

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique  
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : **BENBOUABDELLAH Zakaria.**  
**HADJAL EI Mehdi.**

Thème

## SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE AUTONOME

Soutenu publiquement, le 11 / 09 /2020 , devant le jury composé de

Mme. LASSOUANI Fatiha	Docteur	ESSA. Tlemcen	Présidente
Mme. FARADJI Djamila Née KHERBOUCHE	Docteur	ESSA. Tlemcen	Encadrante
Mme. GHOMRI Amina	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examinatrice
Mme. BOUKLI HACENE Souhila	Docteur	Université Abou Beker Belkaid Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2020 /2021

*« Il est important d'avoir des rêves assez grands pour ne pas les perdre de vue lorsqu'on les poursuit »*

**Oscar WILDE**



# Remerciements

Ce travail, a été le fruit d'un dur travail, accompagnés de beaucoup de sacrifices, surtout durant cette pandémie. Nos remerciements, vont tout d'abord au créateur de l'univers, qui nous accordé la force et le courage et l'intelligence, pour mener à bien cette année. On offre nos sincères et chaleureux remerciements, à notre encadreur de mémoire madame **KHERBOUCHE Djamila**, pour avoir accepté de diriger notre travail avec ses précieux conseils. Aussi que les membres du jury trouvent ici nos remerciements les plus vifs, pour avoir accepté d'honorer par leurs jugements notre modeste travail. Enfin, on ne peut pas achever sans exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidé à réaliser ce travail de près ou de loin.

MERCI !



## Dédicaces

À ma grand-mère Fatima. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Que dieu, vous protège, préserve santé et longue vie.

À la lumière de mes jours, à mes très chers parents, que j'aime énormément tant pour leurs affections, leurs encouragements et leur patience illimitée. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester fidèle à votre fierté et ne jamais vous décevoir.

À mes très chers frère et sœurs, pour les souvenirs d'une enfance agréable et unique. Pour des souvenirs qui n'auraient pu être si les choses étaient un peu différentes.

À mes tendres cousines & cousins, pour les moments passés ensemble, je vous souhaite toute la réussite.

À mes très chers amis, pour l'amitié qui nous unit et les souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble. Merci d'être toujours à mes côtés.  
Vous serez à jamais dans mon cœur.

À mes très chères tantes, à mes chers oncles, un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts et votre encouragement. Que ce travail soit un témoignage de ma gratitude et mon profond amour.

BENBOUABDELLAH Zakaria



# Dédicaces

À Ma chère grand-mère :

Que ce modeste travail, soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de formuler dans vos prières. Que Dieu vous préserve santé et longue vie

À Ma tendre Mère :

Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

À Mon très cher Père :

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

À toute ma famille :

Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

À mes amis :

Vous êtes pour moi des frères sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

HADJAL El Mehdi

# SOMMAIRE

<b>Remerciements</b> .....	<b>II</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>III</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>IV</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>V</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>IX</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>XII</b>
<b>Chapitre I</b> .....	
<b>Introduction</b> .....	<b>2</b>
I.1 Les systèmes électriques hybrides.....	<b>2</b>
I.2 Importance de l'hybridation .....	<b>3</b>
I.3 Combinaisons des systèmes hybrides à énergie renouvelable : .....	<b>4</b>
I.3.1 Architecture à bus CC.....	<b>4</b>
I.3.2 Architecture à bus CA .....	<b>5</b>
I.3.3 Architecture mixte à bus CC/CA.....	<b>6</b>
I.4 Les différentes combinaisons des systèmes hybrides .....	<b>6</b>
I.4.1 Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel .....	<b>6</b>
I.4.2 Système hybride photovoltaïque-batterie et piles à combustible .....	<b>7</b>
I.4.3 Système hybride photovoltaïque –éolien.....	<b>7</b>
I.5 Avantages et inconvénients d'un système hybride .....	<b>8</b>
I.5.1 Avantages.....	<b>8</b>
I.5.2 Inconvénients.....	<b>8</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>8</b>
<b>Chapitre II</b> .....	
<b>Introduction</b> .....	<b>10</b>
II.1 Energie photovoltaïque .....	<b>10</b>

II.1.1	Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque .....	10
II.1.2	Les différents systèmes photovoltaïques .....	10
II.1.2.1	Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau .....	11
II.1.2.2	Systèmes PV raccordés au réseau avec injection totale .....	11
II.1.2.3	Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation : .....	11
II.1.2.4	Systèmes photovoltaïques autonomes.....	12
II.1.2.5	Systèmes photovoltaïques hybrides .....	12
II.1.3	Conversion de l'énergie solaire.....	13
II.2	Génératrice diesel.....	14
II.2.1	Description d'un Générateur Diesel.....	14
II.2.2	Fonctionnement d'un Générateur Diesel .....	15
II.3	Système de stockage.....	16
II.3.1	Choix du système de stockage .....	16
II.3.2	Critère de choix.....	16
<b>Conclusion .....</b>		<b>21</b>
<b>Chapitre III.....</b>		
<b>Introduction.....</b>		<b>23</b>
III.1	Modélisation des caractéristiques du module/champ PV .....	23
III.1.1	L'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque : .....	23
III.1.2	L'efficacité (où le rendement) d'un générateur photovoltaïque : .....	23
III.1.3	Modèle de la température de la cellule : .....	24
III.1.4	Modèle électrique de la cellule PV : .....	25
III.2	Modélisation de puissance d'un génération diesel .....	27
III.3	Modélisation d'un système de stockage (Batteries).....	28
III.3.1	Caractéristiques de la batterie.....	28
III.3.1.1	La tension à vide : .....	29
III.3.1.2	Cycles de charge.....	29
III.3.2	Modèle électrique de CIEMAT .....	29
III.3.3	Modélisation de la capacité Cbat : .....	30
III.3.3.1	Tension de batterie en régime de décharge : .....	31
III.3.3.2	Tension de batterie en régime de charge .....	31
III.3.3.3	Tension de batterie en régime de surcharge : .....	31
III.3.4	Modélisation du rendement faradique : .....	32
III.4	Modélisation du système hybride (photovoltaïque-diesel).....	32

III.4.1	Capacité du système de stockage .....	33
III.4.2	Coefficient d'autonomie R : .....	33
III.4.3	Surfaces retenues des composantes renouvelables.....	33
<b>Conclusion .....</b>		<b>34</b>
<b>Chapitre IV .....</b>		
<b>Introduction.....</b>		<b>36</b>
IV.1	Présentation de logiciel HOMER PRO .....	36
IV.2	Les étapes du fonctionnement du logiciel HOMER .....	37
IV.2.1	Définir le projet .....	37
IV.2.2	Conception du système (Onglet Design).....	38
IV.2.2.1	Entrer la charge.....	38
IV.2.2.2	Entrer le détail des ressources.....	38
IV.2.2.3	Choisir les composantes.....	41
IV.2.2.4	Modèle des composants du système hybride .....	44
IV.3	L'analyse des résultats de la simulation (Onglet ResultView) .....	45
IV.4	L'analyse des résultats d'optimisation du système hybride PV-éolien (Onglet ResultView) ..	47
<b>Conclusion .....</b>		<b>49</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>49</b>



## Liste des figures

Figure I -1- Système hybride à énergies renouvelables. ....	3
Figure I -2-Système hybride à énergies renouvelables. ....	4
Figure I-3-Structure de système hybride à bus à courant continu.....	5
Figure I-4-Structure de système hybride à bus à courant alternatif. ....	6
Figure I-5-Structure de système hybride à bus à courant continu/courant alternatif. ....	6
Figure I-6-Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel. ....	7
Figure I-7-Système hybride photovoltaïque -batterie et piles à combustible.....	7
Figure I-8-Système hybride photovoltaïque –éolien.....	8
Figure II-1- installation photovoltaïque autonome. ....	14
Figure II-2- installation photovoltaïque couplé au réseau.....	14
Figure II-4-Configuration de générateur diesel. ....	15
Figure II-5-Consommation réelle en fonction du taux d'utilisation pour une génératrice diesel. ....	15
Figure II-6-différents systèmes de stockage les plus rependus dans les EnR. ....	16
Figure II-7-critère de choix par densité de puissance. ....	17
Figure II-8-choix par densité d'énergie. ....	18
Figure II-9-comparaison par coût d'investissement. ....	18
Figure III-1- Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	25
Figure III-2-Modélisation linéaire de la consommation d'une génératrice diesel. ....	28
Figure III-3-Schéma équivalent électrique de la batterie dans le modèle CIEMAT.....	29
Figure IV -1-Modèle conceptuel du logiciel HOMER. ....	36
Figure IV -2-Écran d'accueil HOMER. ....	37
Figure IV -3-Charge primaire importée dans HOMER (avec spécifications de variabilité aléatoire). ....	38
Figure IV -4-Rayonnement quotidien de Adrar région de Ksar Kaddour.....	39
Figure IV -5-carburant disponible dans le modèle.....	40
Figure IV -6-Température de l'air ambiant moyenne mensuelle reçue.....	40
Figure IV -7-Spécifications des modules solaires photovoltaïques. ....	42
Figure IV -8-Spécifications HOMER pour générateur diesel.....	43
Figure IV -9-Spécifications HOMER pour le système de stockage (batterie). ....	43
Figure IV -10-Spécifications HOMER pour le convertisseur.....	44
Figure IV -11-Schéma du système hybride simulé (Source : HOMER Pro). ....	45
Figure IV -12-La charge primaire AC (bleu foncé), la charge primaire AC desservie (bleu) et la charge électrique non satisfaite (rouge). ....	45
Figure IV -13-Puissance de sortie photovoltaïque. ....	46
Figure IV-14-Puissance de sortie de générateur diesel.....	46
Figure IV-15-État de charge du stockage de la batterie pendant un an.....	47
Figure IV-16-Indicateurs de performance simulés pour le banc de batteries. ....	47
Figure IV-17-Résultat final du processus de simulation et d'optimisation. ....	48
Figure IV-18-Production et demande d'électricité pour le système photovoltaïque-diesel. ....	48
Figure IV-19-Contribution des unités de puissance pour une utilisation à 100 % des énergies renouvelables. ....	49

## Liste des tableaux

Tableau I-Rayonnement solaire et vitesse du vent incluant la température moyenne. ....	41
Tableau II-Paramètres de conception des modules solaires photovoltaïques. ....	42
Tableau III-Paramètres de conception des batteries. ....	43

### Introduction générale

L'Algérie est un pays en développement où un bon nombre d'habitations se situent en territoires isolés ou à une distance significative du réseau électrique. Les coûts de raccordement au réseau sont importants et parfois, le raccordement est tout simplement impossible. C'est pourquoi les systèmes autonomes sont intéressants pour répondre aux besoins énergétiques des habitants de ces régions.

L'utilisation de génératrices carburant aux énergies fossiles représente la situation générale actuelle malgré quelques avancées qui ont été faites en utilisant des systèmes hybrides avec une génératrice diesel et des panneaux photovoltaïque, il ne reste pas moins que, les systèmes utilisent beaucoup du carburant fossile.

Le site Adrar (Ksar Kaddour) est situé entre 29°35'N de latitude et 0°22.4' E de longitude, qui est un endroit idéal pour l'utilisation de l'énergie solaire. Le rayonnement solaire quotidien varie entre 3.13 et 7.85 kWh/m<sup>2</sup>.

L'objectif principal de cette étude est d'estimer la dimension appropriée autonome hybride photovoltaïque / diesel avec batterie de stockage pour garantir l'autonomie énergétique de la consommation typique à distance avec le plus bas coût d'énergie. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux. Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il y a les systèmes d'énergie hybride, souvent utilisés dans les régions isolées ou éloignées.

# **Chapitre I**

## Généralité sur les systèmes hybrides

## Introduction

La plupart des régions isolées utilisent les générateurs diesel comme principale source de génération d'électricité. Les prix des carburants augmentent en fonction de l'éloignement. Des recherches approfondies ont été menées sur la conception, l'optimisation, le contrôle et l'exploitation des systèmes d'énergies renouvelables hybrides. La combinaison d'éoliennes, d'énergie photovoltaïque ou de petites centrales hydroélectriques et d'autres sources d'énergie renouvelables peut compléter ou remplacer les générateurs diesel habituellement utilisés pour produire de l'électricité dans les régions isolées. Les systèmes énergétiques hybrides sont habituellement destinés à satisfaire les besoins énergétiques allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages ou de petites îles. L'utilisation de plusieurs sources d'énergie renouvelables dans un système énergétique hybride doit avoir un impact bénéfique sur la production d'énergie en termes de coût et de disponibilité et du concept écologique. (1)

### I.1 Les systèmes électriques hybrides

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit (Fig. I-1).



**Figure I -1- Système hybride à énergies renouvelables.**

A : Panneau Photovoltaïque / a : Parafoudre / B : Éolienne / m : Moniteur de batterie

R : Chargeur de batterie / S : Sectionneur / 1 : Disjoncteur de protection / 2 : Régulateur charge/décharge / 3 : Disjoncteur CC / 4 : Batterie / 5 : Onduleur / 6 : Coffret de branchement électrique / 7 : Charge électrique

## I.2 Importance de l'hybridation

Aujourd'hui, il est devenu impératif pour les chercheurs de trouver en dehors des énergies fossiles et fissiles d'autres sources d'énergie propre et renouvelable. Il s'agit entre autres des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse et l'océan. Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois, ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie. D'après le Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne de l'Université du Québec à Rimouski, la combinaison de plusieurs sources d'énergie, surtout les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. L'hybridation des sources d'énergies renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif. (2) De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie ;

- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie.

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation en amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle. (2)

### I.3 Combinaisons des systèmes hybrides à énergie renouvelable :

Il existe plusieurs structures ou dispositions de systèmes hybrides à énergies renouvelables. L'électronique de puissance est très importante dans un système hybride à énergies renouvelables. Les systèmes de stockage comme les batteries et le stockage d'hydrogène (piles à combustible) sont habituellement utilisés.

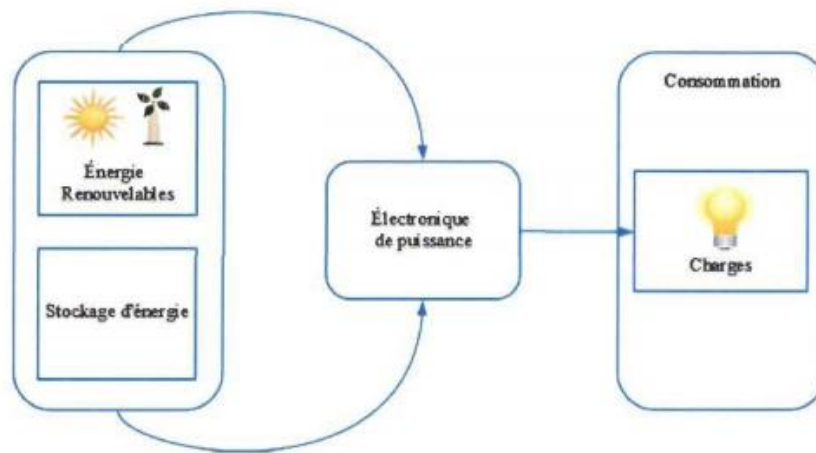


Figure I -2-Système hybride à énergies renouvelables.

