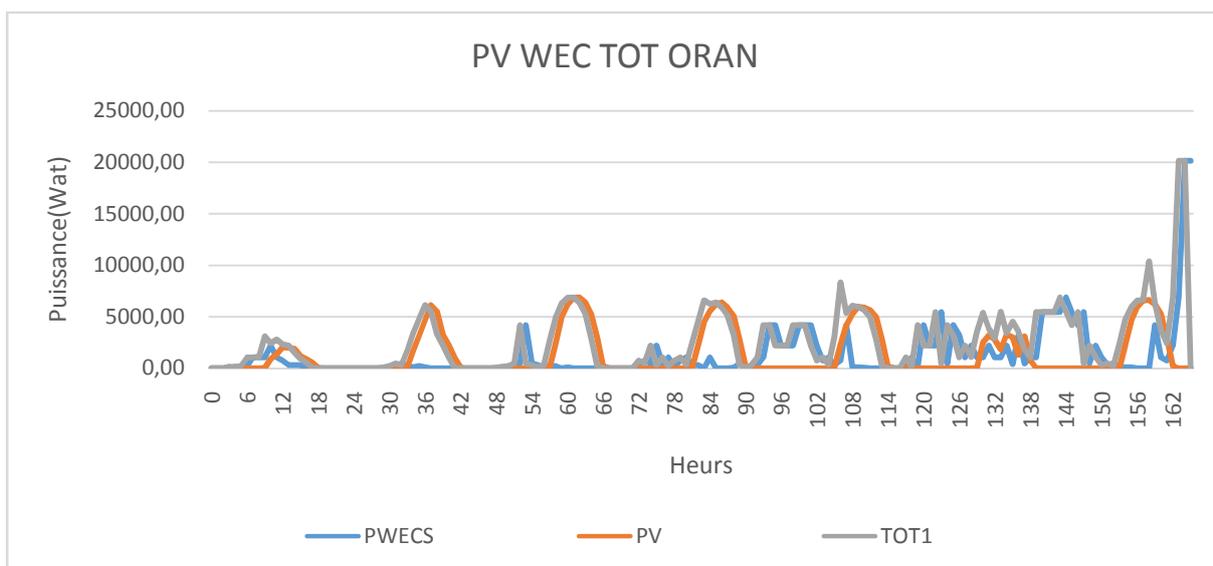


Figure 4.9 Production de chaque source et le total pour la région d'Oran du 1 au 7 décembre

La figure 4.9 nous montre que la production de l'éolienne dans la région d'Oran est plus faible par rapport à celle du photovoltaïque, ce qui permet de dire que l'énergie éolienne est utilisée comme complément de l'énergie photovoltaïque qui constitue la principale source.

La figure 4.8 nous permet aussi de mettre en évidence la discontinuité des ressources renouvelables dans la région de Bouzareah, nous remarquons un important déphasage entre la

production et la consommation et plus spécialement entre les deux sources .Dans certaines nuits l'énergie éolienne n'est pas nulle.

