

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté: Technologie

Département: Génie Mécanique



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité: **Génie mécanique**

Par:

NOURINE ELAID RANIA

Thème :

**Conception et optimisation d'un système hybride photovoltaïque/éolien/diesel pour l'électrification
d'un village isolé au sud de l'Algérie**

Dr KAMLA Youcef	UHBC	Président
Dr ZARGELAINE abdelaziz	UHBC	Examineur
Dr HADJ HENNI Smail	UHBC	Examineur
Dr BELKACEM Nefissa	UHBC	Encadrant

Résumé

Le développement des énergies renouvelables et la maîtrise de la demande énergétique constituent des solutions pertinentes face aux défis actuels, en particulier dans les zones isolées. Parmi ces solutions, la mise en place de systèmes hybrides représente une alternative efficace pour garantir une alimentation électrique fiable.

Ce travail porte sur la conception et l'analyse d'un système de production d'électricité hors réseau (off-grid), basé principalement sur l'énergie solaire photovoltaïque, destiné à alimenter le village isolé de Toundart, situé dans la commune de Tin Zaouatine, wilaya d'In Guezzam, au sud de l'Algérie. Ce village, composé de 30 habitations, n'est pas raccordé au réseau électrique national. La demande énergétique journalière est estimée à environ 600 kWh, avec une puissance de pointe de 175 kW. Le recours à une solution locale autonome s'impose donc comme une alternative réaliste et durable pour répondre aux besoins en électricité.

L'étude s'est concentrée sur un système combinant des panneaux photovoltaïques (PV), un système de stockage par batteries (BTT) et un générateur diesel (GD) de secours. La simulation, réalisée à l'aide du logiciel HOMER Pro, a intégré les aspects techniques, économiques et environnementaux. Les résultats obtenus ont montré que la configuration optimale permet de couvrir 95,7 % de la demande énergétique annuelle grâce à l'énergie solaire, contre 4,3 % par le générateur diesel. La charge primaire en courant alternatif (AC Primary Load) atteint 219 000 kWh/an.

Le système présente également un surplus de production de 41,8 %, offrant ainsi une sécurité énergétique supplémentaire et des perspectives d'extension future. Le coût actualisé de l'énergie (COE) est estimé à 0,138 \$/kWh, tandis que le coût net actualisé (NPC) du projet s'élève à 393 277,7 USD, soit environ 51 199 251 DZD.

Ces résultats démontrent qu'une exploitation optimale de l'énergie solaire, associée à un système de stockage performant, constitue une solution fiable, économique et écologique pour l'électrification durable des zones isolées.

Mots-clés : SEH, PV/Éolien/Diesel, Simulation, HOMER, COE.

المخلص

يُعتبر تطوير الطاقات المتجددة والتحكم في الطلب الطاقوي من الحلول الفعّالة لمواجهة التحديات الطاقوية الحالية، خاصة في المناطق المعزولة. ومن بين هذه الحلول، تمثل أنظمة الطاقة الهجينة بديلاً فعّالاً لضمان توفير الكهرباء بشكل موثوق.

يركز هذا العمل على تصميم وتحليل نظام لإنتاج الكهرباء خارج الشبكة (Off-grid)، يعتمد أساساً على الطاقة الشمسية الكهروضوئية، بهدف تزويد قرية "توندارت" المعزولة، الواقعة في بلدية "تين زاواتين" بولاية عين قزام جنوب الجزائر. تتكوّن هذه القرية من 30 مسكناً، وهي غير مربوطة بالشبكة الكهربائية الوطنية، مع طلب طاقي يومي يُقدّر بحوالي 600 كيلوواط ساعة، بقوة قصوى تصل إلى 175 كيلوواط. وعليه، يُعدّ الاعتماد على حل محلي مستقل خياراً واقعيًا ومستدامًا لتلبية احتياجات السكان من الكهرباء.

تركزت الدراسة على نظام يجمع بين الألواح الشمسية الكهروضوئية (PV)، ونظام تخزين البطاريات (BTT)، ومولد ديزل (GD) احتياطي. تم إجراء المحاكاة باستعمال برنامج HOMER Pro، مع الأخذ بعين الاعتبار الجوانب التقنية والاقتصادية والبيئية. وأظهرت النتائج أن التكوين الأمثل يغطي 95.7% من الطلب السنوي من خلال الطاقة الشمسية، مقابل 4.3% يتم توفيرها بواسطة مولد الديزل. ويصل الحمل الكهربائي الأساسي المتناوب إلى 219,000 كيلوواط ساعة/سنة.

كما يُنتج النظام فائضاً في الطاقة بنسبة 41.8%، مما يوفر أماناً طاقياً إضافياً وفرصاً للتوسعة المستقبلية. يُقدّر تكلفة الطاقة المحسوبة (LCOE) بـ 0.138 دولار/ك.و.س، بينما يبلغ صافي التكلفة الحالية (NPC) للمشروع 393,277.7 دولاراً أمريكياً، أي حوالي 51,199,251 دينار جزائري.

تُظهر هذه النتائج أن الاستغلال الأمثل للطاقة الشمسية، إلى جانب نظام تخزين فعّال، يُمثّل حلاً موثوقاً واقتصادياً وبيئياً لكهربة المناطق المعزولة.

الكلمات المفتاحية: النظام الهجين، الطاقة الشمسية/الرياح/الديزل، المحاكاة، HOMER، تكلفة الطاقة.

Abstract

The development of renewable energies and the management of energy demand represent effective solutions to address current energy challenges, especially in isolated areas. Among these solutions, the implementation of hybrid systems is an efficient alternative to ensure a reliable electricity supply.

This work focuses on the design and analysis of an off-grid electricity production system based primarily on photovoltaic solar energy, intended to supply the isolated village of Toundart, located in the commune of Tin Zaouatine, in the In Guezzam province, southern Algeria. This village, composed of 30 households, is not connected to the national electricity grid, with an estimated daily energy demand of around 600 kWh and a peak power of 175 kW. The implementation of a local autonomous solution thus emerges as a realistic and sustainable alternative to meet the village's electricity needs.

The study focused on a system combining photovoltaic panels (PV), a battery storage system (BTT), and a backup diesel generator (DG). The simulation, carried out using HOMER Pro software, considered technical, economic, and environmental aspects. The results showed that the optimal configuration covers 95.7% of the annual energy demand through solar energy, with 4.3% provided by the diesel generator. The AC Primary Load reaches 219,000 kWh/year.

The system also generates an energy surplus of 41.8%, providing additional energy security and opportunities for future expansion. The Levelized Cost of Energy (LCOE) is estimated at \$0.138/kWh, while the project's Net Present Cost (NPC) amounts to 393,277.7 USD, or about 51,199,251 DZD.

These results demonstrate that optimal use of solar energy, combined with efficient storage, represents a reliable, economical, and ecological solution for the electrification of isolated areas.

Keywords: HPS, PV/Wind/Diesel, Simulation, HOMER, COE.

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit d'un engagement constant et d'une passion profonde pour la science, à toutes celles et ceux qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours.

À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et les nombreux sacrifices consentis afin que je puisse réaliser mes aspirations.

À mes frères, Mohamed et Souheib, ainsi qu'à ma sœur Fawzia, pour leur présence réconfortante et leurs encouragements sincères.

À toutes mes amies, pour leur soutien moral et leur précieuse compagnie au fil de ces années d'études, et tout particulièrement à Lamia Ben Aouali et Hakima Elakboub, dont l'amitié fidèle et la motivation constante ont été pour moi une source d'inspiration inestimable.

À mes collègues de promotion, ainsi qu'à l'ensemble de mes professeurs, qui ont su transmettre leur savoir avec passion, exigence et bienveillance.

À vous toutes et tous, j'adresse l'expression de ma plus profonde gratitude.

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la volonté, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **M^{lle} BELKACEM Nefissa**, mon encadrante, pour la qualité de son encadrement, ses conseils éclairés et son soutien indéfectible tout au long de cette recherche.

Mes remerciements les plus sincères vont également au **Dr DEKKICHE Mohamed**, pour ses orientations précieuses durant la phase de simulation du système.

Je remercie vivement **M^{me} Fares Chahinez**, doyenne de la Faculté de Technologie, ainsi que le **Dr Khati Azzedine**, chef du département de Génie Mécanique, pour leur soutien constant et leur collaboration précieuse tout au long de mon parcours universitaire.

Je suis également reconnaissante à tous les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail et pour leurs observations constructives.

Ma profonde reconnaissance va à l'entreprise **GISB (Green Power)**, qui m'a accueillie au sein de son équipe durant mon stage.

Je remercie tout particulièrement **M^{me} Sofiane Asil**, ma tutrice de stage, pour son professionnalisme, ses conseils judicieux et son accompagnement constant. Je lui suis profondément reconnaissante pour avoir su créer un cadre de travail à la fois stimulant, enrichissant et formateur.

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements les plus chaleureux à **ma famille** et à **mes amis**, pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements indéfectibles tout au long de ce projet.

À toutes et à tous, je vous adresse mes sincères remerciements.

Liste des figures

Figure 1.1 : Classification des systèmes hybrides d'énergies [1]	2
Figure 1.2 : Configuration des SEH à bus CC [2]	3
Figure 1.3 : Configuration du bus CA [2]	4
Figure 1.4 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA [2]	4
Figure 1.5 : Système solaire hybride	6
Figure 1.6 : Panneau solaire [7]	7
Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV [9]	8
Figure 1.8 : Cellules du silicium (a) monocristallin et (b) polycristallin [10]	9
Figure 1.9 : Cellule silicium amorphe. [10]	9
Figure 1.10 : Inclinaison du panneau solaire [12]	12
Figure 1.11 : Association en parallèle [13]	13
Figure 1.12 : Association en série [13]	13
Figure 1.13 : Batterie solaire [15]	15
Figure 1.14 : caractéristique charge et décharge d'une batterie [16]	16
Figure 1.15 : Branchement des batteries en série [17]	17
Figure 1.16 : blanchement des batteries en parallèle [17]	17
Figure 1.17 : schéma de principe de l'onduleur [20]	19
Figure 1.18 : Onduleur solaire [20]	19
Figure 1.19 : les câbles d'installation solaire [20]	20
Figure 1.20 : Eolienne à axe vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines) [21]	21
Figure 1.21 : Eolienne à axe horizontal [22]	22
Figure 1.22 : Composition d'une éolienne [23]	23
Figure 1.23 : Configuration du générateur diesel [25]	24
Figure 1.24 : Système de supervision [26]	25
Figure 2.1 : Localisation de la région Tin-zaouatine [28]	29
Figure 2.2 : Évolution de l'ensoleillement mensuelle superposé à l'indice de clarté.	31
Figure 2.3 : Profil de l'éclairement pour tous les mois en fonction du temps	32
Figure 2.4 : Effets de l'éclairement sur la cellule PV [30]	32
Figure 2.5 : l'évolution des températures mensuelles moyennes de la région de Tin-Zaouatine	33
Figure 2.6 : Moyennes Mensuelles de la température ambiante	34
Figure 2.7 : Figure : Effet de la température sur la cellule	35
Figure 2.8 : Evolution journalière de la vitesse moyenne du vent	37
Figure 2.9 Évolutions mensuelle et annuelle de la vitesse moyenne du vent	37
Figure 2.10 : Les paramètres de vent	38
Figure 3.1 : Opérations du HOMER. [34]	42
Figure 3.2: Configuration de l'installation à dimensionner	47
Figure 3.3 : Architecture du système	47
Figure 3.4 : Profil de charge journalière HOMER.	50
Figure 3.5 : Profil de charge dans une année sur HOMER.	50
Figure 3.6 : Courbe de puissance obtenue en fonction de la vitesse du vent	56
Figure 4.1: Résultat optimal	61
Figure 4.2 : NPC total pour le système	63
Figure 4.3: Production électrique par mois de chaque composant	64
Figure 4.4 : Profil journalier de production	65
Figure 4.5 : Profil saisonnier de production.	65
Figure 4.6 : Etat de charge quotidienne des batteries pendant toute l'année	66
Figure 4.7 : Energie convertie à la sortie du convertisseur bidirectionnel.	67
Figure 4.8 : Puissance délivrée par le GD pour toute l'année	68
Figure 4.9 : Comparaison entre le coût du système raccordé au réseau et celui du système autonome.	69

