

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies  
Filière : Électrotechnique  
Spécialité : **Energies Renouvelables**

*Présenté par*

**AIT BRAHAM Miliza**  
**CHERIKH Thiziri**

Thème

## **Etude d'un système multi-sources à énergies renouvelables**

*Mémoire soutenu publiquement le 25 / 06 / 2024 devant le jury composé de :*

**M<sup>r</sup> Djaffar BOUGUEDAD**

MCA, UMMTO, Président

**M<sup>r</sup> Mohamed Lamine HAMIDA**

MCA, UMMTO, Encadrant

**M<sup>r</sup> Hakim DENOUN**

Professeur, UMMTO, Co-Encadrant

**M<sup>lle</sup> Zoulikha TEBRI**

MAB, UMMTO, Examinatrice

# **REMERCIEMENT**

*Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers le Dieu Tout-Puissant, qui nous a guidés et soutenus tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Sa bénédiction a été une source d'inspiration inestimable*

*En premier lieu, on tient à remercier chaleureusement notre encadrant Mr Mohamed Lamine HAMIDA maître de conférences à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, qui s'est montré disponible pour nous guider avec des conseils judicieux et des commentaires rigoureux pour avancer avec détermination.*

*On remercie également notre Co-encadrant Mr Hakim DENOUN, Professeur à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou pour avoir assuré la partie théorique de ce travail, sans oublier le président et les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner.*

*Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre travail.*

# **Dédicace**

*A mes très chers parents,*

*Vous qui m'avez donné le souffle de la vie et qui m'avez toujours entourée de votre amour inconditionnel, ce mémoire est le fruit de votre dévouement et de votre foi en moi.*

*Votre fille unique vous le dédie avec tout mon cœur débordant de reconnaissance. J'espère que ce travail sera pour vous une source de fierté et de joie profonde, car c'est grâce à votre présence bienveillante, à vos encouragements sans faille et à votre confiance indéfectible en moi que j'ai pu mener à bien ce projet si cher à mon cœur.*

*Vous êtes mes piliers, mes guides et mes modèles, que cette humble dédicace soit le témoignage de ma profonde reconnaissance éternelle envers vous.*

*Je vous aime de tout mon être.*

*A l'ensemble de ma famille,*

*A mes grands-parents, mes oncles et leurs familles et enfants ( Syfax, Mounia, Mayas), mes tantes et leurs maris et enfants (Tahar et Alicia), (Gaya et yasmine), et tous les membres de ma famille, vous avez toujours cru en moi et m'avez entourée de votre affection. Votre soutien et votre amour ont été des piliers essentiels tout au long de cette aventure.*

*À ma binôme et amie THIZIRI,*

*Tu as été à mes côtés tout au long de ce parcours, partageant mes joies et mes doutes. Ton soutien indéfectible et ta complicité ont été d'un inestimable réconfort.*

*À mes chers amis,*

*En particulier MELISSA et NOUNOU, vous tous qui avez partagé mes moments de vie, je vous adresse mes sincères remerciements. Votre présence à mes côtés a été un véritable soutien et m'a permis de surmonter les défis de cette expérience enrichissante.*

*A mes cousins et cousines bien aimés,*

*Surtout khalou **Rahim** et **Lotfi**, tata **Hvoudou** et tonton **Azize**, tata **Djamila** et ses fils, à vous tous, qui avez contribué, chacun à votre manière, à la réalisation de ce mémoire, je vous exprime ma profonde gratitude. Que cette dédicace soit le reflet de mon immense reconnaissance et de mon affection*

**Miliza**

# **Dédicace**

*Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,*

*A mes chers parents,*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit. Votre amour et votre soutien m'ont permis de traverser ce parcours avec confiance, et de réaliser mes objectifs.*

*Ce mémoire est autant le vôtre que le mien. Il représente les fruits de vos conseils, de vos sacrifices et votre foi en moi. Merci d'avoir cru en moi même lorsque j'en doutais.*

*A mes frères, Moumouh et Alilou,*

*A mes sœurs, Lili, Nina et son mari Lounis,*

*Pour ses soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études. Merci pour tout ce que vous êtes et pour tout ce que vous avez fait pour moi.*

*A mes grands-parents maternelle,*

*Je leurs exprime ma profonde gratitude pour leur fierté à mon égard et leurs souhaits constants de me voir réussir. Vous m'avez entouré d'amour et de tendresse, merci pour les valeurs que vous m'avez transmises tout au long de ma vie.*

*A la mémoire de mes grands-parents paternelle,*

*J'espère que, du monde qui sont sien maintenant, ils apprécient cet humble geste comme une preuve de reconnaissance éternelle.*

*A mes neveux, Rayan et Dylan,*

*A ma nièce, Maria,*

*J'espère que leur chemin sera rempli de succès, qu'ils trouvent leur voie et rencontrent un avenir brillant et prospère.*

*A ma chère copine et binôme, Miliza,*

*Merci, pour ton entente et ta sympathie. Je te souhaite un avenir radieux et plein de bonheur.*

*A mes chères cousines, Katyla, Toutou, Aini, Melissa, Louiza, et mes cher ami(e)s,*

*Pour leurs aides et support dans les moments difficiles.*

## Tables des matières

---

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### CHAPITRE I Généralités sur le système multi-sources à énergies renouvelables

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition .....	3
I.3. Les différentes architectures des systèmes multi-sources.....	4
I.3.1. L'architecture à bus à courant continu (DC) .....	4
I.3.2. L'architecture à bus à courant alternatif AC.....	5
I.3.3. Architecture mixte à bus (DC/AC).....	5
I.4. Les principaux composants d'un système multi-sources.....	6
I.4.1. Générateur diesel .....	6
I.4.2. Système photovoltaïque .....	7
I.4.2.1. Types de système PV .....	8
I.4.2.2. Fonctionnement .....	8
I.4.3. Eolienne .....	9
I.4.3.1. Fonctionnement .....	10
I.4.4. Pile à combustible.....	10
I.4.4.1. Stockage d'hydrogène .....	11
I.4.4.2. Composants d'une pile à combustible .....	11
I.4.4.3. Fonctionnement de la pile .....	12
I.4.4.4. Types de piles à combustible .....	13
I.4.5. Le système du stockage .....	13
I.4.5.1. Les batteries .....	14
I.4.5.2. Les supercondensateurs .....	14
I.4.6. Les Convertisseurs .....	16
I.4.7. Le réseau électrique .....	16
I.4.8. La charge.....	17
I.5. Les avantages et les inconvénients d'un système multi-sources .....	17
I.6. Conclusion.....	18

### CHAPITRE II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro

II.1 Introduction .....	19
II. 2 Présentation du Logiciel HOMER Pro .....	19

## Tables des matières

---

II.3 Présentation de l'interface et du fonctionnement général du logiciel HOMER Pro .....	20
II.4 Avantages et inconvénients du logiciel Homer Pro .....	22
II.5 Dimensionnement d'un système multi-sources sous HOMER Pro .....	22
II.5.1 Localisation du site de notre étude.....	24
II.5.2 Profil de la charge .....	27
II.5.3 Adaptation d'un générateur diesel à une pile à combustible .....	28
II.5.4 Choix du panneau photovoltaïque .....	29
II.5.5 Choix des batteries de stockage .....	30
II.5.6 Choix du convertisseur .....	31
II.5.7 Choix de l'électrolyseur.....	32
II.5.8 Réservoir d'hydrogène.....	33
II.6. Conclusion .....	35
 <b>CHAPITRE III Simulation et interprétation des résultats</b>	
III.1. Introduction .....	36
III.2. Interprétation des résultats de la simulation .....	36
III.2.1. Interprétation technique.....	36
III.2.2. La production et la consommation d'énergie .....	37
III.2.3. Résultats liés au champ PV .....	39
III.2.4. Résultats liés à la pile à combustible.....	41
III.2.5. Résultats liés au système de stockage par batteries.....	42
III.2.6. Résultats liés au convertisseur DC/AC.....	44
III.2.7. Résultats liés à l'électrolyseur .....	46
III.2.8. Résultats liés au réservoir d'hydrogène.....	48
III.3. Analyse détaillée des résultats de simulation .....	51
III.4. Conclusion.....	54
 <b>Conclusion générale.....</b>	<b>56</b>
 <b>Références bibliographique.....</b>	<b>58</b>

## *Liste des figures*

### **CHAPITRE I : Généralités sur le système multi-sources à énergies renouvelables**

Figure I.1 : Architecteur générale des SMS .....	3
Figure I.2 : Système multi-sources à bus DC.....	5
Figure I.3 : Système multi-sources à bus AC.....	5
Figure I.4 : Système multi-sources à bus mixte DC/AC.....	6
Figure I.5 : Configuration d'un groupe électrogène diesel.....	6
Figure I.6 : Eléments constituant un champ photovoltaïque.....	7
Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque .....	9
Figure I.8: Schéma d'une éolienne à axe verticale et d'une à axe horizontal .....	9
Figure I.9 : Production d'électricité à partir d'hydrogène.....	10
Figure I.10 : Différentes composants d'une pile à combustible .....	11
Figure I.11 : Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible.....	12
Figure I.12 : Différents types de batteries solaires.....	14
Figure I.13 : Schéma de fonctionnement d'un supercondensateur.....	15

### **CHAPITRE II : Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro**

Figure II.1 : Logo du logiciel HOMER Pro .....	19
Figure II.2 : L'interface du logiciel HOMER Pro.....	20
Figure II.3 : Equipements disponibles sur le logiciel HOMER Pro.....	21
Figure II.4 : Ressources nécessaires pour les équipements du logiciel Homer Pro.....	21
Figure II.5 : Présentation des résultats de calcul .....	22
Figure II.6 : Photo d'une ferme laitière alimenter par des énergies renouvelables .....	23
Figure II.7 : Situation géographique du site étudié .....	24
Figure II.8 : L'irradiation solaire mensuelle de la commune d'IFERHOUNENE.....	25
Figure II.9 : Température moyenne mensuelle de la commune d' IFERHOUNENE.....	26
Figure II.10 : Vitesse du vent moyenne mensuelle de la commune d' IFERHOUNENE .....	27
Figure II.11 : Profil de charge du système .....	28
Figure II.12 : Générateur diesel.....	29
Figure II.13 : Caractéristique du combustible utilisé .....	29

Figure II.14 : Paramètres du champ PV .....	30
Figure II.15 : Paramètres de la batterie .....	31
Figure II.16 : Paramètres du convertisseur.....	32
Figure II.17 : Paramètres de l'électrolyseur.....	33
Figure II.18 : Paramètres du réservoir d'hydrogène .....	34
Figure II.19 : Architecteur du système à étudier sous le logiciel HOMEP Pro .....	34

### **CHAPITRE III : Simulation et interprétation des résultats**

Figure III.1 : Résultats de simulation sous HOMER Pro .....	36
Figure III.2 : Production mensuelle des sources à énergies renouvelables .....	38
Figure III.3 : Puissance journalière moyenne délivrée par les panneaux solaires.....	40
Figure III.4 : Puissance mensuelle moyenne délivrée par les panneaux solaires.....	40
Figure III.5 : Puissance journalière moyenne délivrée par la pile à combustible .....	41
Figure III.6 : Puissance mensuelle moyenne délivrée par la pile à combustible .....	42
Figure III.7 : Etat de charge moyen journalière et mensuel des batteries .....	43
Figure III.8 : Puissance mensuelle moyenne introduite par les batteries .....	44
Figure III.9 : Puissance moyenne journalière délivrée par le convertisseur DC/AC .....	45
Figure III.10 : Puissance moyenne mensuelle délivrée par le convertisseur DC/AC .....	45
Figure III.11 : Puissance moyenne journalière introduite par l'électrolyseur .....	47
Figure III.12 : Puissance moyenne mensuelle délivrée par l'électrolyseur .....	48
Figure III.13 : Niveau journalier et mensuelle du réservoir d'hydrogène .....	49
Figure III.14 : Quantité mensuelle moyenne d'hydrogène stocké.....	50
Figure III.15 : Variation saisonnière du profil de consommation journalier .....	50
Figure III.16 : Profil énergétique pour la journée du 3 janvier.....	51
Figure III.17 : Profil énergétique pour la journée du 11 janvier .....	52
Figure III.18 : Profil énergétique pour la journée du 16 juillet .....	53
Figure III.19 : Profil énergétique pour la journée du 13 décembre.....	54



## *Liste des tableaux*

### **CHAPITRE I : Généralités sur le système multi-sources à énergies renouvelables**

Tableau I.1 : Classification des SMS par gamme de puissance .....	4
---	---

### **CHAPITRE II : Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro**

Tableau II.1 : Billan énergétique d'une ferme laitière.....	27
---	----

Tableau II.2 : Choix de tension de batterie pour un système photovoltaïque .....	31
--	----

### **CHAPITRE III : Simulation et interprétation des résultats**

Tableau III.1 : Capacité énergétique des composants.....	37
--	----

Tableau III.2 : Production énergétique annuelle des sources.....	37
--	----

Tableau III.3 : Consommation énergétique annuelle de la charge.....	39
---	----

Tableau III.4 : Paramètres de fonctionnement du champ PV .....	39
--	----

Tableau III.5 : Paramètres de fonctionnement de la pile à combustible .....	41
---	----

Tableau III.6 : Paramètres de fonctionnement des batteries .....	43
--	----

Tableau III.7 : Paramètres de fonctionnement de convertisseur .....	45
---	----

Tableau III.8 : Paramètres de fonctionnement d'électrolyseur.....	46
---	----

Tableau III.9 : Paramètres de fonctionnement du réservoir d'hydrogène .....	48
---	----

# **Introduction générale**

Un système multi-sources à énergies renouvelables offre une résilience supérieure en compensant les fluctuations de production dues aux conditions météorologiques. De plus, ce système favorise la diversification des sources d'énergie, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles importés. Les pays dotés de diverses ressources renouvelables peuvent ainsi réduire leur empreinte carbone et atteindre leurs objectifs de transition énergétique. Le stockage avancé de l'énergie, comme les batteries, permet en outre de maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelable en stockant l'excédent d'énergie pour une utilisation ultérieure, garantissant ainsi un approvisionnement électrique constant [1].

L'utilisation croissante des énergies renouvelables constitue une réponse essentielle et prometteuse face aux défis environnementaux et énergétiques contemporains, offrant ainsi une alternative durable et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins énergétiques de notre société.

Face à cette réalité, de nombreux pays ont dirigé leur attention vers les énergies à faible émission de carbone comme l'hydrogène vert, l'un des carburants de bas carbone susceptibles de remplacer les carburants fossiles. Les énergies renouvelables, en tant que ressources naturellement abondantes, offrent la possibilité d'être exploitées sans compromettre les besoins énergétiques futurs, se distinguant ainsi des combustibles fossiles dont les réserves s'épuisent progressivement [2,3].

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique apparaît comme une solution très prometteuse pour l'avenir, en raison de son potentiel important. L'hydrogène apportera une productivité élevée, ce qui pourra résoudre le problème du stockage des grandes quantités d'électricité. De plus, nous pouvons utiliser les énergies renouvelables comme principale source d'énergie en utilisant conjointement les piles à combustible (PAC) et l'électrolyseur pour générer l'hydrogène. Il convient absolument à ce que l'hydrogène devienne le vecteur énergétique du futur et cela grâce à la pile à combustible [4,5].

L'intérêt porté aux piles à combustible en tant que source d'énergie propre gagne en importance en raison des quantités massives de polluants rejetés dans l'environnement chaque année. De nos jours, les piles à combustible sont utilisées dans de nombreuses applications, comme les véhicules, les engins spatiaux et les systèmes de communication. L'avantage clé des piles à combustible est qu'elles ne sont pas soumises à la limite thermodynamique de Carnot, ce qui leur permet d'avoir un rendement plus élevé, notamment à charge partielle, comparé aux moteurs à combustion interne [6].

Dans ce contexte, notre étude s'est intéressée à la conception d'un système multi-sources pour la production d'électricité nécessaire au fonctionnement d'une ferme laitière située dans la région d'IFERHOUNENE. Ce système associe deux sources d'énergie renouvelables, des panneaux photovoltaïques et une pile à combustible à hydrogène, et est renforcé par un système de stockage par batteries solaires.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la transition énergétique, visant à répondre aux besoins énergétiques de manière efficiente et à contribuer à l'instauration d'un modèle agricole plus respectueux de l'environnement. Cette étude s'appuie sur le logiciel HOMER Pro pour optimiser la configuration du système et répondre aux besoins spécifiques de la ferme.

En conséquence, ce mémoire est structuré en trois chapitres comme suit :

Le premier chapitre pose les bases essentielles pour la compréhension des systèmes multi-sources à énergies renouvelables, en présentant ses composants essentiels et leurs principes de fonctionnement ainsi que les différentes technologies de stockage associées.

Le deuxième chapitre se concentre sur le dimensionnement d'un système multi-sources à énergie renouvelable pour l'alimentation électrique d'une ferme laitière située dans la commune IFERHOUNENE wilaya de Tizi Ouzou, en utilisant l'outil de simulation Homer Pro.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons une analyse approfondie des résultats de la simulation du système conçu pour la ferme laitière, en nous appuyant sur les principales données obtenues avec le logiciel HOMER Pro.

En guise de conclusion, ce mémoire présente les principaux résultats obtenus. Il précise ensuite les limites de cette étude et propose des perspectives d'élargissement et d'amélioration pour des travaux futurs.

**Chapitre I**  
**Généralités sur le système**  
**multi-sources à énergies**  
**renouvelables**

## I.1. Introduction

Le développement durable des sources d'énergie dites propres prend aujourd'hui de plus en plus d'importance. Cependant, étant donné les problèmes de production d'énergie intermittente et incertaine à partir de ces sources d'énergie renouvelables, les chercheurs dans ce domaine ont entrepris une consolidation des approvisionnements et la formation d'un réseau dit multi-sources, qui correspond aux critères d'exigence énergétiques et de continuité de service [7].

Dans ce chapitre, nous explorerons le monde des systèmes multi-sources. Nous décrirons leurs différentes architectures, les principaux composants de ces systèmes, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

## I.2. Définition

Le Système Multi-Sources (SMS) à énergies renouvelables ou le Système Energétique Hybride (SEH), est un système qui peut combiner deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables. On l'utilise lorsqu'une seule source ne suffit pas pour répondre aux besoins énergétiques de la charge.

De plus, son objectif est d'optimiser la production et de garantir l'alimentation en cas de panne, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie [9].

L'architecture générale des systèmes multi-sources est illustrée dans la Figure I.1.

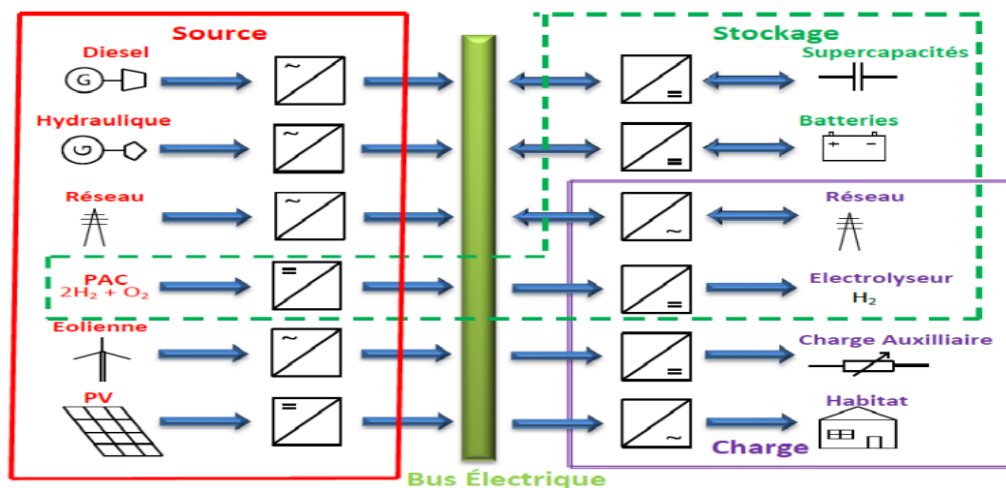


Figure I.1: Architecture générale des SMS [10]

Ces sources d'énergies renouvelables sont souvent associées à une source traditionnelle, comme un générateur diesel. De plus, ces systèmes intègrent également des systèmes de stockage tels que des batteries, des super condensateurs et des piles à combustible [8].

Le champ d'application des SMS est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau I.1) [10].

**Tableau I.1** : Classification des SMS par gamme de puissance [10]

Puissance du Système Energétique Hybride [KW]	Applications
Faible : < 5	Systèmes autonomes : stations de télécommunications, Pompage de l'eau, autres applications isolées
Grande : > 250	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)
Moyenne : 5-250	250 Micro-réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...

### I.3. Les différentes architectures des systèmes multi-sources

Dans le domaine des systèmes multi-sources, il existe trois architectures qui peuvent être utilisées en fonction des besoins et des contraintes spécifiques.

Architecture à Bus CC (bus à Courant Continu) où bus DC (Discontinued Current), architecture à Bus CA (bus à Courant Alternatif) où bus AC (Alternative Current) et l'architecture mixte à Bus CC-CA.