Un système hybride à énergies renouvelables combine deux ou plusieurs technologies d'énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les petites turbines hydroélectriques, etc. En outre, il comprend des équipements d'électronique de puissance et des systèmes de stockage. Trois architectures s'imposent parmi les SHER à savoir : architecture à bus CC, architecture à bus CA et architecture mixte à bus CC-CA. (3)

#### I.3.1 Architecture à bus CC

Dans cette architecture (Figure I-3), les composants de production d'énergie (électricité) sont tous connectés au bus à courant continu CC à travers des convertisseurs de puissance. Les composants de production d'énergie à CA sont d'abord connectés à un redresseur qui se chargera

de la conversion CA-CC. Le système de stockage (par exemple une batterie ou un accumulateur électrochimique) est connecté au bus CC. Généralement, les batteries sont protégées contre la surcharge et la décharge profonde par un régulateur de charge. Les charges à courant alternatif peuvent être alimentées en énergie à travers un onduleur. Les batteries et les convertisseurs sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge. L'avantage d'une telle architecture réside dans sa simplicité, ce qui permet de simplifier le système de commande. Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs. (3)

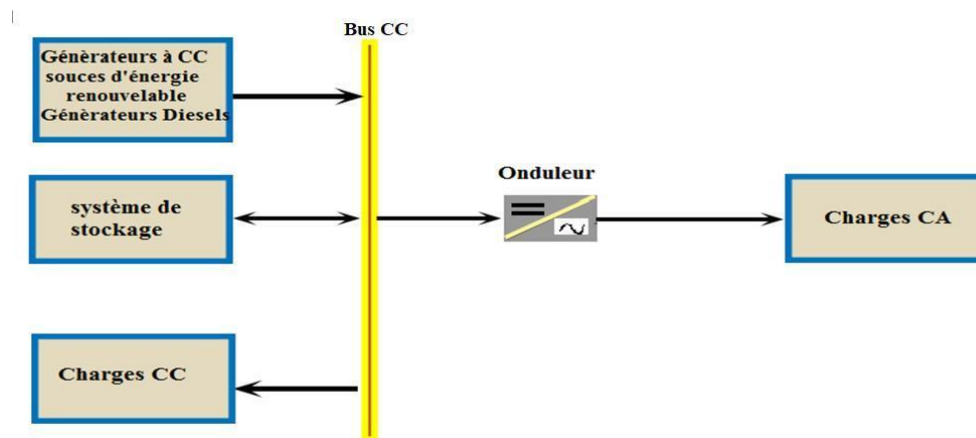


Figure I-3-Structure de système hybride à bus à courant continu.

### I.3.2 Architecture à bus CA

La puissance fournie par chaque composant de production d'électricité est centralisée sur un bus à courant alternatif (CA). Les générateurs CA peuvent être directement connectés sur le bus CA ou avoir besoin d'un convertisseur CA/CA. Les générateurs CC utilisent un onduleur pour être connectés sur le bus CA. Les batteries sont liées au bus CA à travers un convertisseur bidirectionnel. Les charges CC peuvent éventuellement être alimentées par les batteries. (3)



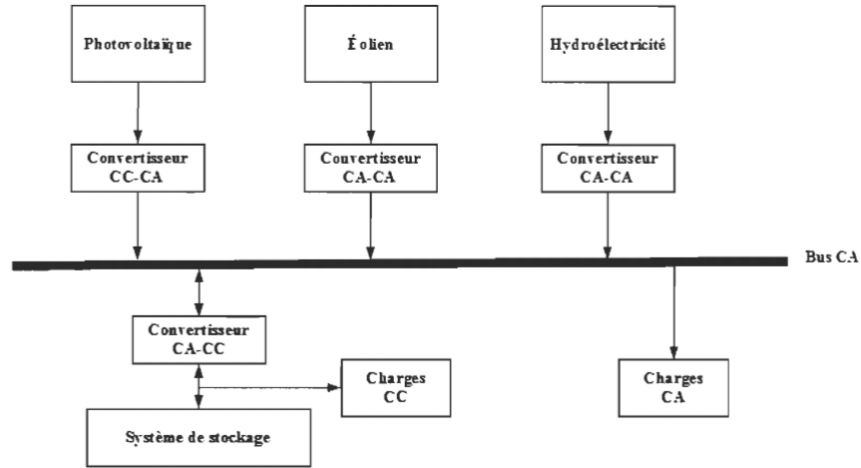


Figure I-4-Structure de système hybride à bus à courant alternatif.

### I.3.3 Architecture mixte à bus CC/CA

Dans la configuration à deux bus, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter une partie de la charge en CA et l'autre partie en CC. Les deux bus doivent être reliés par un convertisseur bidirectionnel. (3)

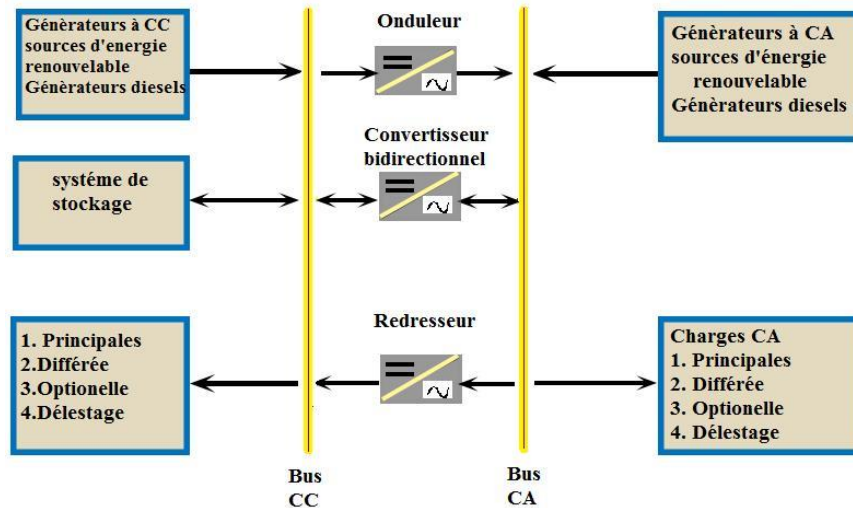


Figure I-5-Structure de système hybride à bus à courant continu/courant alternatif.

## I.4 Les différentes combinaisons des systèmes hybrides

### I.4.1 Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel

Les systèmes hybrides connectent l'énergie photovoltaïque et / ou éolienne à d'autres sources d'énergie. Habituellement, cela comprend les éoliennes et les générateurs de secours au

diesel, au propane ou à l'essence. Ce système peut convenir aux bâtiments résidentiels ou commerciaux qui ne sont pas connectés au réseau de distribution. La plupart des systèmes hybrides sont équipés de batteries. (4)

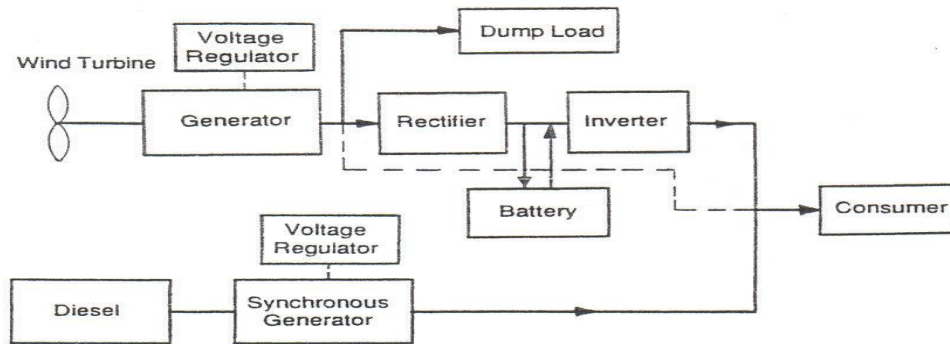


Figure I-6-Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel.

#### I.4.2 Système hybride photovoltaïque-batterie et piles à combustible

Le générateur diesel de ce système est remplacé par un système de pile à combustible. (4)

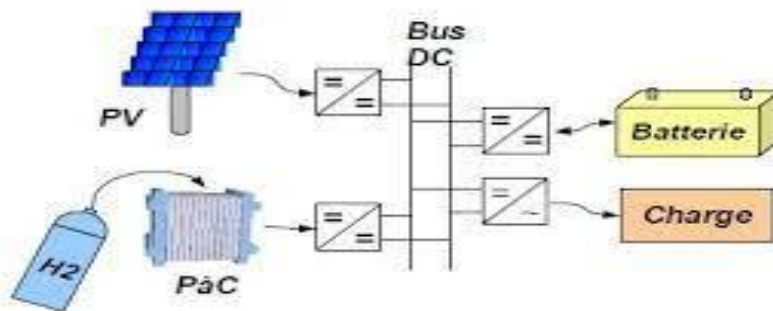


Figure I-7-Système hybride photovoltaïque -batterie et piles à combustible.

#### I.4.3 Système hybride photovoltaïque –éolien

L'utilisation du stockage électrochimique pour optimiser l'énergie éolienne et photovoltaïque dépend largement du modèle économique de chaque système. Cette configuration se compose de deux sources d'énergie complémentaires (photovoltaïque et éolien) et d'une batterie. (4)

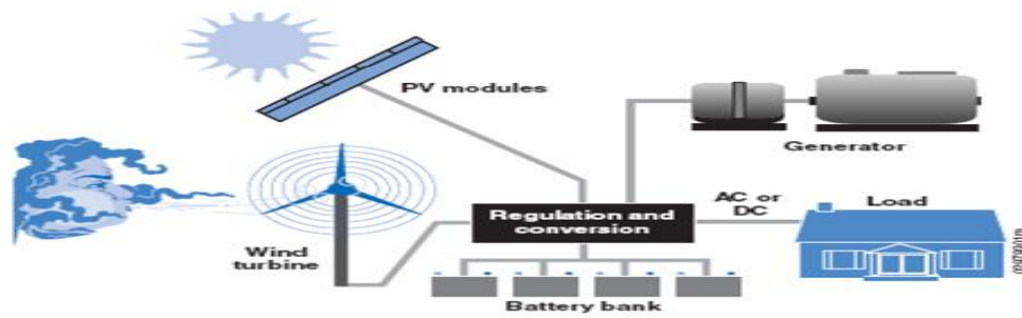


Figure I-8-Système hybride photovoltaïque –éolien.

## I.5 Avantages et inconvénients d'un système hybride

### I.5.1 Avantages

- ✓ Ne repose pas sur une seule source d'énergie.
- ✓ Capable de répondre à la charge évolutive, Opération simple, réduisant l'entretien et la révision.
- ✓ Faibles coûts associés au cycle de vie de l'application. (5)

### I.5.2 Inconvénients

- ✓ Comparé aux générateurs diesel, le coût en capital est élevé.
- ✓ Plus complexe qu'un système électrique isolé, nécessite un stockage par batterie et un conditionnement d'alimentation. (5)

## Conclusion

Ce chapitre présente les stratégies de fonctionnement d'un système hybride à énergies renouvelables. Avant de commencer de parler des stratégies de fonctionnement d'un système hybride, il est important de savoir c'est quoi un système hybride d'énergie et l'importance de l'hybridation. En premier lieu, quelques combinaisons de systèmes hybrides à énergies renouvelables seront présentées. Plusieurs combinaisons de système hybride à énergies renouvelables peuvent exister, cependant seulement le système hybride photovoltaïque diesel sera traité en détail.

**Chapitre II**  
Choix des déferents éléments du système  
étudié

## Introduction

Une modélisation représente l'ensemble du processus, permettant une intervention mathématique basée sur expérience ou observation, un élément essentiel des processus scientifiques, notamment en physique, elle permet de représenter sous une forme simplifiée des systèmes ou des phénomènes afin d'en décrire, expliquer ou prédire certains aspects de ceux-ci. Pour cette raison, une modélisation doit être réalisée pour établir une relation directe entre l'énergie produite par l'installation et la demande d'utilisation. À partir de recherche théorique et expérimentale, l'adaptabilité du système à chaque période de l'année peut être estimée. Dans ce cas, nous introduirons d'abord la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien, ainsi qu'une modélisation du système de stockage dans ce chapitre, car nous proposons de développer des modèles mathématiques de deux systèmes de production différents photovoltaïque et éolien pour renforcer leur développement d'exploitation, notamment la maîtrise du notamment du point de vue des flux de capacité de production.

## II.1 Energie photovoltaïque

### II.1.1 Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe. (6)

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass. Celle-ci n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée. (6)

### II.1.2 Les différents systèmes photovoltaïques

### **II.1.2.1 Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau**

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont d'abord des équipements de production destinés à générer de l'énergie électrique d'origine photovoltaïque, qui sera injectée dans le réseau électrique fourni par d'autres sources de production à partir de machines tournantes de plus forte puissance. Deux architectures de raccordement électrique peuvent être envisagées avec injection totale ou avec autoconsommation. (7)

### **II.1.2.2 Systèmes PV raccordés au réseau avec injection totale**

#### **a. Injection totale sans stockage**

Les générateurs photovoltaïques convertissent directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Le courant continu généré par le module photovoltaïque est converti en courant alternatif compatible avec les caractéristiques électriques du réseau public de distribution grâce à un onduleur photovoltaïque. L'énergie produite est entièrement injectée dans le réseau public de distribution pour pouvoir être valorisée dans les meilleures conditions économiques du producteur. En cas de panne du réseau (perte de tension ou tension et fréquence hors tolérance), L'onduleur photovoltaïque cesse de fonctionner. (7)

#### **b. Injection totale avec stockage**

Son principe est le même que ci-dessus, mais le stockage d'énergie de l'accumulateur est intégré dans l'usine de production. Cependant, pour des raisons économiques, ce stockage est très limité afin de stabiliser la production ou bien de restituer l'énergie. (7)

### **II.1.2.3 Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation :**

#### **a. Autoconsommation sans stockage**

Le système est directement connecté à l'installation électrique intérieure sur site. L'énergie solaire est consommée par le récepteur utilisé. Tout excès d'énergie solaire généré sera injecté dans le réseau de distribution public. Si le réseau tombe en panne (la tension ou la perte de tension et de fréquence dépasse la tolérance), l'onduleur photovoltaïque s'arrêtera de fonctionner et ne fournira plus d'alimentation au récepteur. (7)

#### **b. Autoconsommation avec stockage**

Le stockage d'énergie est intégré au système via l'accumulateur, ce qui permet de stocker l'énergie produite par le générateur photovoltaïque pendant la journée et de la restituer pour une consommation locale la nuit. Cependant, pour des raisons économiques, le dispositif de

stockage ne peut fonctionner que quelques heures et ne peut pas se débarrasser complètement des ennuis du réseau. (7)

#### **II.1.2.4 Systèmes photovoltaïques autonomes**

Dans les systèmes photovoltaïques qui ne sont pas connectés au réseau, on peut distinguer le fonctionnement du système autonome au lieu d'utiliser l'énergie photovoltaïque et hybride qui utilisent l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, des générateurs ou d'autres types d'une ou plusieurs sources d'énergie complémentaires (renouvelables ou non renouvelables) Système sans utiliser aucune autre énergie. Ces systèmes hors réseau sont principalement utilisés pour fournir des services aux utilisateurs. C'est pourquoi le concept de systèmes photovoltaïques évoque tous les composants : production, stockage, gestion, conversion, distribution et utilisation. On peut distinguer les systèmes qui fonctionnent sans stockage (au soleil) et les systèmes qui ont des batteries de stockage. (7)

##### **a. Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage**

Ils fonctionnent de la manière suivante. Pendant la journée, les générateurs photovoltaïques alimentent les utilisateurs directement ou via des convertisseurs CC / CC ou CC / AC. La puissance fournie dépend de la quantité de lumière solaire. Pendant la nuit, l'appareil n'est plus alimenté, Les principales applications photovoltaïques fonctionnant sous le soleil (pompage, ventilation, réfrigération, dessalement...) (7)

##### **b. Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage**

Pendant la journée, le générateur photovoltaïque alimente le récepteur CC et charge la batterie de stockage. Le contrôleur de charge empêche la surcharge de la batterie en cas de surproduction d'énergie solaire. La nuit et par mauvais temps, lorsque le récepteur est alimenté par la batterie et profondément déchargé, le limiteur peut protéger la batterie. Dans le cas du récepteur fonctionnant sur courant alternatif AC, ainsi l'onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative. (7)

#### **II.1.2.5 Systèmes photovoltaïques hybrides**

On peut considérer deux architectures électriques de systèmes hybrides basées sur l'existence ou absence de stockage :

- Installations photovoltaïques dont les accumulateurs sont connectés à des sources d'énergie renouvelables (éolienne, micro-hydraulique, etc.)