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Comparaison des différentes technologies photovoltaïques [10] :.....	9
Tableau 2.1 :Données géographiques obtenues avec HOMER Pro.....	30
Tableau 2.2 : Radiation solaire moyenne	30
Tableau 2.3 Relevé de la température moyenne:	33
Tableau 2.4 : Vitesses moyenne du vent	36
Tableau 3.1 : Les fonctions de HOMER Pro.....	42
Tableau 3.2 : les étapes de simulation avec leurs représentations visuelles.....	43
Tableau 3.3 : Charge d'une habitation en saison hivernale (Wh)	48
Tableau 3.4 : Charge d'une habitation en saison chaud	48
Tableau 3.5 : Charge d'une habitation en saison printemps	49
Tableau 3.6 : Charge d'une habitation en saison l'automne	49
Tableau 3.7 : Charge du site pour les différentes saisons	49
Tableau 3.8 : Coût de GPV [37].....	55
Tableau 3.9 : Tailles GPV considérées.....	55
Tableau 3.10 : Caractéristiques du module PV [38]	55
Tableau 3.11 : Informations techniques du BERGEY EXCEL10 [39].....	56
Tableau 3.12 : Coût de GE [40]	56
Tableau 3.13 : Nombre d'éoliennes considéré.	56
Tableau 3.14 : Coût GD [41].....	57
Tableau 3.15 : Caractéristiques électriques Générateur diesel à Démarrage automatique [41]	57
Tableau 3.16 : Coût de batterie[42]	57
Tableau 3.17 : Tailles de string considérées.	57
Tableau 3.18 : Caractéristiques techniques de la batterie Tesla [43]	58
Tableau 3.19 : Coût de convertisseur [44].....	58
Tableau 3.20 : Taill de convertisseur.....	58
Tableau 3.21 : Caractéristiques techniques principales [44]	58
Tableau 4.1 : Tableau des résultats de calcul pour le système.....	60
Tableau 4.2 : Résultats de la simulation par catégorie.....	61
Tableau 4.3: Cractéristiques de la configuration optimale	62
Tableau 4.4 : Les coûts des composants du système hybride.....	63
Tableau 4.5 : Paramètres de fonctionnement du convertisseur.....	67

Nomenclature

Symbole	Description	Unité
Symboles latins		
A_{pv}	Aire des panneaux photovoltaïques	m^2
C_{ba}	Capacité de la batterie	Ah
c	Paramètre d'échelle	m/s
COE	Coût de l'énergie	\$/kWh ou F CFA/kWh
C_p	Facteur de puissance	
$f(v)$	Fonction de distribution de la vitesse du vent	
F_p	Facteur de pertes du système	
FF	Facteur de forme	
G	Rayonnement moyen mensuel	kWh/m ² /j
G_0	Rayonnement moyen mensuel extraterrestre	kWh/m ² /j
G_{inc}	Éclairement horaire incident	W/m ²
$G_{T,NOCT}$	Rayonnement dans les conditions NOCT	W/m ²
I	Courant de charge	A
I_{CC}	Courant de court-circuit	A
$I_{GD(t)}$	Courant fourni par le générateur diesel à un instant t	A
$I_{GD,max}$	Intensité maximale du générateur diesel	A
I_{ph}	Courant photonique	A
I_s	Courant de saturation	A
K	Constante de Boltzmann	J/K
k	Paramètre de forme	
K_t	Indice de clarté	
NOCT	Température normale de fonctionnement des cellules PV	°C
$P_{gpv(t)}$	Puissance du générateur PV à un instant t	W
$P_{GD(t)}$	Puissance du générateur diesel à un instant t	W
$P_{GD,nom}$	Puissance nominale du générateur diesel	W
P_{in}	Puissance lumineuse incidente	W
P_{max}	Puissance maximale	W
P_n	Puissance nominale de l'aérogénérateur	W
$P(v)$	Fonction de puissance de l'aérogénérateur	W
\bar{P}	Puissance produite par l'aérogénérateur	W
q	Charge d'un électron	C
$q_{GD(t)}$	Consommation de carburant des générateurs diesels	l/h
t	Temps de décharge de la batterie	h
$T_{a(t)}$	Température ambiante horaire	°C
$T_{a,NOCT}$	Température ambiante en conditions NOCT	°C
T_c	Température absolue de la cellule	K
$T_c(t)$	Température instantanée de la cellule	°C
$T_{ref c}$	Température de référence de la cellule	°C
r	Facteur d'autocorrélation	
U	Tension imposée à la diode	V

$U_{GD,nomAC}$	Tension nominale du générateur diesel	V
V_{CO}	Tension à circuit ouvert	V
v	Vitesse de vent	m/s
V_d	Vitesse de démarrage de l'éolienne	m/s
V_m	Vitesse d'arrêt de l'éolienne	m/s
V_n	Vitesse nominale de l'éolienne	m/s
V_{moy}	Vitesse moyenne du vent	m/s
$X_{GD}(t)$	Taux de charge du générateur diesel à un instant t	%
Symboles grecs		
$\varepsilon_i(t)$	État de marche/arrêt du générateur diesel i à un instant t	
η	Rendement d'une cellule PV	%
$\eta_{réfm}$	Rendement de référence du module PV	%
η_{ond}	Rendement de l'onduleur	%
β_T	Coefficient de variation de rendement	
δ	Modèle de force journalier	
ϕ	Heure du pic de la vitesse du vent	

Abréviation	Signification
AC	Courant Alternatif
CC	Courant Continu
COE	Coût de l'énergie (Cost Of Energy)
GD	Générateur diesel
PVDS	Éolienne / générateur diesel / batteries
GE	Générateur Éolien
GPV	Générateur Photovoltaïque
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NPC	Coût Net Actuel (Net Present Cost)
O&M	Ouvriers et Maintenance
EMS	ENERGY MANAGEMENT SYSTEM
SOS	Stat of charge
PV	Photovoltaïque
PVDS	Générateur photovoltaïque / générateur diesel / batteries
SEH	Système d'Énergie Hybride

Table des matières

Introduction Générale

Chapitre 1 : Unités et composants du système hybride

1.1	Introduction :	1
1.2	Système hybride :	1
1.2.1	Définition :	1
1.2.2	Classification :	1
1.2.3	Différentes configurations de bus dans les systèmes hybrides :	2
1.2.4	Avantages et inconvénients d'un système hybride :	5
1.2.5	Etude des structures des systèmes hybrides :	5
1.3	Unités et composants du SEH :	6
1.3.1	Systèmes photovoltaïques autonomes :	6
1.3.2	Définition du panneau photovoltaïque :	7
1.3.3	Le Principe fonctionnement d'un système photovoltaïque :	7
1.3.4	. Technologies des cellules PV :	8
1.3.5	. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	10
1.3.6	Orientation et inclinaison des modules photovoltaïques :	12
1.3.7	Association des modules photovoltaïques :	12
1)	Association en série :	12
1.3.8	Système de suivi solaire à deux axes (2-Axis Tracker) :	13
1.3.9	Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque :	14
1.4	Système de stockage :	15
1.4.1	Définition	15
1.4.2	Groupement de batteries	17
1.5	Le régulateur solaire	18
1.5.1	Les différents types de régulateurs solaires :	18
1.6	Convertisseur :	18
1.6.1	Les onduleurs	19
1.6.2	Câblage de système :	20
1.7	Système éolien :	21
1.7.1	Définition d'un aérogénérateur :	21
1.7.2	Composants d'un aérogénérateur	22
1.7.3	Avantages et les Inconvénients de l'énergie éolienne :	23
1.8	Générateur diesel :	24
1.8.1	Reserve tournante	24
1.8.2	Temps de fonctionnement minimal	24
1.8.3	Hystérésis (surplus minimal)	25
1.9	Charges du système	25
1.10	Système de supervision.....	25
1.11	Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH.....	26
1.12	Pourquoi opter pour un système hybride ?	27
1.13	Conclusion :	27

Chapitre 2 : Présentation et évaluation des gisements solaire et éolien du site

2.1	Introduction :	29
2.2	Présentation du site d'étude :	29

2.2.1	Données géographiques :	29
2.2.2	Données météorologiques :	30
2.3	Conclusion :	39

Chapitre 3: Dimensionnement et simulation du système hybride

3.1	Introduction	41
3.2	Présentation de l'outil de simulation (HOMER) :	41
3.2.1	Critères de choix de HOMER [2].....	41
3.2.2	Fonctionnalités principales de HOMER Pro :	41
3.2.3	Méthodologie d'utilisation de HOMER Pro :	43
3.3	Configuration du système hybride proposé	46
3.4	Dimensionnement technico-économique :	47
3.5	Modélisation de la demande énergétique :	48
3.6	Profil de consommation par mois pour l'année 2021	50
3.7	Modélisation des générateurs (PV, aérogénérateur, diesel) et du stockage d'énergie (batterie) :	50
3.7.1	Modélisation du générateur PV :	50
3.7.2	Modélisation de l'aérogénérateur :	51
3.7.3	Modélisation du générateur diesel :	53
3.7.4	Modélisation du système de stockage par batteries :	54
3.8	Dimensionnement des composants :	54
□	Générateur photovoltaïque :	54
3.9	Conclusion:	58

Chapitre 4: Analyse des résultats de simulation

4.1	Introduction :	60
4.2	Analyse des résultats de simulation :	60
4.2.1	Analyse de la configuration optimale (PVDS) :	61
4.2.2	Résultats écologiques :	68
4.2.3	Comparaison avec une extension du réseau :	68
4.3	Conclusion :	69

Conclusion Générale
Références bibliographiques

Introduction Générale

Introduction Générale

L'accès à l'électricité est aujourd'hui considéré comme un droit fondamental et un levier indispensable pour le développement économique, social et humain. L'énergie électrique permet non seulement d'assurer le confort domestique, mais elle est aussi vitale pour le fonctionnement des systèmes de santé, d'éducation, de communication, et pour l'émergence des activités économiques. Sans électricité, les efforts de développement restent limités, les inégalités se creusent, et les populations restent en marge de la société moderne.

Malgré les progrès technologiques remarquables dans le domaine de la production et de la distribution de l'énergie, une grande partie de la population mondiale – notamment dans les zones rurales et isolées – reste encore privée de ce service essentiel. Selon les données de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), près d'un milliard de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'électricité. Cette situation est particulièrement préoccupante en Afrique, où de nombreux villages demeurent non électrifiés, freinant ainsi les dynamiques locales de développement.

L'Algérie, pays vaste et riche en ressources naturelles, a réalisé d'importants progrès en matière d'électrification nationale. Toutefois, certaines régions éloignées du Grand Sud, en particulier les zones frontalières et sahariennes, restent difficilement accessibles par le réseau électrique conventionnel. C'est le cas du village de Toundart, situé dans la commune de Tin Zaouatine, wilaya d'In Guezzam, à l'extrême sud du pays. Ce village souffre d'un isolement géographique prononcé, de conditions climatiques extrêmes, et de l'absence d'infrastructures énergétiques, rendant l'extension du réseau électrique national techniquement difficile et économiquement coûteuse.

Dans ce contexte, l'option des systèmes hybrides autonomes apparaît comme une alternative réaliste, durable et adaptée aux spécificités locales. Ces systèmes, qui combinent plusieurs sources d'énergie – principalement le solaire photovoltaïque, l'éolien, le diesel et le stockage par batteries – permettent d'assurer une alimentation électrique fiable, continue et plus respectueuse de l'environnement. Ils réduisent la dépendance aux carburants fossiles, tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre.