#### I.3.1. L'architecture à bus à courant continu (DC)

L'architecture à bus à courant continu est utilisée pour les systèmes où la production et le stockage d'énergie en courant continu sont prédominants. D'après la Figure I.2, la tension constante provient de sources comme des batteries ou des panneaux solaires. Les sources de courant alternatif sont converties en courant continu avant d'être injectées dans le bus DC. Les batteries et les onduleurs gèrent les pics de charge, et la puissance peut être contrôlée via un contrôleur de charge [11].

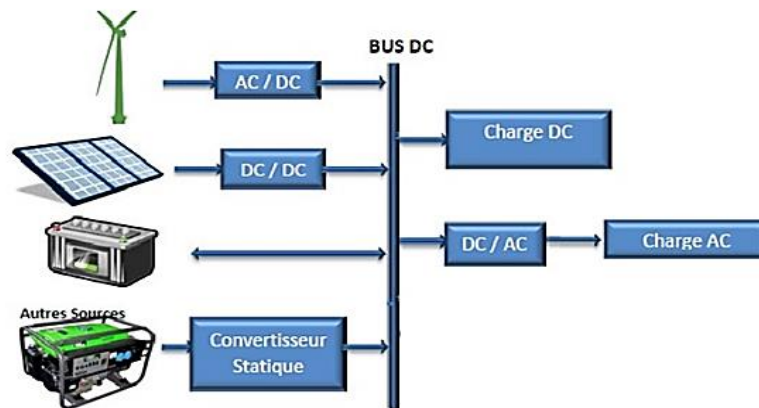


Figure I.2: Système multi-sources à bus DC [14]

### I.3.2. L'architecture à bus à courant alternatif AC

Comme le montre la Figure I.3, cette architecture comporte un système hybride dans lequel plusieurs convertisseurs peuvent se synchroniser avec des générateurs pour alimenter indépendamment une charge variable, ce qui rend les sources flexibles et capables de répondre aux exigences de puissance souhaitées. [13]

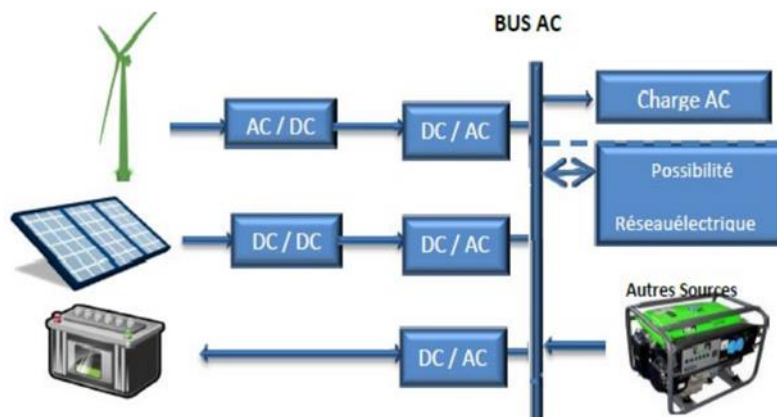


Figure I.3: Système multi-sources à bus AC [14]

### I.3.3. Architecture mixte à bus (DC/AC)

Dans une architecture mixte à bus (DC/AC) donnée par la Figure I.4, les sources d'énergie renouvelables peuvent directement alimenter une partie de la charge en courant alternatif (AC), améliorant l'efficacité du système et réduisant la puissance nominale de l'onduleur. Les convertisseurs entre les bus peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel pour la conversion AC/DC. Les batteries peuvent être chargées en cas d'excès d'énergie. Cette configuration est avantageuse pour les systèmes avec production et stockage multiples à niveaux de puissance élevés, offrant également la possibilité de se connecter au réseau électrique [11].



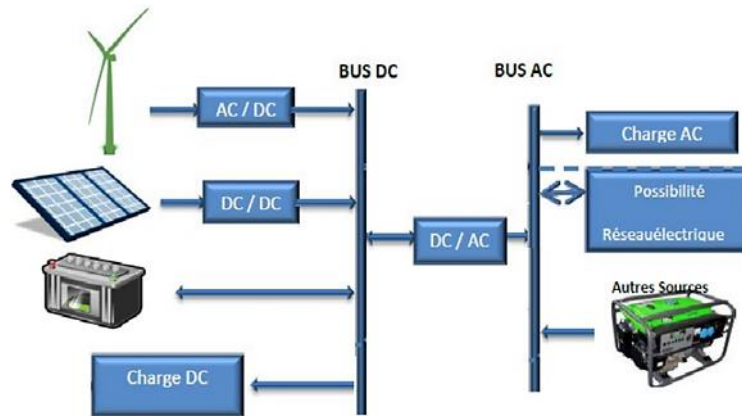


Figure I.4 : Système multi-sources à bus mixte DC/AC [14]

## I.4. Les principaux composants d'un système multi-sources

### I.4.1. Générateur diesel

Le générateur diesel est un équipement essentiel pour la production d'électricité en utilisant du carburant diesel comme source d'énergie. Il est largement utilisé dans diverses applications, allant des systèmes de secours aux installations industrielles, en raison de sa fiabilité et de sa disponibilité généralisée. En cas de défaillance ou de coupure de courant, le générateur diesel intervient pour assurer la continuité de l'alimentation électrique, notamment dans les systèmes hybrides. Sa présence est cruciale pour éviter les conséquences graves et les pertes financières importantes qui peuvent résulter d'une interruption de l'alimentation électrique. De plus, les générateurs diesel sont souvent appréciés pour leur efficacité énergétique et leur capacité à fournir une puissance élevée sur une longue durée de fonctionnement [12]. La Figure I.5 ci-dessous représente la configuration d'un groupe électrogène diesel.

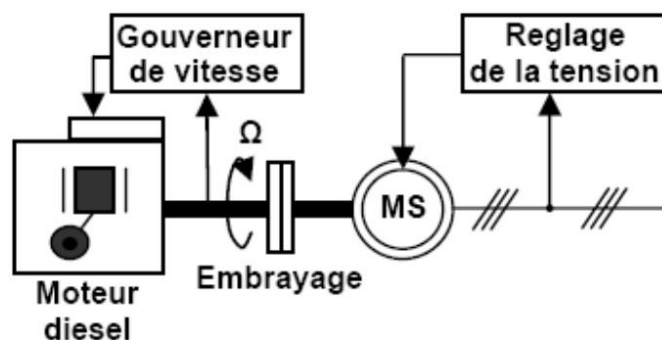
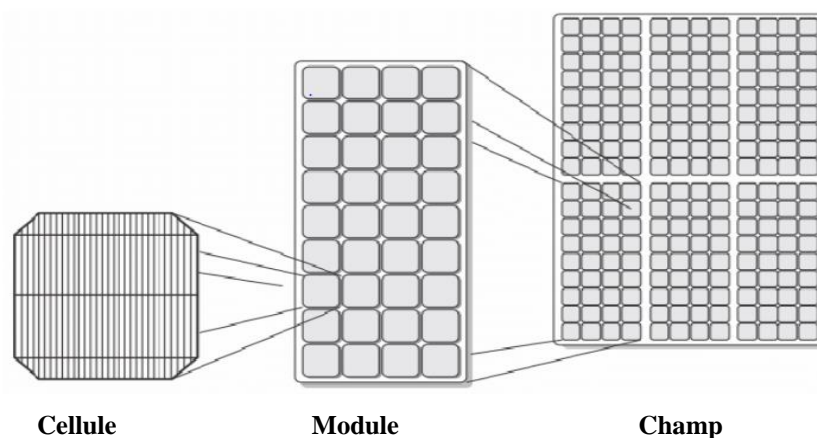


Figure I.5 : Configuration d'un groupe électrogène diesel [7]

### I.4.2. Système photovoltaïque

Le système photovoltaïque permet une production d'électricité propre, fiable et silencieuse en convertissant directement l'énergie solaire en électricité. Les principaux composants d'un système photovoltaïque comprennent des panneaux solaires (cellules photovoltaïques), des systèmes de stockage tels que les batteries, des régulateurs et des convertisseurs de courant. Dans un système photovoltaïque autonome, un générateur de secours peut être intégré pour assurer une alimentation électrique continue en cas de dysfonctionnement [9]. La Figure I.6 illustre les éléments constituant un champ photovoltaïque.



**Figure I.6 :** Eléments constituant un champ photovoltaïque [10]

**Les cellules photovoltaïques :** sont les éléments de base qui convertissent la lumière du soleil en électricité.

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, tels que les [27] :

- **Cellules monocristallines :** Fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium, elles offrent le meilleur rendement de conversion (jusqu'à 22%) mais sont aussi les plus coûteuses.
- **Cellules polycristallines :** Constituées de plusieurs cristaux de silicium, elles sont moins performantes que les cellules monocristallines (rendement de 15 à 19%) mais aussi moins chères.
- **Cellules amorphes :** Fabriquées à partir de silicium non cristallin, elles sont flexibles et moins sensibles à l'orientation du soleil que les autres types de cellules, mais leur rendement est plus faible (environ 5 à 10%).

- **Cellules multi jonction :** Elles combinent plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs pour convertir une plus grande partie du spectre lumineux en électricité. Elles atteignent des rendements élevés (jusqu'à 30%) mais sont encore très coûteuses.
- **Cellules en Pérovskite :** Représentent une nouvelle technologie prometteuse pour l'énergie solaire, grâce à leur rendement élevé et leur faible coût de production. Cependant, des défis de stabilité et de fabrication doivent encore être surmontés.

Le choix du type de cellule dépendra de plusieurs facteurs, tels que le budget, l'efficacité souhaitée et l'application envisagée.

**Les modules photovoltaïques :** regroupent plusieurs cellules photovoltaïques pour produire une puissance plus élevée. Les modules solaires comprennent également divers composants tels que le verre trempé, la couche d'EVA, la feuille de Tedlar blanc et la boîte de jonction. Ces éléments assurent la protection, la transmission de la lumière et le raccordement électrique du module.

**Les champs photovoltaïques :** sont des installations de grande taille qui regroupent plusieurs modules photovoltaïques.

#### I.4.2.1. Types de système PV

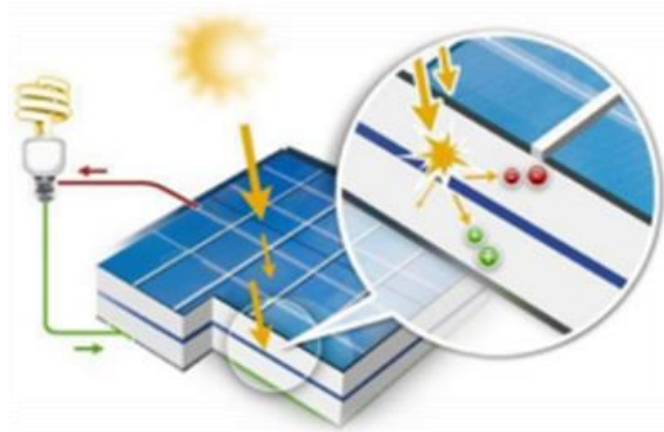
Il existe trois principaux types de systèmes photovoltaïques [17] [15] :

- **Systèmes photovoltaïques connectés au réseau :** Ces systèmes sont connectés directement au réseau électrique et ne nécessitent pas de batteries, car l'énergie excédentaire est transmise au réseau et celui-ci fournit de l'électricité lorsque la production solaire est insuffisante.
- **Systèmes photovoltaïques autonome :** Les systèmes autonomes ne sont pas connectés au réseau et stockent l'électricité qu'ils produisent dans des batteries pour une utilisation ultérieure.
- **Systèmes photovoltaïques hybride :** Les systèmes hybrides sont une combinaison de systèmes connectés au réseau et de systèmes autonomes, avec la possibilité de stocker l'énergie dans des batteries et d'utiliser également d'autres sources d'énergie telles que l'énergie éolienne.

#### I.4.2.2. Fonctionnement

Le principe de fonctionnement est montré par la Figure I.7. Le processus commence par l'absorption de la lumière solaire par les cellules solaires des panneaux photovoltaïques, qui convertissent cette énergie en courant continu (DC). Le courant continu est ensuite converti en courant alternatif (AC) à l'aide d'un onduleur, puis transmis aux appareils électriques via la boîte

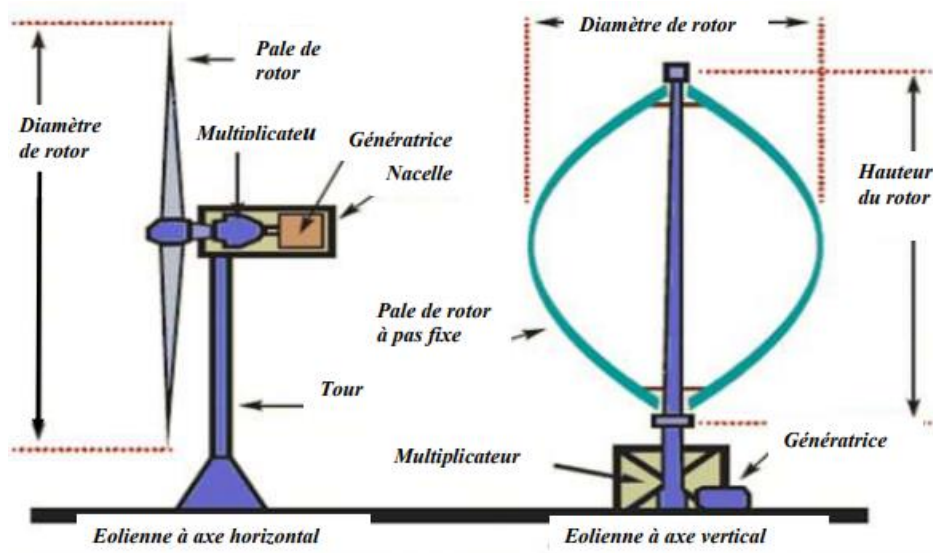
à fusibles existante dans les maisons. L'électricité excédentaire peut être injectée dans le réseau électrique ou utilisée pour charger les batteries. [18]



**Figure I.7 :** Principe du fonctionnement d'un Générateur Photovoltaïque [8]

### I.4.3. Eolienne

Une éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Les éoliennes peuvent être classées en fonction de leur forme, de leur capacité de production et de leur emplacement. Comme le montre la Figure I.8, les éoliennes peuvent être à axe vertical ou à axe horizontal, avec différentes capacités de production allant de la plus grande à la plus petite. On les trouve dans les parcs éoliens, sur terre ou en mer [19].



**Figure I.8:** Schéma d'une éolienne à axe verticale et d'une éolienne à axe horizontal [19]

L'éolienne est composée de plusieurs éléments clés :

- Tour : Structure imposante qui supporte la nacelle et le rotor.
- Nacelle : Abrite les composants mécaniques et électriques de l'éolienne.
- Rotor : Composé du moyeu et des pales, il capte l'énergie du vent.
- Pales : Généralement au nombre de trois, elles sont profilées pour maximiser la capture du vent.
- Moyeu : Relie les pales au rotor.

#### I.4.3.1. Fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une éolienne est simple : le vent fait tourner les pales d'une éolienne, qui font à leur tour tourner le générateur. Le générateur convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Cette électricité peut être envoyée sur le réseau électrique ou stockée dans des batteries [19].

#### I.4.4. Pile à combustible

Une pile à combustible est un appareil qui convertit l'énergie chimique du carburant en énergie électrique. L'électricité est produite par une réaction chimique contrôlée avec de l'oxygène ou d'autres oxydants. Les piles à combustible diffèrent des batteries dans la mesure où elles nécessitent un approvisionnement continu en carburant pour fonctionner, mais leur production d'électricité est constante tant que l'alimentation en carburant est assurée. Une pile à combustible est un générateur de courant très économe en énergie. C'est Généralement proche de 50% [20]. La Figure I.9 montre un schéma simplifié de la conversion de l'hydrogène en énergie électrique.



**Figure I.9 :** Production d'électricité à partir d'hydrogène [7]

Les piles à combustible ont de nombreuses applications potentielles, telles que la propulsion des véhicules, les applications portables, la production d'électricité et de chaleur, etc. Des innovations et des recherches sont en cours pour améliorer la production d'hydrogène, réduire les coûts des catalyseurs et explorer de nouvelles méthodes de stockage de l'hydrogène.

#### I.4.4.1. Stockage d'hydrogène

L'hydrogène n'est pas une source d'énergie primaire comme le pétrole ou le gaz. Il est plutôt un vecteur d'énergie, car il doit être produit par une réaction chimique à partir d'une source d'énergie primaire avant de pouvoir être utilisé.

L'hydrogène peut être stocké de différentes manières, soit sous forme de gaz sous haute pression, soit sous forme de liquide à des températures extrêmement basses. Le stockage de l'hydrogène sous forme de gaz nécessite une compression ou une liquéfaction pour réduire son volume. Il peut être stocké dans des réservoirs pour le transport ou dans des installations de stockage souterraines. Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide est plus complexe et plus coûteux, et n'est actuellement utilisé qu'à des fins spécifiques. En outre, des études sont menées sur le stockage de l'hydrogène sous forme d'ammoniac. L'hydrogène peut également être utilisé pour stocker de l'énergie renouvelable en convertissant l'électricité excédentaire en hydrogène par le biais du processus Power to Gas. Cela permet de stocker l'électricité lorsque la production d'énergie renouvelable dépasse la demande. L'hydrogène stocké peut ensuite être injecté dans les réseaux de transport de gaz ou converti en méthane synthétique. Le procédé Power to Gas est essentiel pour relever les défis du stockage et de la fluctuation des énergies renouvelables [22].

#### I.4.4.2. Composants d'une pile à combustible

Chaque type de pile a sa propre structure géométrique, mais les composants principaux restent constants. La Figure I.10 présente une vue simplifiée des principaux composants d'une pile à combustible.

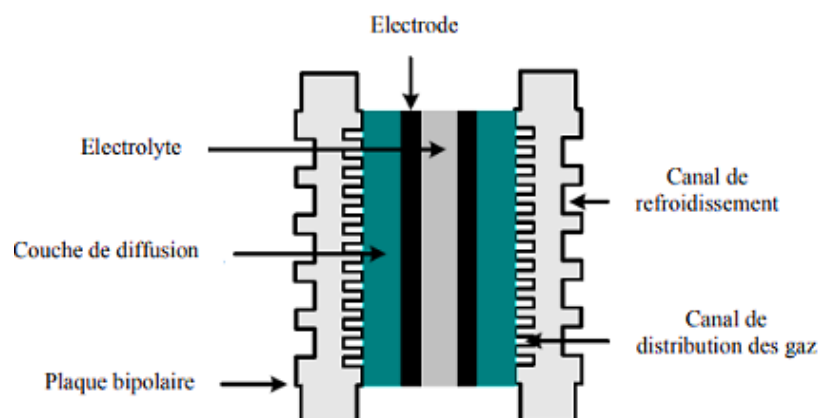


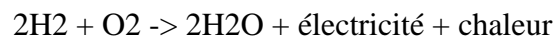
Figure I.10 : Différents composants d'une pile à combustible [20]

- **Electrodes (anode et cathode)** : supportent les réactions chimiques et génèrent l'électricité.

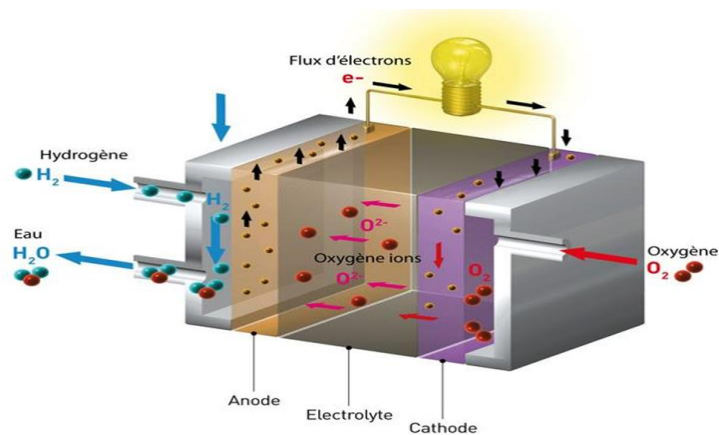
- **Electrolyte** : permet aux ions de circuler entre les électrodes.
- **Couche de diffusion** : assure la distribution des gaz sur les électrodes.
- **Plaque bipolaire** : assure la liaison électrique entre les électrodes et collecte l'électricité.
- **Canaux de refroidissement et de distribution du gaz** : évacuent la chaleur et acheminent les gaz vers les électrodes.

#### I.4.4.3. Fonctionnement de la pile

Une pile à combustible est un générateur qui utilise l'oxydation de l'hydrogène sur une électrode et la réduction de l'oxygène sur l'autre électrode pour produire de l'électricité et de la chaleur. Elle ne nécessite que de l'hydrogène et de l'oxygène pour fonctionner. L'hydrogène se décompose sur l'anode, libérant des électrons qui circulent dans le circuit extérieur. Les ions hydrogène migrent vers la cathode à travers l'électrolyte. Pendant ce temps, l'oxygène se décompose sur la cathode, se combinant avec les ions hydrogène et les électrons pour former de l'eau. Le schéma de fonctionnement de la pile à combustible est illustré dans la Figure I.11. La réaction globale dans une pile à combustible est la suivante :



Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, et certains nécessitent des catalyseurs en métaux nobles comme le platine. L'hydrogène est le combustible le plus efficace en raison de sa grande réactivité électrochimique, tandis que l'oxygène est le meilleur oxydant en raison de sa grande réactivité et de son abondance dans l'air [6].