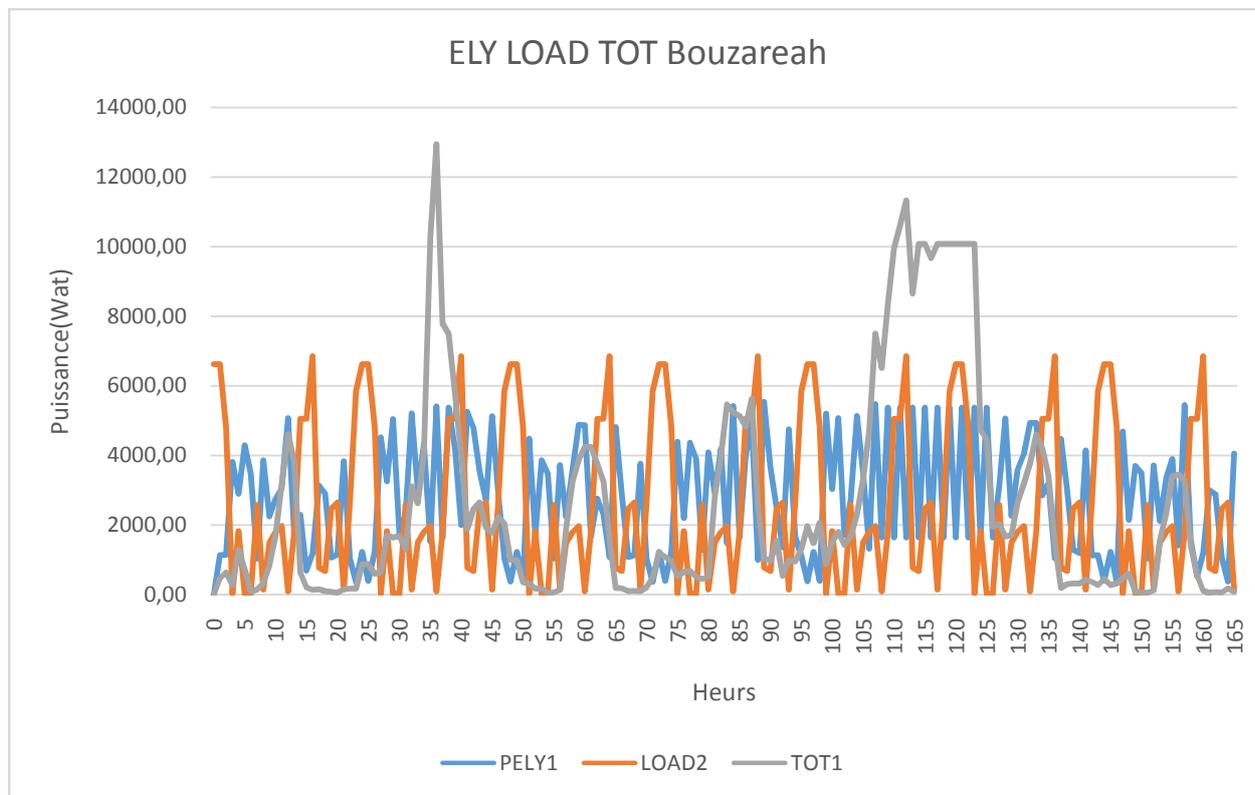


Figure 4.10 Production de l'électrolyseur et la production total, la charge pour la région de Bouzareah du 1 au 7 décembre