Ce travail de recherche vise à concevoir, dimensionner et simuler un système hybride autonome pour l'alimentation en énergie électrique du village de Toundart, en exploitant au mieux les ressources naturelles disponibles (ensoleillement et vent). L'objectif est de proposer une solution techniquement fiable, économiquement viable et écologiquement soutenable. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel HOMER Pro, reconnu internationalement pour la modélisation et l'optimisation des systèmes hybrides. Ce logiciel permet de comparer différentes configurations en termes de coût, performance énergétique et impact environnemental, afin d'identifier la solution la plus adaptée.

La méthodologie adoptée s'appuie sur plusieurs étapes clés :

- L'analyse des données climatiques du site (irradiation solaire, vitesse du vent, température, etc.).
- L'estimation des charges électriques quotidiennes et annuelles, en fonction des besoins réels des habitants.
- La sélection des composants technologiques les plus adaptés (panneaux PV, éoliennes, générateur, batteries).
- La simulation des différentes combinaisons possibles à l'aide de HOMER Pro.
- L'analyse des résultats techniques et économiques (coût actualisé de l'énergie, coût net du système, taux de couverture, etc.).

Cette étude s'inscrit dans une démarche de transition énergétique qui ne vise pas uniquement à électrifier un village, mais à proposer un modèle reproductible, pouvant être appliqué à d'autres zones similaires dans le sud algérien, voire dans d'autres pays sahéliens.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

Chapitre 1 : Présentation des composantes techniques du système hybride (panneaux photovoltaïques, éolienne, groupe électrogène diesel, batteries), leur fonctionnement, et leur rôle dans la chaîne énergétique.

Chapitre 2 : Étude des caractéristiques climatiques et environnementales du site de Toundart, et évaluation du potentiel en ressources renouvelables.

Chapitre 3 : Dimensionnement optimal du système hybride et simulation des différentes configurations à l'aide de HOMER Pro.

Chapitre 4 : Évaluation technique, économique et environnementale du système retenu, avec une discussion sur sa faisabilité et son potentiel de répliation.

Enfin, une conclusion générale résumera les résultats obtenus, les enseignements tirés de l'étude, et proposera des perspectives d'amélioration, telles que l'intégration de nouvelles sources d'énergie (comme la biomasse ou l'hydrogène), l'optimisation de la gestion intelligente de la charge, ou encore la mise en place de micro-réseaux interconnectés.

Chapitre 1

Unités et composants du système hybride

1.1 Introduction :

Les ressources en énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et éolienne, représentent une solution durable et respectueuse de l'environnement pour la production d'électricité. Leur caractère inépuisable en fait une alternative stratégique aux énergies fossiles, notamment dans les régions isolées. Toutefois, leur exploitation se heurte à la variabilité des conditions météorologiques. Cette intermittence nécessite des systèmes de stockage et, parfois, l'intégration de sources d'appoint comme les générateurs diesel. Ce chapitre présente les différents composants d'un système hybride intégrant des sources d'énergie renouvelable (solaire et éolienne), un générateur diesel et un système de stockage. Il détaille le rôle et les interactions de ces unités dans une architecture visant à garantir une alimentation fiable et continue.

1.2 Système hybride :

1.2.1 Définition :

Un système hybride (SH) à sources d'énergie renouvelables associe plusieurs sources d'énergie, dont au moins une est renouvelable. Il peut fonctionner en mode autonome (isolé) ou connecté au réseau. Les SH comprennent souvent un dispositif de stockage pour pallier l'intermittence des sources renouvelables. [1]

La structure d'un système hybride dépend :

- de la présence d'une source conventionnelle (générateur diesel),
- d'un dispositif de stockage (batteries),
- du type de sources renouvelables (PV, éolien, etc.).

1.2.2 Classification :

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

1.2.2.1 Selon le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, fonctionnant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.

Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc. [1]

1.2.2.2 Selon la structure d'un système hybride :

La structure d'un système hybride peut être classée selon trois critères principaux [1] :

- Présence d'une source d'énergie conventionnelle :

La présence ou l'absence d'une source d'énergie classique constitue un critère fondamental. La source peut être un générateur diesel, une micro-turbine à gaz, ou même une centrale électrique complète dans le cadre de l'étude d'un réseau électrique intégré. Cette source assure un appoint en énergie en cas de défaillance des ressources renouvelables

- **Présence d'un dispositif de stockage :**

Un autre critère distinctif est la présence ou l'absence d'un dispositif de stockage d'énergie. Le stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques durant les périodes d'indisponibilité de la ressource primaire convertible en électricité. Les dispositifs de stockage incluent les batteries rechargeables, les électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, etc.

- **Type de sources d'énergies renouvelables utilisées :**

Le dernier critère de classification concerne les types de sources d'énergie renouvelables exploitées. La structure du système peut intégrer un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectriques ou utilisation des vagues), ou une combinaison de ces sources. Le potentiel énergétique disponible, qui dépend du lieu d'installation et du système hybride, est un critère important pour la sélection de la source utilisée. De plus, l'importance du consommateur électrique alimenté détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle, etc.

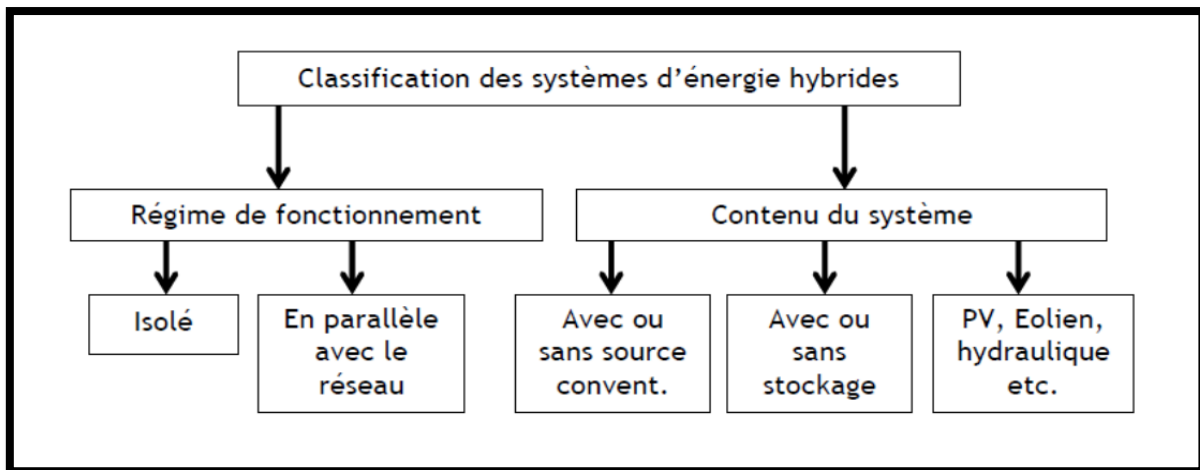


Figure 1.1 : Classification des systèmes hybrides d'énergies [1]

1.2.3 Différentes configurations de bus dans les systèmes hybrides :

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Trois configurations sont envisageables pour un système constitué de sources d'énergie renouvelable, de batteries et de générateurs diesels [2]

1.2.3.1 Architecture de bus CC :

Bus CC (courant continu) : Toutes les sources sont connectées à un bus commun en courant continu, puis converties en courant alternatif via un onduleur [2].

✚ Avantages :

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75% , 85 %.

✚ Inconvénients:

- 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.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge

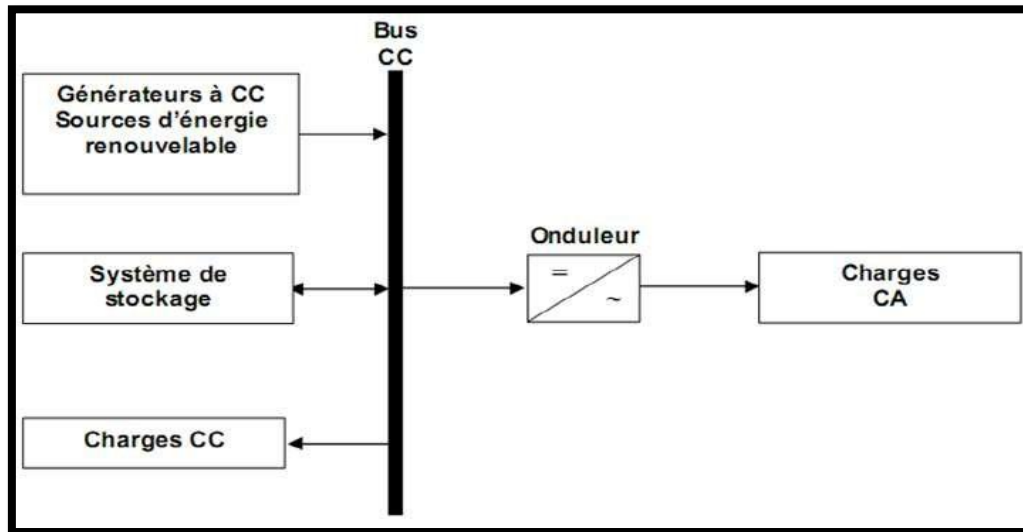


Figure 1.2 : Configuration des SEH à bus CC [2]

1.2.3.2 Architecture de bus CA :

Bus CA (courant alternatif) : Les sources sont converties individuellement en courant alternatif et reliées à un bus commun. Cela permet un fonctionnement indépendant mais augmente la complexité de commande et les pertes. Elle est particulièrement adaptée aux systèmes connectés au réseau électrique [2].

✚ Avantages :

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres .
- Le GD peut fixer la tension et la fréquence du bus (CA) .
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur) .
- Appareillage de connexion, bon marché et disponible facilement .
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence).

✚ Inconvénients :

- 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 .
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande

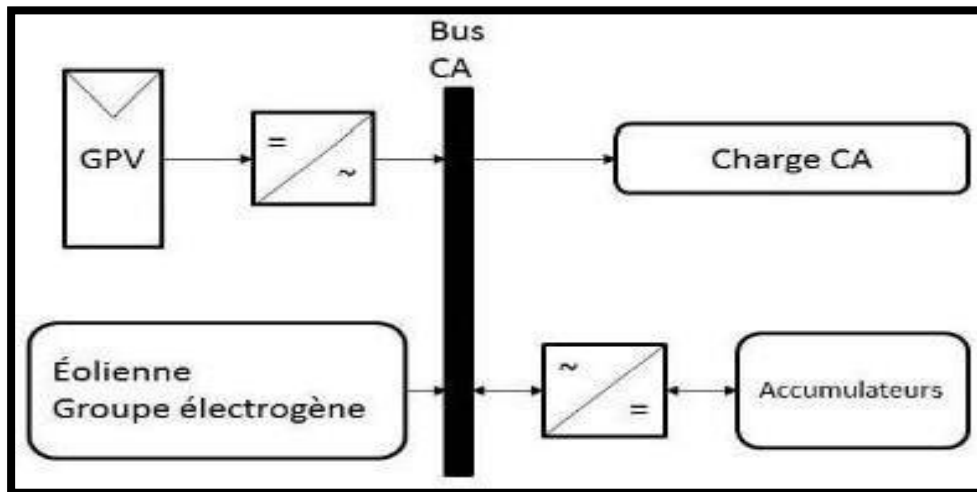


Figure 1.3 : Configuration du bus CA [2].