**Figure I.11** : Schéma de fonctionnement d'une pile à combustible [6]



#### I.4.4.4. Types de piles à combustible

Différents types de piles à combustible existent, classés en fonction de l'électrolyte utilisé et de la température de fonctionnement. Ils comprennent [26] :

- **La pile à membrane échangeuse de protons :** Elle est caractérisée par l'utilisation d'une membrane conductrice de protons et fonctionne à des températures relativement réduites. Elle est essentiellement utilisée dans les automobiles alimentées en hydrogène.
- **La pile à combustible à oxyde solide (SOFC) :** Son mode de fonctionnement repose sur l'utilisation d'un électrolyte en céramique et elle opère à des températures élevées. Elle est adaptée aux applications fixes (stationnaires) et aux véhicules de transport de poids lourds.
- **La pile à combustible à oxyde solide à carbonate fondu (MCFC) :** Elle fonctionne avec un électrolyte à base de carbonate en fusion et à hautes températures. Ce genre de pile est idéal pour les applications fixes à grande envergure.
- **La pile à combustible alcaline (AFC) :** Cette pile utilise une solution aqueuse à base d'hydroxyde de potassium et fonctionne à la température ambiante. Elle se retrouve principalement dans les applications spatiales.
- **La pile à combustible à acide phosphorique (PAFC) :** Son fonctionnement se base sur l'emploi de l'acide phosphorique comme électrolyte et elle opère à des températures modérément élevées. Cette pile est particulièrement adaptée aux applications stationnaires pour la génération d'électricité.

#### I.4.5. Le système du stockage

Le stockage des sources renouvelables fait référence à la capacité de stocker l'énergie produite à partir des sources d'énergies renouvelables. Cela permet de compenser les variations de la production d'énergie et d'assurer un approvisionnement continu, même lorsque les conditions météorologiques ne sont pas favorables à la production d'énergie renouvelable. Le stockage peut être réaliser à long terme (batterie) et le stockage à court terme (supercondensateur).



### I.4.5.1. Les batteries

Il existe différents types de batteries dont certaines sont spécialement adaptées pour le stockage des énergies renouvelables (Figure I.12).

**Les batteries plomb-acide :** Une batterie au plomb acide est un ensemble de cellules de 2V connectées en série pour produire la tension de fonctionnement souhaitée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives assemblées [21]. Ce type de batteries nécessite un entretien régulier par ajout d'eau distillée. Ils doivent être placés dans un endroit aéré et éviter les froids extrêmes (s'ils sont déchargés, ils peuvent geler en dessous de  $-20^{\circ}\text{C}$ ). Leur durée de vie est de plusieurs centaines de cycles de charge/décharge, soit 3 à 5ans [3].

- **Batteries au gel :** Le gel est obtenu en mélangeant de la silice avec un électrolyte. Elles sont étanches et ne présentent pas de risque lié à l'acide sulfurique comme les batteries au plomb. Elles ne nécessitent aucun entretien et peuvent être stockée à l'intérieur. La charge ne doit normalement pas dépasser 15% de la capacité de la batterie par heure. Ils ne conviennent pas au démarrage du moteur [3].
- **Batteries AGM :** Elles sont étanches et ne requièrent pas d'entretien. En plus, elles sont moins chères et elles peuvent supporter des cycles de charge/décharges plus rapides [3].
- **Batteries lithium-ion :** Cette technologie a progressé rapidement ces dernières années, mais elles sont très coûteuses que d'autres technologies. Les batteries lithium-ion, ont une durée de vie pouvant aller jusqu'à 15ans [3].



Batterie Plomb-acide

Batterie AGM

Batterie GEL

Batterie lithium

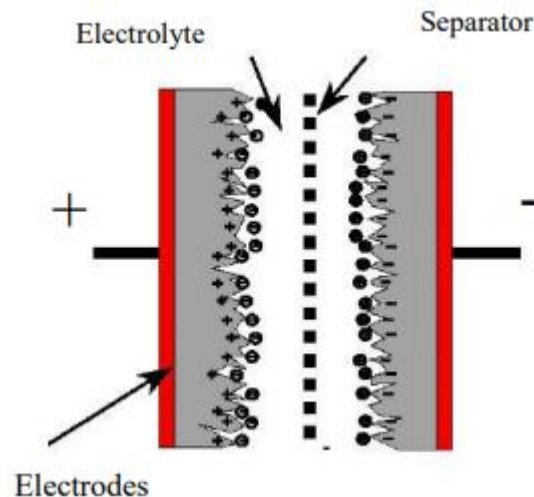
**Figure I.12 :** Différents types de batteries solaires [3]

Dans les systèmes multi-sources, les plus courants sont les batteries au plomb-acide, car elles présentent de nombreux avantages comme le coût faible.

### I.4.5.2. Les supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des systèmes de stockage d'énergie à courte portée. Leur processus de décharge, de nature électrostatique, est basé sur l'adsorption-désorption des ions de

l'électrode, cela permet aux supercondensateurs d'avoir des performances de puissance supérieures à celle des systèmes distants tels que les batteries [23]. Un schéma simplifié d'un supercondensateur est illustré dans la Figure I.13 ci-dessous.



**Figure I.13** : Schéma de fonctionnement d'un supercondensateur [24]

Les supercondensateurs peuvent être classés en trois grandes catégories qui sont différenciées par leurs modes de stockage, ainsi que par la nature des matériaux d'électrode.

- **Les supercondensateurs à double couches** : Sont les supercondensateurs les plus populaire. Lorsque le supercondensateur est chargé, des ions de l'électrolyte migrent vers les électrodes et forment une double couche électrique. Cette double couche stocke l'énergie électrique. [25]
- **Les supercondensateurs pseudo-capacitifs** : sont à l'opposition de EDLC (double couche électrique), combinaison des deux mécanismes pour une capacité et une puissance accrue. Le pseudo-capacitif se caractérise par deux types de contributions :
  - Intrinsèque : Les propriétés du matériau sont intrinsèquement liées à ses caractéristiques, quelle que soit la structure de l'électrode.
  - Extrinsèque : La disposition des particules, ainsi que la structure et la morphologie de l'électrode, jouent un rôle crucial dans la détermination du résultat. [25]
- **Les supercondensateurs hybrides** : sont des systèmes combinant une électrode de type faradique (électrode de batterie) assurant une haute densité énergétique et une électrode de type capacitif assurant une haute densité de puissance. [25]

#### I.4.6. Les Convertisseurs

Un convertisseur est un appareil électrique capable de transformer un type d'énergie électrique en un autre. Il existe plusieurs types de convertisseurs, chacun ayant sa propre fonction spécifique. Le fonctionnement d'un convertisseur dépend du type de conversion qu'il effectue.

Dans la structure des systèmes hybrides, on trouve trois types de convertisseurs : les redresseurs, les hacheurs et les onduleurs [12].

- **Les hacheurs (convertisseurs DC/DC) :** peuvent être non réversibles ou réversibles, ces derniers permettant d'inverser l'énergie de la source à la charge. Il existe trois types de hacheurs réversibles : réversible en courant, réversible en tension, et réversible en tension et en courant.
- **Les onduleurs (convertisseurs DC/AC) :** sont utilisés pour alimenter des charges alternatives à des fréquences fixes ou variables. Il existe deux types d'onduleurs : les onduleurs de tension, qui sont alimentés par une source de tension constante, et les onduleurs de courant, qui sont alimentés par une source de courant. Les onduleurs de tension peuvent être monophasés ou triphasés.
- **Les redresseurs (convertisseurs AC/DC) :** Sont des appareils électroniques de puissance qui convertissent le courant alternatif en courant continu. Ils sont utilisés pour fournir un courant continu lorsque l'énergie électrique est disponible sous forme de courant alternatif. Il existe deux types de redresseurs : les redresseurs non contrôlés, qui ne permettent pas de régler la tension, et les redresseurs contrôlés, qui permettent de faire varier la tension. Les redresseurs sont utilisés dans diverses applications et sont généralement alimentés par une source d'énergie monophasée ou triphasée. Les tensions d'entrée sont généralement supposées être sinusoïdales et équilibrées.

#### I.4.7. Le réseau électrique

Constitué des lignes et des postes de transformation qui alimentent les clients. Ce réseau est divisé en deux parties : le réseau de distribution moyenne tension (2,4 kV à 64 kV) et le réseau de distribution basse tension (120 à 600 V).

Les postes de transformation servent à augmenter ou à diminuer la tension et à la réguler à l'aide de compensateurs statiques, de réactances capacitives ou inductives et de transformateurs à prises variables. Ils contiennent également des disjoncteurs, des fusibles et des parasurtenseurs pour protéger les équipements et le réseau. Les stations d'interconnexion

sont utilisées pour connecter le réseau à d'autres réseaux afin d'augmenter la stabilité globale et de permettre les échanges d'énergie [12].

Le réseau électrique et les systèmes multi-sources d'énergie entretiennent une relation étroite et dynamique, contribuant ensemble à un avenir énergétique plus durable, bien que de manière complexe. D'un côté, le vaste réseau électrique, avec ses imposantes infrastructures, offre une plateforme stable pour distribuer de l'électricité à grande échelle. Leur interaction mutuelle vise à réduire la dépendance du réseau aux combustibles fossiles.

#### **I.4.8. La charge**

Il y a trois types de charges électriques : les charges résistives, les charges inductives et les charges capacitives. Les charges résistives, telles que les ampoules à incandescence et les chauffe-eaux, consomment de l'énergie de manière constante. Les charges résistives et inductives se trouvent dans les appareils utilisant des machines électriques, et elles sont responsables de la consommation de puissance réactive. Les charges en courant continu peuvent également avoir des composants inductifs, mais cela entraîne uniquement des variations transitoires de tension et de courant lors des changements dans le fonctionnement du système [12]. Les charges capacitives incluent l'énergie stockée dans des matériaux et des dispositifs, tels que des condensateurs, ce qui entraîne des changements de tension en retard par rapport aux changements de courant. Aussi, sont moins courantes que les charges inductives et résistives.

#### **I.5. Les avantages et les inconvénients d'un système multi-sources**

##### **➤ Les avantages**

- Disponibilité d'une source d'énergie pour prendre le relais, si l'autre tombe en panne pour assurer la continuité du courant.
- Efficacité environnementale, les systèmes multi-sources peuvent réduire les émissions de gaz à effet de serre et faciliter la transition vers des solutions énergétiques plus durables.
- Les systèmes multi- sources offrent une plus grande flexibilité en permettant la combinaison de différentes sources d'énergie.

##### **➤ Les inconvénients**

- Les systèmes multi-sources peuvent être plus coûteux à installer et à entretenir que les systèmes qui dépendent d'une seule source d'énergie.

-Stockage cher.

-Problème de l'interconnexion et de la gestion énergétique.

### **I.6.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons abordé le sujet des systèmes multi-sources dans ses grandes lignes. Après avoir examiné les différentes architectures, les composants et les avantages et inconvénients de ces systèmes, il est clair que ce chapitre fournit une vision et un examen approfondi de ce sujet clé. En résumé, la diversité des sources d'énergie et la complexité des systèmes multi-sources ouvrent la voie à des solutions énergétiques durables et innovantes, tout en soulignant les défis à relever pour une transition énergétique fiable.

Le deuxième chapitre se concentre ensuite sur le dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel HOMER.

**Chapitre II**  
**Dimensionnement d'un**  
**systeme multi-sources à**  
**énergies renouvelables à**  
**l'aide du logiciel Homer Pro**

### II.1 Introduction

Les logiciels de dimensionnement jouent un rôle décisif dans la conception et l'optimisation des systèmes à énergies renouvelables. Dans notre cas, nous avons opter pour le logiciel HOMER Pro qui est un outil de simulation puissant qui permet de concevoir et d'optimiser des systèmes électriques hybrides renouvelables, et de réaliser une analyse technique et économique.

Dans ce deuxième chapitre, nous abordons le processus de dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables sous le logiciel HOMER Pro.

### II. 2 Présentation du Logiciel HOMER Pro

Le logiciel de modélisation énergétique HOMER (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) est un outil précieux pour les systèmes multi-sources. Il permet d'optimiser les coûts en prenant en compte divers facteurs tels que :

- Le prix des composants
- La durée de vie des éléments
- Les coûts du carburant
- Les considérations environnementales

Il constitue une solution robuste pour la conception et l'évaluation des systèmes hybrides de production d'électricité. Ces systèmes intègrent une large gamme de composants, tels que des groupes électrogènes, des systèmes de cogénération, des éoliennes, des systèmes photovoltaïques, des systèmes hydrauliques, des batteries, de la biomasse, etc. Que l'installation soit raccordée au réseau ou autonome, ce logiciel offre une plateforme complète d'analyse et de conception [28].



**Figure II.1** : Logo du logiciel HOMER Pro [29]

### II.3 Présentation de l'interface et du fonctionnement général du logiciel HOMER Pro

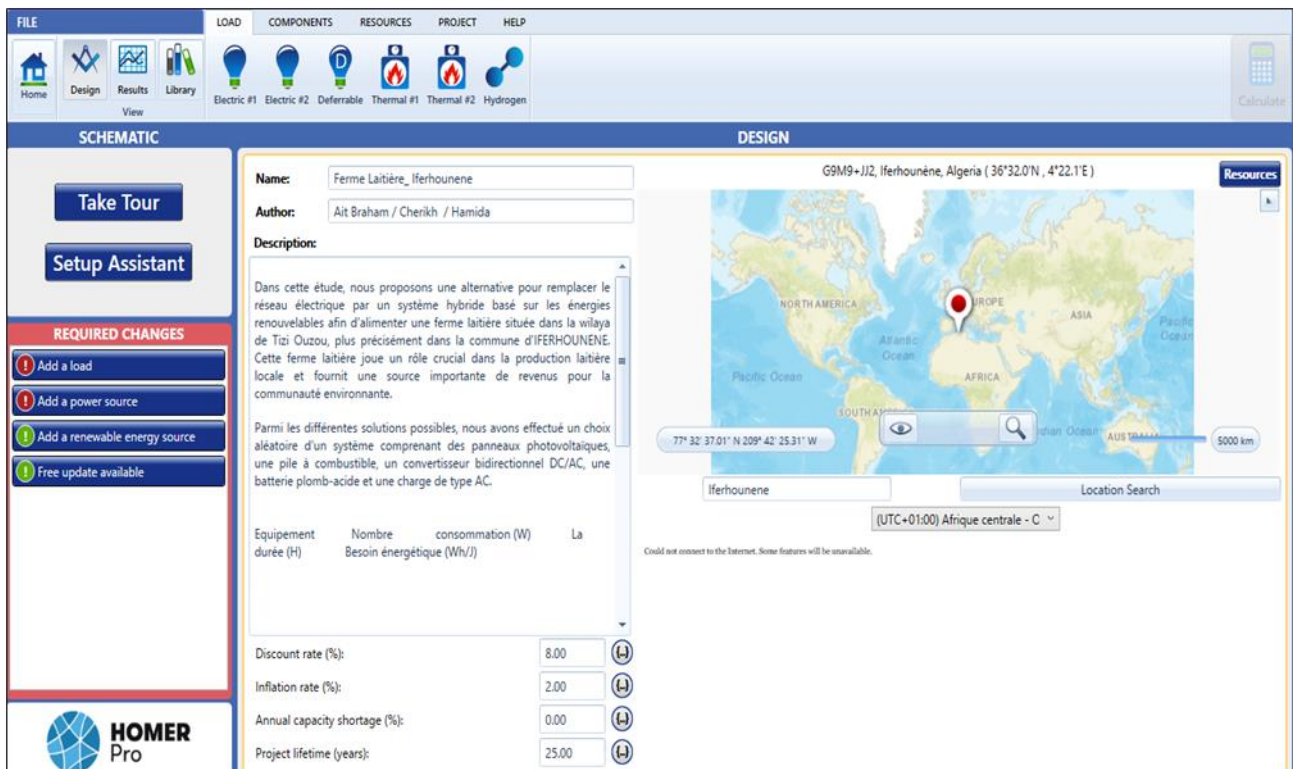


Figure II.2 : L'interface du logiciel HOMER Pro

Le logiciel HOMER Pro possède une interface facile à utiliser et similaire aux logiciels usuels comme l'illustre la Figure II.2.

Cette interface se divise en trois parties principales :

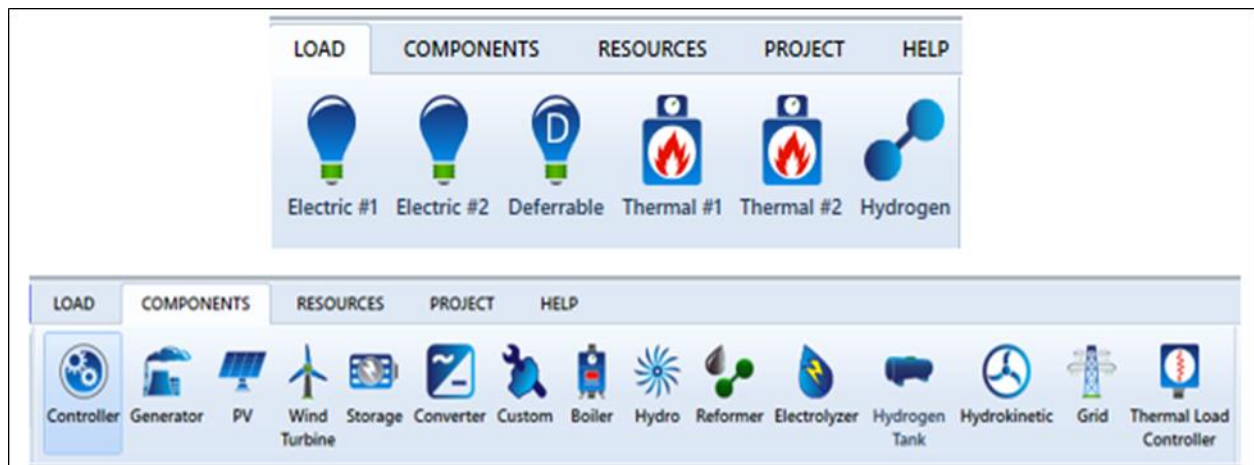
- **La définition du système**

Cette partie permet de choisir le nom du projet, la localisation du site et les équipements à inclure dans le système à modéliser comme le montre la Figure II.3. Il est possible de cocher les éléments à utiliser parmi plusieurs choix.

Dans cette étape, on peut également modéliser le réseau électrique, de faire une comparaison avec un système hors réseau ou de choisir ne pas le modéliser du tout.

Une fois les équipements sélectionnés, ils apparaissent dans le schéma du système (Partie SCHEMATIC).



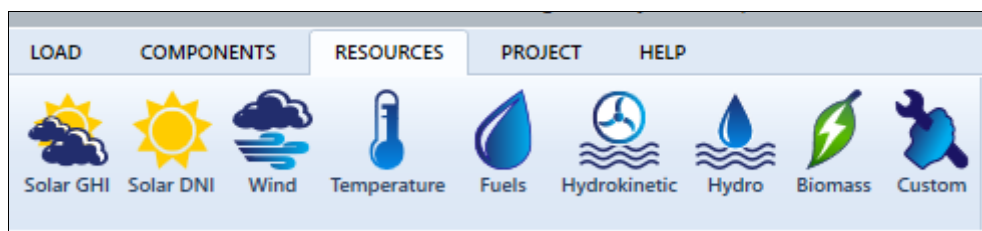


**Figure II.3 :** Equipements disponibles sur le logiciel Homer Pro

- **Les ressources**

La Figure II.4 illustre les ressources requises pour les équipements sélectionnés, telles que les données de gisement solaire ou éolien, ainsi que les données relatives au combustible utilisé par les générateurs.

Pour chaque élément, il y a des cases à remplir avec les données requises pour la simulation.

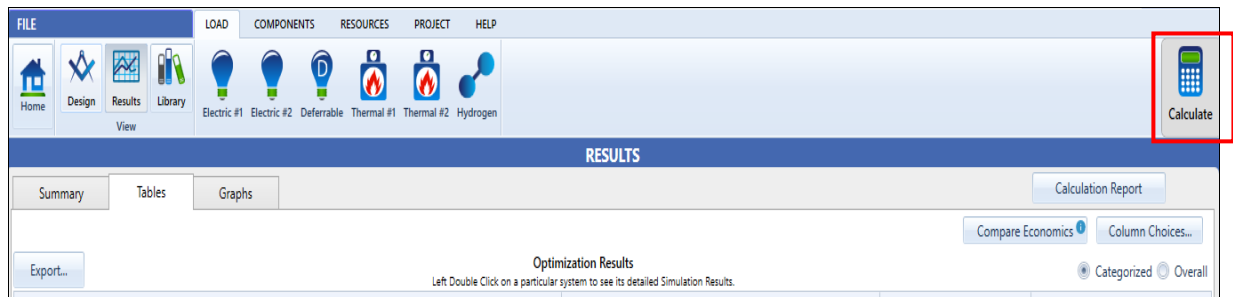


**Figure II.4 :** Ressources nécessaires pour les équipements du logiciel Homer Pro

- **Les résultats**

Après avoir rempli toutes les données, et comme indiqué sur la Figure II.5, on peut lancer le calcul en cliquant sur l'icône (Calculate) et d'obtenir les résultats. Ces derniers peuvent être affichés de deux manières : par catégorie, cliquant sur "categorized" (en présentant la meilleure option pour chaque type de système) ou en global choisissant "over all" (on obtient tous les systèmes possibles sur la même liste, avec le plus économique en premier).