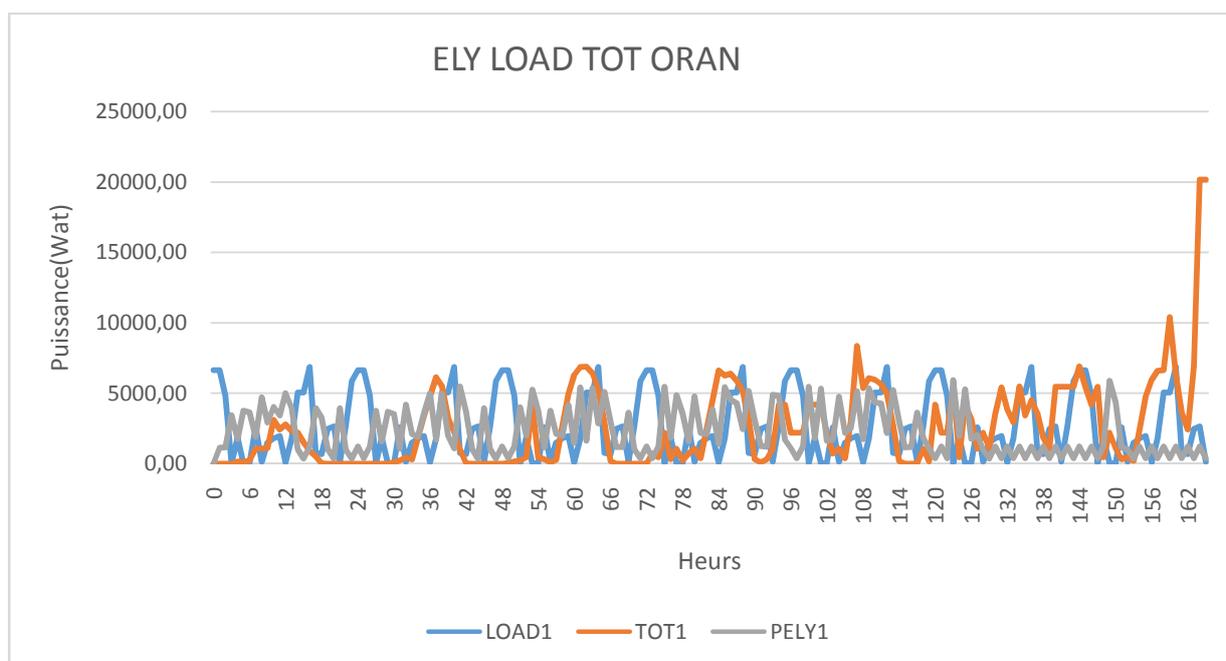


Figure 4.11 Production de l'électrolyseur et la production total, la charge pour la région d'Oranu 1 au 7 décembre

Les figures 4.10 ,4.11 représente la production totale du système hybride et des électrolyseurs. Nous remarquons pour les sites d'Oran et de Bouzareah que pour certaines nuit l'énergie produite est nulle à cause de l'inexistence du rayonnement solaire et des vitesse de vent très faible ,alors que pendant certaines périodes la production de la source renouvelable est supérieure à la charge dans ce cas le surplus d'énergie sert à stocke l'énergie par l'électrolyse de l'eau et stocke cette énergie sous forme d'hydrogène qui nous fournirons plus tard de l'énergie lorsque la production est inférieure à la demande.

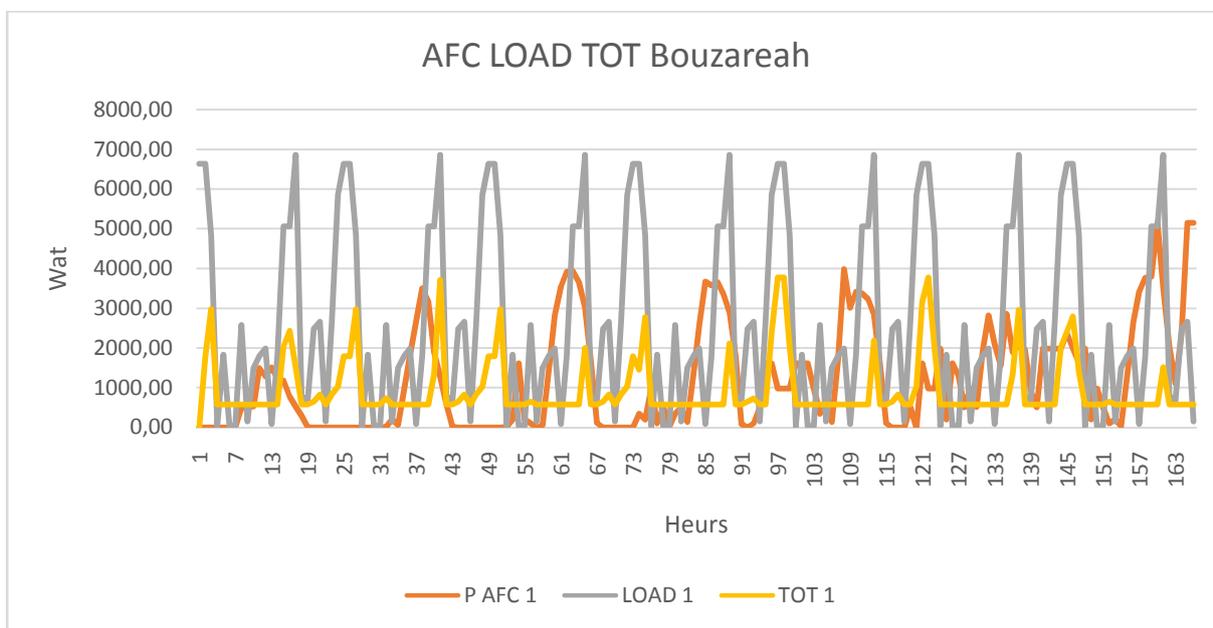


Figure 4.12 Consommation par AFC et la production totale, la charge pour la région de Bouzareahdu 1 au 7 décembre