1.2.3.3 Architecture mixte de bus CC/CA :

C'est un système qui combine les avantages des deux configurations précédentes avec un convertisseur bidirectionnel entre les bus. Elle permet de réduire la taille des générateurs et onduleurs tout en gérant efficacement les pics de charge. [2]

✚ Avantages :

- Le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

✚ Inconvénients:

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du GD) [5]

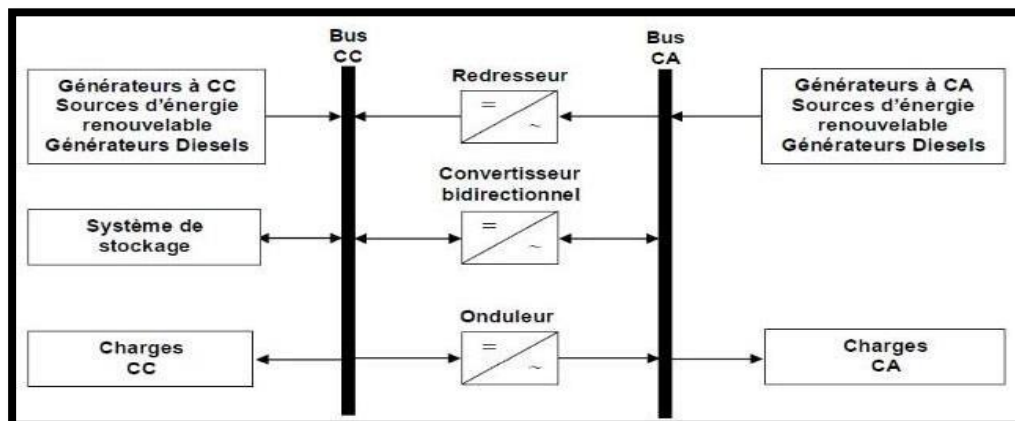


Figure 1.4 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA [2]

1.2.4 Avantages et inconvénients d'un système hybride :

L'intérêt essentiel d'utiliser les technologies d'hybridation est d'assurer l'énergie demandée par la charge sans interruption et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable. De plus, les technologies d'hybridation permettent de [3,4] :

- Lisser la puissance délivrée par les sources d'énergies : il s'agit d'être capable, de délivrer régulièrement des puissances supérieures à la puissance moyenne du générateur électrique ou de récupérer de l'énergie pour recharger la source de puissance.
- Palier pendant une durée limitée à l'incapacité partielle ou totale de la source d'énergie. Par exemple, si on prend le système hybride PV-Eolien qui est souvent utilisé, on remarque que le système PV fournit l'énergie pendant le jour où le rayonnement solaire est plus fort, par contre, le système éolien produit l'énergie dans la nuit où le vent peut souffler. De même, le vent souffle plus pendant l'hiver et l'automne et il diminue au printemps tandis que le rayonnement solaire le plus intense se situe pendant l'été. Cette complémentarité journalière et saisonnière des ressources solaires et éoliennes permet par exemple au site isolé d'avoir une disponibilité de l'énergie plus fiable.

Néanmoins, les technologies d'hybridation posent certains problèmes :

- La nature stochastique des sources d'énergie renouvelable : la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge.
- Le problème de l'interconnexion de plusieurs sources complique le système de contrôle : les technologies d'hybridation sont très complexes comparativement à l'utilisation d'une seule source.
- Le problème de la gestion énergétique : il est nécessaire de trouver un algorithme de contrôle efficace afin d'améliorer les performances globales du système.
- La dynamique des générateurs d'énergie renouvelable peut causer des problèmes dans le fonctionnement des SEH : par exemple le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée, dans ce cas la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur,
- la production de l'énergie électrique peut connaître des changements rapides : il en résulte des problèmes de qualité d'énergie (variations de tension et de fréquence) qui peuvent détruire des appareils électroniques sensibles et même l'arrêt complet du système.
- La durée de vie des composants d'un SEH : peut être beaucoup plus courte que la durée de vie des composants individuels

1.2.5 Etude des structures des systèmes hybrides :

1.2.5.1 Présentation du système hybride

Le système hybride de production d'énergie combine plusieurs sources d'énergie facilement mobilisables et complémentaires. Dans cette étude, nous nous intéressons à un système qui regroupe le photovoltaïque, l'éolien, le générateur diesel en appoint, et un stockage électrochimique pour garantir une production d'énergie stable et continue.

Ce système hybride est spécialement conçu pour alimenter des sites isolés dans des régions désertiques, où l'accès à l'électricité est limité. Notre étude porte particulièrement sur le village de Toundart, situé dans la commune de Tin Zaouatine, à l'extrême sud de l'Algérie, dans la wilaya de In Guezzam. Cette localité souffre d'un isolement énergétique marqué, ce qui en fait un cas d'application idéal pour les systèmes hybrides autonomes.

L'ajout du générateur diesel permet non seulement d'augmenter la fiabilité du système, en fournissant de l'énergie lorsque les conditions climatiques limitent la production solaire ou éolienne, mais aussi de réduire la taille des panneaux solaires et des éoliennes, ce qui permet de diminuer significativement les coûts d'installation et de maintenance. Le stockage dans des batteries permet de stocker l'énergie excédentaire produite pendant les périodes de forte production pour être utilisée lorsque la demande dépasse la capacité de production.

En somme, ce système hybride permet de fournir un service énergétique fiable et économique aux populations locales, tout en minimisant les coûts de production et en optimisant l'utilisation des ressources disponibles [5].

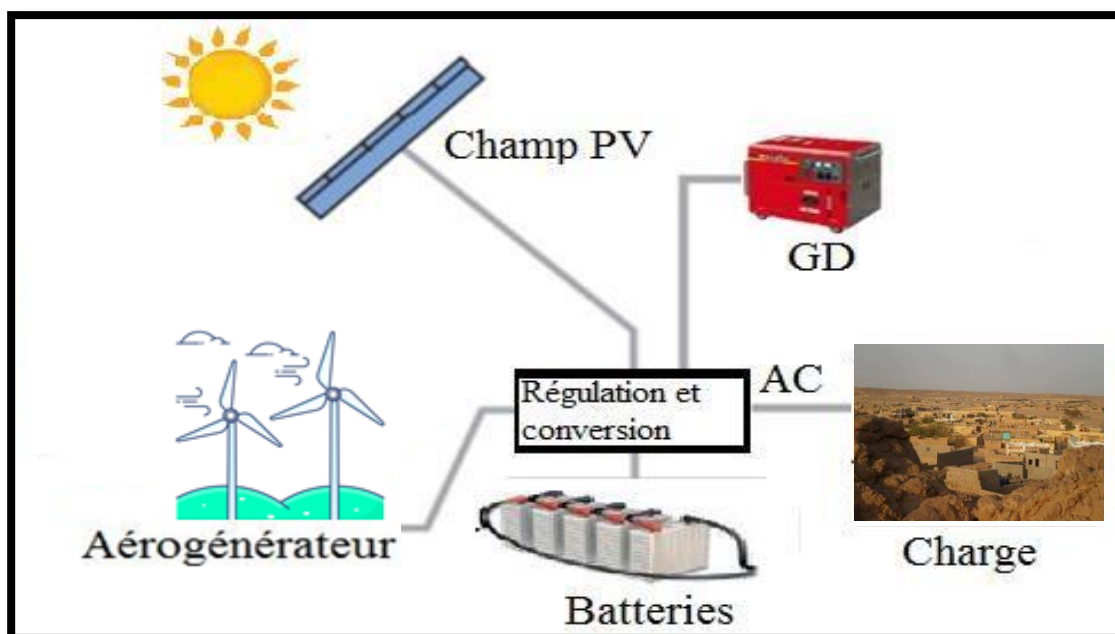


Figure 1.5 : Système solaire hybride

1.3 Unités et composants du SEH :

1.3.1 Systèmes photovoltaïques autonomes :

Système PV Autonome Un système photovoltaïque autonome convertit la lumière du soleil en électricité sans dépendre du réseau électrique national. Il est constitué de panneaux solaires qui captent l'énergie solaire, d'un contrôleur de charge qui gère la charge des batteries pour optimiser leur durée de vie, de batteries qui stockent l'énergie pour les périodes sans ensoleillement, et d'un onduleur qui convertit l'électricité en courant alternatif (AC) pour les appareils domestiques. En Algérie, ces systèmes sont particulièrement adaptés aux régions désertiques et montagneuses où le raccordement au réseau électrique est difficile [6]

1.3.2 Définition du panneau photovoltaïque :

Le panneau solaire ou champ solaire est un ensemble de modules photovoltaïques interconnectés, capables de convertir l'énergie lumineuse du soleil directement en électricité. Ces plaques sont assemblées sur un cadre métallique solide qui porte l'installation photovoltaïque à un angle précis permettant une exposition optimale. La production électrique générée par cet agencement de panneaux dépend de nombreux facteurs comme l'ensoleillement, la surface installée ou les caractéristiques techniques des modules. [7]

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des systèmes PV dépend de :

- La taille du panneau.
- L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal et presque nul la nuit ce qui nécessite un élément de stockage.



Figure 1.6 : Panneau solaire [7]

1.3.3 Le Principe fonctionnement d'un système photovoltaïque :

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est essentiel de connaître l'élément de base qui permet la conversion de l'énergie solaire en électricité [8,9]

Principe photovoltaïque

a. Jonction PN :

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dopé P (composé de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- jonction PN (homo-jonction) : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- une hétéro jonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée « zone de charge d'espace » créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul.

b. Production d'électricité

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. La puissance électrique résultant de cette conversion dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie spectrale. Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

c. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La naissance d'une différence de potentiel lorsque les porteurs de charges sont créés dans les environs de la jonction par excitation lumineuse, permet à la cellule de fonctionner comme un générateur électrique quand les deux faces de la cellule sont électriquement reliées à une charge, par exemple une résistance R

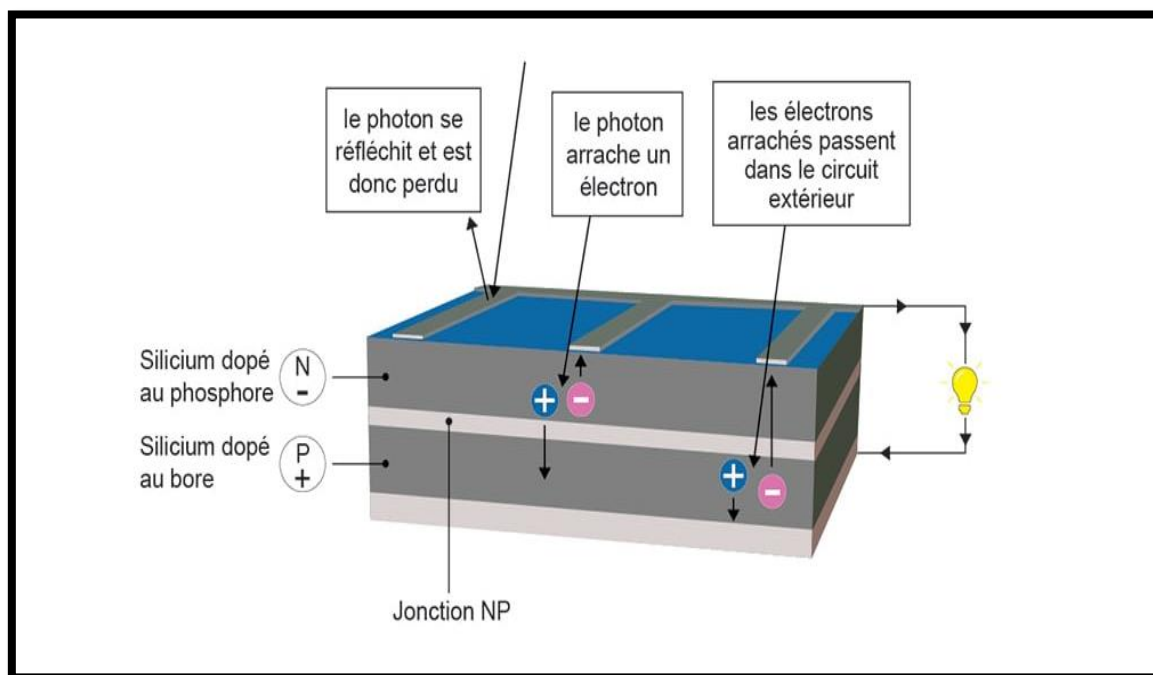


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV [9].