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro



**Figure II.5 :** Présentation des résultats de calcul

Les résultats détaillés comprennent le résumé des coûts, le flux monétaire, les informations sur l'électricité (production, consommation, excès d'énergie, etc.), les détails sur l'énergie et la puissance des équipements, les émissions et les données simulées heure par heure.

### II.4 Avantages et inconvénients du logiciel Homer Pro

#### ➤ Les avantages

- HOMER Pro est un outil précis qui a été validé par de nombreuses études et simulations.
- Disposer d'une bonne bibliothèque de données qui peut être utilisée pour concevoir et tester le système selon les besoins.
- HOMER Pro est un outil flexible qui permet de modéliser une grande variété de configurations des systèmes multi-sources.

#### ➤ Les inconvénients

- La version complète du logiciel HOMER Pro est payante et peut s'avérer onéreuse, ce qui peut limiter son accessibilité à certains utilisateurs.
- La prise en main du logiciel peut nécessiter un temps d'apprentissage conséquent.
- HOMER Pro peut être un outil complexe à utiliser pour les utilisateurs non expérimentés.
- Le support technique pour HOMER Pro est limité.

### II.5 Dimensionnement d'un système multi-sources sous HOMER Pro

Dans cette étude, nous proposons une alternative pour remplacer le réseau électrique par un système hybride basé sur les énergies renouvelables afin d'alimenter une ferme laitière située dans la wilaya de Tizi Ouzou, plus précisément dans la commune d'IFERHOUNENE. Cette ferme laitière joue un rôle crucial dans la production laitière locale et fournit une source importante de revenus pour la communauté environnante. Le logiciel Homer Pro a été utilisé pour effectuer les différentes simulations et optimisations afin d'obtenir le système le plus fiable possible.



**Figure II.6 :** Photo d'une ferme laitière alimentée par des énergies renouvelables [30]

Parmi les différentes solutions possibles, nous avons effectué un choix aléatoire d'un système comprenant des panneaux photovoltaïques, une pile à combustible, un convertisseur bidirectionnel DC/AC, une batterie plomb-acide et une charge de type AC.

Les deux sources d'énergie ici seront alors les panneaux solaires et une pile à combustible à hydrogène (Hydrogen fuel cell). Cependant, il n'existe actuellement pas de telle source dans les bases de données du logiciel HOMER Pro. Par conséquent, une source d'énergie traditionnelle, telle qu'un générateur diesel, est utilisée avec les modifications suivantes :

- 1- Le combustible utilisé est remplacé par de l'hydrogène stocké.
- 2- Les caractéristiques du combustible utilisé sont modifiées, passant du diesel à l'hydrogène.
- 3- Changement de type de la source : de AC à DC.

Les calculs effectués par le logiciel prennent en compte des valeurs telles que le coût des composants, l'amortissement, les frais de fonctionnement, le coût du carburant, etc [31].

Par ailleurs, il ne s'agit pas ici d'une étude économique approfondie. Par conséquent, nous introduisons des coûts, qui sont approximativement proches des valeurs réelles. Notre objectif principal est d'assurer une alimentation permanente et stable de la charge, quelles que soient les conditions climatiques.

### II.5.1 Localisation du site de notre étude

Avant d'entamer le dimensionnement, la commune d'IFERHOUNENE a été choisie pour l'étude. Cette commune est située dans la ville de Tizi Ouzou au nord d'Algérie. Sa latitude est de  $36^{\circ}32.0'N$  et sa longitude est de  $4^{\circ}22.1'E$ , comme indiqué sur la Figure II.7.



Figure II.7 : Situation géographique du site étudié

#### ✓ Données météorologiques

Les figures ci-dessous représentent les différentes données météorologiques du site.

- L'irradiation solaire annuelle : **4.57 KWh/m<sup>2</sup>/jour**
- La température annuelle : **17.24°C**
- La vitesse du vent annuelle : **4,59 m/s**

#### ● L'irradiation solaire

D'après la Figure II.8, le mois de juillet est le mois le plus ensoleillé avec une irradiation journalière moyenne de 7 KWh/m<sup>2</sup>/jour. En revanche, le mois de décembre est le moins ensoleillé avec une irradiation journalière moyenne de 2,010 KWh/m<sup>2</sup>/jour.

Nous constatons, que la quantité d'énergie solaire reçue varie en fonction de la saison, en été particulièrement durant les mois de Mai, Juin, Juillet et Août, l'ensoleillement est très élevé, par rapport à la saison hivernale.

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro

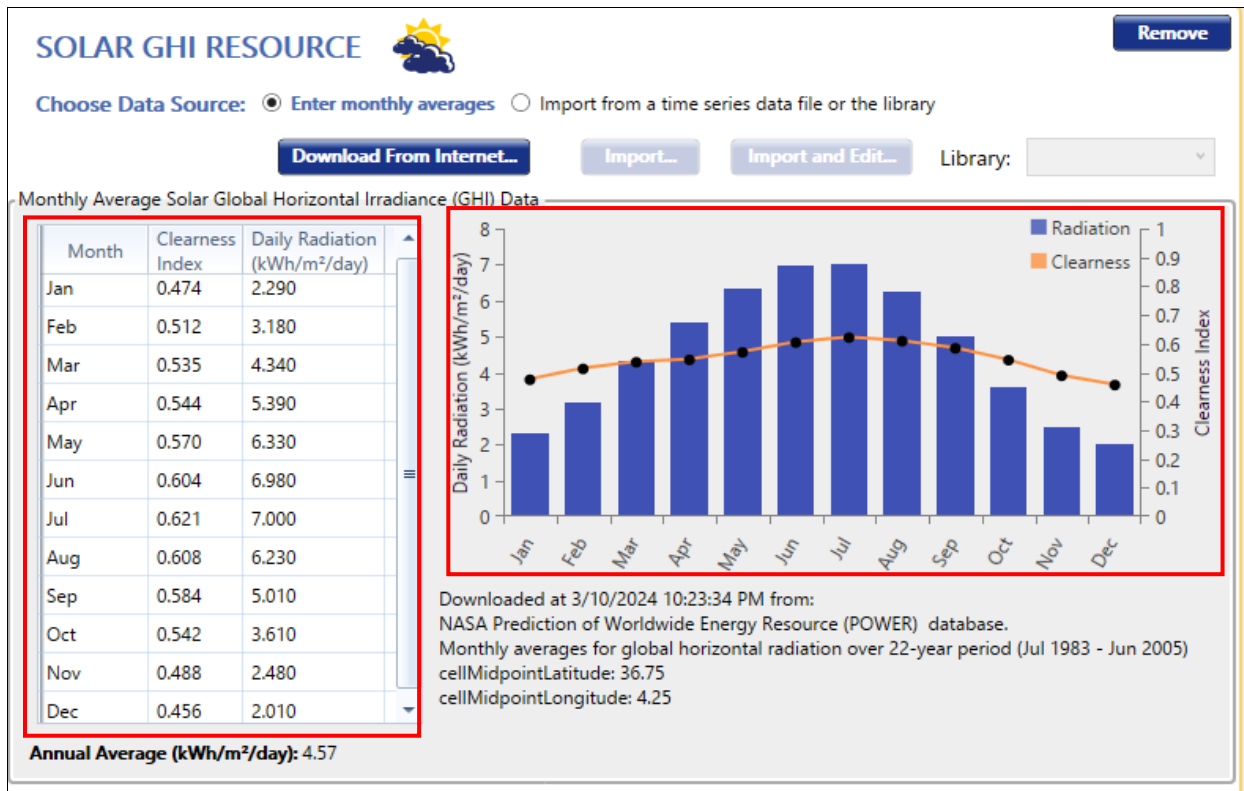


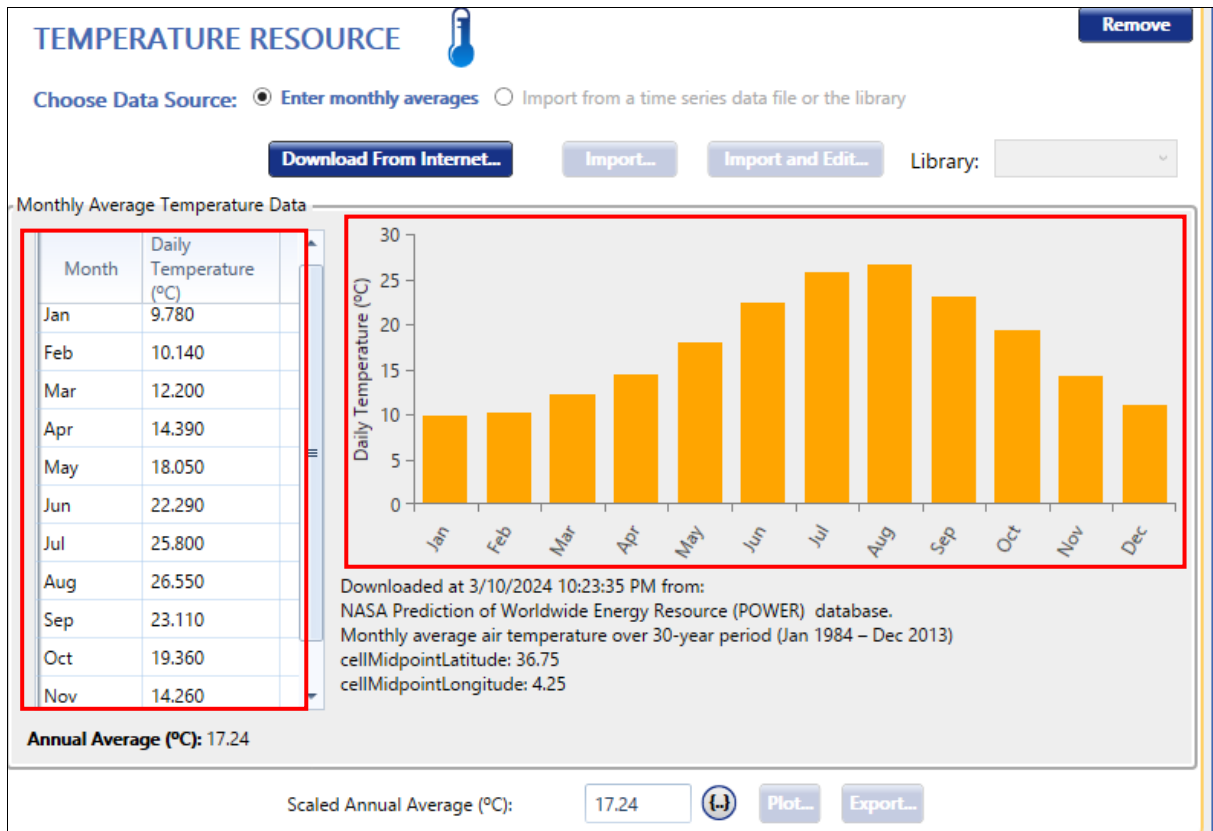
Figure II.8 : L'irradiation solaire mensuelle de la commune d'IFERHOUNENE

- **La température**

La température est un facteur important qui affecte les performances des panneaux solaires. La Figure II.9 montre les changements de température moyenne au cours de différents mois dans la région d'IFERHOUNENE. De plus, le mois de Juillet c'est le mois le plus adaptable pour un bon fonctionnement avec une température moyenne de 25,800°C, sachant que la température optimale d'un panneau solaire est égale à 25°C.

Lorsqu'une cellule solaire est chauffée par la température, le nombre d'électrons excités augmente et la tension produite par le panneau diminue. Cela réduit l'efficacité et les performances du système [32].

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro



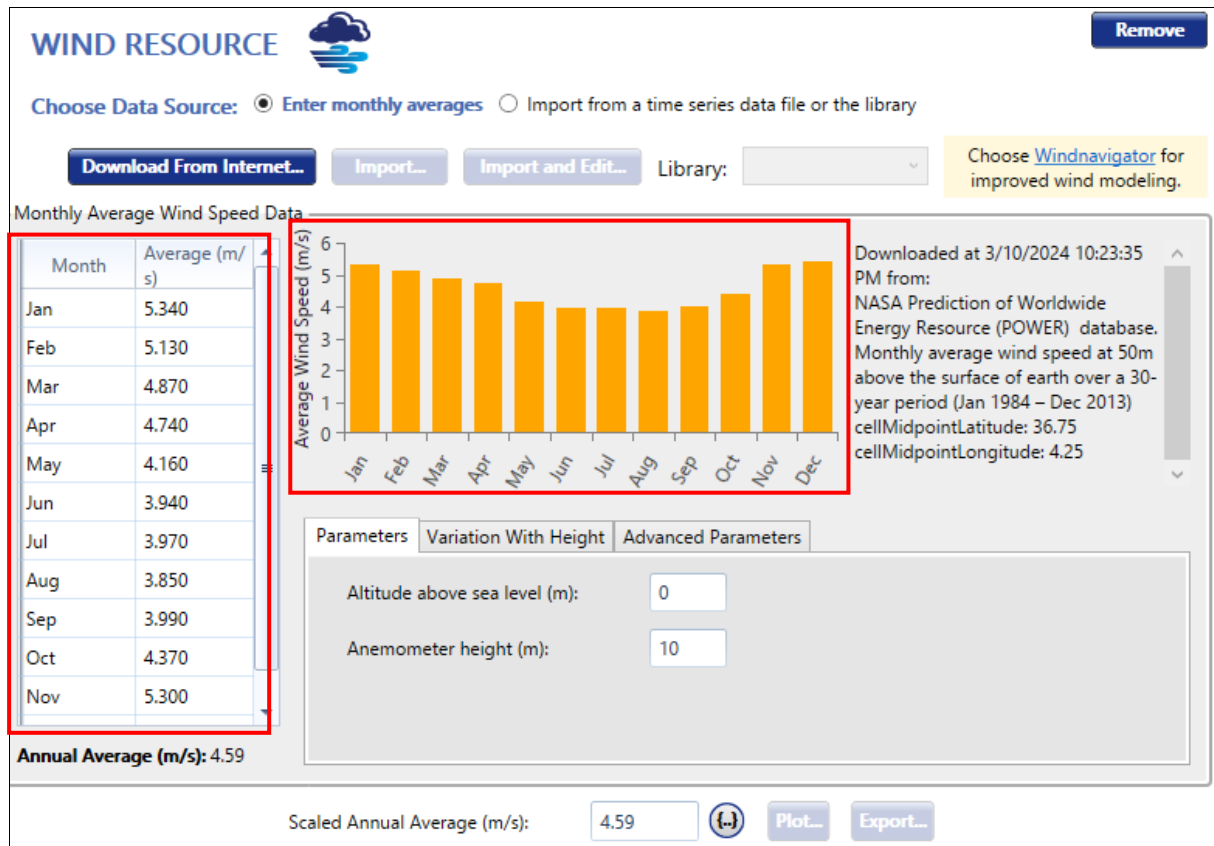
**Figure II.9 :** Température moyenne mensuelle de la commune d'IFERHOUNENE

- **La vitesse du vent**

La vitesse du vent sur un site donné peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que le climat, la saison et la topographie locale. Ces variations de vitesse du vent peuvent avoir un impact significatif sur le rendement des panneaux photovoltaïques. Le graphique de la Figure II.10 montre la vitesse mensuelle moyenne du vent à la commune d'IFERHOUNENE. Le graphique indique que cette vitesse varie tout au long de l'année. La vitesse mensuelle moyenne du vent la plus élevée se situe entre janvier et décembre, entre 5,34 m/s et 5,43 m/s. La vitesse mensuelle moyenne du vent la plus basse se situe en juin, à 3,94 m/s.



## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro



**Figure II.10 :** Vitesse du vent moyenne mensuelle de la commune d'IFERHOUNENE

### II.5.2 Profil de la charge

Dans notre étude, nous nous sommes concentrés sur un profil énergétique d'une ferme laitière où les heures de travail varient dans les 24h avec une charge qui variée entre 0,5 KW et 3KW par heure tout au long de l'année. Le bilan énergétique de cette ferme est donné par le tableau II.1.

**Tableau II.1:** Bilan énergétique d'une ferme laitière

Equipement	Nombre	Puissance(W)	La durée d'utilisation(H)	Consommation journalière(Wh/Jour)
Lampes	15	36	8	4320
Cuve de stockage	1	900	12	10800
TV	1	100	8	800
Réfrigérateur	1	700	24	16,800
Machine à traire	1	750	4	3000
Pompe à eau	1	1560	1	1560

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro

Ces données ont été introduites dans le logiciel HOMER PRO pour calculer la consommation journalière, mensuelle et annuelle. D'après la Figure II.11, on peut observer que la consommation journalière moyenne est égale à 25 KWh/Jour avec un pic de 3,12 KW.

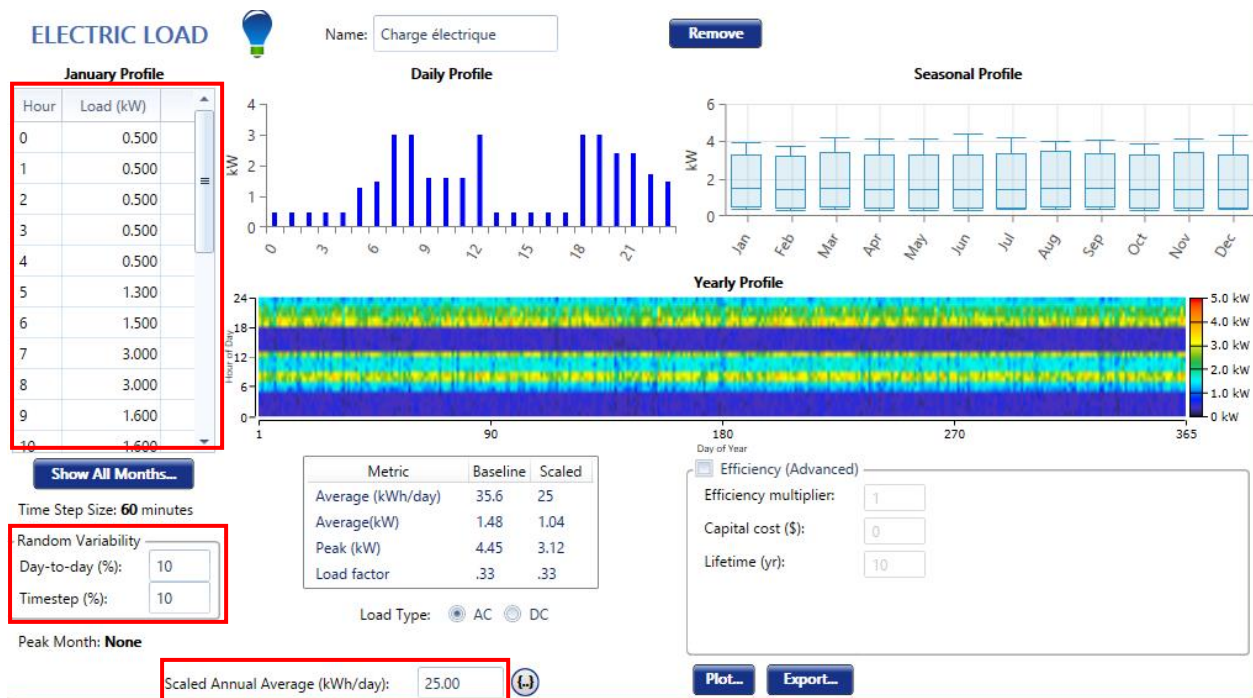


Figure II.11 : Profil de charge du système

Pour l'option "Day-to-day" en anglais, fait référence à la variation quotidienne sur les changements de la charge électrique pour optimiser la conception des systèmes énergétiques.

"Timestep" en anglais ou "pas de temps" en français, fournit des informations précieuses sur les changements de la charge électrique au fil du temps.

### II.5.3 Adaptation d'un générateur diesel à une pile à combustible

La Figure II.12 montre le générateur Diesel utilisé. Il s'agit d'un modèle générique que l'on peut ajuster en fonction de nos besoins afin d'obtenir un fonctionnement similaire à celui d'une pile à combustible, selon les modifications mentionnées précédemment dans la partie II.5.

Comme illustré à la Figure II.13, il est possible de sélectionner le type de carburant que notre générateur doit utiliser. Parmi les options disponibles, on trouve le diesel, le biodiesel, le biogaz et d'autres carburants. Dans le cadre de ce projet, l'hydrogène a été choisi comme type de carburant.



## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro

Le prix du litre de carburant peut ensuite être modifié et personnalisé. Il est important de noter que ces informations sont définies par le logiciel lui-même. Cependant, il est possible de les modifier si nécessaire.