- Des systèmes photovoltaïques sans accumulateurs couplés avec des groupes électrogènes.

**a. Systèmes photovoltaïque hybrides avec stockage**

Pendant la journée, le générateur photovoltaïque charge la batterie tout en alimentant l'onduleur, ce dernier convertit la tension continue en tension alternative et alimente le récepteur qui fonctionne en alternance. Le contrôleur de charge empêche la batterie de se surcharger lorsque l'énergie solaire est surproduite. La nuit, l'onduleur est alimenté par des batteries. En cas d'ensoleillement insuffisant ou de consommation plus élevée du récepteur, un générateur de secours ou de secours peut fournir une alimentation directe au récepteur et charger la batterie pour assurer la continuité du service. (7)

**b. Systèmes photovoltaïques hybrides sans stockage**

Le générateur photovoltaïque injecte une puissance variable dans le réseau en fonction de la quantité d'ensoleillement. Toute l'énergie fournie par le générateur PV ne sera pas fournie par le groupe électrogène, de sorte que la consommation de carburant et les coûts d'exploitation peuvent être réduits. Les systèmes hybrides avec une capacité de stockage (de quelques kilowatts à des centaines de kilowatts) sont largement utilisés, notamment pour fournir des maisons individuelles, des refuges de montagne et des répéteurs de télécommunications haute puissance et pour l'électrification rurale. Les systèmes hybrides sans stockage (de plusieurs dizaines de kilowatts à plusieurs mégawatts) sont principalement utilisés pour l'électrification des grands villages et les alimentations électriques pour les mines d'extraction. (7)

### **II.1.3 Conversion de l'énergie solaire**

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc...) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif. (8)



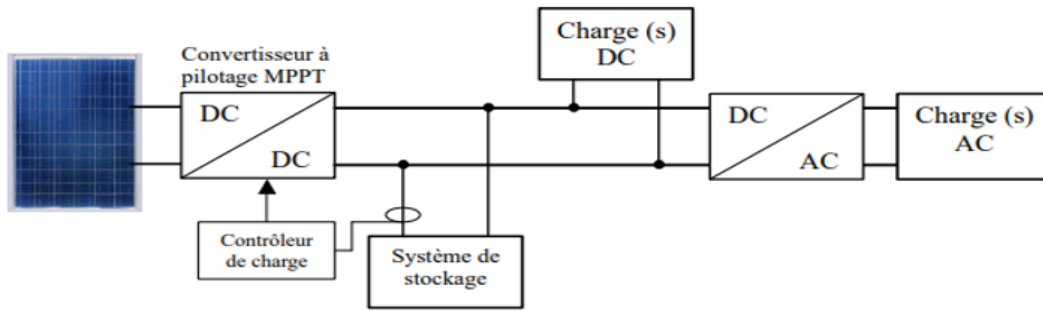


Figure II-9- installation photovoltaïque autonome.

Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend inopérant le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins. (8)

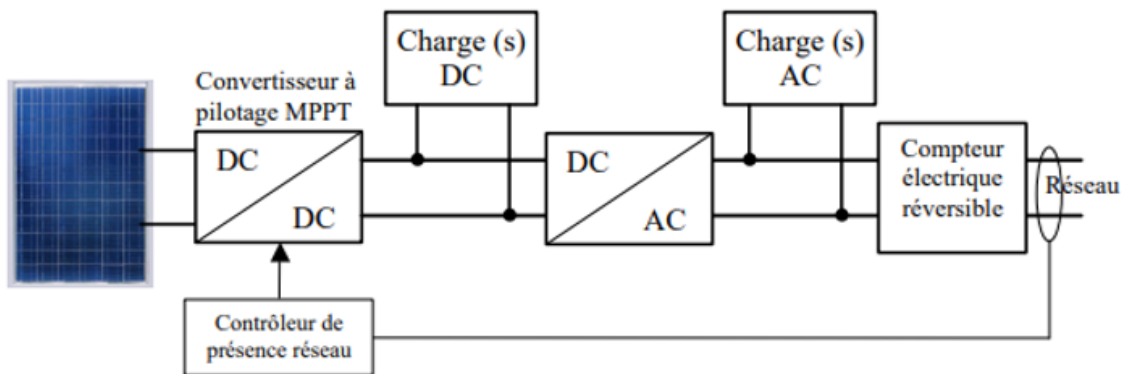


Figure II-10- installation photovoltaïque couplé au réseau.

## II.2 Génératrice diesel

### II.2.1 Description d'un Générateur Diesel

Dans le cas des installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un système énergie hybride, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone. La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de

vitesse sur le moteur diesel (9). Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux du carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constant.

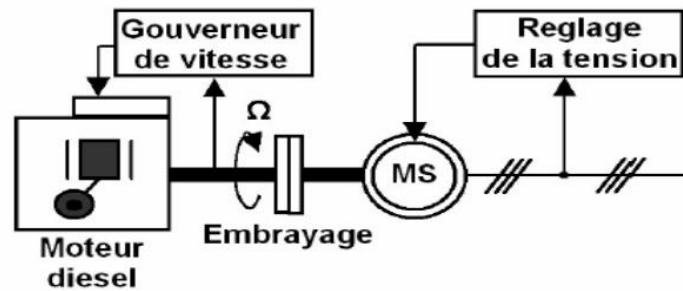


Figure II-11-Configuration de générateur diesel.

## II.2.2 Fonctionnement d'un Générateur Diesel

Une génératrice diesel est un moteur à combustion interne qui fait tourner un axe relié à un alternateur. Pour l'éolienne, l'alternateur tourne grâce à la force du vent alors que les génératrices utilisent un moteur thermique.

Suivant l'électricité produite, la consommation de diesel varie. Elle dépend en effet du taux d'utilisation (figure II-4) qui est le rapport entre la puissance fournie et la puissance nominale de la génératrice diesel.

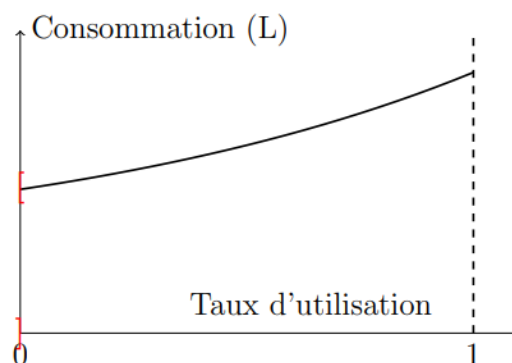


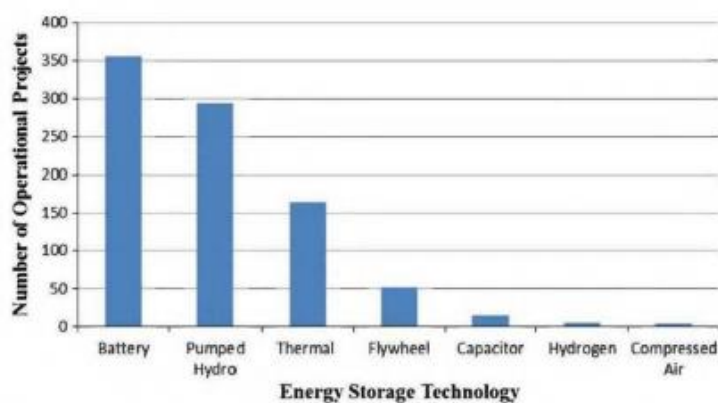
Figure II-12-Consommation réelle en fonction du taux d'utilisation pour une génératrice diesel.

Sur la figure II-4 on remarque la discontinuité en 0 qui signifie que la génératrice consomme de l'es qu'elle est mise en route. Il y a donc une surconsommation lors de chaque démarrage.

## II.3 Système de stockage

### II.3.1 Choix du système de stockage

À l'échelle mondiale, divers types de projets de stockage d'énergie ont été exécutés à différentes échelles. Une analyse détaillée de la base de données de projets de stockage d'énergie globale du « Department of Energy » des États-Unis révèle que la technologie de stockage d'énergie par batterie compte le plus grand nombre de projets opérationnels lié aux EnR (figure II-5). (10)



**Figure II-13-différents systèmes de stockage les plus répandus dans les EnR.**

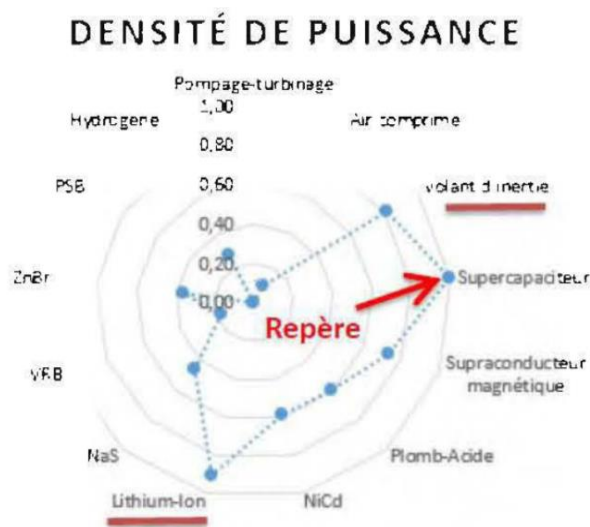
Aujourd'hui les accumulateurs électrochimiques ont une densité énergétique se situant entre 150 et 250 kWh/kg avec une durée de vie relativement faible de l'ordre de 200 à 10000 cycles. Les accumulateurs électrochimiques notamment ceux au lithium-ion occupent la quasi-totalité du marché de la téléphonie mobile. Ils sont également utilisés dans les applications de forte puissance et dans l'aérospatiale telle que les satellites Galileo. Les accumulateurs Ni-Cd sont aussi utilisés dans les applications demandant une forte puissance et peuvent fonctionner sous une température relativement élevée. Pour ce qui est de la batterie au plomb, son marché est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage ainsi que la plupart des batteries stationnaires. En fonction de la nature des électrodes et de l'électrolyte, on rencontre différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques dont les plus utilisées sont : plomb acide, nickel-cadmium et lithium-ion. (11)

### II.3.2 Critère de choix

Le système de stockage a pour rôle d'assurer une permanence de production dans un réseau électrique (Système hybride) et d'absorber les pics de consommation afin d'éviter les déséquilibres énergétiques. La sélection d'un mode de stockage dépend de plusieurs critères parmi lesquels on cite :

- Densité de puissance et densité d'énergie ;
- Coûts d'investissement ;
- Rendement ;
- Cycle de vie ;
- Taille d'application
- Maturité téléologique et adaptation à l'environnement etc. (12)

En termes de densité de puissance, le stockage d'énergie par batterie Lithium-ion occupe la seconde place (figure II-7) comparativement aux autres excepté le supercondensateur. (12)



**Figure II-14-critère de choix par densité de puissance.**

En termes de densité de puissance, le stockage d'énergie par batterie Lithium-ion occupe la seconde place (figure II-8) comparativement aux autres excepté le supercondensateur. (12)

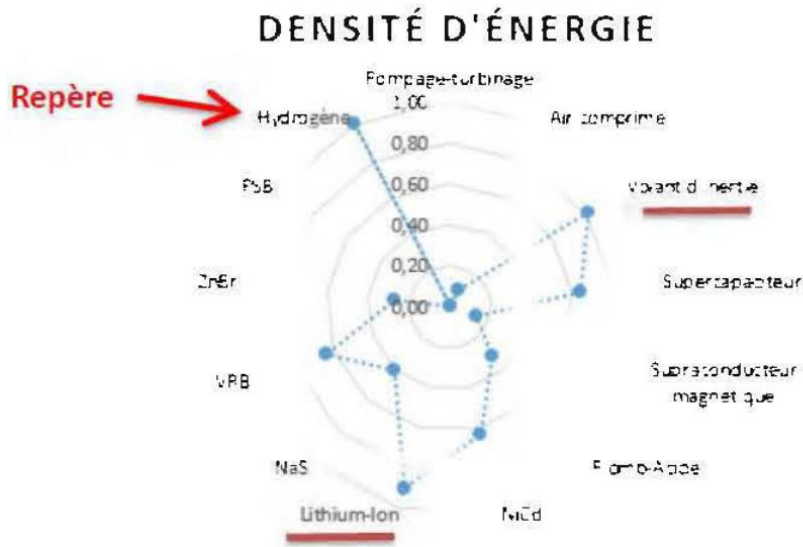


Figure II-15-choix par densité d'énergie.

Le coût d'investissement du stockage par batterie lithium-ion reste plus élevé comparé à la plupart des technologies de stockage. Néanmoins, en termes de coût d'amortissement et d'efficacité à long terme et la baisse sans cesse des prix des batteries aux lithium (figure II-9) leur permettra de concurrencer les autres systèmes dans l'avenir. La dernière étude effectuée par la société des études Bloomberg New Energy Finance (BNEF) aux États-Unis a annoncé d'ailleurs depuis mars 2019 que le prix des batteries lithium-ion a chuté de 35% à 187 USD par méga-wattheure depuis la dernière étude. (12)

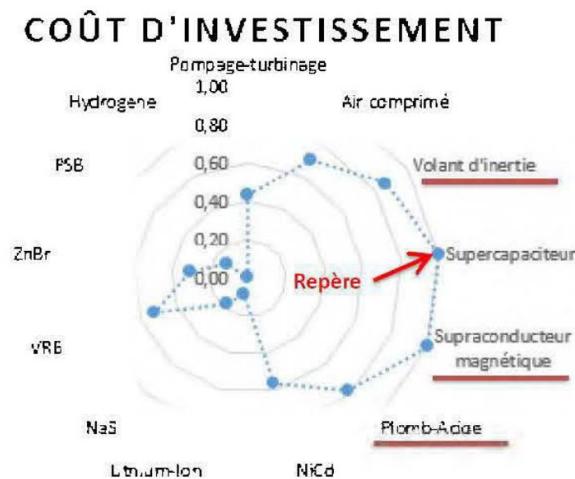


Figure II-16-comparaison par coût d'investissement.