1.3.4 . Technologies des cellules PV :

Deux technologies de cellules photovoltaïques sont présentes majoritairement aujourd'hui sur le marché :

1. Cellules au silicium cristallin

- **Silicium monocristallin** : Ces cellules sont issues d'un seul cristal de silicium. Elles sont reconnaissables à leur couleur noire uniforme et offrent un rendement élevé, entre 18 % et 22 %. Elles sont toutefois plus coûteuses à produire.

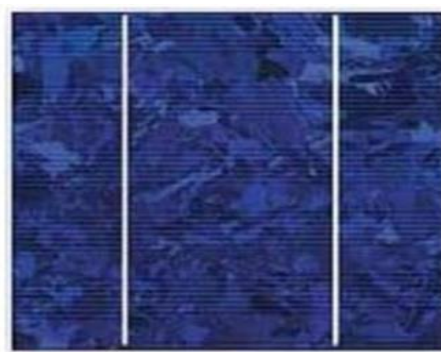
- **Silicium polycristallin** : Fabriquées à partir de multiples cristaux de silicium, elles sont généralement bleutées. Leur rendement est légèrement inférieur (14 % à 18 %), mais elles sont moins chères à produire que les cellules monocristallines.

2. Cellules à couches minces

- **Silicium amorphe** : Ces cellules sont réalisées par dépôt de couches très fines de silicium sur un support. Leur rendement est plus faible (6 % à 10 %), mais elles sont souples, légères et moins gourmandes en matériaux.
- **Autres technologies couches minces** : On trouve également des cellules à base de tellure de cadmium (CdTe) ou de cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS), qui offrent un bon compromis entre performance et coût dans certaines applications.



(a) Monocristallin



(b) polycristallin

Figure 1.8 : Cellules du silicium (a) monocristallin et (b) polycristallin [10]



Figure 1.9 : Cellule silicium amorphe. [10]

Sur ce qui suit la comparaison entre ces technologies :

Tableau 0.1 : Comparaison des différentes technologies photovoltaïques [10] :

Type de cellules	Silicium Mono Cristallin	Silicium Poly Cristallin	Silicium Amorphe (couche mince)
Rendement d'un module	18-22%	14-18%	6-10%
Part de marché	85%	85%	5%
Garantie de puissance	90% de puissance initiale pendant 10 ans 80% pendant 20 ans environ (selon le constructeur)		
Durée de vie	25-30ans	25-30ans	Environ 10 ans

Avantages	-Technologie connue et maîtrisée -Bon rendement -Durée de vie	-Technologie connue et maîtrisée -Bon rendement -Durée de vie -Moins cher que la technologie monocristalline	-Meilleur marché -Rendement moins affecté par un faible éclairage -Plus souples -Installation plus facile -Moins énergivore -Meilleure résistance à la température
Inconvénients	-Coûteuse -Faible Rendement sous faible éclairage	- Faible Rendement sous faible éclairage	- Faible Rendement sous faible éclairage - Durée de vie courte - Processus industriel pas encore optimal -Moins écologique que le cristallin

Le choix de la technologie dépend des contraintes économiques, spatiales et climatiques du site d'installation. Dans les systèmes hybrides isolés, le critère du rendement énergétique et de la durabilité prime souvent sur celui du coût initial.

1.3.5 . Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent d'évaluer les performances d'une cellule photovoltaïque. Ils sont déduits à partir de la caractéristique courant-tension I(V). Les principaux paramètres qui seront abordés dans ce chapitre sont [11] :

Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

$$I_{cc} = I_{cc,ref} * \frac{G}{G_{ref}} * [1 + \alpha_{Isc} * (T - T_{ref})] \quad 1.1$$

I_{cc} : Courant de court-circuit, c'est le courant produit par la cellule photovoltaïque lorsque la tension à ses bornes est nulle (en ampères, A).

$I_{cc,ref}$: Courant de court-circuit de référence, mesuré dans des conditions standards (irradiance de 1000 W/m² et température de 25°C).

G : Irradiance solaire instantanée reçue par la cellule (en watts par mètre carré, W/m²).

G_{ref} : Irradiance solaire de référence, généralement égale à 1000 W/m².

T : Température actuelle de la cellule photovoltaïque (en degrés Celsius, °C).

T_{ref} : Température de référence, généralement 25°C.

α_{Isc} : Coefficient de température du courant de court-circuit, exprimé en $1/^\circ\text{C}$. Il indique comment le courant varie avec la température

Tension de circuit ouvert (V_{co}) :

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [7].

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \cdot \log \left(\left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) + 1 \right) \quad 1.2$$

Avec :

V_{co} : Potentiel thermodynamique

K : Constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ J.K-1)

q : Charge d'un électron [C]

T_c : Température absolue [K]

I_s : Courant de saturation [A]

I_{ph} : Courant photonique

Facteur de forme (FF) :

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [22]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} \quad 1.3$$

Le rendement (η) :

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \quad 1.4$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

Paramètres influant sur la cellule PV :

Plusieurs paramètres influent sur les caractéristiques d'une cellule dont deux principales sont à dénombrer. Il s'agit du rayonnement solaire et de la température. Leurs influences seront explicitées dans le chapitre suivant.

1.3.6 Orientation et inclinaison des modules photovoltaïques :

1) Choix de l'orientation du module :

Dans l'hémisphère nord, les modules doivent idéalement être orientés vers le sud. Cette orientation permet de bénéficier du maximum d'ensoleillement tout au long de la journée. Des ajustements peuvent être faits selon la latitude du site. L'orientation est choisie vers le nord pour les sites de l'hémisphère Sud. [12]

2) Choix de l'inclinaison du module

Pour optimiser la production d'énergie, il est essentiel que la surface soit perpendiculaire aux rayons du soleil. Étant donné qu'il est compliqué d'ajuster l'inclinaison des panneaux plusieurs fois au cours de l'année, on opte généralement pour une valeur moyenne qui s'applique sur l'ensemble de l'année. [12]

Une mauvaise orientation ou inclinaison peut entraîner une baisse significative de la production. Il est donc crucial de les définir avec précision lors de la conception du système

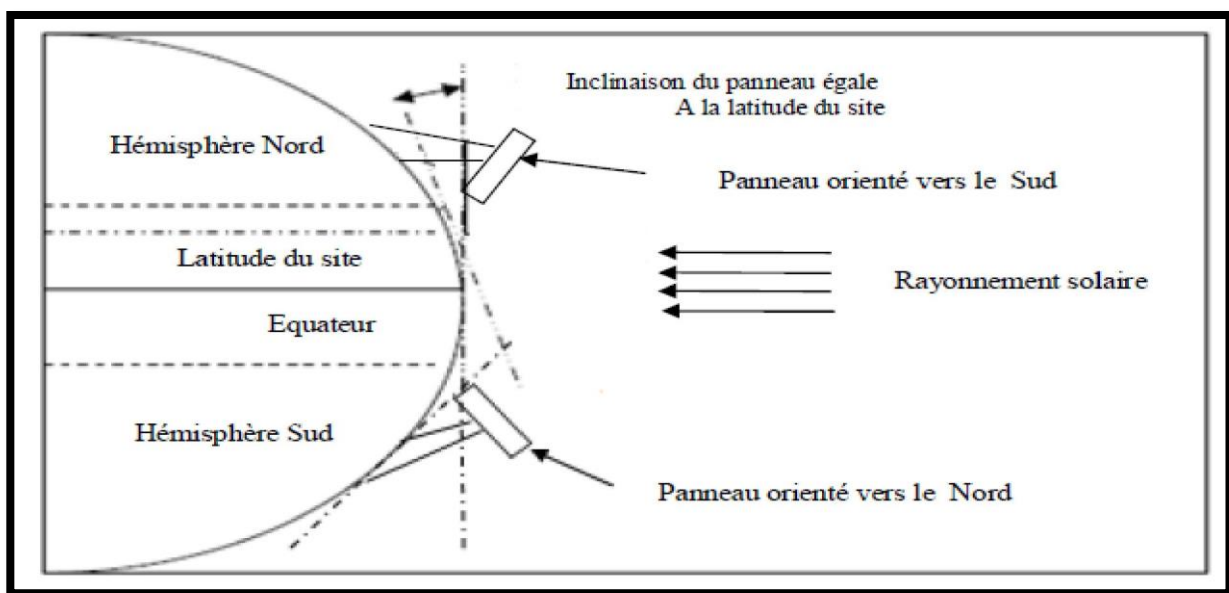


Figure 1.10 : Inclinaison du panneau solaire [12]

1.3.7 Association des modules photovoltaïques :

Pour atteindre la tension et la puissance souhaitées d'un champ photovoltaïque, les modules sont généralement connectés entre eux selon deux configurations fondamentales [13]:

1) Association en série :

Dans cette configuration, les modules sont connectés bout à bout. Le courant reste constant, tandis que la tension totale est la somme des tensions de chaque module.

Avantage : Permet d'atteindre rapidement une tension élevée.

Inconvénient : Si un seul module est ombragé ou défectueux, cela affecte toute la chaîne.

2) Association en parallèle :

Dans ce cas, les bornes positives des modules sont reliées entre elles, de même pour les bornes négatives. Le courant s'additionne, mais la tension reste constante.

Avantage : Moins sensible à l'ombrage ou à un dysfonctionnement localisé.

Inconvénient : Des courants plus élevés nécessitent des câbles et des protections adaptés.

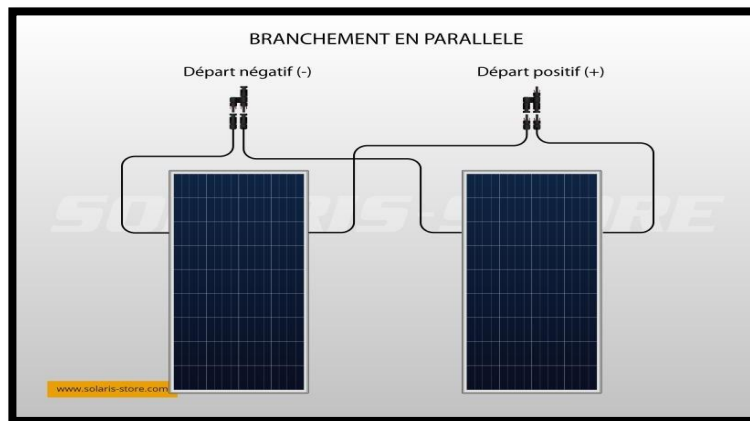


Figure 1.11 : Association en parallèle [13].

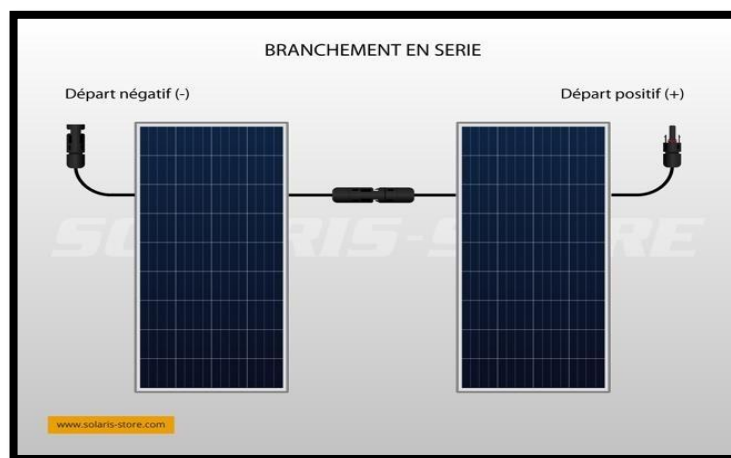


Figure 1.12 : Association en série [13]

3) Association mixte (série-parallèle)

C'est la combinaison des deux méthodes précédentes. Elle permet de construire des générateurs photovoltaïques répondant à des besoins spécifiques en tension et en courant.