The screenshot shows the 'GENERATOR' configuration window in HOMER Pro. The 'Name' is 'Fuel-Cell' and the 'Abbreviation' is 'Pile a cc'. The interface is divided into several sections:

- Properties:** Name: Fuel-Cell, Abbreviation: Pile a combustible, Manufacturer: Generic, www.homerenergy.com.
- Costs:** A table with columns: Capacity (kW), Capital (\$), Replacement (\$), O&M (\$/op. hr). Row 1: 1, \$450.00, \$450.00, \$0.15. Below the table is a 'Click here to add new item' link and a 'Multiplier' section with three minus buttons.
- Site Specific Input:** Minimum Load Ratio (%): 25.00, CHP Heat Recovery Ratio (%): 0.00, Lifetime (Hours): 15,000.00, Minimum Runtime (Minutes): 0.00, Stored Hydrogen Fuel Price (\$): 1.000, Initial Hours: 0.00.
- Sizing:** A vertical list with 'Size (kW)' and the value '3'. Buttons for 'Remove' and 'Copy To Library' are at the top.
- Electrical Bus:** Radio buttons for AC and DC, with DC selected.
- Advanced...** button at the bottom right.

Figure II.12 : Générateur diesel

The screenshot shows the 'FUEL RESOURCE' configuration window in HOMER Pro. The 'Selected Fuel' is 'Stored Hydrogen'. The interface is divided into two main sections:

- FUELS AVAILABLE IN MODEL:** A table with columns: Name, LHV, Density, Carbon, Sulfur, Special. The 'Stored Hydrogen' row is highlighted with a red border.
- PROPERTIES:** Lower Heating Value (MJ/kg): 120.00, Density (kg/m3): 0.09, Carbon Content (%): 0.00, Sulfur Content (%): 0.00. Fuel Type: Radio buttons for Conventional, Stored Hydrogen (selected), and Uses biomass resource. A note states: 'Stored hydrogen fuel requires a hydrogen tank and either a reformer or electrolyzer.'

Figure II.13 : Caractéristiques du combustible utilisé

### II.5.4 Choix du panneau photovoltaïque

La Figure II.14 montre le type de panneau solaire que nous avons choisi est le "PEIMAR 260SG260M". Ce panneau est de puissance nominale de 260W, une tension nominale de

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro

37.39V, un courant nominal de 9.15A, la technologie utilisée pour ce panneau solaire est le silicium monocristallin, et son type est Mono-c-Si, il est reconnu pour son haute efficacité à produire une grande quantité d'énergie. Il se distingue par sa durabilité et sa résistance aux conditions environnementales difficiles, telles que la neige et les fortes pluies, ce qui le rend adapté à une variété de climats et il fait un choix fiable pour notre cas et le site d'étude.

Cependant, il est important de noter que le logiciel HOMER Pro lui-même est conçu pour être flexible et capable de choisir automatiquement le type de panneaux solaires adapté à chaque situation.

The screenshot displays the configuration interface for a PV field in HOMER Pro. At the top, the 'Name' is 'PEIMAR260SG260M' and the 'Abbreviation' is 'Pannea'. The 'Properties' section, highlighted with a red border, lists the following details: Name: PEIMAR260SG260M, Abbreviation: Panneau Photovoltaïque (PEI260), Panel Type: Flat plate, Rated Capacity (kW): 10, Temperature Coefficient: -0.468170, Operating Temperature (°C): 45.2, Efficiency (%): 13, and Manufacturer: PEIMAR. The 'Cost' section includes a table for Capacity (kW), Capital (\$), Replacement (\$), and O&M (\$/year), with values 1, 150.00, 150.00, and 0.00 respectively. The 'Lifetime' is set to 25.00 years. The 'Sizing' section shows 'HOMER Optimizer™' and 'Search Space' selected, with a capacity of 10 kW. The 'Site Specific Input' section has a 'Derating Factor (%)' of 85.00. The 'Electrical Bus' is set to 'DC'. Buttons for 'Remove', 'Copy To Library', and 'Advanced...' are also visible.

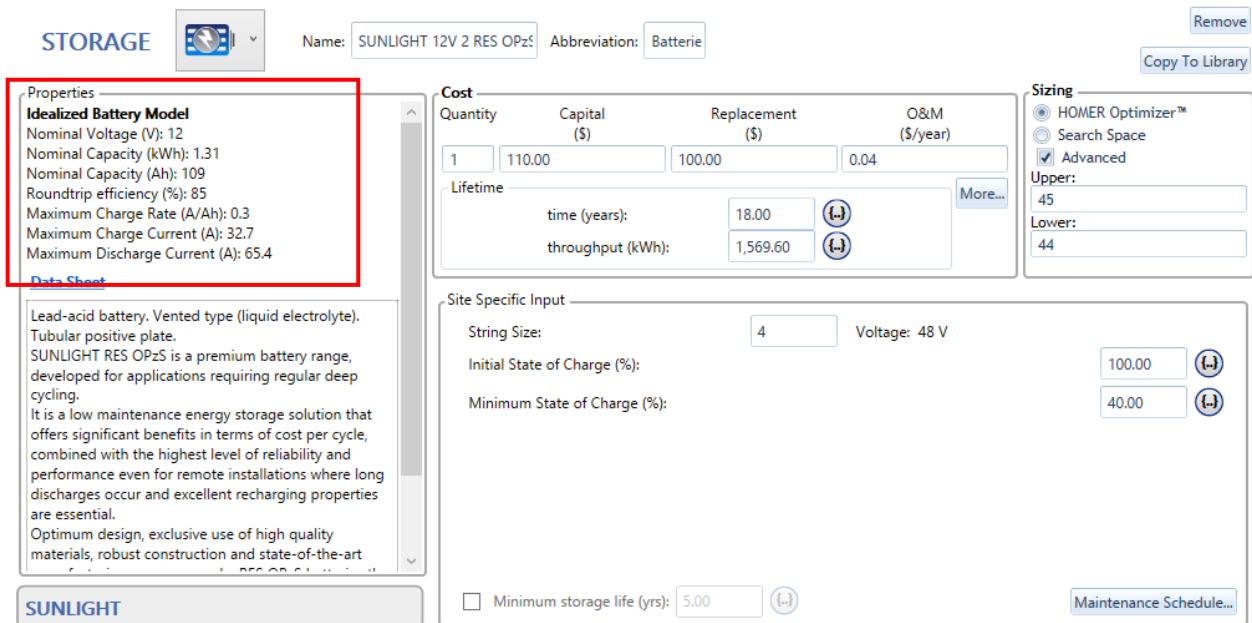
Figure II.14 : Paramètres du champ PV

### II.5.5 Choix des batteries de stockage

La Figure II.15 présente le type de batterie choisi : "SUNLIGHT 12V 2 RES OPzS 130". Cette batterie est un excellent choix pour les applications nécessitant un stockage d'énergie fiable et durable, surtout dans les systèmes où l'entretien peut être effectué régulièrement pour garantir des performances optimales. Les avantages de cette batterie incluent également sa résistance à des cycles de charge et décharge profonds, ainsi que sa performance stable dans diverses conditions.

D'après le tableau II.2, la tension de batterie recommandée pour un système PV dépend de la puissance du champ PV. Dans notre cas la puissance du champ PV est de 10KW ce qui nous a conduit à choisir un système de stockage d'une tension de 48V.

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro



**Figure II.15 : Paramètres de la batterie**


**Tableau II.2: Choix de la tension de batterie pour un système photovoltaïque [33]**

Puissance du champ PV	0-500W	500W-2KW	2KW-10KW	>10KW
Tension de batterie recommandée	12V	24V	48V	>48

### II.5.6 Choix du convertisseur

La Figure II.16 illustre le type de convertisseur choisi, le "ABB PVI-4.2-OUTD-S-US-Z (240V)". Ses caractéristiques comprennent une haute efficacité de conversion, une conception robuste, ainsi qu'une protection pour assurer un fonctionnement fiable et une compatibilité avec différentes sources d'énergie renouvelable.

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro

**CONVERTER**  ABB PVI-4.2-OUTD-S-US-Z (240 V) Name: ABB PVI-4.2-OUTD-S-US-Z Remove  
Complete Catalog Abbreviation: Convert Copy To Library

**Properties**

Name: **ABB PVI-4.2-OUTD-S-US-Z (240 V)**  
Abbreviation: **Convertisseur (ABB4.2)**  
[CEC Inverters](#)  
Notes:  
**This component comes from the CEC inverter database, which was most recently updated in August 2017. The nominal voltage is: 240V. CEC identifies this inverter as a microinverter (Y/N): N.**

**Costs**

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
4.2	\$600.00	\$600.00	\$0.0

Click here to add new item

Multiplier:

**Capacity Optimization**

HOMER Optimizer™  
 Search Space  
 Advanced

**ABB**  
[www.abb.com](http://www.abb.com)  
Contact Centre  
[contact.centre@in.abb.com](mailto:contact.centre@in.abb.com)  
+91 80 67 143 000  
[Connect with Vendor](#)

**Inverter Input**

Lifetime (years):    
Efficiency (%):    
 Parallel with AC generator?

**Rectifier Input**

Relative Capacity (%):    
Efficiency (%):

**Consulting Services**  
Let HOMER Energy perform your analyses for you.

Figure II.16 : Paramètres du convertisseur

### II.5.7 Choix de l'électrolyseur

L'électrolyseur joue un rôle crucial dans notre système. Il est responsable de la production d'hydrogène, utilisant l'énergie électrique produite par les panneaux solaires.

La Figure II.17 montre l'électrolyseur sélectionné, en tenant compte de nos propres critères de coût et de capacité de 3KW pour garantir une production d'hydrogène suffisante pour répondre aux besoins de la ferme laitière.

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro

**ELECTROLYZER**

Name: Generic Electrolyser Abbreviation: Electrol Remove Copy To Library

Generic Electrolyser

**Properties**

Name: **Generic Electrolyser**  
Abbreviation: **Electrolyseur**  
Manufacturer: **Generic**  
[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)  
Notes: **This is a generic electrolyzer.**

**Costs**

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$770.00	\$770.00	\$15.00

Click here to add new item

Multiplier: (-) (-) (-)

**Capacity Optimization**

Size (kW)
0
3

Lifetime (years): 15.00 (-)  
Efficiency (%): 85.00 (-)  
Minimum load ratio (%): 0.00 (-)

Electrical Bus:  AC  DC

**Step 1: Select a mode:** 00:00  
 Forced On  Optimize

**Step 2: Select a time period:**  
 All Week  
 Weekdays  
 Weekends

**Step 3: Click on the chart to 23:00**  
when the selected operating applies.

**Electrolyzer Schedule**

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Schedule												


Figure II.17 : Paramètres de l'électrolyseur

### II.5.8 Réservoir d'hydrogène

Réservoir d'hydrogène (en anglais "Hydrogen Tank"), un élément déjà présent dans la bibliothèque du logiciel HOMER Pro, est conçu pour stocker efficacement l'hydrogène produit par l'électrolyseur. Cet hydrogène peut ensuite être utilisé pour produire de l'électricité lorsque les sources d'énergie renouvelables ne sont pas disponibles.

La Figure II.18 montre les différents paramètres du réservoir d'hydrogène sélectionné, tels que le coût et la capacité de réserve d'hydrogène de 20Kg.

## Chapitre II Dimensionnement d'un système multi-sources à énergies renouvelables à l'aide du logiciel Homer Pro

**HYDROGEN TANK** 

Name:  Abbreviation:

Hydrogen Tank ▾

**Properties**

Name: **Hydrogen Tank**

Abbreviation: **Réservoir d'hydrogène**

Manufacturer: **Generic**

[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

Notes:  
**This is a generic hydrogen tank.**

**Costs**

Size (kg)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$1,100.00	\$950.00	\$20.00

Click here to add new item

Multiplier:

**Capacity Optimization**

Size (kg)
0
20

Lifetime (years):

Initial Tank Level

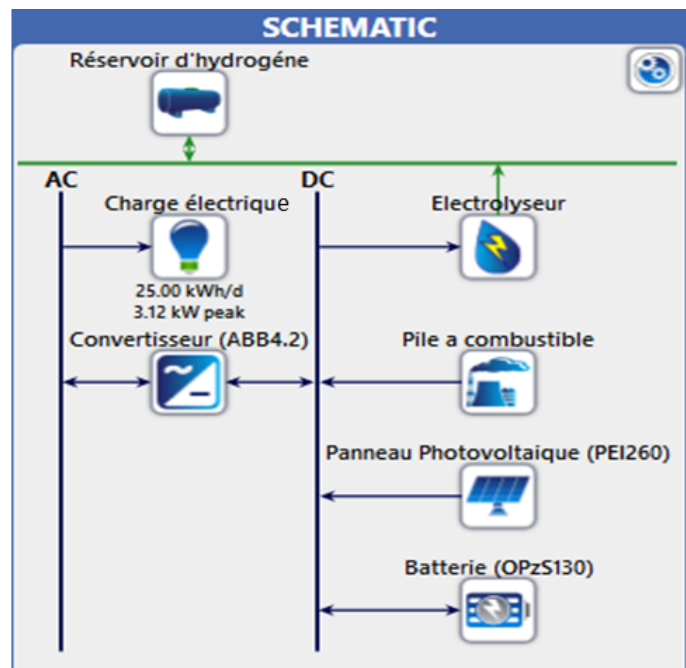
Relative to tank size (%):

Absolute amount (kg):

Require year-end tank level to equal or exceed initial tank level.

**Figure II.18** : Paramètres du réservoir d'hydrogène

La Figure II.19 illustre l'architecture finale du système à étudier. Après la sélection et la configuration des différents composants du système, le logiciel Homer Pro effectue automatiquement la connexion appropriée sur les bus DC et AC.



**Figure II.19** : Architecture du système à étudier sous le logiciel Homer Pro

## **II.6. Conclusion**

Nous avons débuté ce chapitre par une présentation du logiciel de dimensionnement HOMER Pro, en soulignant ses principaux avantages et inconvénients. Par la suite, nous nous sommes immergés dans le processus de dimensionnement d'un système multi-sources intégrant essentiellement des panneaux solaires, une pile à combustible et un système de stockage par des batteries.

Dans le troisième chapitre, nous allons discuter les différents résultats obtenus après la simulation du système dimensionné.

# **Chapitre III**

## **Simulation et interprétation des résultats**



III.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons sélectionné les composants adéquats d'un système multi-sources à l'aide du logiciel HOMER Pro. Ce chapitre présente une analyse approfondie des résultats obtenus par la simulation, en les interprétant étape par étape. L'objectif de cette partie est de fournir des informations précieuses pour éclairer la prise de décision concernant la conception d'un système fiable et performant.

III.2. Interprétation des résultats de la simulation

Une fois la simulation effectuée dans le logiciel HOMER Pro pour le système multi-sources, les résultats seront affichés sous forme de graphiques et de tableaux. Les graphiques permettent de visualiser les performances du système, telles que la production d'énergie des panneaux solaires et de la pile à combustible, la consommation d'énergie et le niveau de charge de la batterie. Les tableaux présentent les données de manière plus détaillée, en fournissant des informations telles que la quantité d'énergie consommée et les coûts associés.

III.2.1. Interprétation technique

La Figure III.1 illustre les résultats de la simulation réalisée sous le logiciel HOMER, qui compare les différents composants étudiés dans notre système en fonction de plusieurs critères tels que le coût et la capacité. Cette simulation permet d'identifier la configuration optimale répondant aux besoins spécifiques de l'utilisateur.

Optimization Results														
Architecture										Cost			System	
PEI260 (kW)	FC (kW)	OPzS130	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	ABB4.2 (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (kg/yr)		
10.0	3.00	176	3.00	20.0	3.13	LF	\$57,233	\$0.485	\$794.15	\$46,966	100	1.04		

FC		PEI260		OPzS130				ABB4.2				
Hours	Production (kWh)	Fuel (kg)	O&M Cost (\$/yr)	Fuel Cost (\$/yr)	Capital Cost (\$)	Production (kWh/yr)	Autonomy (hr)	Annual Throughput (kWh/yr)	Nominal Capacity (kWh)	Usable Nominal Capacity (kWh)	Rectifier Mean Output (kW)	Inverter Mean Output (kW)
13.0	17.2	1.04	5.85	0	1,500	14,667	133	6,224	230	138	0	1.04

Figure III.1 : Résultats de simulation sous HOMER Pro

Toutefois, il est possible de générer des tableaux plus détaillés en sélectionnant des colonnes supplémentaires.

Le tableau III.1 présente les composants du système étudié et indique leur capacité énergétique.

**Tableau III.1:** Capacité énergétique des composants

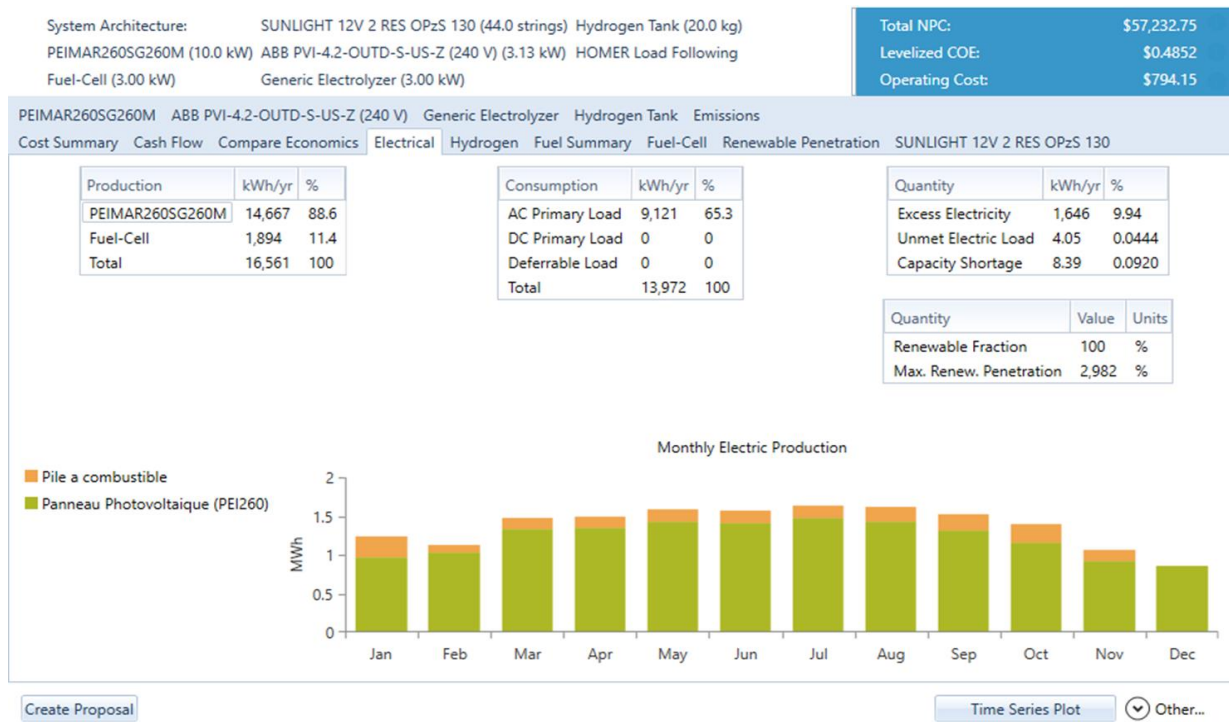
Composants	Capacité énergétique
Champ PV	10 kW
Pile à combustible	3 kW
Batterie	176 kWh
Convertisseur DC/AC	3.13 kW
Electrolyseur	3 kW
Réservoir d'hydrogène	20kg

### III.2.2. La production et la consommation d'énergie

La production fractionnelle représente la contribution énergétique de chaque composant du système. Comme le montre le tableau III.2, le champ photovoltaïque assure une production fractionnelle de 88,6 %, tandis que la pile à combustible contribue pour 11,4 %. Cela signifie que le champ PV fournit la majeure partie de l'énergie totale produite par le système, tandis que la pile à combustible prend le relais lorsque le champ PV ne produit pas suffisamment d'énergie.

**Tableau III.2:** Production énergétique annuelle des sources

Composants	Production (kWh/an)	Fraction (%)
Champ PV	14.667	88.6
Pile à combustible	1.894	11.4
Total	16.561	100



**Figure III.2 :** Production mensuelle des sources à énergie renouvelables

D'après la Figure III.2, qui montre la variation de la production d'électricité par chaque système de production tout au long de l'année, il apparaît que le système PV est la source d'énergie la plus efficace pour répondre à nos besoins énergétiques. En effet, sa production d'électricité est importante tout au long de l'année, à l'exception des mois de février et décembre où elle est réduite. Cette baisse de production s'explique par un ensoleillement moins important durant cette période hivernale.

En revanche, la pile à combustible présente une production d'électricité plus faible, avec une interruption totale en décembre. Cette fluctuation est liée au fonctionnement de la pile à combustible, qui nécessitant une source d'hydrogène. En cas d'insuffisance d'hydrogène, la production d'électricité s'arrête. Cette pénurie d'hydrogène découle de la baisse de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques, qui alimentent l'électrolyseur responsable de la production d'hydrogène.

L'excès d'électricité est de 1,646 kWh par an. Dans ce cas, étant donné que nous disposons d'un électrolyseur de 3 kW, les panneaux solaires ont pu répondre à ses besoins en énergie et même produire un surplus d'énergie, ce qui explique cet excédent.

D'après les résultats du tableau III.3, la charge à courant alternatif représente la principale source de consommation d'électricité dans notre étude. Pour la consommation d'électricité de la part de l'électrolyseur n'est pas directement liées à la consommation de la charge AC, mais elle contribue à la consommation totale d'énergie du système.