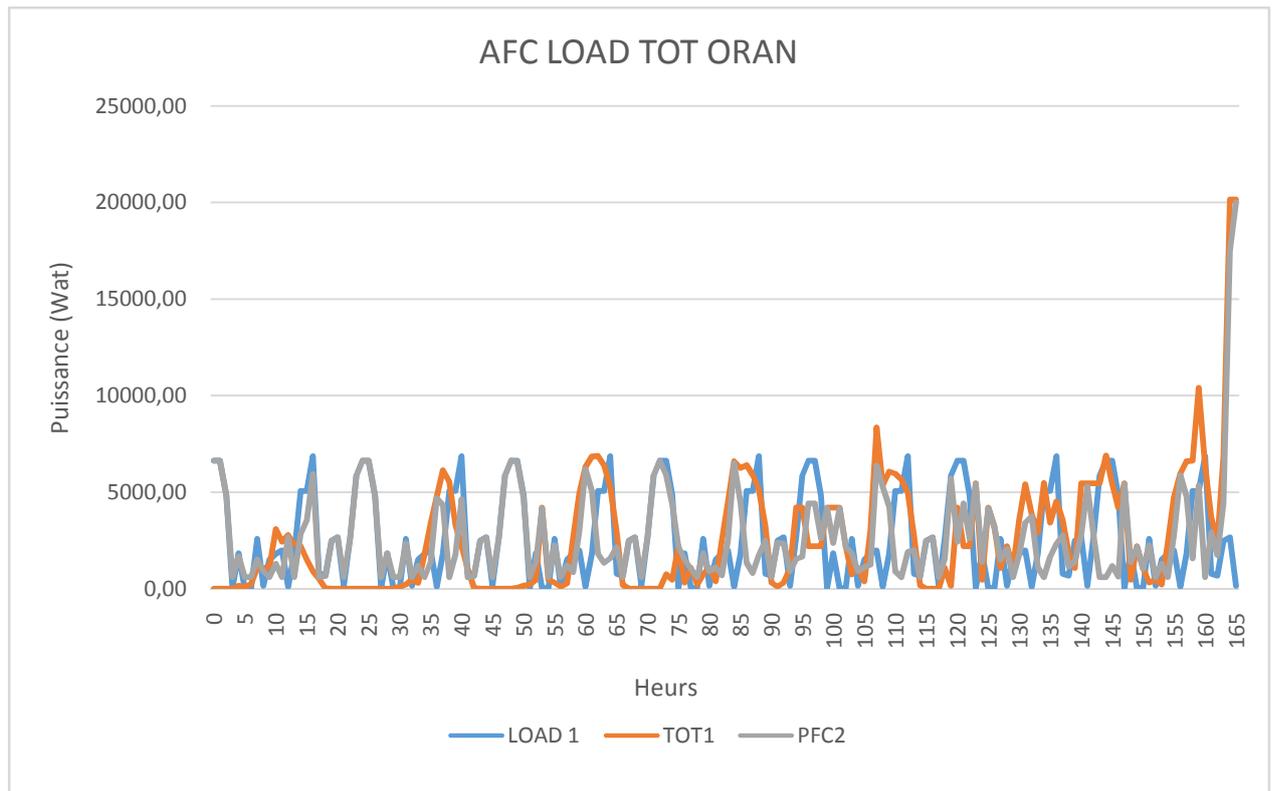


Figure 4.13 Consommation par AFC et la production totale, la charge pour la région d'Oran du 1 au 7 décembre

Les figures 4.12 ,4.13 représente la consommation de l'hydrogène stocke par rapport à la charge et à la production totale du PV et l'éolienne. Nous remarquons pour les sites d'Oran et de Bouzareah que pour certaines nuit l'énergie produite est nulle à cause de l'inexistence du rayonnement solaire et des vitesse de vent très faible , dans ce cas la pile à combustible commence à consomme l'hydrogène et libéré l'énergie stocke pour compensé le manque alors que pendant certaines périodes la production de la source renouvelable est supérieure à la charge dans ce cas la pile à combustible devenir en vielle avec une puissance constante.