Cette approche est couramment utilisée dans les systèmes hybrides pour adapter les caractéristiques du champ photovoltaïque aux exigences des convertisseurs, des régulateurs de charge et des batteries.

Un bon dimensionnement de l'association série/parallèle est crucial pour maximiser le rendement du système et éviter les déséquilibres de fonctionnement. [13]

1.3.8 Système de suivi solaire à deux axes (2-Axis Tracker) :

Il s'agit d'un système mécanique qui permet d'orienter automatiquement le panneau photovoltaïque en direction du soleil tout au long de la journée (est /ouest) et de l'année (été/ hiver), ce qui augmente la quantité de rayonnement solaire capté.

➤ **Le mouvement se fait selon deux axes :**

- a) Axe horizontal (azimut) : suivre le mouvement est-ouest du soleil au cours de la journée.
- b) Axe vertical (inclinaison) : ajuster l'angle selon la hauteur du soleil dans le ciel, variant selon l'heure et la saison.

✚ Avantages

- **Augmentation de la production** : jusqu'à 35 % d'énergie supplémentaire par rapport à une installation fixe.
- **Optimisation en continu** : orientation optimale assurée à chaque instant pour maximiser le rayonnement incident.
- **Particulièrement utile en zones à fort ensoleillement direct.**

✚ Inconvénients

- **Coût initial élevé** : l'investissement est supérieur à celui d'un système fixe ou à un axe.
- **Maintenance accrue** : les composants mécaniques (moteurs, vérins, capteurs) nécessitent un entretien régulier.
- **Consommation énergétique** : une petite partie de l'énergie produite est utilisée pour faire fonctionner le système.

1.3.9 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque :

✚ Avantages [14]:

- **Énergie propre et renouvelable** : Ils produisent de l'électricité à partir de l'énergie solaire, une source inépuisable et non polluante, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre
- **Réduction des coûts énergétiques** : Ils permettent de diminuer significativement les factures d'électricité, avec des économies pouvant atteindre 40 % ou plus en autoconsommation
- **Durabilité et longévité** : Les panneaux ont une durée de vie supérieure à 20-25 ans et sont majoritairement recyclables, ce qui en fait un investissement durable
- **Indépendance énergétique** : Ils offrent une autonomie vis-à-vis des fournisseurs d'électricité et protègent contre les fluctuations des prix de l'énergie
- **Modularité** : Adaptés à diverses tailles d'installation et conditions climatiques, ils conviennent aussi bien aux particuliers qu'aux installations industrielles

✚ Inconvénients [14] :

- **Dépendance à l'ensoleillement** : Leur rendement varie selon la météo et la localisation géographique, avec une production moindre les jours nuageux ou en hiver
- **Coûts initiaux élevés** : L'investissement de départ (achat, installation, équipements complémentaires) est souvent important, même si des aides existent⁴⁵.
- **Surface nécessaire** : Pour une production significative, une surface suffisante doit être disponible pour installer les panneaux

1.4 Système de stockage :

- **Batterie solaire**

Le stockage électrochimique repose sur le principe de transformation de l'énergie électrique en énergie chimique, puis sa reconversion lors du déchargement. Les batteries sont les dispositifs les plus couramment utilisés dans ce cadre.

Il représente plus du tiers du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique des énergies renouvelables. [15]



Figure 1.13 : Batterie solaire [15]

1.4.1 Définition

La batterie solaire est un dispositif électrochimique conçu pour stocker l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Elle joue un rôle crucial dans les systèmes autonomes ou hybrides en permettant une alimentation continue, même en l'absence de soleil. [16]

Divers types de batteries sont disponibles, notamment :

1. Batteries au plomb-acide (Pb-acide)

- **Caractéristiques** : Technologie mature, bon rendement, faible coût.
- **Inconvénients** : Durée de vie limitée, sensible aux décharges profondes, encombrantes.
- **Applications** : Très répandues dans les installations solaires autonomes de petite à moyenne taille.

2. Batteries au lithium-ion (Li-ion)

- **Caractéristiques** : Densité énergétique élevée, durée de vie plus longue, faible autodécharge.
- **Inconvénients** : Coût plus élevé, nécessite des systèmes de gestion (BMS).
- **Applications** : Utilisées dans les installations nécessitant une densité énergétique élevée.

3. Batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd)

- **Caractéristiques** : Robustes, bonne tolérance aux températures extrêmes.
- **Inconvénients** : Effet mémoire, toxicité du cadmium, moins utilisées aujourd'hui.
- **Applications** : Sites isolés, applications industrielles spécifiques.

4. Autres technologies émergentes

- **Flux redox** : Possibilité de stocker de grandes capacités d'énergie, indépendance entre puissance et capacité.

- **Sodium-soufre, lithium-fer-phosphate** : Alternatives en développement offrant de bonnes perspectives en matière de sécurité, de durée de vie et de coûts.

1.4.1.1 Les Critères de choix d'une batterie sont [17] :

Capacité :

La capacité d'une batterie est la quantité d'énergie que l'on peut stocker et que l'on peut restituer par celle-ci sous tension nominale; elle est exprimée en ampère-heure (Ah) ou kWh.

Rapports de chargement et déchargement :

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

La durée de vie :

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ses caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) . Tout dépend du type de technologie et des conditions d'utilisation

Profondeur de décharge (DOD) : Pourcentage de capacité utilisable pendant un cycle de charge/décharge sans détériorer la batterie

La tension d'utilisation :

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge, détermine la compatibilité avec le système électrique.

Le rendement :

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

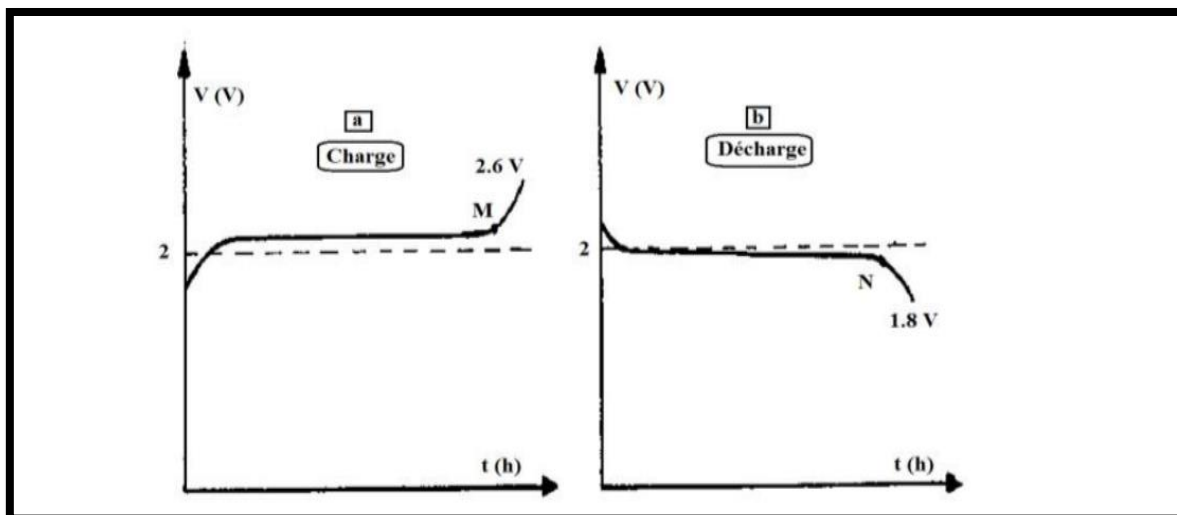


Figure 1.14 : caractéristique charge et décharge d'une batterie [16]

1.4.2 Groupement de batteries

Le groupement de batteries permet d'adapter la tension et la capacité du système de stockage aux besoins de l'installation. Deux types de connexions sont utilisés [17]:

➤ Connexion en série

- La tension totale est égale à la somme des tensions des batteries.
- Le courant reste identique à celui d'une batterie seule.
- Utilisée pour augmenter la tension du banc de batteries.

➤ Connexion en parallèle

- La tension reste constante (égale à celle d'une seule batterie).
- Le courant total est la somme des courants des batteries.
- Utilisée pour augmenter la capacité (autonomie) du système.

➤ Connexion série-parallèle

- Combine les deux types de connexions pour atteindre la tension et la capacité requises.
- Nécessite un équilibrage des batteries et une protection adéquate (fusibles, disjoncteurs).

Une attention particulière doit être portée à l'homogénéité des batteries (âge, capacité, état de charge) pour éviter les déséquilibres de fonctionnement.

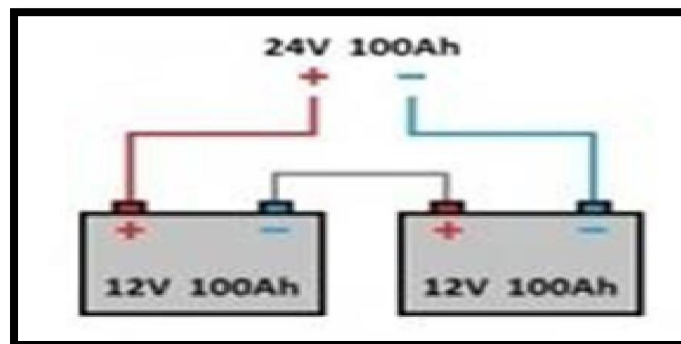


Figure 1.15 : Branchement des batteries en série [17]

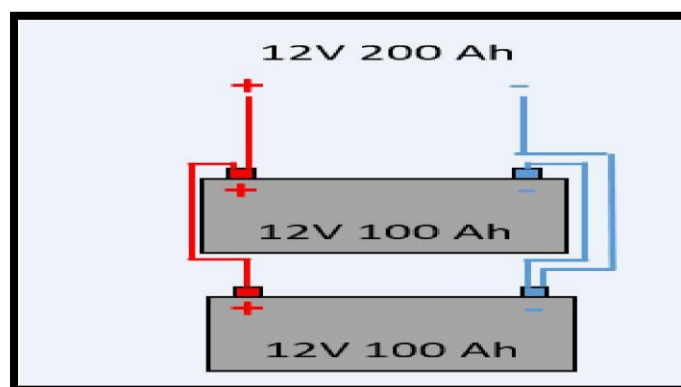


Figure 1.16 : blanchement des batteries en parallèle [17]

1.5 Le régulateur solaire

Le régulateur solaire, ou régulateur de charge, est un dispositif électronique indispensable dans un système photovoltaïque autonome. Il assure la gestion de l'énergie entre les panneaux solaires, la batterie et la charge [18].

Rôles principaux :

- **Protéger la batterie** contre les surcharges et les décharges profondes.
- **Optimiser la charge** en adaptant la tension et le courant selon l'état de la batterie.
- **Éviter les retours de courant** des batteries vers les panneaux durant la nuit.

1.5.1 Les différents types de régulateurs solaires :

- **PWM (Pulse Width Modulation) :**
 - Technologie simple et économique.
 - Efficace si la tension du panneau est proche de celle de la batterie.
 - Moins performante en cas de fort écart de tension.
- **MPPT (Maximum Power Point Tracking) :**
 - Plus sophistiqué et coûteux.
 - Permet d'exploiter la puissance maximale du panneau, même si la tension diffère de celle de la batterie.
 - Améliore le rendement global du système (jusqu'à +30 % par rapport au PWM).

Le choix entre ces deux types dépend des caractéristiques du champ photovoltaïque, du budget et des performances attendues. Le régulateur MPPT est recommandé pour les systèmes de moyenne à grande puissance ou en cas d'écart important entre la tension du générateur et celle de la batterie.