**Tableau III.3:** Consommation énergétique annuelle de la charge

Charge	Consommation (kWh/an)	Fraction (%)
Charge AC	9.121	65.3
L'électrolyseur	4.85	34.7
Total	13.971	100

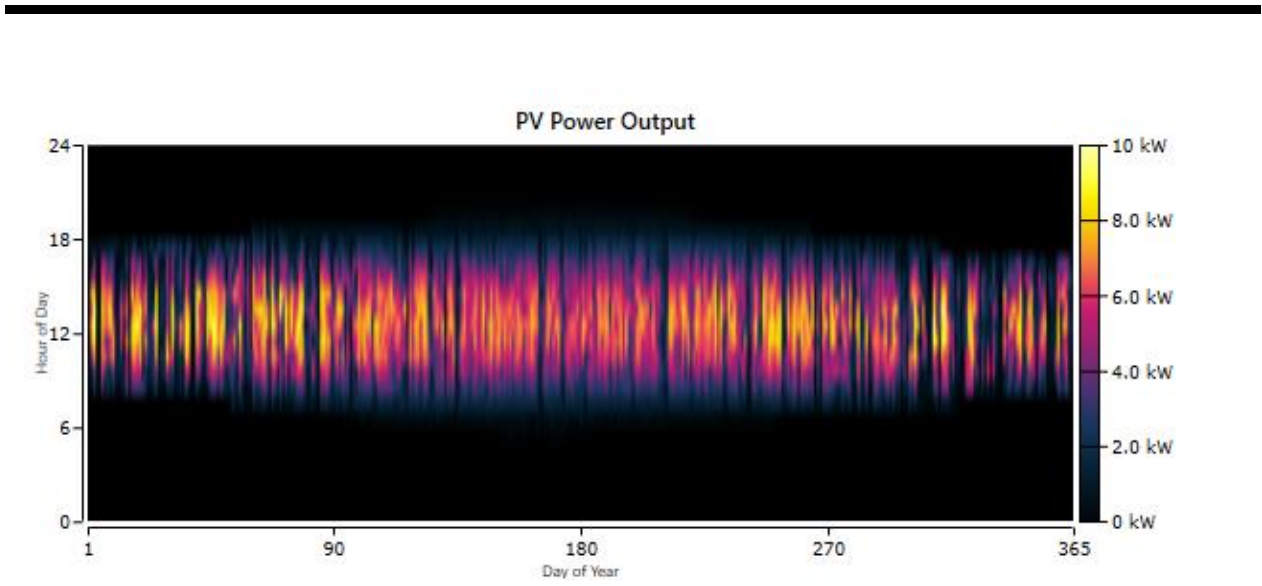
### III.2.3. Résultats liés au champ PV

Le tableau III.4 présente les paramètres de fonctionnement du champ PV. Ces paramètres permettent d'évaluer les performances d'une installation photovoltaïque en vue de les comparer à d'autres configurations et de les optimiser.

**Tableau III. 4:** Paramètres de fonctionnement du champ PV

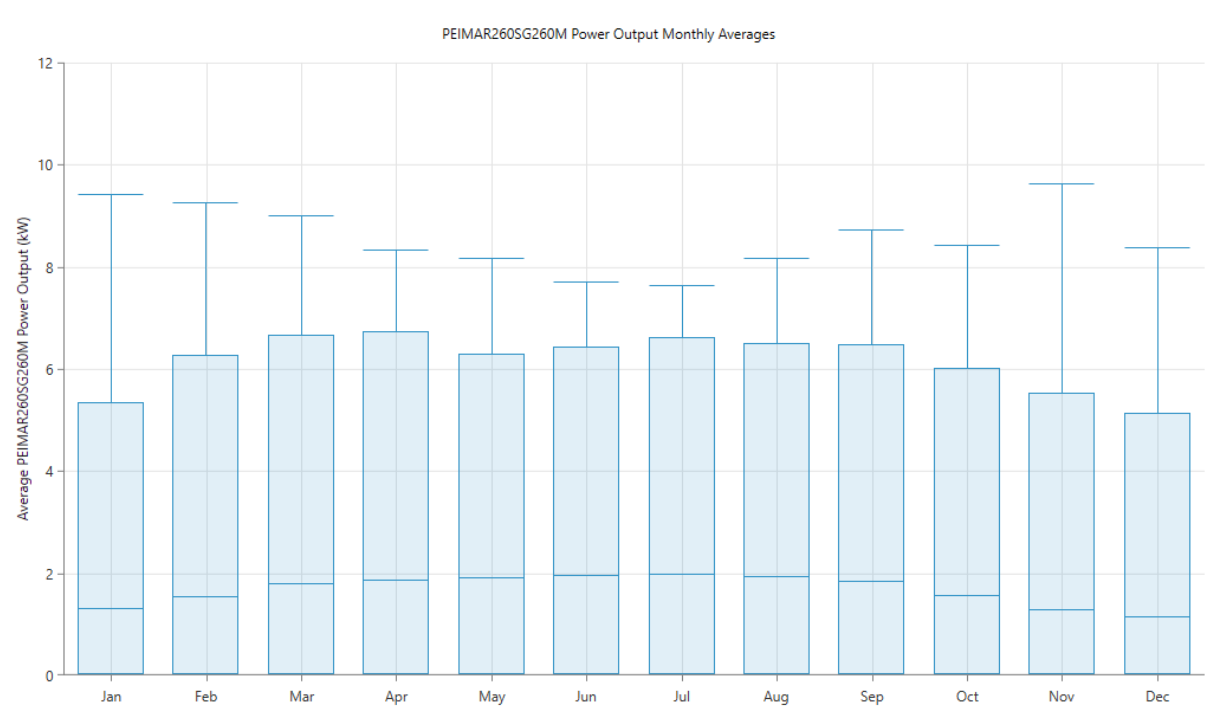
Variable	Valeur
Heure de fonctionnement	4366 h/an
Pénétration PV	161%
Facteur de Capacité	16.7 %
Puissance moyenne journalière	14,667 kWh/J
Puissance minimale	0 kW
Puissance maximale	9.63 kW

D'après le graphique illustré dans la Figure III.3, la production d'énergie solaire est élevée entre 08h et 18h en été, mais moins importante en hiver. De plus, la production d'électricité par les panneaux photovoltaïques est très faible pendant les périodes de pic de consommation entre 20h00 et 23h00.



**Figure III.3 :** Puissance journalière moyenne délivrée par les panneaux solaires

Le Figure III. 4 montre que la puissance mensuelle moyenne délivrée par les panneaux solaires varie tout au long de l'année. Les valeurs les plus élevées sont observées pendant les mois d'été (juin, juillet et août), lorsque l'ensoleillement est le plus important. Les valeurs les plus basses sont observées pendant les mois d'hiver (décembre, janvier et février), lorsque l'ensoleillement est le plus faible.



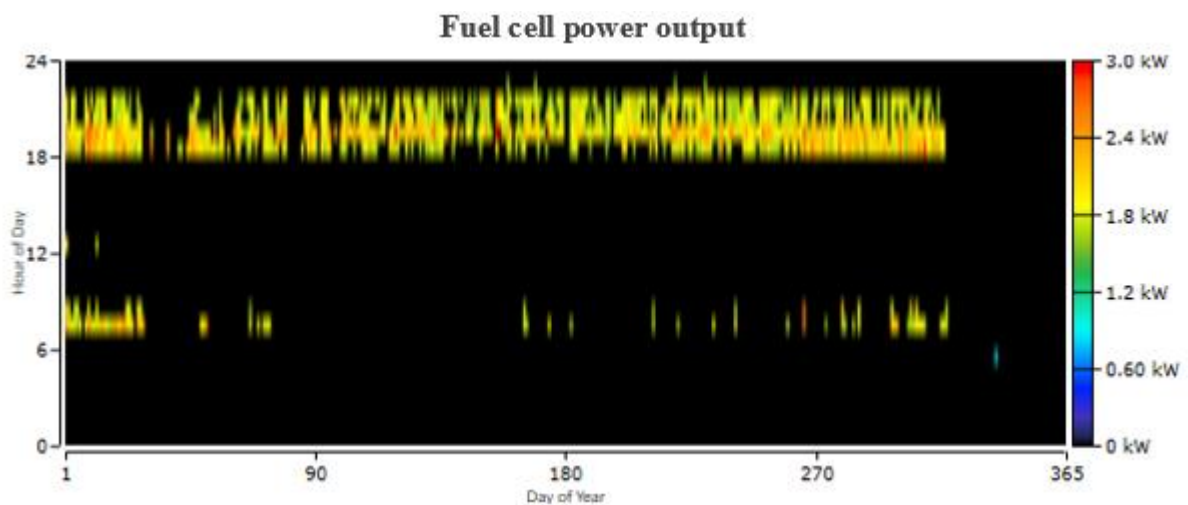
**Figure III.4 :** Puissance mensuelle moyenne délivrée par les panneaux solaires

### III.2.4. Résultats liés à la pile à combustible

Le tableau III.5 fournit des informations précieuses sur l'efficacité et le coût de la pile à combustible dimensionnée pour notre système.

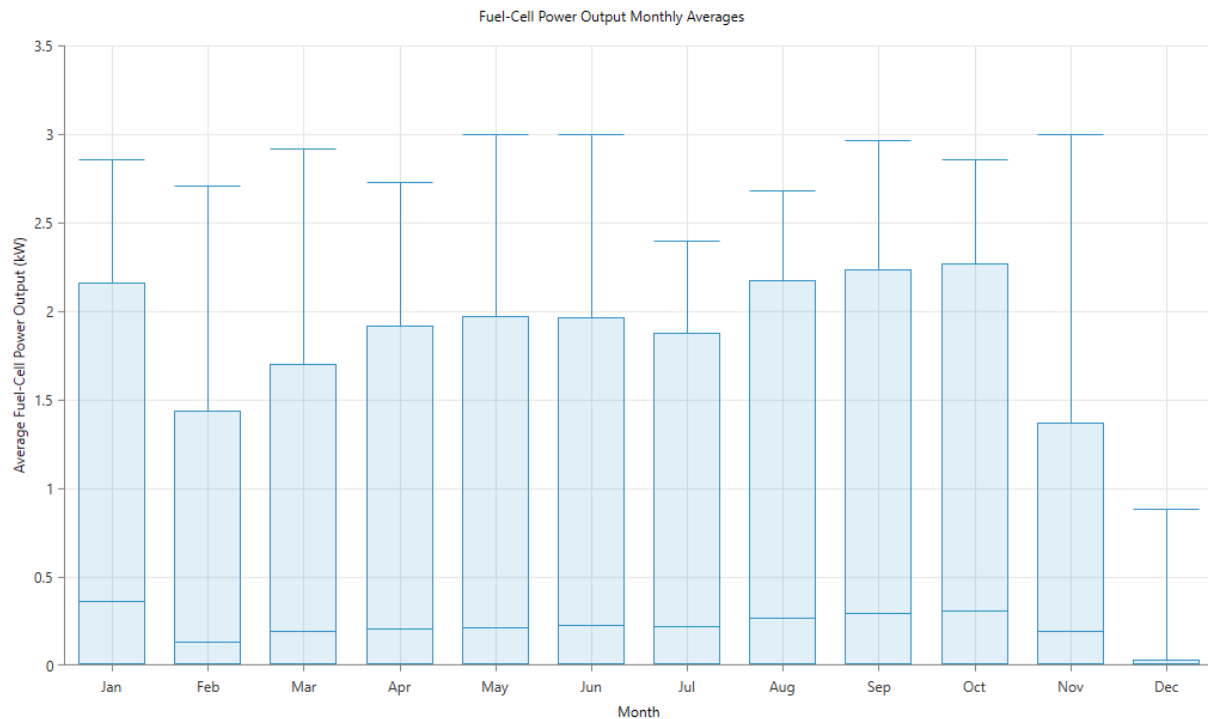
**Tableau III.5 :** Paramètres de fonctionnement de la pile à combustible

Variable	Valeur
Heure de fonctionnement	945 h/an
Production électrique	1.894 kWh/ an
Facteur de Capacité	7.21 %
Puissance minimale	0.882 kW
Puissance maximale	3 kW
Consommation de l'hydrogène	115 kg
L'apport d'énergie de l'hydrogène	3,817kWh/ an
Rendement électrique moyen	49.6 %



**Figure III.5 :** Puissance journalière moyenne délivrée par la pile à combustible

D'après la Figure III.5, on observe que la puissance journalière moyenne délivrée par la pile à combustible est la plus élevée lorsque la puissance de la source photovoltaïque est la plus basse. Elle fonctionne entre 18h00 et 23h00 pour une puissance de 1,8 kW à 2,4 kW afin de satisfaire la demande de la charge en cas d'absence ou d'insuffisance d'énergie solaire. Cependant, cette puissance varie en fonction de la période de l'année.



**Figure III.6 :** Puissance mensuelle moyenne délivrée par la pile à combustible

La Figure III.6 illustre la puissance mensuelle délivrée par la pile à combustible tout au long de l'année, en corrélation avec la demande d'électricité. On observe que pendant les mois de janvier, septembre et octobre, la demande d'électricité est particulièrement élevée, ce qui se traduit par une puissance fournie par la pile à combustible plus importante. Ces pics peuvent s'expliquer par les fluctuations saisonnières de la consommation d'électricité.

### III.2.5. Résultats liés au système de stockage par batteries

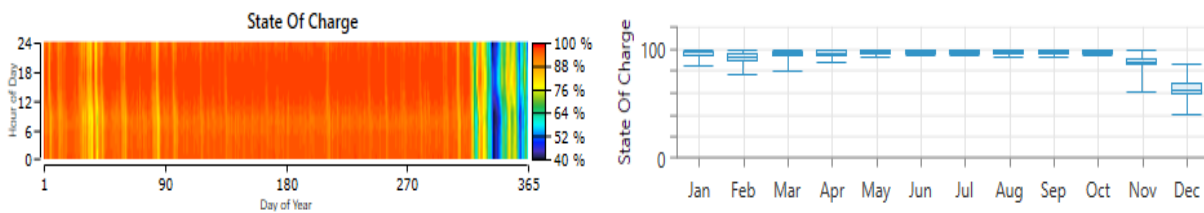
Les paramètres de fonctionnement de la batterie, présentés dans le tableau III.6, fournissent des informations précieuses sur les performances et l'utilisation de la batterie dans notre système. L'analyse de ces paramètres permet d'évaluer certaines variables.

**Tableau III. 6:** Paramètres de fonctionnement des batteries

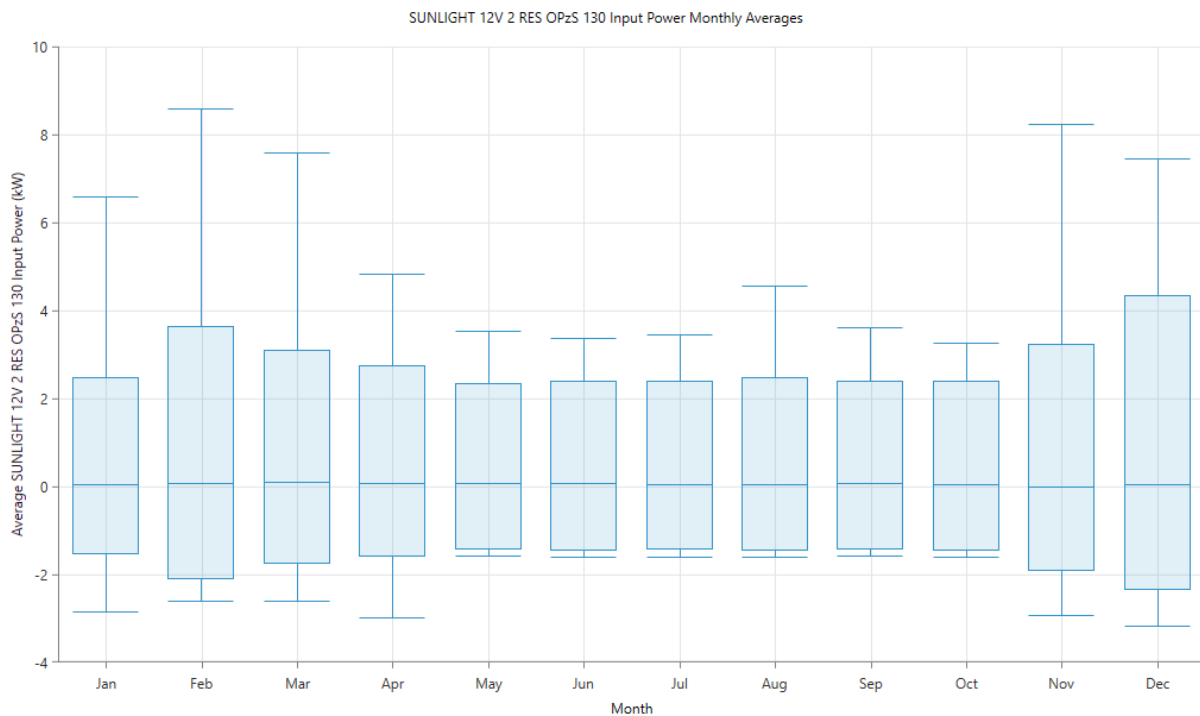
Variable	Valeur
Autonomie	133 h
Energie entrante	4.419 kWh/ an
Energie sortante	3.855 kWh/ an
Epuisement du stockage	108 kWh/ an
Pertes d'énergie	671 kWh/ an
Débit annuel	4.182 kWh/ an
Durée de vie	18 ans
Quantité de batteries	176 (4*44)
Tension de batteries	48V

Une analyse plus approfondie des données de fonctionnement est donnée par la Figure III. 7, qui montre l'état de charge moyen journalier et mensuel des batteries. Le graphique montre que les batteries peuvent stocker de l'énergie pendant plusieurs mois, avec une capacité de stockage comprise entre 76 % et 100 % de leur capacité maximale.

En effet, on constate que les batteries sont restées quasiment chargées entre avril et juillet, puis elles commencent à se décharger jusqu'à atteindre une profondeur de 60% en décembre.

**Figure III.7 :** Etat de charge moyen journalier et mensuel des batteries





**Figure III.8 :** Puissance mensuelle moyenne introduite par les batteries

La Figure III.8 illustre la puissance mensuelle moyenne introduite par les batteries solaires au sein du système. Cette puissance varie en fonction des saisons, ce qui est directement lié à la quantité de lumière solaire reçue par les panneaux solaires, ainsi qu'à d'autres facteurs influençant leur performance, tels que la température, l'ensoleillement, l'ombre, et l'orientation des panneaux solaires.

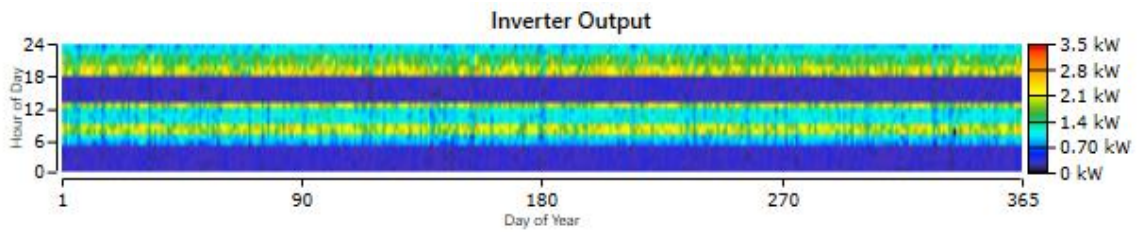
On observe que la puissance moyenne introduite par les batteries est la plus élevée de mars à septembre grâce à une forte luminosité et des conditions météorologiques favorables, permettant un stockage d'énergie important. En revanche, de novembre à février, la puissance moyenne est la plus faible en raison des jours plus courts et du faible ensoleillement, limitant la production d'énergie des panneaux solaires.