Les batteries lithium-ion occupent quasiment la première place en termes de rendement énergétique, c'est ce qui les rend plus attractifs dans les micro-réseaux (Figure II-10).

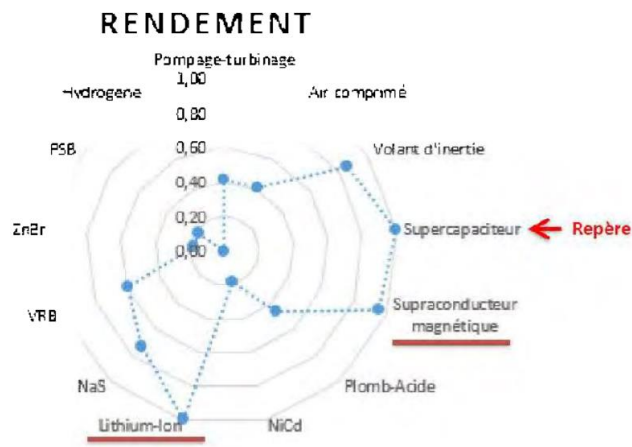


Figure II-1 -critère de choix par rendement.

En termes de cycle de vie les batteries aux lithium-ion sont moyen comparer au volant d'inertie, super-condensateur, etc., mais largement supérieur aux batteries aux plombs, très répandues dans les micro-réseaux autonomes (Figure II-11).

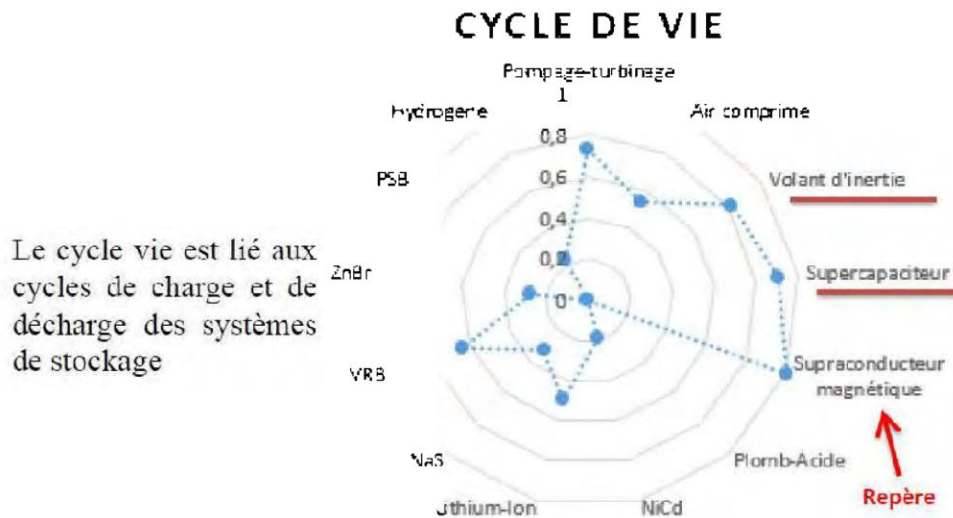
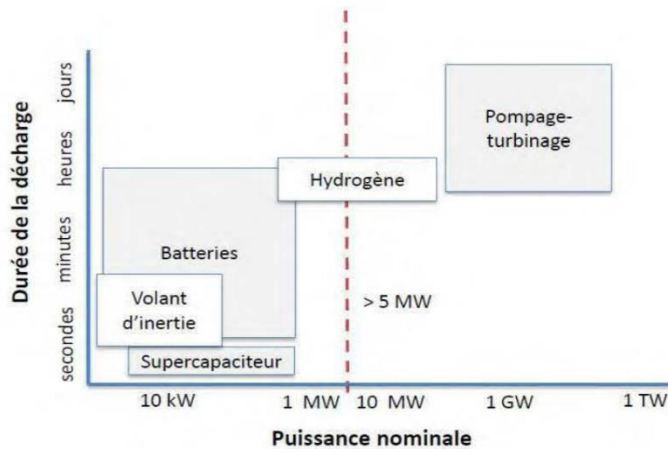


Figure II-2 -comparaison par cycle de vie.

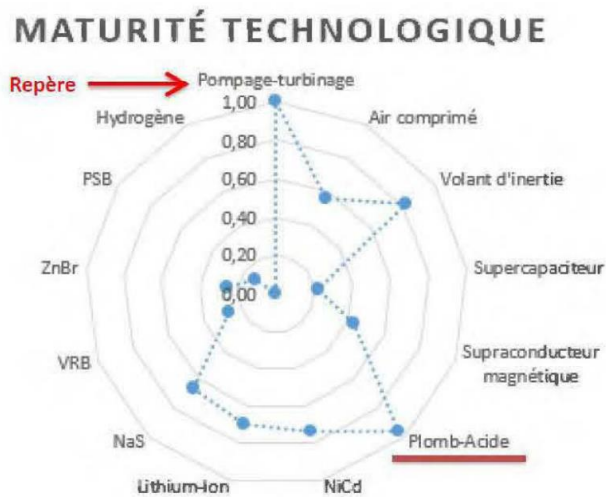
La taille d'application des systèmes de stockages se mesure par famille comme présentée à la (figure II-12). Les stockages par batteries, volant d'inertie ou encore les super-condensateurs ont une puissance nominale allant de quelques KW a 1MW pour une durée de décharge de quelques secondes à quelques heures ou plus selon l'utilisation. Cependant c'est le stockage

par pompage-turbinage qui occupe une place incontestable à ce sujet avec près de 1 TW de puissance délivrée pour plusieurs jours (voire des mois) de temps de décharge. (12)



**Figure II-3-comparaison par taille d'application.**

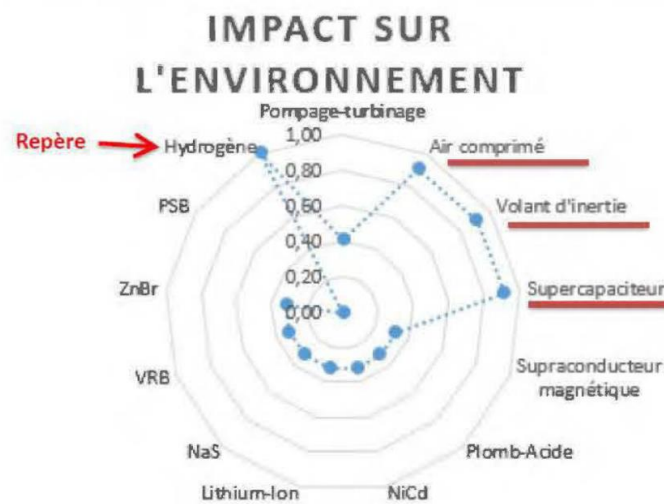
Mis sur le marché pour la première fois par la compagnie Sony Energitech dans les années 1990, les batteries lithium-ion sont plus récentes comparées aux plomb-acide, nickel Cadmium (NiCd), volant d'inertie et le plus ancien, le pompage-turbinage (figure II-13). La bonne nouvelle est que les batteries au lithium sont en pleine expansion et pourraient faire oublier ou réduire l'utilisation de certaines formes de stockages dans les prochaines années. (12)



**Figure II-4-maturité des différents systèmes de stockages.**

Le stockage par hydrogène, par air comprimé, volant d'inertie ou encore le super-condensateur sont les plus respectueux de l'environnement comparativement aux autres technologies de stockage d'énergie (Figure II-14). Heureusement des études poussées sont en train de se faire

par beaucoup de chercheurs afin de réduire considérablement l'impact des batteries lithium-ion sur l'environnement. (12)



**Figure II-1-Impact environnemental des différents systèmes de stockages.**

### Conclusion

Ce chapitre traite le choix des différents éléments du système étudié ainsi les termes généraux des lois qui peuvent être utilisées pour obtenir une modélisation du système hybride pour l'énergie solaire et diesel, également dans l'étude du modèle de système de stockage.



**Chapitre III**  
Modélisation des différents éléments du  
système étudié

## Introduction

Une modélisation représente l'ensemble du processus, permettant une intervention mathématique basée sur expérience ou observation, un élément essentiel des processus scientifiques, notamment en physique, elle permet de représenter sous une forme simplifiée des systèmes ou des phénomènes afin d'en décrire, expliquer ou prédire certains aspects de ceux-ci. Pour cette raison, une modélisation doit être réalisée pour établir une relation directe entre l'énergie produite par l'installation et la demande d'utilisation. À partir de recherche théorique et expérimentale, l'adaptabilité du système à chaque période de l'année peut être estimée. Dans ce cas, nous introduirons d'abord la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien, ainsi qu'une modélisation du système de stockage dans ce chapitre, car nous proposons de développer des modèles mathématiques de deux systèmes de production différents photovoltaïque et éolien pour renforcer leur développement d'exploitation, notamment la maîtrise du notamment du point de vue des flux de capacité de production.

### III.1 Modélisation des caractéristiques du module/champ PV

L'énergie produite par le générateur photovoltaïque est estimée sur la base des données d'irradiance totale sur la pente, la température ambiante et les données constructeur des modules photovoltaïques utilisés. (13)

#### III.1.1 L'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque :

$$E_{pv} = \eta_{ge} S_{pv} p_f H \quad (1)$$

Où :

$E_{pv}$  : représente la surface totale du générateur photovoltaïque ( $m^2$ ) ;

$\eta_{ge}$  : le rendement du générateur photovoltaïque ;

$H$  : l'irradiation solaire sur un plan incliné ( $kWh/m^2.mois$ ) ;

$p_f$  : le facteur de remplissage du module égal à 0.9.

#### III.1.2 L'efficacité (où le rendement) d'un générateur photovoltaïque :

$$\eta_{\text{gen}} = \eta \{ 1 - \gamma (T_J - 25) \} \quad (2)$$

Où :

$\gamma$  : représente le coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à (0.0045 /°C) ;

$\eta$  : le rendement de référence du générateur photovoltaïque.

### III.1.3 Modèle de la température de la cellule :

Ce modèle suppose que la température de jonction de la cellule  $T_c$  (°C) est une fonction linéaire de la température ambiante  $T_a$  (°C) et de l'éclairement  $G$ .

$$T_c = T_a + \left( \frac{\text{NOCT} - 20}{800} \right) G \quad (3)$$

D'où : **NOCT** est la température nominale de fonctionnement (°C) atteinte par les cellules dans les conditions suivantes  $T_a = 20$  °C,  $G = 800$  W / m<sup>2</sup>; vitesse du vent **1 m / s**; distribution spectrale **AM = 1,5**; L'intégration de MPPT peut simplifier le modèle de diode simple, n'obtenant ainsi qu'une équation empirique. Désormais, en utilisant uniquement les données climatiques de terrain (lumière du soleil et température ambiante) et les données du fabricant du module, nous pouvons connaître la puissance maximale disponible à la sortie du module PV. Par conséquent, la génération électrique du champ CC est directement proportionnelle à la génération du module photovoltaïque. Une multiplication de la puissance de sortie d'un module par le nombre de modules qui composent le générateur photovoltaïque est suffisante pour trouver la puissance totale qu'il fournit. Ce modèle ne prend pas en compte la perte de connexion entre les modules. (14)

$$P_{\text{MPPT}} = N_{\text{PV}} \frac{G}{G_{\text{réf}}} [P_{0 \text{ max}} + \mu_{\text{PM}} (T_c - T_{c \text{ réf}})] = N_{\text{PV}} P_{\text{max}} \quad (4)$$

Avec :

$G$  : Irradiation solaire globale du lieu considéré (W/m<sup>2</sup>) ;

$G_{\text{réf}} = 1000$  (W/m<sup>2</sup>) : Irradiation solaire dans les conditions standard de référence ;

$P_{\text{MPPT}}$  : Puissance fournie par le champ PV (W)

$N_{\text{PV}}$  : Nombre de modules composant le PV ;

$P_{0\ max}$  : Puissance maximale du module dans les conditions standards (W) ;

$\mu_{Pm}$ : Coefficient de variation de la puissance en fonction de la température ;

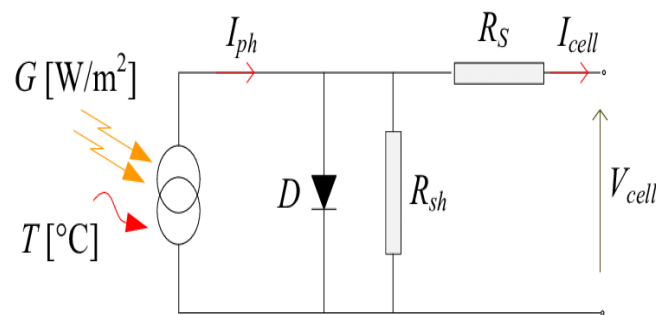
$T_c$  : Température de jonction du module PV (°C) ;

$T_{c\ ref}$  : Température de jonction dans les conditions de références du module PV (25°C) ;

$T_a$  : Température ambiante du lieu considéré (°C) ;

NOCT : Température de fonctionnement des cellules PV dans les conditions de références.