1.6 Convertisseur [19]:

Le convertisseur est un élément fondamental dans les systèmes hybrides, en particulier lorsque les charges nécessitent du courant alternatif (CA) alors que l'énergie est produite et stockée en courant continu (CC). Il permet la conversion de l'énergie entre différentes formes électriques (CC en CA, et parfois CA en CC). Dans les SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à courant alternatif

Il existe deux types de convertisseurs principaux :

- **Onduleur (inverter) :** Convertit le courant continu (provenant des panneaux ou des batteries) en courant alternatif pour alimenter les charges CA.
- **Redresseur (chargeur) :** Convertit le courant alternatif (réseau ou groupe électrogène) en courant continu pour charger les batteries.

Certains convertisseurs sont bidirectionnels et peuvent remplir ces deux fonctions de manière automatique, selon les besoins.

1.6.1 Les onduleurs

L'onduleur est le composant central du convertisseur dans un système photovoltaïque autonome ou hybride. Il joue un rôle clé dans la distribution de l'énergie et la stabilité du réseau local.

Rôles principaux :

- Convertir le courant continu (CC) en courant alternatif (CA) compatible avec les appareils électriques.
- Stabiliser la fréquence (souvent 50 Hz) et la tension (généralement 230 V ou 400 V selon le réseau).
- Garantir la synchronisation avec d'autres sources (groupe électrogène, réseau public).

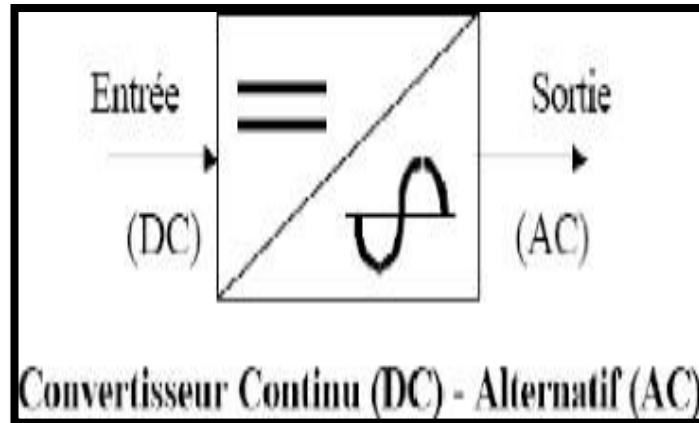


Figure 1.17 : schéma de principe de l'onduleur [20]



Figure 1.18 : Onduleur solaire [20]

Types d'onduleurs :

- **Onduleur autonome (off-grid)** : Conçu pour fonctionner indépendamment du réseau. Il alimente les charges directement à partir de la batterie ou des panneaux.
- **Onduleur hybride** : Combine les fonctions d'un onduleur autonome et connecté au réseau. Il peut gérer plusieurs sources et optimiser l'utilisation de l'énergie solaire.
- **Onduleur réseau (on-grid)** : Utilisé pour injecter l'électricité produite dans le réseau public. Il nécessite une connexion réseau et une synchronisation stricte.

Critères de choix d'un onduleur :

- **Puissance nominale** : Doit être adaptée à la charge maximale attendue.
- **Rendement** : Plus le rendement est élevé, moins il y a de pertes par conversion.

- **Ondulation de sortie** : Qualité du signal sinusoïdal délivré (pure sinus recommandée).
- **Fonctionnalités supplémentaires** : Interface de communication, priorisation des sources, fonctions de sauvegarde, etc.

Le choix de l'onduleur dépend du type de système envisagé (autonome, hybride ou connecté au réseau), des besoins en alimentation, et des performances souhaitées.

1.6.2 Câblage de système :

Le câblage électrique constitue un élément fondamental dans la conception et le bon fonctionnement d'un système hybride. Une installation mal câblée peut entraîner des pertes d'énergie, des échauffements excessifs, voire des risques d'incendie. [20]

- **Câblage des panneaux solaires** : Les panneaux solaires sont généralement câblés en série pour augmenter la tension de sortie. Cela signifie que les bornes positives de chaque panneau sont connectées aux bornes négatives du panneau suivant, créant ainsi une chaîne de panneaux solaires. Le câblage doit être protégé contre les intempéries et les dommages mécaniques.
- **Câblage du régulateur de charge** : Le régulateur de charge est un élément clé de l'installation photovoltaïque, car il protège la batterie contre la surcharge ou la décharge excessive. Le régulateur de charge est généralement câblé entre les panneaux solaires et la batterie, et doit être dimensionné en fonction de la puissance des panneaux solaires.
- **Câblage de la batterie** : La batterie doit être câblée avec des câbles de grosseur suffisante pour supporter la charge électrique. Les bornes de la batterie doivent être protégées contre les courts-circuits et les surcharges.
- **Câblage de l'onduleur** : L'onduleur convertit le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif utilisable pour alimenter les appareils électriques. L'onduleur doit être connecté à la batterie et aux circuits électriques de l'installation.

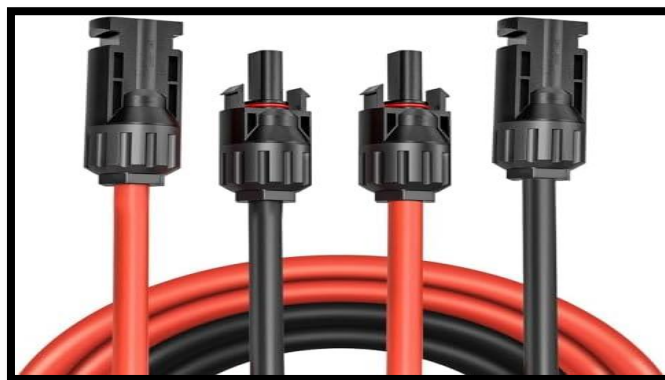


Figure 1.19 : les câbles d'installation solaire [20]

Un câblage bien conçu participe non seulement à l'efficacité énergétique du système, mais également à sa durabilité et sa sécurité globale.

1.7 Système éolien :

1.7.1 Définition d'un aérogénérateur :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est une composante importante dans les systèmes hybrides, notamment lorsqu'il s'agit de diversifier les sources d'énergie renouvelable. Il permet de produire de l'électricité à partir de l'énergie cinétique du vent à l'aide d'une éolienne, réduisant ainsi la dépendance aux générateurs thermiques et améliorant la fiabilité globale du système. [21]

.Les différents types d'aérogénérateurs :

Les éoliennes sont principalement classées en deux catégories, en fonction de l'orientation de leur axe de rotation :

1. Eolienne à axe vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines).

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible .

- **Avantages :**
 - Pas besoin d'orientation.
 - Fonctionne bien en milieu urbain ou avec des vents turbulents.
- **Inconvénients :**
 - Rendement inférieur à celui des éoliennes à axe horizontal.
 - Départ difficile à basse vitesse.

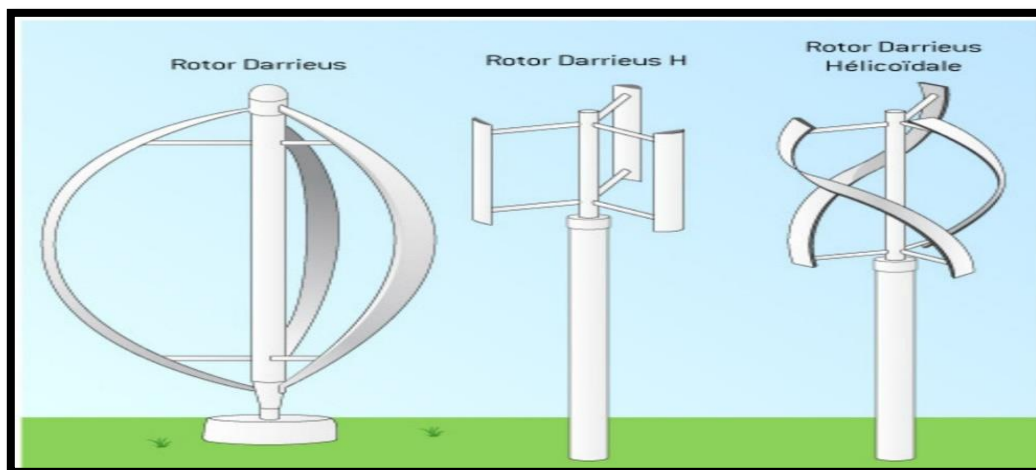


Figure 1.20 : Eolienne à axe vertical (VAWT - Vertical Axis Wind Turbines) [21]

2. Eolienne à axe horizontal (HAWT - Horizontal Axis Wind Turbines)

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent, l'axe de rotation est parallèle au sol. Les pales sont disposées en hélice et orientées face au vent. Dans ce cas. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3.

- **Avantages :**
 - Haut rendement dans des zones à vents réguliers.
 - Technologie mature et largement utilisée.
- **Inconvénients :**
 - Sensibilité aux turbulences.
 - Nécessite un système d'orientation (yaw) pour suivre le vent.



Figure 1.21 : Eolienne à axe horizontal [22]

Le choix d'un type d'aérogénérateur dépend principalement des conditions de vent du site, des besoins énergétiques et des contraintes d'installation (espace, réglementation, bruit, etc.).

1.7.2 Composants d'un aérogénérateur

Un aérogénérateur est composé de plusieurs éléments mécaniques et électriques assurant la conversion de l'énergie du vent en électricité utilisable. Les composants principaux sont [22]:

- **Pales** : Captent l'énergie cinétique du vent et la transmettent au rotor. Leur forme aérodynamique est optimisée pour maximiser la rotation.
- **Moyeu (hub)** : Connecte les pales à l'arbre principal. Il peut être fixe ou inclure un système de pas variable pour ajuster l'angle des pales.
- **Arbre (arbre lent)** : Transmet la rotation du moyeu au multiplicateur ou directement au générateur.
- **Multiplicateur de vitesse** : (absent dans les systèmes à entraînement direct) Augmente la vitesse de rotation pour l'adapter aux exigences du générateur.
- **Générateur électrique** : Convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Il peut être synchrone ou asynchrone, à aimants permanents ou bobinages.
- **Système d'orientation (yaw)** : Permet à la nacelle de suivre la direction du vent (présent dans les éoliennes à axe horizontal).
- **Freins** : Mécaniques et/ou électriques, utilisés pour stopper l'éolienne en cas de vent fort ou de maintenance.
- **Mât ou tour** : Supporte la nacelle et permet d'élever les pales à une hauteur favorable au vent.

- **Système de contrôle** : Surveille les conditions de fonctionnement (vent, vitesse, tension, température) et optimise la production tout en assurant la sécurité.

La figure : met en avant les différents constituants d'une éolienne.

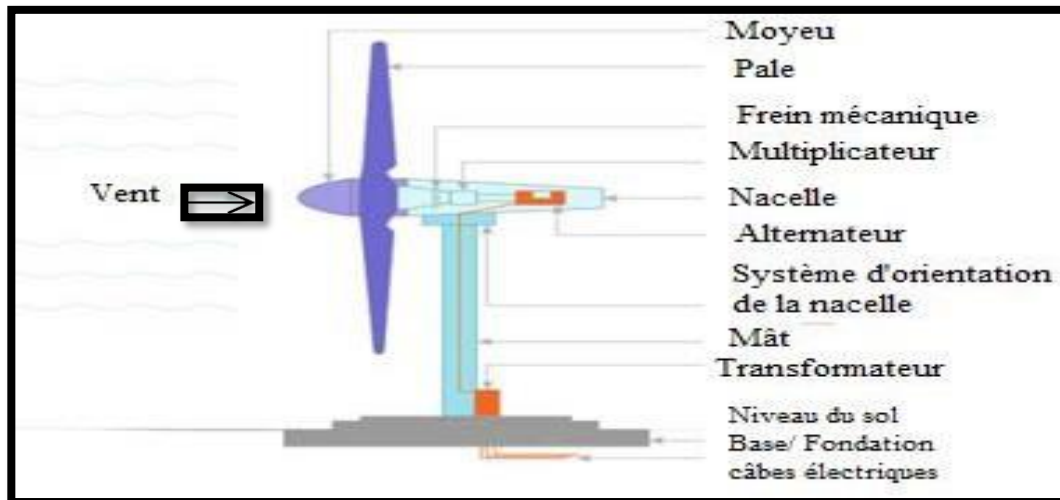


Figure 1.22 : Composition d'une éolienne [23].