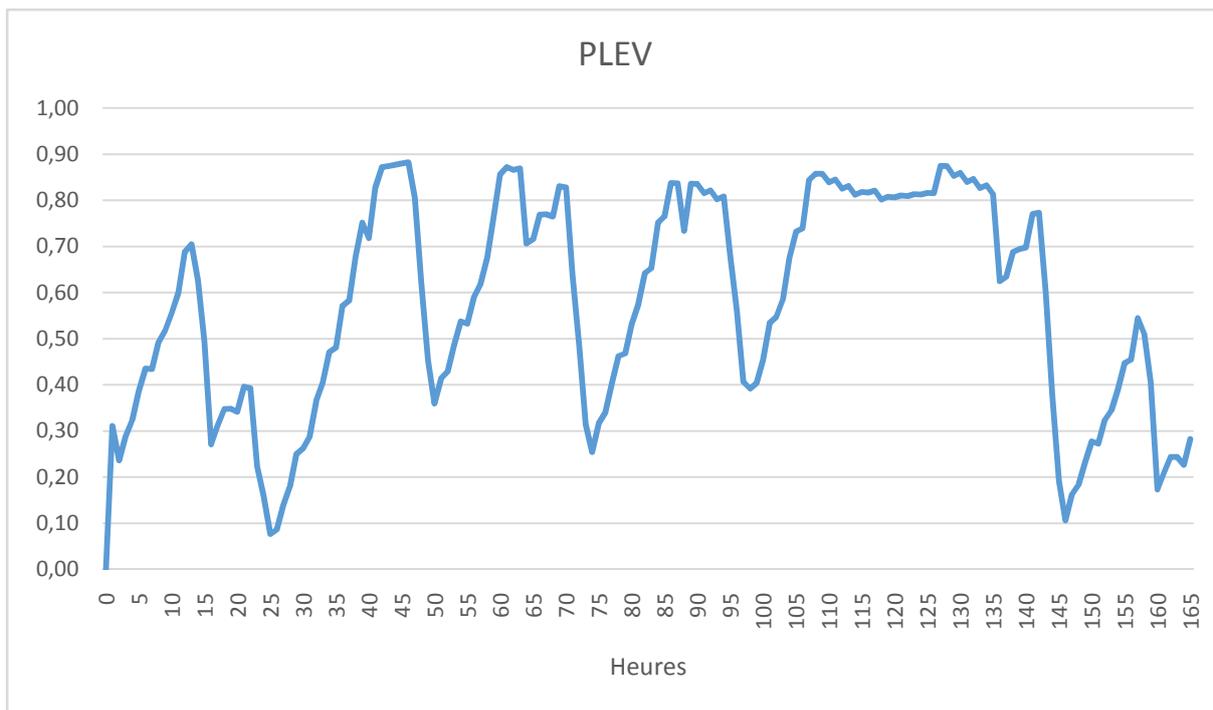


Figure 4.14 : Etat de charge du ballon de stockage H₂ pour la région de Bouzareah du 1 au 7 décembre