### III.1.4 Modèle électrique de la cellule PV :



**Figure III-17- Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.**

Une cellule solaire Photovoltaïque est une diode électronique PN de grande surface qui, exposée à la lumière (photons), génère une tension électrique (volts), une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série  $R_s$  mais aussi des courants de fuites modélisés par une résistance shunt  $R_{sh}$ . (13)

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad (5)$$

D'après la loi de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est donné par :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (6)$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{réf}} I_{sc} T_C (1 + \alpha (T_C - T_{C,réf})) \quad (7)$$

Le courant de la diode est donné par l'expression de Shockley :

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left( \frac{q(V + I R_s)}{A K T_C} \right) - 1 \right\} \quad (8)$$

La résistance shunt est déduite par l'équation suivante :

$$R_{sh} = -\frac{dV}{dI} V_{oc} T_C + \frac{A K T_C}{q I_{sc} T_C} \quad (9)$$

Le courant dans la résistance  $R_{sh}$  est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (10)$$

D'où

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V + R_s I}{A K T_C} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (11)$$

$G$  : représente l'éclairement de fonctionnement et  $G_{réf}$  l'éclairement normalisé ;

$\alpha$  : le coefficient de température du courant  $I_{ph}$  (mA/°C) ;

$A$  : le facteur d'idéalité de la jonction P-N ;

$k$  : la constante de Boltzmann,  $1.381 \times 10^{-23}$  J/K ;

$T_{C,réf}$  : la température absolue de référence de la cellule ;

$q$  : la charge d'un électron,  $1.602 \times 10^{-19}$  C ;

$V$  : la tension imposée aux bornes de la cellule ;

$I_0$  : le courant de saturation à l'obscurité ;

$I_{sc} T_C$  : le courant de court-circuit de la cellule à la température ambiante  $T_C$  ;

$V_{oc} T_C$  : la tension du circuit ouvert à la température  $T_C$  ;

Le modèle est basé sur le calcul des cinq paramètres de la fonction  $I = f(I, V)$  qui sont :  $I_{ph}$ ,  $I_0$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  et  $A$ . Ces paramètres sont déterminés à partir des données qui sont : le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension à circuit ouvert  $V_{co}$ , le courant  $I_m$  et la tension  $V_m$ , au point de puissance maximale  $P_m$  et les pentes au voisinage de  $V_{co}$  et de  $I_{cc}$ .

$$I_0 = \left( I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) \exp \left( q \frac{V_{co}}{A K T_c} \right) \quad (12)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left( \exp \frac{I_{cc} R_s}{A} - 1 \right) \quad (13)$$

Supposant que la résistance parallèle est infinie ( $R_{sh} = \infty$ )

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V + I R_s}{A K T_c} \right) - 1 \right] \quad (14)$$

### III.2 Modélisation de puissance d'une génération diesel

Dans notre modèle les génératrices diesels sont identiques de puissance nominale  $P_{gM}$ . Nous notons  $N_g \geq 0$  le nombre de génératrices diesel installées. A tout instant  $t$ , nous pouvons faire fonctionner  $N_g(t) \geq 0$  génératrices diesels. Ces  $|T|$  variables entières augmentent considérablement le temps de résolution. On ne peut pas utiliser plus de génératrices que de génératrices installées :

$$\forall t \in T \quad N_g(t) \leq N_g \quad (15)$$

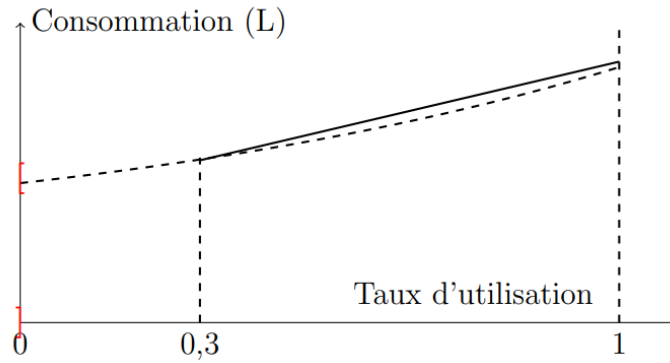
La puissance totale des génératrices diesel  $P_g(t) \geq 0$  est limitée par ce nombre de génératrices diesels  $N_g(t)$  à tout instant :

$$\forall t \in T \quad P_g(t) \leq N_g(t) \cdot P_{gM} \quad (16)$$

Et on a l'interdiction de faire fonctionner les génératrices à moins du pourcentage  $u_{gm}$  de leur puissance nominale:

$$\forall t \in T \quad P_g(t) \geq u_{gm} \cdot N_g(t) \cdot P_{gM} \quad (17)$$

Nous obtenons donc la modélisation représentée à la figure III-2.



**Figure III-18-Modélisation linéaire de la consommation d'une génératrice diesel.**

Il faut aussi que les génératrices soient capables de fournir le pic d'électricité. Par mesure de sécurité, au cas où il n'y aurait pas de vent et que la batterie soit complètement déchargée.

$$N_g(t) \geq \frac{\max_{t \in T} P_d(t)}{P_{gM}} \quad (18)$$

### III.3 Modélisation d'un système de stockage (Batteries)

#### III.3.1 Caractéristiques de la batterie

##### c. L'état de charge :

Une donnée très importante est l'état de charge EDC (SOC pour State Of Charge), cette valeur est exprimée en pourcent. Il s'agit tout simplement de la capacité actuelle (Q) de la batterie exprimée en fonction de sa capacité nominale (Q<sub>max</sub>), c'est-à-dire lorsqu'elle est chargée à 100% de EDC. (15)

$$\text{EDC} = \frac{Q(\text{Ah})}{Q_{\text{max}}} \quad (19)$$

A l'inverse, nous pouvons parler de la profondeur de décharge PDD (DOD, pour Depth Of Discharge). Il s'agit également d'un pourcentage représentant l'inverse du EDC. Ainsi, une batterie ayant un EDC de 100% présentera un PDD de 0% alors qu'un EDC de 0% correspondra à un PDD de 100%. Lorsque le PDD dépasse les 80%, nous pouvons parler de décharge profonde de la batterie. (15)

$$\text{PDD} = 1 - \text{EDC} \quad (20)$$

### III.3.1.1 La tension à vide :

Une autre tension importante est la tension à circuit ouvert, ou voltage à circuit ouvert, que nous appellerons ici « OCV » (pour « Open Circuit Voltage »). Il s'agit donc du voltage de la batterie lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge, c'est-à-dire lorsque le circuit électrique n'est pas fermé, est ouvert. L'OCV augmente également avec le SOC. Ce voltage à circuit ouvert est généralement 5 à 7% plus élevé que le voltage lorsque la batterie est connectée à une charge. (15)

### III.3.1.2 Cycles de charge

Il s'agit du nombre de cycles de charge-décharge complets que la batterie peut endurer avant de ne plus pouvoir satisfaire les exigences de performance. Ce nombre de cycles peut varier en fonction de l'utilisation de la batterie. Précisons qu'un cycle est généralement défini comme la décharge complète d'une batterie initialement chargée à 100%, suivie d'un rechargement complet. Ce n'est cependant pas toujours le cas. En effet, les fabricants se limitent souvent à 80% de PDD afin d'évaluer la batterie, 80% de l'énergie stockée est donc délivrée et 20% ne sont pas utilisés. Cela permet d'augmenter la durée de vie de la batterie. (15)

### III.3.2 Modèle électrique de CIEMAT

Le premier modèle utilisé pour la simulation a été développé par le CIEMAT en Espagne (Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas) qui définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction de quelques paramètres, tels que le courant imposé, son état de charge et sa température. Ce modèle tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge. (16)

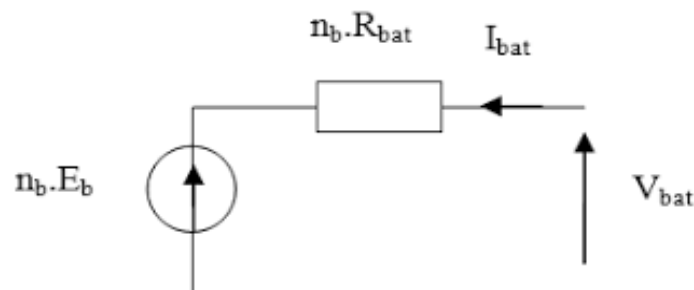


Figure III-19-Schéma équivalent électrique de la batterie dans le modèle CIEMAT



Dans ce modèle, pour  $n_b$  cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée par la relation suivante, où  $U_{bat}$  et  $I_{bat}$  sont la tension et le courant de la batterie,  $E_b$  est la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et  $R_{bat}$  sa résistance interne. (16)

$$U_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_{bat} I_{bat} \quad (21)$$

La description du comportement de la batterie selon le modèle CIEMAT, nécessite trois équations correspondantes aux trois régimes de fonctionnements : le régime de décharge, le régime de charge et le régime de surcharge de la batterie. L'ensemble de ces équations tient compte de l'expression normalisée de la capacité  $C_{bat}$  de la batterie. L'état de charge EDC de la batterie est fonction de la charge résiduelle et du régime de charge ou de décharge. (16)

### III.3.3 Modélisation de la capacité $C_{bat}$ :

Le modèle de la capacité  $C_{bat}$  donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge  $I_{bat, moy, déch}$ . Cette capacité est donnée par :

$$C_{bat} = \frac{1,67 C_{10}}{1 + 0,67 \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0,9}} (1 + 0,005 \Delta T) \quad (22)$$

$I_{10}$  : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur ;

$C_{10}$  : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10 I_{10} \quad (23)$$

$\Delta T$  : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie. L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité  $C_{bat}$  et de la quantité de charge manquante à la batterie  $Q_m$  (16). L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par :

$$Q_m = I_{bat} t \quad (24)$$

où  $t$  est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant  $I_{bat}$ . L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}} \quad (25)$$

**III.3.3.1 Tension de batterie en régime de décharge :**

$$U_{\text{bat-déché}} = n_b E_{\text{b-déché}} - n_b R_{\text{b-déché}} |I_{\text{bat}}| \quad (26)$$

$$E_{\text{b-déché}} = 1.965 + 0,12 \text{ EDC} \quad (27)$$

$$R_{\text{b-déché}} = R_{\text{bat}} = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{4}{1 + |I_{\text{bat}}|^{0.3}} + \frac{0.27}{\text{EDC}^{1.5}} + 0,02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (28)$$

**III.3.3.2 Tension de batterie en régime de charge**

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par :

$$E_{\text{b-ch}} = 2 + 0,16 \text{ EDC} \quad (29)$$

$$R_{\text{b-ch}} = R_{\text{char}} = \frac{1}{C_{10}} \left( \frac{6}{1 + |I_{\text{bat}}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - \text{EDC})^{1.2}} + 0,036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (30)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la charge :

$$U_{\text{bat-ch}} = n_b E_{\text{b-ch}} + n_b R_{\text{b-ch}} I_{\text{bat}} \quad (31)$$

**III.3.3.3 Tension de batterie en régime de surcharge :**

En régime de surcharge, l'expression de la tension de la batterie tient compte de deux phénomènes physiques qui sont, le "Gassing" dont la tension est  $V_g$  et la saturation qui exprime le repos de la batterie, lorsque son état de charge ne varie plus entraînant la tension de batterie appelée tension de fin de charge  $V_{ec}$  (16). Pour ce régime de surcharge, l'expression de la tension de batterie est alors donnée par :

$$U_{\text{bat-surch}} = n_b V_g + n_b (V_{ec} - V_g) \left[ 1 - \exp \frac{t - t_g}{\tau_g} \right] \quad (32)$$

Avec :

$t_g$  : l'instant au bout du quel  $U_{\text{bat-char}} = V_g$  ;

$V_g$  : Tension de "Gassing" ;

$V_{ec}$  : Tension de fin de charge ;

$\tau_g$  : Constante de temps.

$$V_g = \left[ 2,24 + 1,97 \ln \left( 1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right) \right] (1 - 0,002\Delta T) \quad (33)$$

$$V_{ec} = \left[ 2,45 + 2,011 \ln \left( 1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right) \right] (1 - 0,002\Delta T) \quad (34)$$

$$\tau_g = \frac{1,73}{1 + 852 \left( \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right)^{1.67}} \quad (35)$$

### III.3.4 Modélisation du rendement faradique :

Les rendements Faradiques, ou Coulombiens, sont des rendements qui concernent la capacité de la batterie à emmagasiner de l'énergie. Ils ne font pas intervenir les pertes par effet Joule dans la résistance interne. Pour le modèle CIEMAT, le rendement Faradique est pris en compte dans le cas de la charge et il est supposé égal à 1 ( $\eta_{décharge} = 1$ ) en régime de décharge. Le rendement Faradique en charge dépend du taux de charge, il a une valeur voisine de 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge. Puis, il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge (16).  $\eta_{charge}$  est donné par la relation suivante :

$$\eta_{charge} = 1 - \exp \left[ \frac{20,73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0,55} (EDC - 1) \right] \quad (36)$$

### III.4 Modélisation du système hybride (photovoltaïque-diesel)

L'énergie délivrée par un module photovoltaïque est décrite par la caractéristique (I-V) qui varie de manière à ce que le courant suivie une relation de la forme :  $I = f(V, E_s, T_j)$ . On voudrait toujours déterminer la puissance maximale que peut fournir un groupe de modules photovoltaïques pour un ensoleillement et une température donnée. La puissance produite par un aérogénérateur éolien est estimée par la relation suivante :

$$P = \int_{V_i}^V P(V)f(V) dV \quad (37)$$

Ainsi, connaissant les caractéristiques de l'aérogénérateur choisi, de la moyenne mensuelle par jour de la vitesse du vent et de la densité de probabilité de Weibull correspondante, nous pouvons déduire rapidement la puissance produite par le système hybride.

$$E_{pv}S_{pv} + E_eS_e = E_d \quad (38)$$

### III.4.1 Capacité du système de stockage

La taille de la batterie de stockage est déterminée à partir de la charge demandée maximale  $E_{dmax}$  (charge mensuelle maximale) (17). La capacité de la batterie de stockage (en Ah) pour une période de temps  $\Delta t$  par jour est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat} = \frac{E_{dmax} \cdot 1000 \Delta t}{V_{sys} N_m} \quad (39)$$

$V_{sys}$  : Tension nominale du système ;

$N_m$  : Nombre de jours du moins le plus défavorable ;

$\Delta t$  : Durée relative en jours à l'autonomie demandée, qui est définie par le concepteur. La capacité réelle de la batterie est déterminée à partir de la capacité d'une unité de batterie  $C_{bat,u}$  comme pour le cas des surfaces des générateurs photovoltaïque et éolien.

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat,u} = C^{te} C_{bat,u} \quad (40)$$

$C^{te}$  qui est une constante donnée par la partie entière du rapport  $\left( \frac{C_{bat}}{C_{bat,u}} \right)$

### III.4.2 Coefficient d'autonomie R :

Le coefficient d'autonomie R du système est calculé à partir du rapport du nombre total des jours où on a le déficit au nombre total des jours de l'opération. (17)

$$R = 1 - \frac{N_{jd}}{N_{tot}} \quad (41)$$

$N_{jd}$  : Nombre total des jours de l'année où on a le déficit d'énergie ;

$N_{tot}$  : Nombre total des jours de l'année de fonctionnement.

Pour une opération annuelle, le nombre total est égal à 365 jours. Dans le système de mesure et d'optimisation, le critère d'autonomie est :  $R \geq R_{min}$  avec  $R_{min}$  la fraction minimale du temps alloué pour lequel le système doit couvrir la demande. (17)

### III.4.3 Surfaces retenues des composantes renouvelables

La composante retenue de la surface  $S_{i,a}$  ( $i = 1$  pour le PV et  $i = 2$  pour l'éolien) est particulièrement essentielle pour les systèmes de petite échelle économique. Ceci est pris en compte en introduisant la surface de l'unité de composante  $S_{i,a}$  ( $S_{PV,u} = 0,3mm^2$  et  $S_{éol,u} = 0,65mm^2$ ) (17). La surface retenue est calculée à partir de l'équation suivante :

$$S_{i,u}^s = C^{te} S_{i,u} \quad (42)$$

Avec :  $C^{te}$  est un nombre entier voisin à degré élevé du rapport,  $S$  Représente le scénario

$$\frac{S_i^s}{S_{i,s}} \quad (43)$$

### Conclusion

Ce chapitre traite en termes généraux des lois qui peuvent être utilisées pour obtenir une modélisation du système hybride photovoltaïque - diesel également dans l'étude du modèle de système de stockage.