### III.2.6. Résultats liés au convertisseur DC/AC

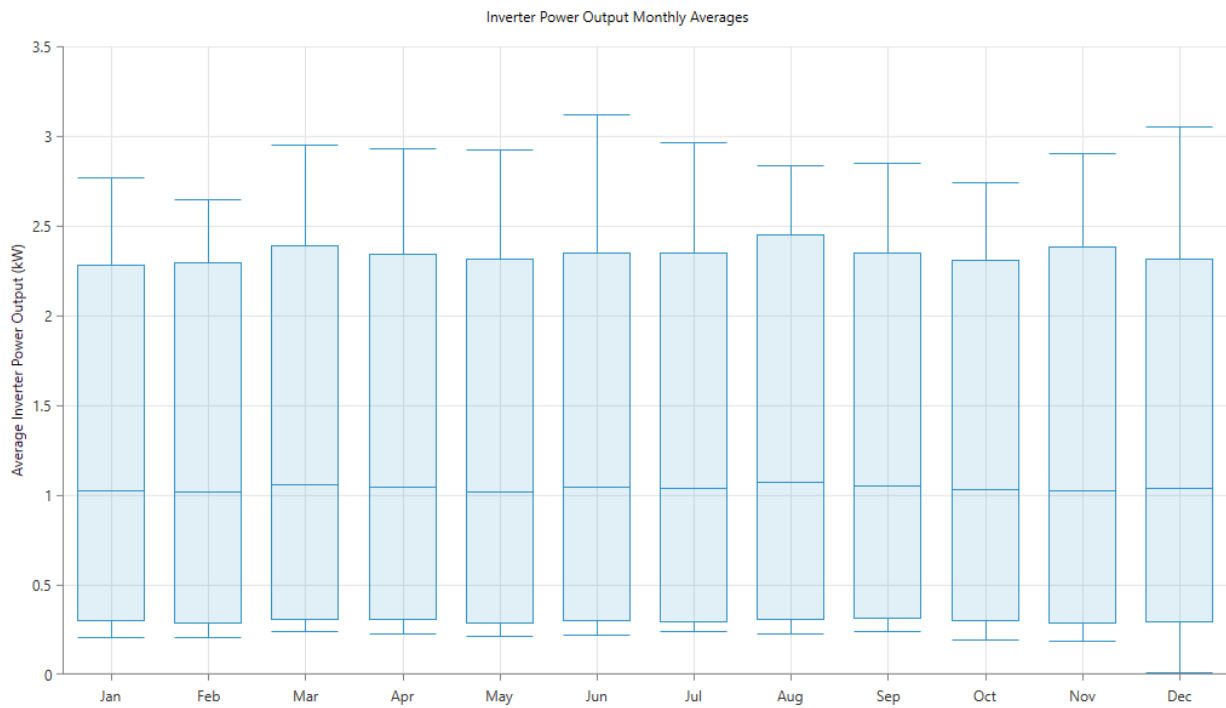
Les paramètres de fonctionnement de convertisseur sont présentés dans le tableau III .7.

**Tableau III. 7:** Paramètres de fonctionnement de convertisseur

Variable	Valeur
Facteur de capacité	33.3 %
Puissance moyenne	1.04 kW
Puissance minimale	0 kW
Puissance maximale	3.12 kW
Energie entrante	9.501 kWh/ an
Energie sortante	9.121 kWh/ an
Pertes d'énergie	380 kWh/ an



**Figure III.9 :** Puissance moyenne journalière délivrée par le convertisseur DC/AC



**Figure III.10 :** Puissance moyenne mensuelle délivrée par le convertisseur DC/AC

D'après la Figure III.9 de la puissance moyenne journalière délivrée par le convertisseur, entre 00h00 et 6h00, le convertisseur délivre une puissance moyenne d'environ 0,75 kW, ce qui correspond à une faible consommation de la charge durant cette période d'environ 0.5 kW.

En revanche, entre 6h00 et 12h00, la puissance de la charge augmente jusqu'à 3 kW, ce qui entraîne une augmentation de la puissance délivrée par le convertisseur, atteignant des valeurs comprises entre 1,4 kW et 2,8 kW.

Cependant, la puissance moyenne journalière délivrée par le convertisseur dépend de la consommation électrique de la charge.

Le profil de charge fait référence à la répartition de la consommation d'électricité sur une période donnée, tandis que la saison influence généralement les habitudes de consommation d'énergie. D'après la Figure III.10, représentant la puissance moyenne mensuelle délivrée par le convertisseur DC/AC, on observe que pendant les saisons où la consommation d'électricité est plus élevée, la puissance moyenne mensuelle du convertisseur tend à être plus élevée pour répondre à la demande accrue en énergie.

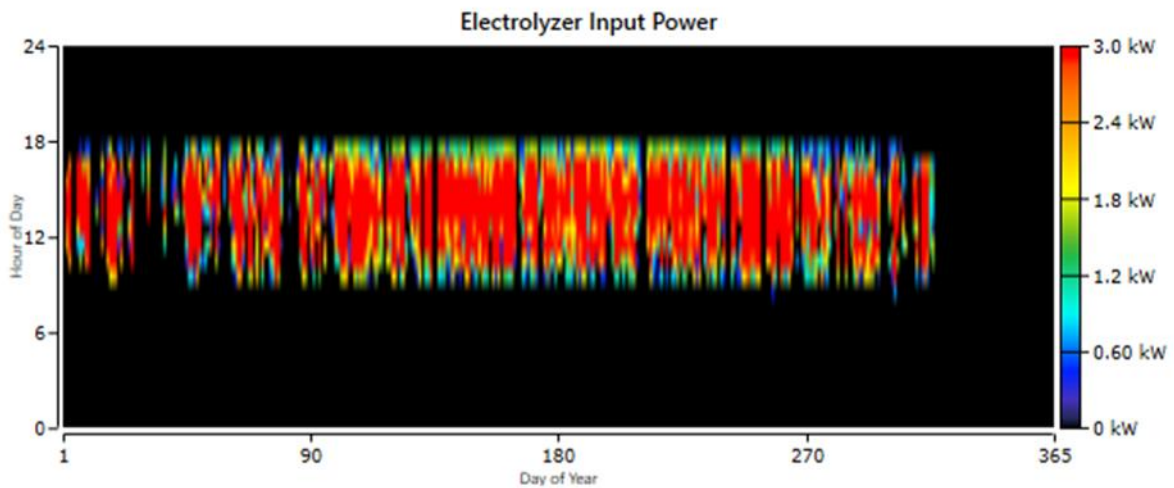
### III.2.7. Résultats liés à l'électrolyseur

Le tableau III.8 présente les caractéristiques de fonctionnement de l'électrolyseur, offrant des détails importants sur ses performances et son utilisation dans notre système.

**Tableau III. 8:** Paramètres de fonctionnement d'électrolyseur

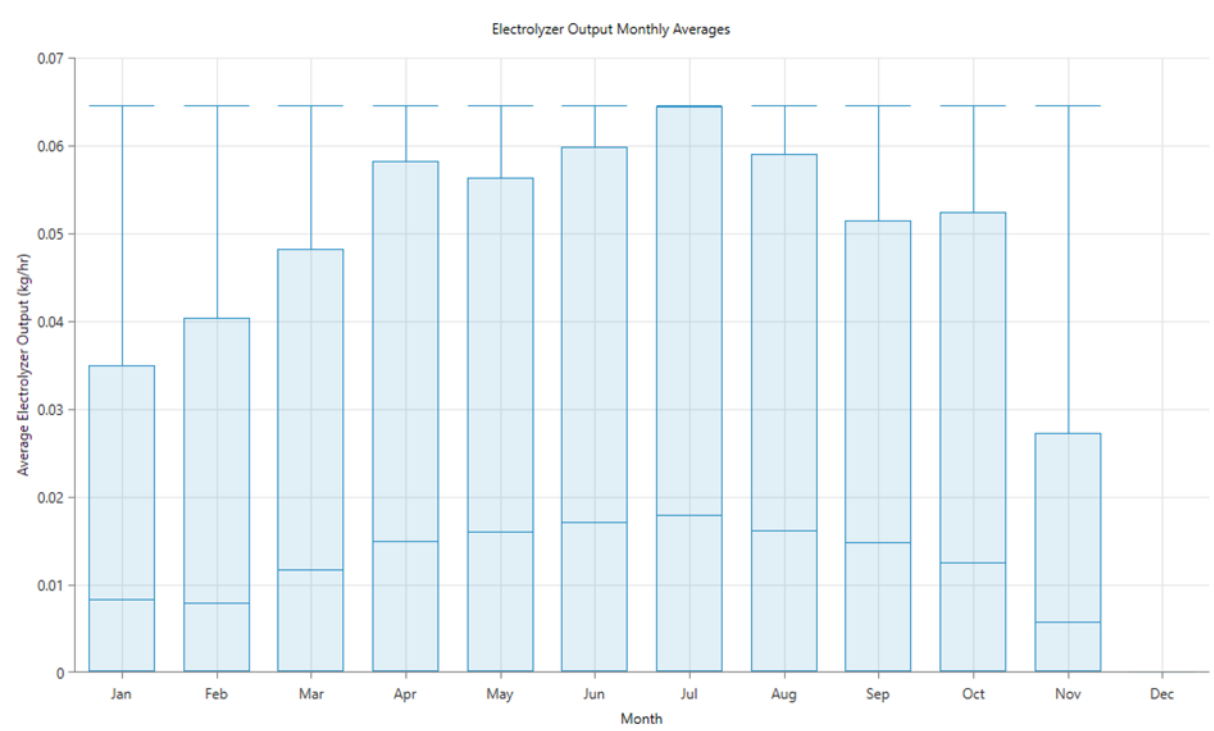
Variable	Valeur
Capacité nominale	3 kW
Puissance moyenne	0.554 kW
Puissance minimale	0 kW
Puissance maximale	3 kW
Energie total d'entrée	4.851 kWh/an
Facteur de capacité	18 %
Sortie minimale	0 kg/h
Sortie moyenne	0.0119 kg/h
Sortie maximale	0.0646 kg/h
Production totale	105 kg/an
Consommation spécifique	46.4 kWh/kg

L'électrolyseur utilise l'énergie électrique fournie par les panneaux solaires pour son fonctionnement. En comparant les résultats de la Figure III.11, qui représente la puissance moyenne journalière introduite par l'électrolyseur, avec ceux de la Figure III.3 montrant la puissance journalière moyenne délivrée par les panneaux solaires, nous pouvons conclure que la production optimale de l'électrolyseur se concentre entre 8h00 et 18h00, et qu'il y a une période de faible production entre 20h00 et 23h00. La puissance moyenne journalière varie de 0,554 kW, atteignant un maximum de 3 kW. Il est essentiel de noter que la puissance moyenne journalière introduite par l'électrolyseur est étroitement liée à la puissance moyenne journalière délivrée par les panneaux solaires.



**Figure III.11** : Puissance moyenne journalière introduite par l'électrolyseur

Dans le contexte de l'étude de la puissance moyenne mensuelle délivrée par l'électrolyseur, comme illustré dans la Figure III.12, on peut constater que la capacité de l'électrolyseur à traiter une plus grande quantité d'énergie et à produire de l'hydrogène dépendra de la puissance moyenne fournie par les panneaux solaires pendant un mois donné. Spécifiquement durant les mois de mai, juin et juillet. En revanche, si la puissance moyenne des panneaux solaires est faible, la production d'hydrogène par l'électrolyseur sera également réduite.



**Figure III.12 :** Puissance moyenne mensuelle délivrée par l'électrolyseur

### III.2.9. Résultats liés au réservoir d'hydrogène

Le tableau III.9 expose les paramètres opérationnels du réservoir d'hydrogène, fournissant des informations précieuses sur ses performances et son utilisation dans notre système.

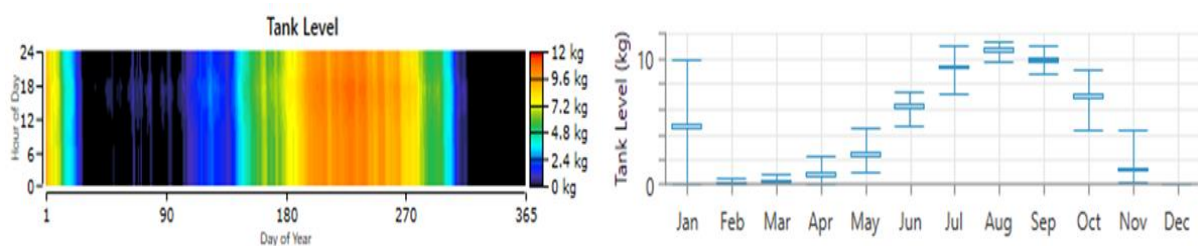
**Tableau III. 9:** Paramètres de fonctionnement du réservoir d'hydrogène

Variable	Valeur
Capacité de stockage d'hydrogène	20 kg
Capacité de stockage d'énergie	667 kWh
Autonomie du réservoir	640 h
Contenu en début d'année	10 kg
Contenu en fin d'année	0.0134 kg

La Figure III.13 illustre que le niveau journalier et mensuelle du réservoir d'hydrogène dépend de la lumière du soleil et la production de l'électrolyseur ainsi que la demande en énergie.

En effet, si la puissance moyenne délivrée par les panneaux solaires est élevée, spécifiquement pendant les mois ensoleillés, le niveau du réservoir d'hydrogène augmente, conjointement avec l'augmentation de la puissance moyenne délivrée par l'électrolyseur.

En revanche, lorsque la demande en électricité est élevée, le niveau du réservoir d'hydrogène peut diminuer plus rapidement s'il n'est pas suffisamment rechargé pendant la journée.



**Figure III.13 :** Niveau journalier et mensuelle de réservoir d'hydrogène

La Figure III.14 montre que la quantité mensuelle moyenne d'hydrogène stockée est la plus élevée en été, et la plus basse en hiver.

Cependant, la quantité d'hydrogène stocké dans le réservoir dépend de son niveau de remplissage. En conséquent, si la demande en énergie est élevée, le réservoir d'hydrogène sera sollicité pour fournir plus d'énergie.

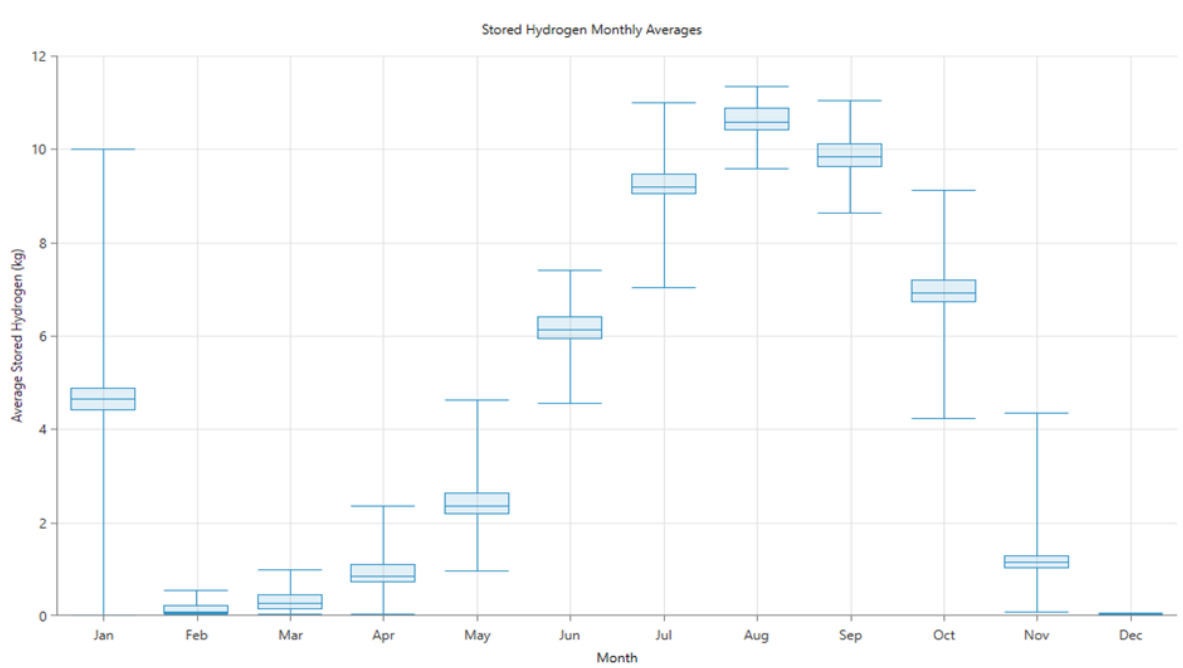


Figure III.14 : Quantité mensuelle moyenne d'hydrogène stocké

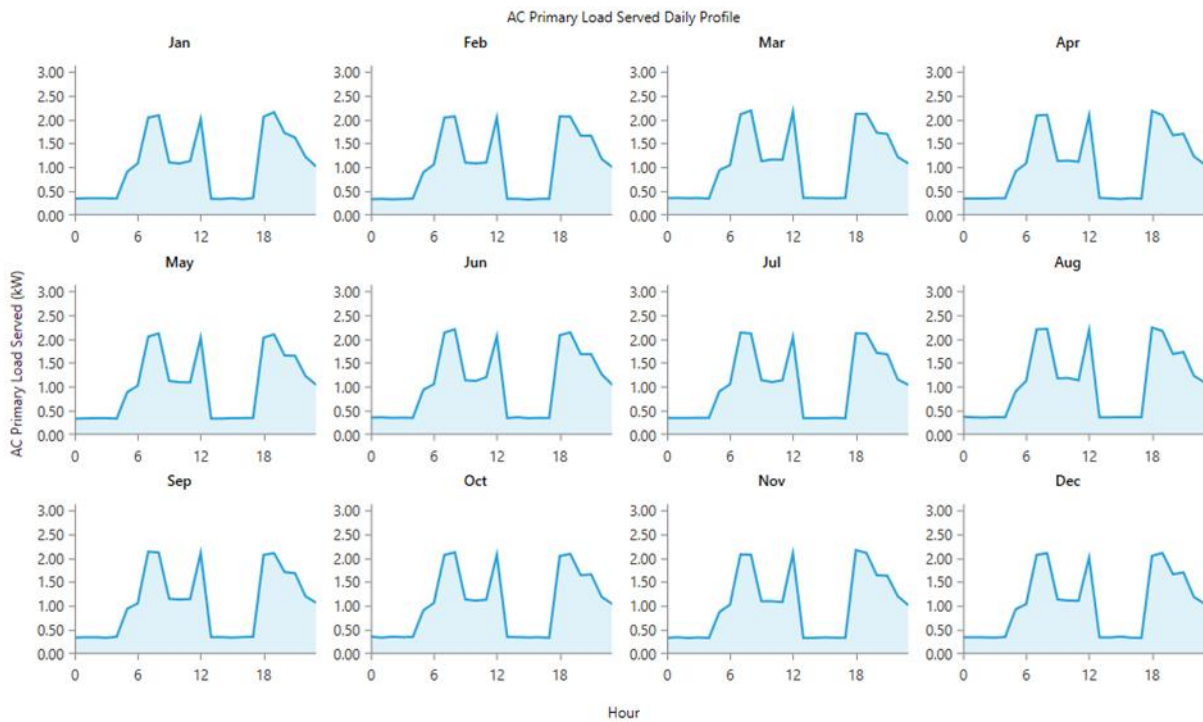


Figure III.15 : Variation saisonnière du profil de consommation journalier

L'analyse de la Figure III.15 montre que le profil de consommation électrique suit généralement une tendance journalière similaire, avec des creux de consommation la nuit entre 00h00 et 05h00 ainsi qu'entre 13h00 et 17h00, et des pics le matin vers 07h00, en début d'après-

midi vers 12h00, et le soir vers 18h00. Cependant, ce profil de consommation varie de manière notable selon les saisons. Tandis que la charge électrique évolue de façon aléatoire d'un jour à l'autre et d'une heure à l'autre, principalement en raison des changements météorologiques.

**III.3. Analyse détaillée des résultats de simulation**

La Figure III.16 illustre les résultats de la journée du 03 janvier. On remarque que pendant les heures de fort ensoleillement, les panneaux solaires (en rouge) produisent l'essentiel de l'électricité nécessaire pour notre installation. On observe alors des pics de production photovoltaïque, notamment entre 11h00 et 14h00. L'électrolyseur (en violet) permet de valoriser les excédents de production solaire en produisant de l'hydrogène, lequel peut ensuite être stocké et réutilisé dans la pile à combustible (en jaune) lors des périodes de faible ensoleillement, de 6h00 à 8h00 et de 17h00 à 22h00. Le système de stockage (en bleu) permet de lisser les variations de la production photovoltaïque et de couvrir les besoins électriques en cas du besoin.

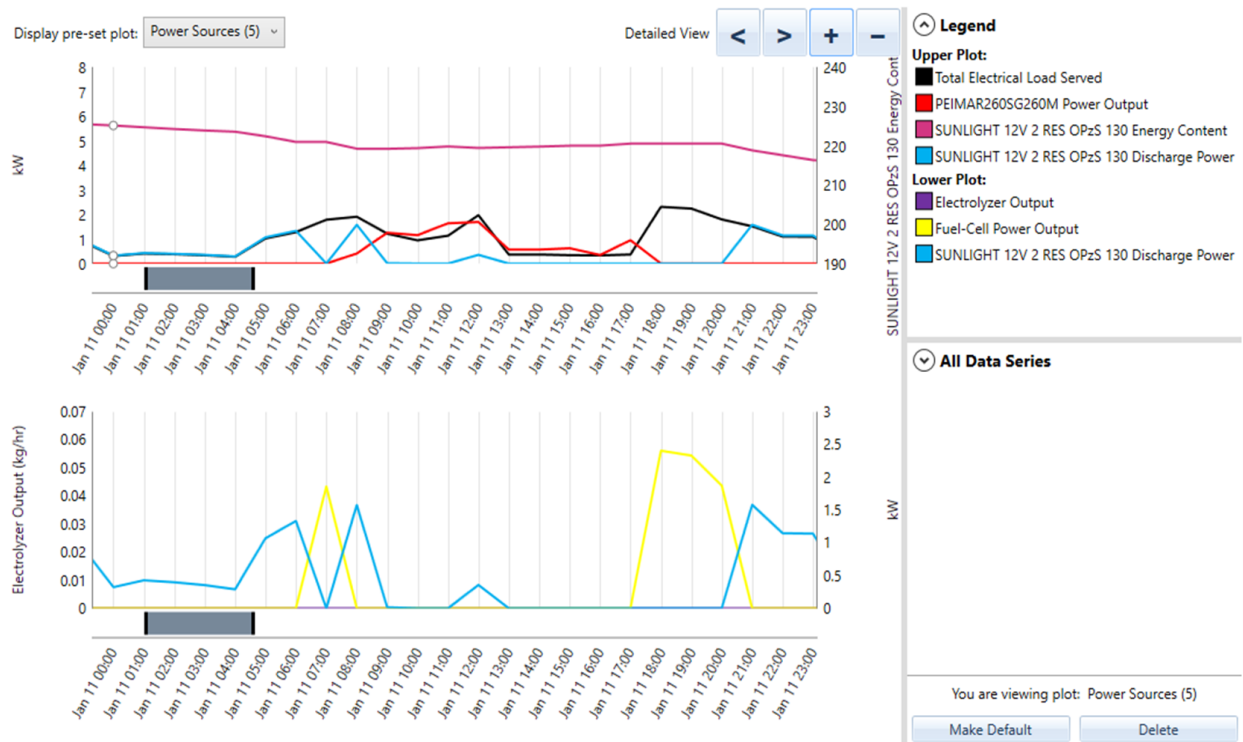


**Figure III.16 :** Profil énergétique pour la journée du 3 janvier

La Figure III.17 illustre la journée du 11 janvier. Durant cette journée sans ensoleillement, on remarque que la production des panneaux solaires (en rouge) est très faible tout au long de la journée. Cela indique que la production photovoltaïque seule ne peut pas répondre aux besoins électriques. De plus, comme le surplus de production solaire n'est pas disponible pour alimenter



l'électrolyseur, son interprétation est limitée. La pile à combustible (en jaune) et les batteries (en bleu) prennent le relais et fournissent l'essentiel de l'électricité nécessaire pour maintenir les besoins énergétiques stables malgré l'absence de production solaire.