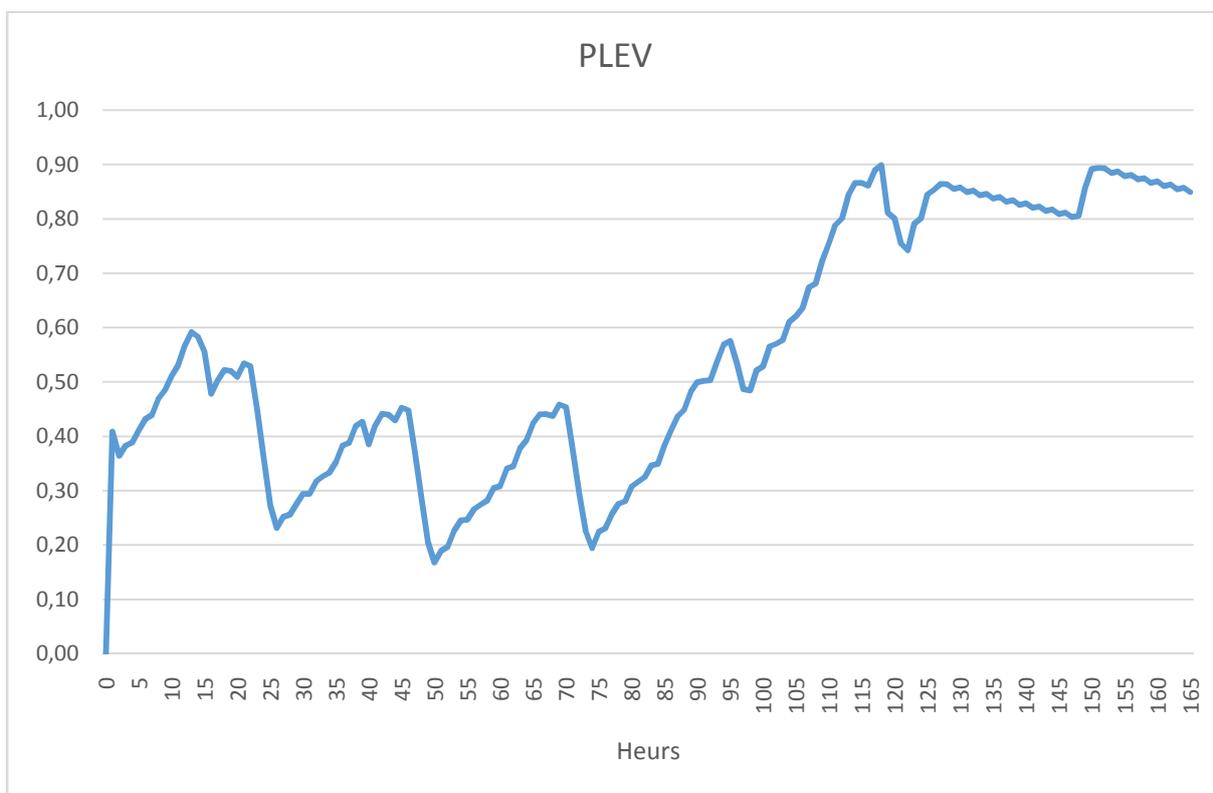


Figure 4.15 : Etat de charge du ballon de stockage H₂ pour la région d'Oran du 1 au 7 décembre

Les figures 4.14 ,4.15 représente l'état de charge du ballon de stockage H₂ pour la région de Bouzareah et la région d'Oran du 1 au 7 décembre. Nous remarquons que le stockage d'hydrogène dépend de la puissance total (pv+eolien) si il y'a un surplus d'énergie, elle va stocke, si il y'a un manque l'hydrogène stocke libère une énergie

4.11. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'exploiter les résultats de la simulation de façon très intéressante, Nous avons pu dimensionner le système hybride pour couvrir la charge totale sur les deux sites, tout en respectant les spécificités architecturales de l'immeuble et en essayant de minimiser le cout de l'installation .nous avons pu voir le comportement de stockage d'hydrogène lorsque la source renouvelable est insuffisante. Les résultats ont montre aussi que les éoliennes de petites puissances sont plus rentables dans les sites ou le gisement éolien est moyen voir faible comme pour les sites d'Oran et Bouzareah.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons dimensionné une installation hybride constituée des panneaux solaires, d'éoliennes et stockage par hydrogène pour l'alimentation en électricité d'un immeuble de 6 appartements isolée située dans les régions d'Oran, et de Bouzareah.

A travers ce projet d'étude nous avons traité les points suivants :

1. Détermination du gisement solaire et éolien des deux sites sélectionnés, à partir des données de l'irradiation solaire et des vitesses du vent .nous avons constaté que les régions Bouzareah et Oran dispose des gisements solaire et éolien importants. Pour Oran et Bouzareah sa valeur est de respectivement 40,694 KW/m² et 31,120 KW/m² .La même constatation a été faite pour les vitesses du vent, ilsont considérable pour les deux régions.
2. Détermination de la charge électrique d'ensemble d'habitation pour une famille de 4 personnes dans chaque appartement.
3. Modélisation des systèmes hybrides : éolien et solaire. Nous avons sélectionné un ensemble de modules photovoltaïques et éoliens de petite puissance adaptée pour générer de l'électricité à partir du vent et de la ressource solaire disponible.
4. Dimensionnement du système hybride : Nous avons dimensionné le système hybride éolien solaire et le stockage par hydrogène pour notre application pour le mois le plus défavorable en énergie solaire. En essayant deux combinaisons possibles et en augmentant à chaque fois la puissance de l'éolienne toute en comparant le déficit en énergie qui sera alimentée par des panneaux photovoltaïques .ensuite on choisira la combinaison qui présente le cout le moins élevé. Les résultats ont montré que pour les deux sites l'utilisation de l'éolienne de 5 KW en complément de panneaux photovoltaïques est la plus adaptée à notre cas.