## **Chapitre IV**

# Simulation et interprétation des résultats

## Introduction

Un système d'alimentation hybride est composé de divers composants. Lors de la conception d'un système électrique hybride, des facteurs tels que la taille des composants, les configurations du système, l'adéquation des diverses ressources d'énergie renouvelable dans cette région, les aspects économiques du projet avec l'évolution des charges et des coûts des composants, le cycle de vie du système, le coût actuel net du système, le coût de l'énergie pour l'utilisateur final, les coûts de maintenance et les coûts de fonctionnement annuels du système hybride aideront le décideur à déterminer les solutions les plus rentables du système hybride pour répondre aux charges électriques pour lesquelles il est en cours de conception. Ce chapitre présente une étude de cas conçue où l'Algérie est choisie.

### IV.1 Présentation de logiciel HOMER PRO

HOMER (HybridOptimization of Multiple Energy Resources) est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il permet de faire des simulations de systèmes avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles. Un de ses grands atouts est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou fossile.

Tout d'abord, ce logiciel permet de faire des simulations pour ensuite optimiser les systèmes et pour finalement terminer avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergie ou plus. Figure IV -1 représente le modèle conceptuel du logiciel HOMER.

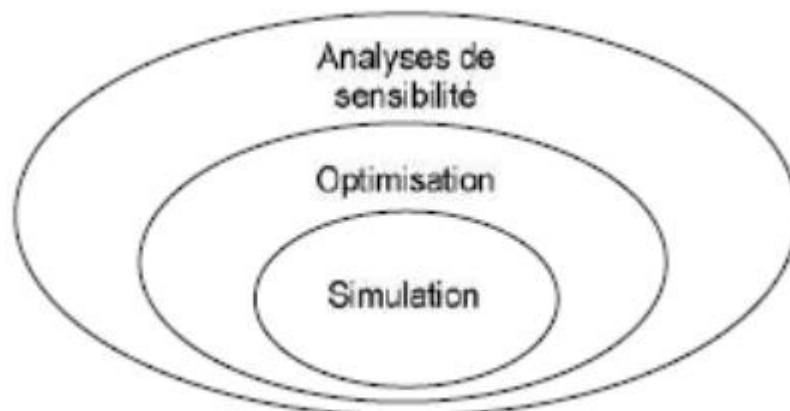


Figure IV -20-Modèle conceptuel du logiciel HOMER.

Le logiciel permet de faire la simulation d'un système selon des données de gisement (solaire, éolien, diesel, etc.) en fonction d'une demande énergétique (besoins en énergie). Par la suite, il est possible d'analyser plusieurs configurations différentes pour ce même système afin d'en obtenir un système optimisé au niveau du coût. Le logiciel simule toutes les configurations demandées et donne la meilleure solution, la solution la moins chère, parmi celles-ci. Ensuite, il est finalement possible de faire des analyses de sensibilité afin de savoir si la solution trouvée reste la meilleure même s'il y a certains changements dans les différents paramètres entrés (variation du coût de la technologie, variation dans les données de gisement, etc.). Il est donc possible de faire bon nombre d'analyses avec de nombreuses configurations différentes en moins de quelques minutes de simulation. (30)

## IV.2 Les étapes du fonctionnement du logiciel HOMER

Pour le fonctionnement de Homer, les utilisateurs doivent suivre les étapes suivantes :

### IV.2.1 Définir le projet

(Onglet Home) À la première ouverture du logiciel, un environnement pour définir le projet s'offre à nous. Il sert à entrer le nom du projet, l'auteur, une description sommaire du projet et la localisation du projet. Cette dernière servira à télécharger les données des ressources (vent et rayonnement solaire).

Le cas d'étude de cette mémoire est une zone de la wilaya d'Adrar (Ksar Kaddour).



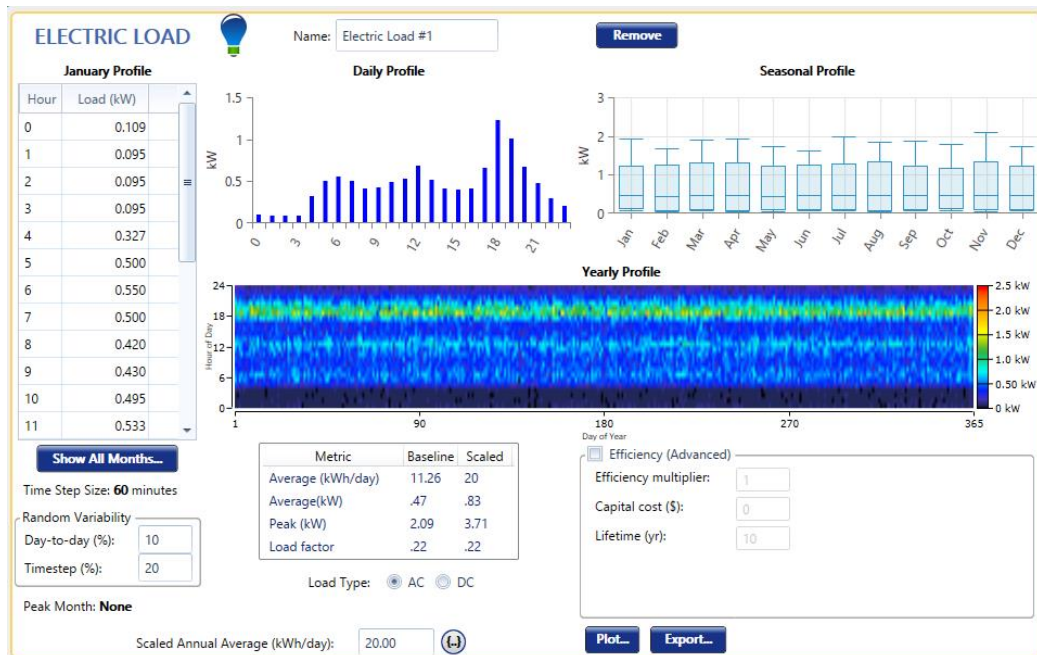
Figure IV-21-Écran d'accueil HOMER.



## IV.2.2 Conception du système (Onglet Design)

### IV.2.2.1 Entrer la charge

Sous le menu Load nous pouvons définir les charges à supporter par le système. Nous devons ajouter le profil de la charge au modèle, modifier les spécifications de chargement après l'ajout de la charge au modèle et spécifier le type de la charge (primaire, thermique, secondaire ou d'hydrogène)



**Figure IV-22-Charge primaire importée dans HOMER (avec spécifications de variabilité aléatoire).**

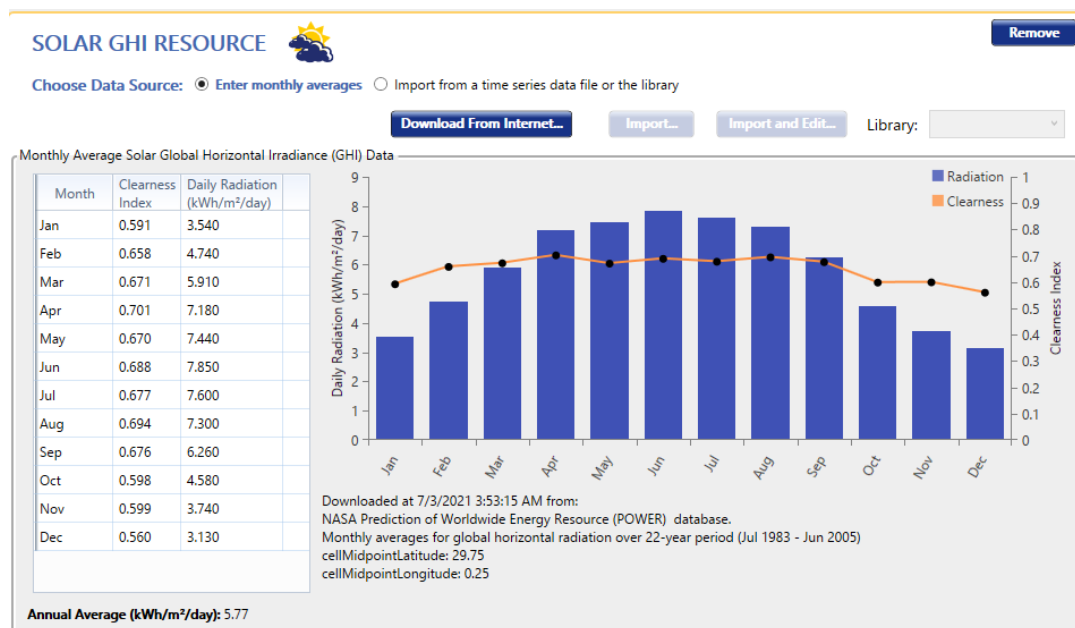
### IV.2.2.2 Entrer le détail des ressources

HOMER définit une ressource comme étant tout ce qui provient de l'extérieur du système. Chaque ressource est liée à un composant (exemple les données de vent pour l'éolienne). Le menu Ressources permet d'introduire les données de la ressource. Ces dernières peuvent être importées à partir des bases de données de HOMER suivant la localisation du projet. Ils peuvent être téléchargés à partir d'un fichier ou entrer directement.

#### a. Donnée sur les ressources solaires

La connaissance de l'éclairement énergétique à la surface d'un capteur est essentielle pour l'évaluation des ressources solaires. La plupart des stations météorologiques enregistrent l'irradiation totale sur une surface horizontale également connue sous le nom d'irradiation

globale horizontale (GHI). GHI, quant à lui, représente la somme du rayonnement solaire incident directement à la surface de la terre et de l'irradiance horizontale diffuse (DHI). C'est un paramètre important pour la conception des systèmes photovoltaïques à panneaux. L'irradiance horizontale diffuse est le rayonnement du soleil qui ne frappe pas directement la surface de la terre, mais a plutôt été dispersé par des molécules, des nuages, de la poussière ou d'autres particules dans l'atmosphère terrestre et vient également de toutes les directions. La zone d'étude de cas étant située à Adrar, le district de ressources solaires obtenu à partir de la base de données de prévision des ressources énergétiques mondiales (POWER) de la NASA.



**Figure IV-23-Rayonnement quotidien de Adrar région deKsar Kaddour.**

#### b. Donné sur le carburant Diesel

LHV c'est Le pouvoir calorifique inférieur est une propriété des combustibles. Il s'agit de la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible. Dans notre cas LHV=43.2.

Density, Il s'agit du poids du produit pour un volume donné. Elle dépend de la température du produit. À 15°C, elle est en moyenne de 830 kg/m<sup>3</sup> (830 kg pour 1 m<sup>3</sup>) pour notre cas la densité est égale à 820kg/m<sup>3</sup>.

Le fioul à très basse teneur en soufre est un fioul lourd dont le pourcentage massique du soufre est inférieur à . Dans notre cas le pourcentage du soufre est 0.4%.

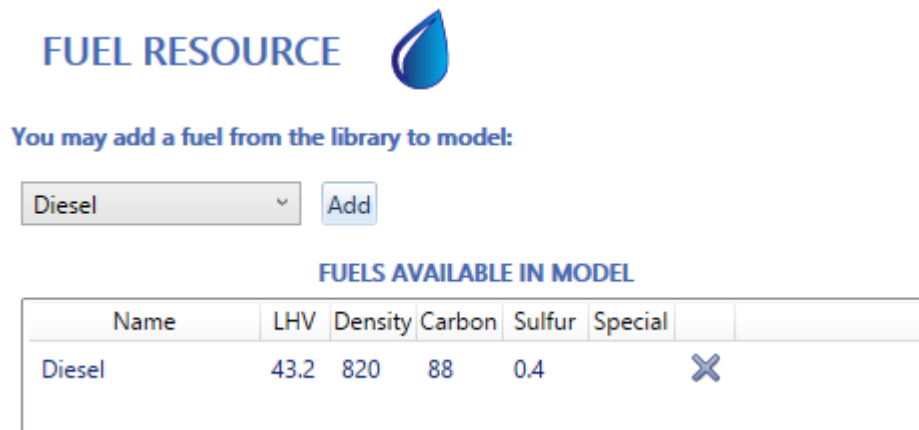


Figure IV -24-carburant disponible dans le modèle.

**c. Température ambiante**

La température ambiante Figure III-6 sur le site sélectionné (Ksar Kaddour) est également d'une grande importance, car les performances solaires photovoltaïques ont une corrélation négative avec la température ambiante, comme le montre la revue de la littérature. La température quotidienne moyenne annuelle dans ce cas est de 22.39 °C. La température quotidienne la plus élevée enregistrée au cours de la saison est de 35.15 °C pour juillet. Cependant, la température quotidienne la plus basse est de 9.38 °C en janvier.

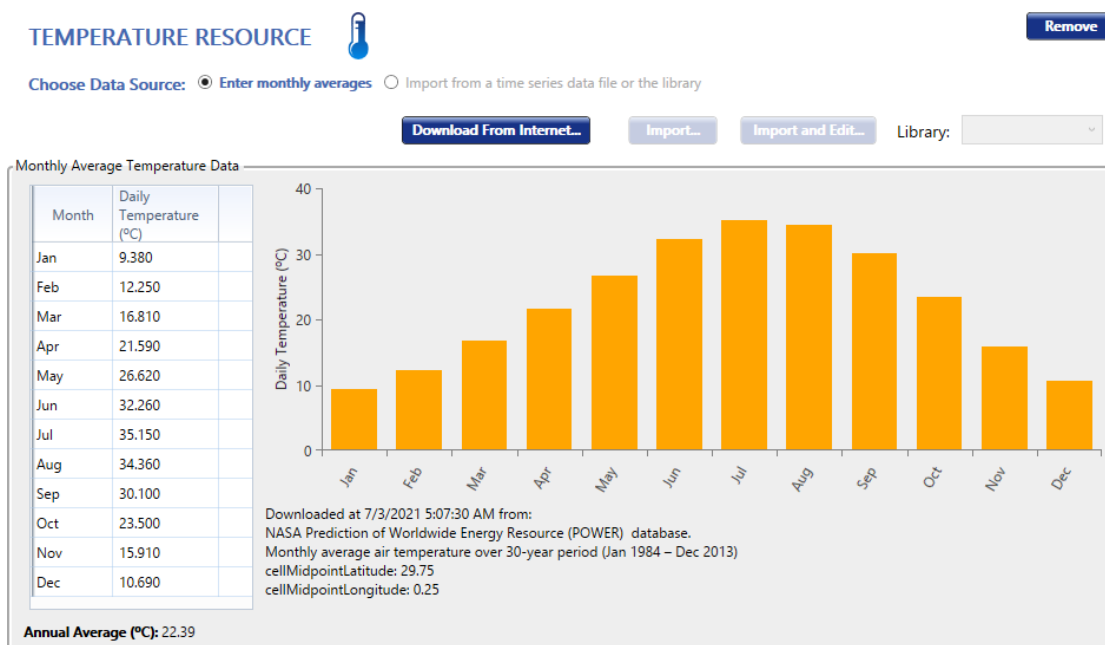


Figure IV-25-Température de l'air ambiant moyenne mensuelle reçue.