**Figure III.17 :** Profil énergétique pour la journée du 11 janvier

D'après les profils énergétiques présentés dans les Figures III.16 et III.17, on peut constater que malgré leur appartenance à la même saison hivernale, ces deux journées présentent des profils de production énergétique très différents. Lors de la journée ensoleillée illustrée par la Figure III.16, la production solaire est prédominante, avec des fluctuations importantes liées aux variations d'ensoleillement. La pile à combustible intervient alors en soutien lorsque la production photovoltaïque diminue. À l'inverse, la Figure III.17 montre une journée sans ensoleillement significatif, où la production solaire est très faible. C'est dans ce cas que la pile à combustible devient essentielle pour assurer la majeure partie de l'alimentation électrique.

La Figure III.18 illustre la journée du 16 juillet, un jour ensoleillé où la production photovoltaïque (en rouge) est prédominante. Des pics de production sont atteints au milieu de la journée lorsque l'ensoleillement est maximal. La production solaire excédentaire est exploitée par l'électrolyseur (en violet) pour produire de l'hydrogène. Cependant, pendant les heures de

faible ensoleillement, notamment de 21h00 à 8h00 du matin, le système de stockage par batterie (en bleu) prend le relais pour alimenter notre installation en énergie. Enfin, on observe que la pile à combustible (en jaune) intervient de manière complémentaire en fin de journée, entre 18h00 et 21h00.

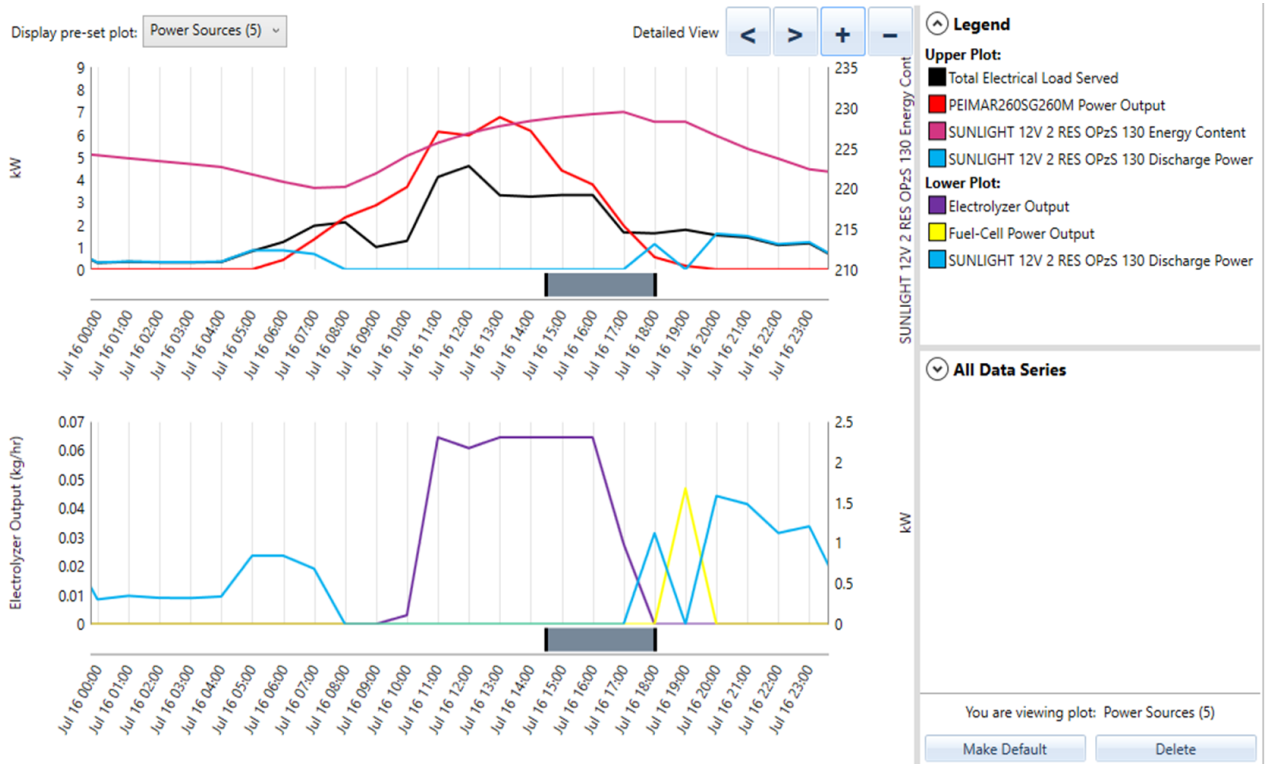
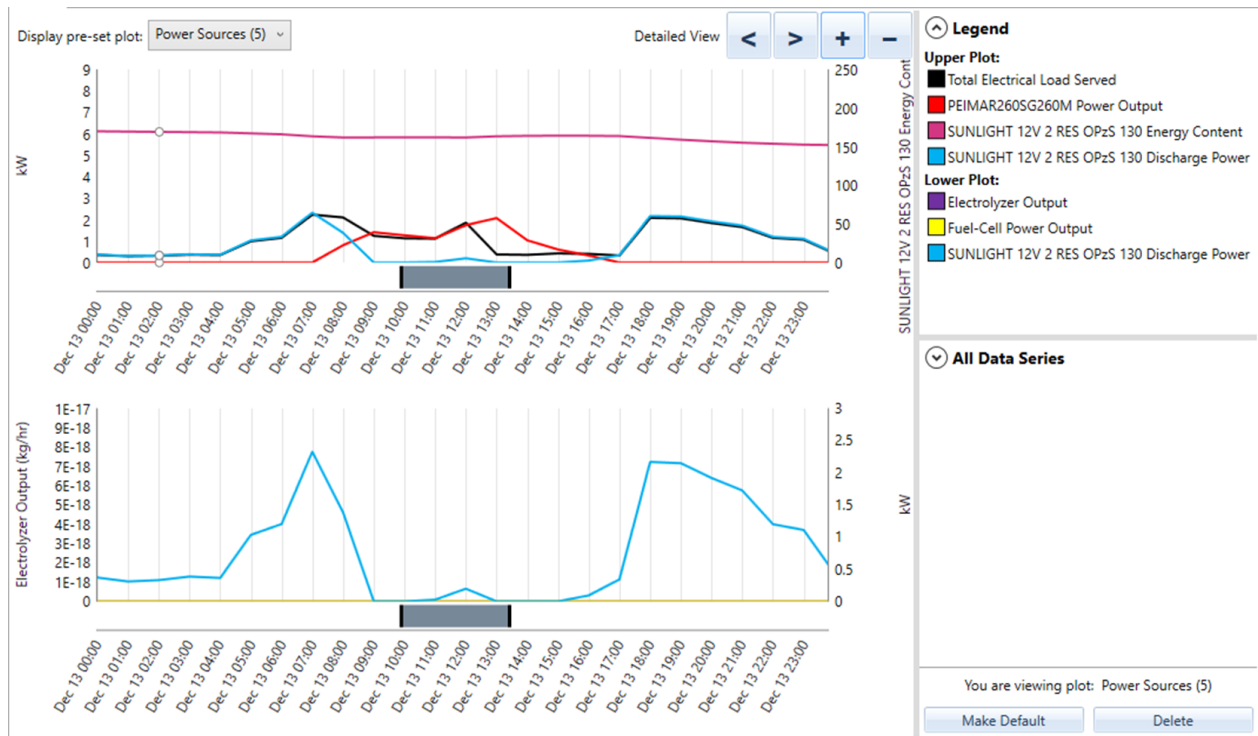


Figure III.18 : Profil énergétique pour la journée du 16 juillet



**Figure III.19** : Profil énergétique pour la journée du 13 décembre

La figure III.19 montre la journée du 13 décembre, on constate que la production photovoltaïque (en rouge) est très faible, en raison du manque d'ensoleillement typique de cette période hivernale. Dans ce cas, le système de stockage par batteries (en bleu) joue un rôle crucial pour combler le manque de production solaire et fournir l'énergie nécessaire aux besoins de la ferme. On note également l'absence d'utilisation de l'électrolyseur (en violet) et de la pile à combustible (en jaune), indiquant que le système n'a pas produit d'excédents d'énergie solaire permettant de générer et stocker de l'hydrogène.

### III.4. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté et analysé les résultats des simulations effectuées à l'aide du logiciel HOMER Pro. Ces simulations portaient sur l'étude d'un système multi-sources destiné à l'alimentation électrique d'une ferme laitière. Les données issues des simulations ont été présentées sous forme de tableaux et de graphiques, permettant une visualisation claire et une interprétation approfondie des performances du système proposé.

Les résultats obtenus démontrent que le système multi-sources étudié constitue une solution viable et durable pour répondre aux besoins énergétiques de la ferme laitière. Ce système permet de réduire la dépendance aux énergies fossiles et de minimiser l'impact environnemental de l'exploitation agricole.

Certes, la solution proposée utilisant une pile à combustible à hydrogène présente un coût élevé. Cependant, le développement continu des technologies liées à cette source d'énergie peut rendre ces systèmes plus compétitifs face aux énergies fossiles dans le futur.

# **Conclusion générale**

## Conclusion Générale

---

Les résultats de cette étude ont permis de concevoir une alternative innovante au réseau électrique d'une ferme laitière à la commune d'IFERHOUNENE, wilaya de Tizi Ouzou, en Algérie. Le système hybride associant des énergies renouvelables que nous avons proposé en utilisant le logiciel HOMER Pro présente de nombreux avantages pour cette application.

Tout d'abord, la combinaison stratégique de panneaux photovoltaïques, d'une pile à combustible alimentée par un réservoir d'hydrogène, d'un convertisseur bidirectionnel et d'un système de stockage par batterie plomb-acide a permis de mettre en place une solution techniquement fiable, durable et adaptée aux besoins énergétiques spécifiques de la ferme laitière. Les panneaux photovoltaïques assurent la production d'électricité renouvelable, tandis que la pile à combustible, alimentée par l'hydrogène stocké, intervient en complément pour répondre aux pointes de consommation. Le convertisseur bidirectionnel permet de gérer les flux d'énergie entre les différents éléments du système, tandis que les batteries plomb-acide jouent un rôle essentiel dans le stockage de l'énergie excédentaire pour une utilisation ultérieure.

Les simulations réalisées ont démontré la faisabilité technique du système dans son ensemble. Bien que le système hybride proposé présente des coûts d'investissement initiaux élevés, notamment pour des éléments comme le réservoir d'hydrogène et la pile à combustible, ses bénéfices à long terme en font une solution intéressante pour la ferme laitière.

Malgré le défi financier posé par ces coûts initiaux, une fois le système installé, les économies substantielles réalisées sur la facture énergétique ainsi que les avantages environnementaux du système (réduction des émissions de gaz à effet de serre, développement durable) offrent des bénéfices à long terme.

Des perspectives d'amélioration peuvent être envisagées pour optimiser d'avantage les performances et la viabilité économique de ce système, comme :

- La réalisation d'une étude économique approfondie permettant de quantifier précisément les bénéfices attendus et de démontrer que ceux-ci compensent largement l'investissement initial.
- Étude d'autres configurations basées sur d'autres sources d'énergies renouvelables, afin de sélectionner la solution la plus performante et la plus rentable sur le long terme.

## Conclusion Générale

---

En outre, cette étude exemplaire pourrait servir de modèle pour d'autres fermes, les encourageant à adopter des systèmes d'énergie durable et donc à contribuer ainsi à la transition vers un avenir énergétique plus respectueux de l'environnement.

# **Références bibliographiques**



- [1] **Y.S Mohammed, M.W Mustafa**, N. Bachir, Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power : Review of substantial issues (Version 35), Renewable and Sustainable Energy Reviews ; 527-539.2014.
- [2] **M. LAMOUREUX**, “ Analyse de scénarios d'utilisation potentielle de l'hydrogène vert au Québec ”, Mémoire de Maîtrise, Université de Laval de Québec, Canada, 2023.
- [3] **E. WARE**, “Etude Et Gestion D'un Système Hybride-éolien-Photovoltaïque Autonome”, Mémoire de Master, Université Du Québec A Trois –Rivières, Canda, 2023.
- [4] **M. ADROUCHE, S. BAALI CHERIF**, “ Connexion au réseau d'un système pile à combustible (commande et modélisation) ”, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2022.
- [5] **S. JEMEI**, “Hybridation, diagnostique et pronostic de pile à combustible”, ISTE, Edition, France, 2019.
- [6] **A. MANSOURI, K. MANSOURI**, “Etude et simulation des performances des piles à combustible à hydrogène dans des applications statiques et dynamiques”, Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie,2022.
- [7] **T. LARFAOUI, M. ZEBBOUDJ**, “Gestion d'un système multi-sources (photovoltaïque-éolien) avec stockage par batteries”, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, Algérie, 2021.
- [8] **R. ROUAS**, “Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque”, Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 2018.
- [9] **DERAI, S.A et KAABECHE, A.** Modélisation et dimensionnement d'un système hybride Eolien/Photovoltaïque autonome. Journal of Renewable Energies, vol. 19, no 2, p. 265-276. 2016.
- [10] **L. GABANI, A. RIGHI**, “Dimensionnement d'un système multi sources à énergies renouvelables”, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Algérie, 2021.
- [11] **K. GHOUL**, “Modélisation et commande d'un système multi-sources (Photovoltaïque - éolienne) ”, Mémoire de Master, Université Larbi Tebessi de Tébessa, Algérie, 2022.
- [12] **M. DAHOU**, “ Etude d'un système hybride pour l'alimentation d'un habitat”, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Algérie,2016.
- [13] **Y. H. SAAD**, “Gestion optimale des systèmes hybrides pour la production de l'énergie dans les sites isolés”, Thèse de Doctorat, Université de technologie Belfort – Montbéliard, France, 2018.
- [14] **K.Eddine**, “Systèmes multi sources à énergie renouvelables” Cours 2ème année Master Energies Renouvelables en Electrotechnique, Université Farhat Abbas Sétif 1 de Sétif, Algérie, 2022.

- [15] **W. GHARSALLAOUI**, “Design contrôle et tests des performances en temps réel d’un convertisseur quasi-Z-source à courant continu pour un système photovoltaïque autonome”, Mémoire de maîtrise électronique, École de technologie supérieure, Montréal, Canada, 2023.
- [16] **A. H. SHNEISHIL**, “Solar Photovoltaic System”, Course Renewable Energy College of Education, university of mustansiriyah, Baghdad, Irak, 2019.
- [17] **A. ARDJAL**, “Energies renouvelables”, Cours 1ère année Master Energies Renouvelables, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 2023.
- [18] **Tigo Energy**, “comment fonctionnent les systèmes d’énergie solaire ”, Blog Tigo Energy, France, 2021. <https://fr.tigoenergy.com/post/blog-how-solar-energy-systems-work>
- [19] **R. MAMMAD**, “Etude Et Simulation De La Robustesse D’une Commande Pour Eolienne A Base De MADA En Présence Des Incertitudes Des Paramètres Et/Ou Des Perturbations Présente Dans Le Réseau Electrique ”, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie, 2017.
- [20] **F. OUAGUENI**, “Modélisation et Commande des Piles à Combustible”, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2021.
- [21] **F. NOUAR KHERKHACHI, H. AZAZLA**, “ Commande d’un système hybride contenant un panneau solaire et une batterie”, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2020.
- [22] **Site Tterega.fr**, “Nos activités hydrogène : le stockage d’hydrogène un enjeu pour le développement de la filière” 2024.
- [23] **E. LAHRAR**, “Simulations de l'adsorption des ions dans des carbones poreux modèles pour étudier les relations structure-performance dans les super condensateurs”, Thèse de Doctorat, École Doctorale Sciences de la Matière de Toulouse, France, 2020.
- [24] **M. LI**, “Préparation de matériaux composites pour super condensateurs à hautes performances”, Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, 2022.
- [25] **H. NADOUR**, “Détermination de l’impact de la porosité de carbones activés sur l’énergie spécifique de super condensateur utilisant un liquide ionique redox”, Mémoire de Master, Université de Montréal, Canada, 2023.
- [26] **K. THABET**, “Pile à combustible à céramique conductrice protonique : élaboration et caractérisations physico-chimiques et électrochimiques des matériaux et optimisation de la mise en forme par le procédé de densification à basse température CSP”, Thèse De Doctorat, Université de Nantes, France, 2023.
- [27] **Green MA, Dunlop E, Hohl-Ebinger J**, et al. Solar cell efficiency tables (Version 60), Prog Photovolt Res Appl. ;30(7) :687-701.2022.
- [28] **A. MEBROUKI, A. DJAAFARI**, “ Etude d’un système hybride cas des centrales KABERTENE”, Mémoire de Master, Université d’Adrar, Algérie, 2016.

[29] **M. WALKER**, et HOMER Energy Releases New Software Updates to Help Users Make Intelligent Energy Storage Decisions for Off-Grid Systems, Blog, UL solutions, France, 2018.

<https://microgridnews.com/release-homer-energy-releases-new-software-updates-to-help-users-make-intelligent-energy-storage-decisions-for-off-grid-systems/>

[30] <https://www.bing.com/>

[31] **D. GORINE, Z. GUISSA**, “Etude d’un projet d’un système autonome hybride photovoltaïque éolien et biomasse pour application agricoles”, Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis De Mostaganem, Algérie, 2023.

[32] **Pratik Electric**, “comment la température affecte les panneaux solaires”, blog Entreprise de Maison moderne électrique, France, 2022. <https://www.maisonmoderne-electricite.fr/blog/post/comment-la-temperature-affecte-les-panneaux-solaires-.html>

[33] **A. LABOURET, M. VILLOZ**, “Energie solaire photovoltaïque”, DUNOD, 4ème Edition, Paris, France, 2009.

## **Résumé**

Ce travail porte sur l'étude et la simulation d'un système multi-sources à énergies renouvelables avec stockage pour alimenter une ferme laitière située dans la commune d'IFERHOUNENE. Les systèmes multi-sources combinent plusieurs types de sources afin d'optimiser la production d'énergie. La conception d'une installation multi-sources nécessite une analyse des besoins énergétiques du site, la disponibilité des ressources renouvelables et l'intégration de technologies de stockage d'énergie. En utilisant le logiciel HOMER Pro, nous avons modélisé différents scénarios en combinant les sources d'énergie disponibles. La simulation nous a permis d'identifier la configuration la plus efficace et économiquement viable pour répondre aux besoins énergétiques de la ferme. Les simulations réalisées ont démontré la faisabilité technique du système proposé dans son ensemble. Enfin, cette approche vise à promouvoir un modèle agricole durable, réduire les coûts énergétiques et diminuer l'empreinte carbone de l'exploitation.

**Mot clés :** Système multi-sources, Energies renouvelables, Ferme laitière, Stockage d'énergie, HOMER Pro.

## **Abstract**

This work focuses on the study and simulation of a multi-source renewable energy system with storage to supply a dairy farm located in the commune of IFERHOUNENE. Multi-source systems combine several types of sources to optimize energy production. Designing a multi-source installation requires analysing the site's energy needs, the availability of renewable resources, and the integration of energy storage technologies. Using HOMER Pro software, we modeled different scenarios by combining the available energy sources. The simulation allowed us to identify the most efficient and economically viable configuration to meet the farm's energy needs. The simulations demonstrated the overall technical feasibility of the proposed system. Finally, this approach aims to promote a sustainable agricultural model, reduce energy costs, and decrease the farm's carbon footprint.

**Keywords:** Multi-source system, Renewable energy, Dairy farm, Energy storage, HOMER Pro.