En perspective, ce travail pourra être complété en dimensionnant le système hybride par d'autres méthodes qui utilisent des algorithmes spécifiques et dont le but est d'éviter le surdimensionnement du système ce qui réduira le cout total de l'installation.

Bibliographie

- [1] Lilia Aiche epsHamane, 2015, thèse doctorat, « Contribution à l'estimation du potentiel d'hydrogène produit par énergie éolienne »
- [2] zohrabenhachani ,élaboration d'un modelé de dimensionnement d'un système hybride eolien-photovoltaïque pour alimenter une ferme dans la région des Aurès , mémoire pour l'obtention d'un magister de l'université de Batna (2011) .
- [3] Markvart ,Sizing of hybridphotovoltaic-windenergy system ,SolarEnergy Vol. 51. No. 4. pp. 277-281, (1996).
- [4] A. D. Babul et al, sizing of a stand alonehybridwindphotovoltaic system usingathreeeventprobabilitydensityapproximation, Electric Power SystemsResearch 39 (1996).
- [5] S. Diaf et al, Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar , centre de développement des énergie renouvelable CDER (2006).
- [6] L. Aïche-Hamane, M. Hamane and M. BelhamelEstimation of hydrogen production fromdifferentwind turbine sizes in the south of Algeria
Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Algérie (2007)
- [7] Dakher Abbes, Etude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage. Dimensionnement et analyse du cycle de vie, européen journal of Electric engineering (2010).
- [8] hatti mustapha Contribution à l'étude des systèmes hybride PV/Pile à combustible
Université des sciences et des technologies Mohamed Boudiaf Oran (2010)
- [9] E. Akyuz et al Performance investigation of hydrogen production from a hybridwind-PV system Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Balikesir University, Turkey (2011)
- [10] Jing Li et al ,Simplesizingalgorithm for Stand-Alone PV/Wind/Batteryhybridmicrogrids Energies 5, 5307-5323 (2012).

- [11] GregorisPanayiotou et al, Design and simulation of a PV and a PV-Wind standalone energy system to power a householdapplication, *RenewableEnergy* 37 .355e363 (2012).
- [12] Chong Li et al , Techno-economicfeasibilitystudy of autonomouslyhybridwind/PV/ battery power system for a household in Urumqi, China , *Energy* 55 . 263e272 (2013).
- [13] Akbar Maleki et al , Optimalsizing of autonomouslyhybridphotovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by usingevolutionaryalgorithms, *SolarEnergy* 115 471–483 (2015).
- [14] FontinaPetrakopoulou et al Exergeticanalysis and dynamic simulation of a solar-wind power plant withelectricitystorage and hydrogengeneration. Unit of Environmental Science and Technology, National TechnicalUniversity of Athens, Greece (2015)
- [15] Pei-Hsing Huang et al Applying small wind turbines and a photovoltaicsystem to facilitateelectrolysis hydrogen production. Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, Taiwan (2015)
- [16] Xiangmin Pan et al Safety study of a wind solar hybrid renewable hydrogen refuelling station in China . School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai China (2016)
- [17] Chassagnette Nicolas Pujalte Pierre La Pile SOFC destinée à la cogénération. Etude de procédé. Ecole des mines d'albi France (2002)
- [18] Lilia Aiche eps Hamane, 2003, thèse de magister, « contribution à l'élaboration de la carte du gisement énergétique éolien de l'Algérie »
- [19] Mounir dziri thèse master application des énergies renouvelables dans l'habitat. Universitesaaddahleb Blida (2015)
- [20] Aide mathématique Trnsys
- [21] Zouako Souhil master énergies renouvelable et habitat bioclimatique (Dimensionnement et simulation d'un système hybride éolien-photovoltaïque autonome avec batteries intégré dans un habitat individuel) Université Saad Dahleb Blida 2016