**Tableau I-Rayonnement solaire et vitesse du vent incluant la température moyenne.**

Mois	Indice de clarté	Rayonnement solaire [KWh/m <sup>2</sup> /jour]	Température moyenne[°C]
Janvier	0.591	3.54	9.38
Février	0.658	4.74	12.25
Mars	0.671	5.91	16.81
Avril	0.701	7.18	21.59
May	0.670	7.44	26.62
Juin	0.688	7.85	32.62
Juillet	0.677	7.60	35.15
Août	0.694	7.30	34.36
Septembre	0.676	6.26	30.10
Octobre	0.598	4.58	23.50
Novembre	0.599	3.74	15.91
Décembre	0.560	3.13	10.69

#### IV.2.2.3 Choisir les composants

En utilisant le menu component, nous pouvons choisir tous les composants que nous voulons considérer dans notre système d'alimentation. HOMER offre un nombre considérable de composants à savoir générateur, PV, Diesel, différents dispositifs de stockages, convertisseur, hydro, reformer, électrolyseur, réservoir d'hydrogène, hydro cinétique, réseau et contrôleur de charge thermique. D'autres modules concernant l'énergie biomasse sont aussi disponibles via l'ajout d'un module supplémentaire du logiciel. Lors du choix des composants, il est important de sélectionner tous les composants des différents systèmes que nous voulons considérer et d'entrer les spécifications techniques et les différents coûts pour chaque composant.

##### a. Spécifications panneaux solaires photovoltaïques

Les panneaux solaires sont un groupe de cellules connectées en parallèle et en série pour générer la puissance électrique requise en fonction de facteurs météorologiques tels que le rayonnement solaire et la température. Un panneau en silicium multi-cristallin modèle **Froniussymo 4.5-3-S withGeneric PV**, a été utilisé dans l'étude en raison de son efficacité relative élevée 17.30% de sa robustesse, de ses performances exceptionnelles à faible éclairage. Le composant a été choisi pour être le principal générateur d'électricité en raison

de l'ensoleillement abondant. Avec le bon angle d'inclinaison, les modules bénéficient d'un ensoleillement tout au long de la journée.

The screenshot displays the configuration window for a 'Fronius Symo 4.5-3-S with' PV module. The 'Properties' section lists technical details such as a rated capacity of 4.4 kW, an efficiency of 17.30%, and a temperature coefficient of -0.4100. The 'Cost' section is divided into Capital (\$3,000.00), Replacement (\$3,000.00), and O&M (\$10.00/year) costs, with a lifetime of 25 years. The 'Sizing' section shows 'HOMER Optimizer™' selected. The 'Site Specific Input' section has a derating factor of 96.00%. The 'Electrical Bus' is set to DC.

Figure IV-26-Spécifications des modules solaires photovoltaïques.

Tableau II-Paramètres de conception des modules solaires photovoltaïques.

Paramètres	Unité	Valeur
Coût de remplacement	\$	3,000.00
Coût d'exploitation et d'entretien	\$/ans	10.00
Température de fonctionnement	°C	45
Coefficient de température	°C	-0.460
Capacité nominale	KW	4.4
Facteur de déclassement	%	96
Efficacité	%	17.3

### b. Spécifications d'éoliennes

Un générateur diesel **CAT-100kVA-50Hz-PP** a été utilisée dans cette étude il s'agit d'un générateur d'une capacité de 80 kW.

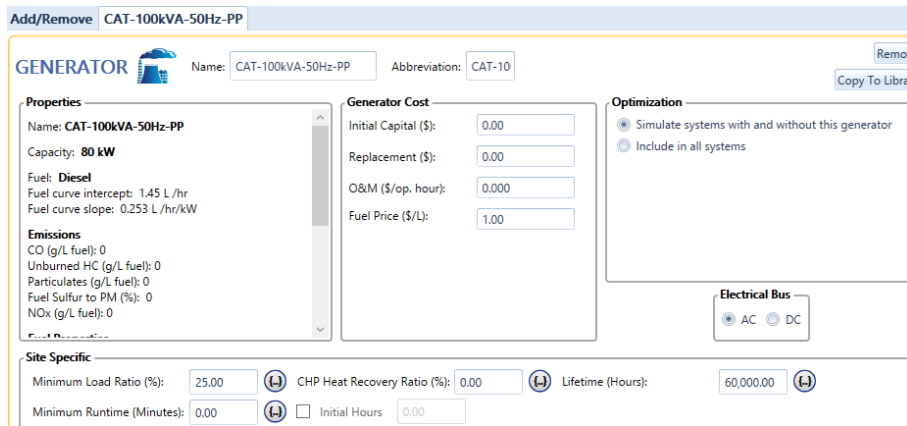


Figure IV-27-Spécifications HOMER pour générateur diesel.

c. Spécifications de la batterie

Lorsque la puissance générée par l'éolienne et le PV dans un système hybride est supérieure à la demande de charge, l'énergie excédentaire sera stockée dans les batteries et fournira de l'électricité pendant le temps. Le modèle de batterie EnerSysPowerSafe SBS 680 a été choisi pour la modélisation du système et les détails sont répertoriés dans le tableau. Le nombre de batteries considéré dans l'étude d'optimisation a été déterminé par l'optimiseur HOMER Pro qui a décidé du nombre total nécessaire. En cas de défaillance de la production d'électricité, l'énergie stockée sera utilisée pour alimenter la charge, ce qui améliore la fiabilité du système.

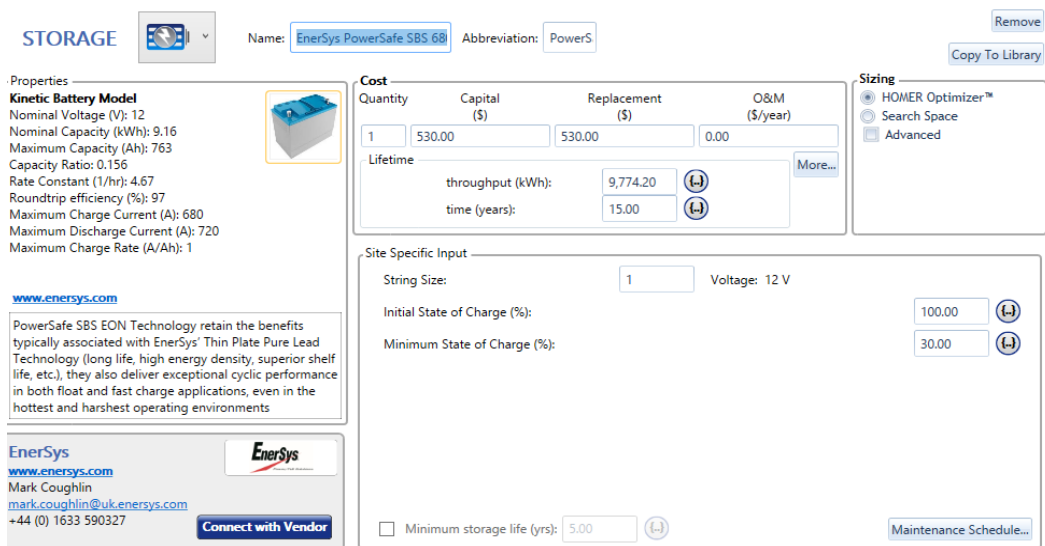


Figure IV -28-Spécifications HOMER pour le système de stockage (batterie).

Tableau III-Paramètres de conception des batteries.

Paramètres	Unité	Valeur
Tension nominale	Volt	12

Capacité nominale	KWh	9.16
Efficacité aller-retour	%	97
Capacité maximale	Ah	763
Courant de charge max	A	680
Courant de décharge max	A	720

**d. Spécifications du convertisseur**

Le modèle conçu dans Homer Pro se compose à la fois de générateurs CC et CA connectés à une charge CA uniquement. Un convertisseur est donc nécessaire pour maintenir le flux d'énergie entre les composants AC et CC. Un convertisseur bidirectionnel triphasé Leonics MTP-413F 25 kW a été choisi pour le système. Le logiciel HOMER Pro est utilisé pour l'optimisation de la taille. La taille peut alors être réduite ou augmentée en fonction du résultat de la simulation.

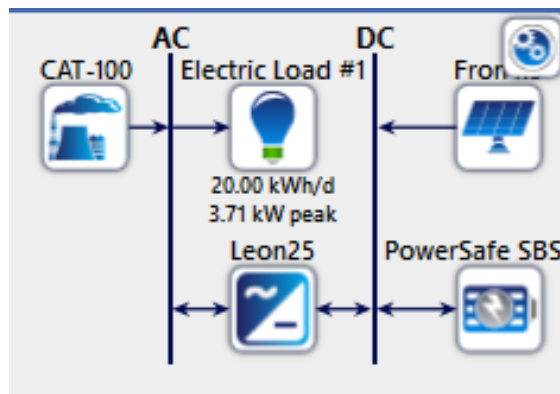
The screenshot shows the HOMER Pro interface for configuring a converter. At the top, the selected component is 'Leonics MTP-413F 25kW'. The 'Properties' panel on the left lists the name, abbreviation 'Leon25', and notes: 'Grid-forming & grid-following. "Hybrid-inverter," designed for hybrid power systems combining solar with diesel and other renewable energy sources. 25kW 240Vdc'. The 'Costs' table is as follows:

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$600.00	\$600.00	\$0.0

Additional parameters include: Inverter Input (Lifetime: 10.00 years, Efficiency: 96.00%), Rectifier Input (Relative Capacity: 80.00%, Efficiency: 94.00%), and a checked option for 'Parallel with AC generator?'. The 'Capacity Optimization' panel on the right has 'HOMER Optimizer™' selected.

Figure IV -29-Spécifications HOMER pour le convertisseur.

**IV.2.2.4 Modèle des composants du système hybride**



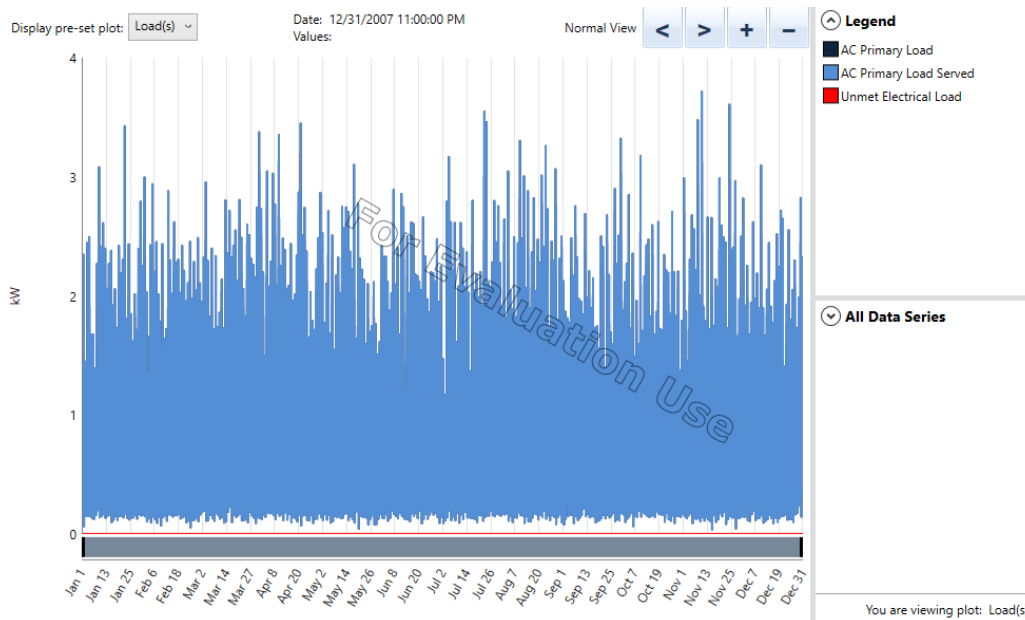
**Figure IV-30-Schéma du système hybride simulé (Source : HOMER Pro).**

### IV.3 L'analyse des résultats de la simulation (Onglet ResultView)

Il s'agit de faire une analyse des coûts, du flux de trésorerie, de la consommation et la production de l'électricité du système, des émissions, des détails d'opération pour chaque composant, du carburant, du stockage et du réseau de chaque système simulé. Les différentes analyses se font en se basant sur les différents rapports, tables et graphes que Homer met à la disposition de l'utilisateur.

Dans cette étude, « une conception et une application de système hybride solaire-diesel de type domestique » est mise en œuvre. Les informations d'entrée qui doivent être fournies à HOMER comprennent : les charges électriques (un an de données de charge), les ressources renouvelables (telles qu'un an de données de rayonnement solaire), les détails/coûts techniques des composants, les contraintes, les contrôles, le type de stratégie de répartition, etc.

La figure IV-12 ci-dessous indique à la fois la charge primaire CA (en bleu foncé) et la charge primaire CA desservie (en bleu) tout au long de l'année. La différence avec ces deux charges est représentée par la courbe en rouge. Cette courbe (rouge) est appelée charge électrique non satisfaite qui pourrait se produire parce que la puissance générée par le système n'était pas suffisante pour alimenter la charge.



**Figure IV-31-La charge primaire AC (bleu foncé), la charge primaire AC desservie (bleu) et la charge électrique non satisfaite (rouge).**



On peut observer à partir du tableau que le PV fonctionnerait avec un facteur de capacité de 22.8%. Avec une capacité installée de 4.40 kW, le générateur photovoltaïque pourrait atteindre une puissance maximale de 4.40 kW. Le LCOE de 0,121 par kWh indiqué ci-dessus est basé sur le coût total des composants. Il s'agit du LCOE pour les coûts d'installation des panneaux photovoltaïques seuls.

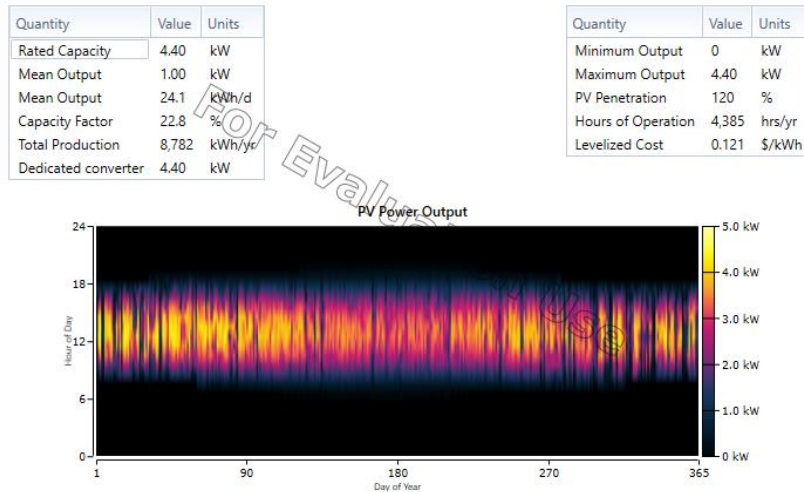


Figure IV-32-1 Puissance de sortie photovoltaïque.

Le générateur diesel procède un facteur de capacité de 0.0285% illustré dans la Figure IV-13 le générateur pourrait atteindre une puissance maximale de 20 kW. Consommation de carburant est de 65.0 L. La production d'électricité dans une année est de 200 kWh.

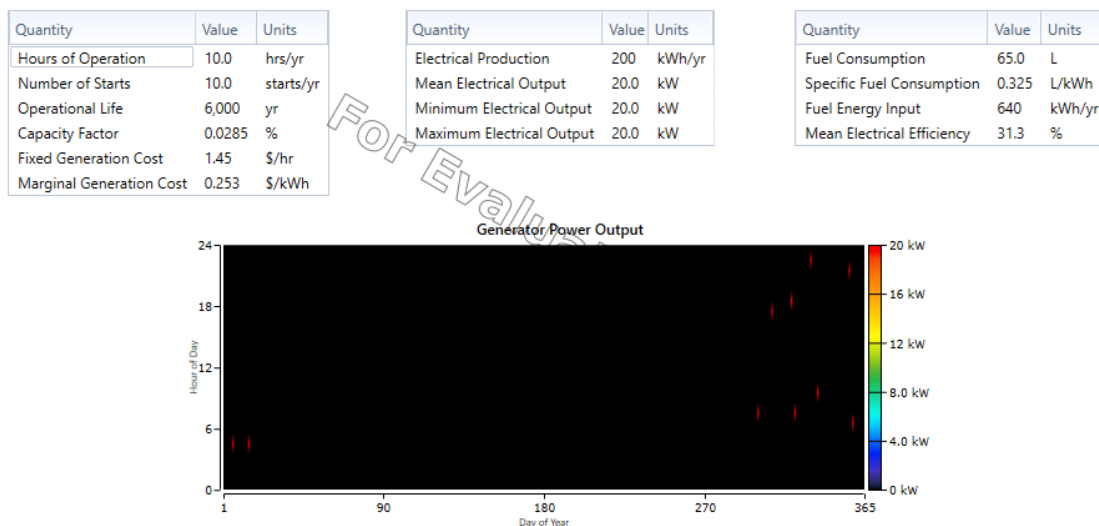


Figure IV-33- Puissance de sortie de générateur diesel.

- Performances du banc de batteries

L'architecture du système contient 6 batteries, avec une taille de chaîne de 1,00 par batterie, et 6 chaînes en parallèle et une tension de bus de 12 V. La taille de la batterie a une autonomie de 46.1 heures avec une capacité nominale de 54.9 kWh et un débit à vie de 58.645 kWh et durée de vie prévue de 14 ans. On peut voir sur la figure que l'état de charge du groupe de batteries varierait entre 30 et 100 %. Dans la figure IV-14, on peut montrer que l'efficacité du groupe de batteries est de 97 %, c'est-à-dire qu'elle a 3 % de pertes. Cependant, le paramètre important est la durée de vie prévue de la batterie. Les résultats montrent que le parc de batteries aurait besoin d'être changé tous les 14 ans environ.



**Figure IV-34-État de charge du stockage de la batterie pendant un an.**

Quantity	Value	Units
Batteries	6.00	qty.
String Size	1.00	batteries
Strings in Parallel	6.00	strings
Bus Voltage	12.0	V

Quantity	Value	Units
Autonomy	46.1	hr
Storage Wear Cost	0.0551	\$/kWh
Nominal Capacity	54.9	kWh
Usable Nominal Capacity	38.5	kWh
Lifetime Throughput	58,645	kWh
Expected Life	14.0	yr

Quantity	Value	Units
Average Energy Cost	0	\$/kWh
Energy In	4,210	kWh/yr
Energy Out	4,116	kWh/yr
Storage Depletion	32.4	kWh/yr
Losses	127	kWh/yr
Annual Throughput	4,179	kWh/yr

**Figure IV-35-Indicateurs de performance simulés pour le banc de batteries.**

#### IV.4 L'analyse des résultats d'optimisation du système hybride PV-éolien (Onglet ResultView)

Le profil de charge et les données météorologiques du fonctionnement du système hybride PV-diesel sont utilisés dans cette étude. Les mesures horaires du rayonnement solaire sur une période d'un an ont été importées dans les outils HOMER pour calculer les valeurs moyennes mensuelles de l'indice de clarté et du rayonnement quotidien. Le rayonnement global moyen annuel est de 5.77 kWh/m<sup>2</sup>/jour avec un indice de clarté moyen annuel de 0,648. Les résultats sont affichés sous une forme globale dans laquelle les configurations de système les mieux classées sont répertoriées en fonction de leur coût actuel net (CNP) pour le type de système possible. La figure IV-15 montre une liste des combinaisons possibles de composants du système dans la forme globale.

Architecture								Cost			System	
Fron4.5 (kW)	Fron4.5-MPPT (kW)	CAT-100 (kW)	PowerSafe SBS 680	Leon25 (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	
4.40	4.40	80.0	6	25.0	LF	\$45,504	\$0.482	\$1,093	\$31,380	97.3	65.0	
4.40	4.40	80.0	6	25.0	LF	\$45,504	\$0.482	\$1,093	\$31,380	97.3	65.0	
4.40	4.40	80.0	6	25.0	LF	\$45,504	\$0.482	\$1,093	\$31,380	97.3	65.0	
4.40	4.40	80.0	6	25.0	LF	\$45,504	\$0.482	\$1,093	\$31,380	97.3	65.0	
4.40	4.40	80.0	5	25.0	LF	\$45,722	\$0.484	\$1,150	\$30,850	95.6	104	
4.40	4.40	80.0	5	25.0	LF	\$45,722	\$0.484	\$1,150	\$30,850	95.6	104	
4.40	4.40	80.0	5	25.0	LF	\$45,722	\$0.484	\$1,150	\$30,850	95.6	104	
4.40	4.40	80.0	7	25.0	LF	\$45,800	\$0.485	\$1,074	\$31,910	98.1	45.5	
4.40	4.40	80.0	7	25.0	LF	\$45,800	\$0.485	\$1,074	\$31,910	98.1	45.5	
4.40	4.40	80.0	6	25.0	CC	\$46,175	\$0.489	\$1,144	\$31,380	95.1	117	
4.40	4.40	80.0	6	25.0	CC	\$46,175	\$0.489	\$1,144	\$31,380	95.1	117	
4.40	4.40	80.0	6	25.0	CC	\$46,175	\$0.489	\$1,144	\$31,380	95.1	117	
4.40	4.40	80.0	6	25.0	CC	\$46,175	\$0.489	\$1,144	\$31,380	95.1	117	
4.40	4.40	80.0	8	25.0	LF	\$46,260	\$0.490	\$1,069	\$32,440	98.9	26.0	
4.40	4.40	80.0	7	25.0	CC	\$46,504	\$0.493	\$1,129	\$31,910	95.8	100	
4.40	4.40	80.0	7	25.0	CC	\$46,504	\$0.493	\$1,129	\$31,910	95.8	100	
4.40	4.40	80.0	5	25.0	CC	\$46,558	\$0.493	\$1,215	\$30,850	92.9	169	

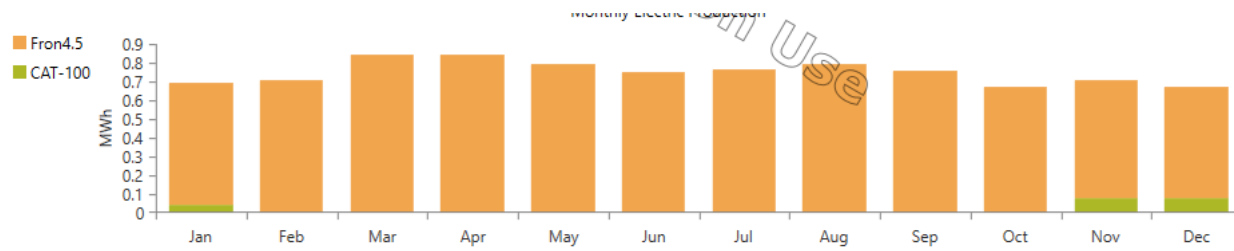
Figure IV-36-Résultat final du processus de simulation et d'optimisation.

Le système a été simulé pour évaluer ses caractéristiques opérationnelles, la production annuelle d'énergie électrique ; charges électriques annuelles desservies, excès d'électricité, fraction RE, pénurie de capacité, charge non satisfaite, etc. Une stratégie de contrôle de suivi de charge a été suivie dans la simulation. Dans le cadre de cette stratégie, chaque fois qu'un générateur d'électricité est nécessaire, il ne produit que suffisamment d'électricité pour répondre à la demande. La (figure IV-18) montre la production et la demande d'électricité pour le système d'énergie PV-diesel. Les résultats de la simulation montrent que ce système a une production annuelle totale d'énergie électrique de 8982kWh/an, dans laquelle l'énergie totale produite à partir d'un générateur PV est supérieure à l'énergie générée à partir d'un générateur diesel.

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%
Fronius Symo 4.5-3-S with Generic PV	8,782	97.8	AC Primary Load	7,300	100
CAT-100kVA-50Hz-PP	200	2.23	DC Primary Load	0	0
Total	8,982	100	Deferrable Load	0	0
			Total	7,300	100

Figure IV-37-Production et demande d'électricité pour le système photovoltaïque-diesel.

De plus, la part du générateur photovoltaïque et de diesel pour la production électrique de chaque mois de l'année est illustrée dans la (Figure IV -19) Comme on peut le voir, la quantité d'électricité produite par générateur diesel varie de 0,05 MWh en janvier à près de 0.1 MWh en décembre.



**Figure IV-38-Contribution des unités de puissance pour une utilisation à 100 % des énergies renouvelables.**

### Conclusion

L'optimisation des ressources est un facteur majeur dans l'évaluation de l'efficacité des systèmes d'énergie renouvelable. Diverses méthodes sont utilisées par différents chercheurs dans la planification et le dimensionnement des systèmes hybrides photovoltaïques/diesel connectés au réseau ou hors réseau. Dans cette étude, en utilisant le modèle informatique du logiciel HOMER, nous avons déterminé une énergie hybride efficace et économique qui utilise des sources diesel et solaires. Sur la base des résultats du processus d'optimisation, le système énergétique optimal comprend des modules PV de 4.4 kW, une éolienne (3 kW), un convertisseur de 25 kW et un nombre de 6 batteries. Les résultats de la simulation montrent que ce système a une production annuelle totale d'énergie électrique de 8982 kWh/an, dans laquelle l'énergie totale produite à partir d'un générateur photovoltaïque est supérieure à l'énergie générée à partir d'un générateur diesel.

## Bibliographie

1. P. M. KOUMBA and ÉTUDE, "Université du Québec à Trois-Rivières."
2. H. Ibrahim, A. Ilinca and I. Perron, *Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés*, Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03-Septembre 2008.
3. Traoré, Abdoul Karim. *Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles*. Diss. Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
4. U. M. Larbi Ben and elle M.kebailisalimafadlounfadilabelkadinawel, "republiquealgeriennedemocratique et populaire ministre de l'enseignement superieur et de la recherche scientifique Modélisation d'un système énergétique hybride (Photovoltaïque + Batterie) Proposé et dirigé : Présenté par," 2009.
5. "Université Abderrahmane Mira-Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie Electrique Spécialité : Electrotechnique Option : Commande des systèmes électrique Projet de Fin de cycle."
6. Taïki Vaïtchemé, Martin. *Modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien*. Diss. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2019.
7. M. Gérard, "L' énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé," pp. 1–10, 2016.
8. Gergaud, Olivier. *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*. Diss. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
9. Zarour Laid, « Etude technique d'un système d'énergie hybride Photovoltaïque-éolien hors réseau », Magistère en Electrotechnique, Université Mentouri De Constantine, Département D'électrotechnique, Algérie, 07/2010.
10. El Aimani, Salma. *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*. Diss. Ecole Centrale de Lille, 2004
11. B. Multon et al., "Etat de l' art des aérogénérateurs To cite this version : HAL Id : hal-00674088," 2012
12. Yahya, A. Ould Mohamed, A. Ould Mahmoud, and I. Youm. "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque." *Revue des Energies Renouvelables* 11.3 (2008) : 473-483.
13. M. BELATEL, F. BENCHIKH, Z. SIMOHAMED, F. FERHAT, and F. Z. AISSOUS, "Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte," *Rev. Des Energies Renouvelables*, vol 1.

14. Huff, G., *DOE Global Energy Storage Data base*. 2015, Sandia National Lab. (SNL-NM)
15. A. Baiwir and P. Andre, “Modélisation de systèmes de stockage électrique et leur intégration dans un réseau électrique intelligent Master en Sciences et Gestion de l’ Environnement – finalité Energies Renouvelables (ULg) Master en Développement Durable.
16. S. Hakim, M. Elyaqouti, L. Bouhouch, and A. Moudden, “Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques [Comparison between two models of the battery storage used in the photovoltaic system], ” vol. 20, no. 4, pp. 1033–10.
17. F. Boumediene, “Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d’électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah,” *Mémoire de Magister*, p. 152, 2012.

## Résumé

L'exploitation des énergies renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. Le système hybride de production d'électricité (photovoltaïque – diesel) totalement autonome est la solution idéale pour ce genre de problème.

Nous présentons dans ce papier, une méthode de dimensionnement optimal du générateur photovoltaïque et du banc de batteries dans un système hybride de production d'électricité (photovoltaïque - diesel) totalement autonome.

Dans ce travail nous allons mettre en évidence que la gestion de ce système dépend essentiellement de la consommation demandée ce qui nous permettrait de prévoir des systèmes de stockage appropriés pour assurer une meilleure autonomie

Des stratégies pour développer un système de stockage efficace sont également présentées, ainsi qu'un bref aperçu des développements des techniques d'optimisation, de l'indice de fiabilité et des techniques d'analyse des coûts des systèmes hybrides d'énergie renouvelable à l'aide d'une simulation avec le logiciel Homer pro.

## Abstract

The exploitation of renewable energies is booming in industrialized countries and even in some underdeveloped countries. The completely autonomous hybrid power generation system (photovoltaic - diesel) is the ideal solution for this kind of problem. In this paper, we present a method for optimal sizing of the photovoltaic generator and the battery bank in a completely autonomous hybrid electricity production system (photovoltaic - diesel).

In this work we will demonstrate that the management of this system depends essentially on the demanded consumption which would allow us to provide appropriate storage systems to ensure better autonomy. Strategies for developing and efficient storage system are also presented, along with a brief overview of developments in optimization techniques, reliability index and cost analysis techniques of hybrid renewable energy systems at the same time. using a simulation with Homer pro software.

## ملخص

يزدهر استغلال الطاقات المتجددة في البلدان الصناعية وحتى في بعض البلدان المتخلفة. نظام توليد الطاقة الهجين المستقل تمامًا (الكهروضوئية- ديزل) هو الحل الأمثل لهذا النوع من المشاكل. في هذا البحث، نقدم طريقة للتجسيم الأمثل للمولد الكهروضوئي وبنك البطارية في نظام إنتاج الكهرباء الهجين المستقل تمامًا (الكهروضوئية- ديزل).

سنثبت في هذا العمل أن إدارة هذا النظام تعتمد بشكل أساسي على الاستهلاك المطلوب مما يسمح لنا بتوفير أنظمة تخزين مناسبة لضمان استقلالية أفضل. كما يتم تقديم استراتيجيات لتطوير نظام تخزين فعال، إلى جانب لمحة موجزة عن التطورات في تقنيات التحسين، ومؤشر الموثوقية وتقنيات تحليل التكلفة لأنظمة الطاقة المتجددة الهجينة في نفس الوقت. باستخدام محاكاة مع برنامج Homer pro.

## Mots clés

**Energie renouvelable, système hybride, éolien, panneau solaire, diesel, Homer PRO, batterie.**