1.7.3 Avantages et les Inconvénients de l'énergie éolienne [24] :

✚ Avantages

- **Réduction des émissions de CO₂** : L'énergie éolienne ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet.
- **Source renouvelable** : L'énergie du vent est gratuite et inépuisable.
- Le peu d'accidents fatals enregistrés dans le monde de l'industrie éolienne sont liés aux travaux de construction et de maintenance.
- **Complémentarité avec le solaire** : Dans de nombreuses régions, le vent souffle plus la nuit ou en hiver, ce qui équilibre la production.
- **Faibles coûts d'exploitation** : Une fois installées, les éoliennes ont des coûts de maintenance relativement bas
- Les éoliennes occupent peu de terrain.

➤ Inconvénients :

- **Intermittence** : La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.
- **Impact visuel et sonore** : Certaines installations peuvent être perçues comme nuisibles pour le paysage et produire du bruit.
- **Nécessite un site adapté** : Un bon gisement éolien est indispensable.
- **Investissement initial élevé** : Notamment pour les grandes installations.
- **Effets environnementaux potentiels** : Risques pour la faune aviaire et perturbations locales.

1.8 Générateur diesel :

Le générateur diesel est souvent utilisé comme source d'appoint dans un système hybride (SH). Il permet de compenser les défaillances des sources renouvelables (absence de soleil ou de vent) et d'assurer la continuité d'alimentation. [25]

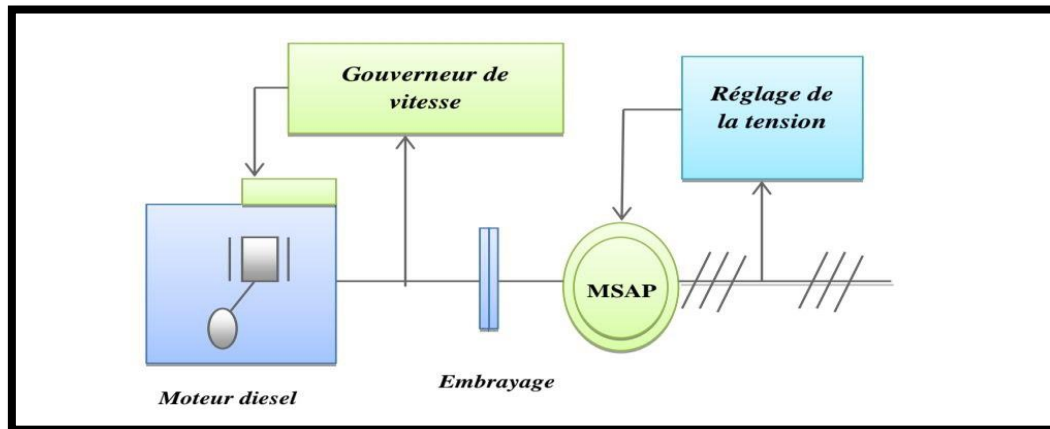


Figure 1.23 : Configuration du générateur diesel [25].

Avantages

- **Fiabilité** : Fonctionne de manière prévisible quelle que soit la météo.
- **Autonomie énergétique** : Peut fonctionner seul ou en soutien des sources renouvelables.
- **Réactivité** : Capable de répondre rapidement à une demande en énergie.

Inconvénients

- **Consommation de carburant fossile** : Émet du CO₂ et des polluants.
- **Entretien régulier** : Nécessite vidanges, filtres, contrôles mécaniques.
- **Coût de fonctionnement élevé** : Lié au prix du carburant et à la maintenance.
- **Nuisances sonores** : Les générateurs sont souvent bruyants, surtout les modèles standards.

L'intégration d'un générateur diesel dans un système hybride doit être optimisée pour limiter son fonctionnement aux seules périodes nécessaires, afin de réduire son impact économique et environnemental

1.8.1 Réserve tournante

La réserve tournante est une capacité de puissance disponible immédiatement, sans délai de démarrage, pour faire face à des variations soudaines de la charge ou à la défaillance d'une source. Dans un système hybride, cela signifie souvent maintenir en marche un générateur GD à faible charge, prêt à augmenter sa puissance si nécessaire. Une réserve d'énergie doit toujours être disponible pour éviter l'effondrement du système lors d'une réduction soudaine de la production d'énergie renouvelable. [25]

1.8.2 Temps de fonctionnement minimal

Cette stratégie consiste à maintenir le GD en fonctionnement pendant une durée minimale prédéfinie en fonction de la variabilité de la charge ou de la variabilité de l'énergie renouvelable. Cette stratégie est utilisée pour réduire le cycle démarrage/arrêt du générateur diesel, lorsque la différence de puissance entre celle consommée par la charge et l'énergie produite par le générateur d'énergie renouvelable varie largement. La

minimisation du cycle démarrage/arrêt du générateur diesel permet d'éviter l'usure des moteurs diesels et du démarreur, et par la même occasion permet d'économiser le carburant. [25]

1.8.3 Hystérésis (surplus minimal)

Il s'agit d'une stratégie fréquemment employée pour gérer l'arrêt du générateur diesel. Celui-ci ne s'arrête que lorsque la puissance fournie par les sources renouvelables dépasse la demande de la charge. Ce seuil minimal d'énergie excédentaire, appelé hystérésis, peut être évalué de deux manières selon le type de régulation utilisé :

- Si le générateur utilise un régulateur de type proportionnel (P), l'hystérésis peut être déduite de la variation de la fréquence du réseau qu'il impose.
- Avec un régulateur de type proportionnel-intégral (PI), elle peut être mesurée à partir du niveau de charge du générateur

Cette méthode permet de limiter les cycles d'allumage et d'extinction trop fréquents, tout en assurant une utilisation efficace de l'énergie renouvelable disponible. [25]

1.9 Charges du système

Les charges représentent l'ensemble des équipements et dispositifs qui consomment l'énergie produite par le système hybride. Elles peuvent être très variées en fonction du contexte d'utilisation (domestique, industriel, rural isolé, etc.).

Dans notre cas les charges sont constituées d'éléments de consommation de chaque ménage (lampes, charge de batteries, ordinateurs, télévision et autres...).

Un dimensionnement correct des charges est essentiel pour assurer l'efficacité, la fiabilité et la longévité du système hybride.

1.10 Système de supervision

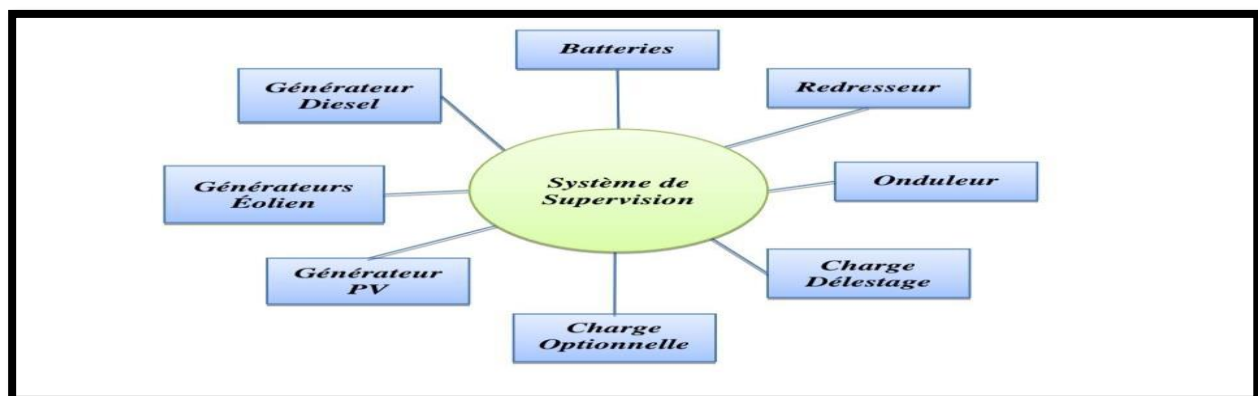


Figure 1.24 : Système de supervision [26].

Le système de supervision, souvent appelé **EMS (Energy Management System)**, est l'unité centrale de contrôle du système hybride. Il supervise, régule et optimise le fonctionnement des différentes sources d'énergie, du stockage et des charges. En effet Les régulateurs de batteries, par exemple, incluent souvent un système de commande pour éviter les décharges profondes et les surcharges des batteries. Les réseaux multi-diesel peuvent utiliser des méthodes relativement sophistiquées pour gérer les générateurs diesel et règlent le flux de puissance. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système.

On peut citer quelques exemples de commandes intégrées, tels que le gouverneur de vitesse sur le moteur diesel, le régulateur de tension sur le générateur synchrone du diesel ou la commande de l'éolienne. Un autre type de commande plus global, permet la surveillance de certains ou de tous les composants (figure 1.24). Ce système de surveillance est d'habitude automatique. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesel, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour différents types de charges envisageables pour un système constitué de sources d'énergie renouvelable, de batteries et de générateurs diesels. [26]

1.11 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH

Les systèmes énergétiques hybrides (SEH) présentent de nombreux avantages, mais leur fonctionnement n'est pas exempt de difficultés. Parmi les problèmes fréquemment rencontrés, on distingue [27] :

- **Intermittence des sources renouvelables** : Variabilité du solaire et de l'éolien, nécessitant un dimensionnement rigoureux du stockage.
- **Gestion des sources multiples** : Coordination complexe entre les différentes unités de production (photovoltaïque, éolien, diesel).
- **Surproduction** : En période de faible consommation, la production excédentaire peut entraîner une perte d'énergie si elle n'est pas bien gérée
- Fonctionnement intermittent des générateurs diesel : démarrages et arrêts fréquents causant une usure prématurée des moteurs et des démarreurs, ainsi que des risques de coupure si la production renouvelable chute plus vite que le temps de démarrage.
- Coûts supplémentaires liés aux systèmes de commande additionnels (charges de délestage, contrôle de la qualité de la tension), pouvant remettre en question la rentabilité globale du système hybride.
- Risques de surtensions causées par des courts-circuits, l'arrêt brusque de charges importantes ou la connexion soudaine de bancs de condensateurs.
- Perturbations du réseau : défauts électriques pouvant provoquer l'arrêt des systèmes ou endommager des composants.

Une conception rigoureuse, associée à des algorithmes de contrôle performants, est nécessaire pour anticiper et pallier ces limitations.

Commande des SEH :

Le problème principal dans la commande de SEH est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, malgré les grandes variations de l'énergie produite, tout en maintenant la fréquence et la tension du bus à CA dans des limites acceptables. Les variations de la production sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables. Deux aspects principaux doivent être pris en compte dans la commande du SEH [25] :

1. La stratégie de fonctionnement, qui implique des décisions liées au flux d'énergie à l'échelle de plusieurs heures ou jours et des actions pour améliorer le fonctionnement du système,

2. La qualité de l'énergie, à l'échelle des secondes ou millisecondes. Cela concerne la stabilité de la fréquence et de la tension, les protections, etc.

L'objectif est d'assurer un équilibre permanent entre production, stockage et demande, tout en minimisant les coûts et les pertes.

1.12 Pourquoi opter pour un système hybride ?

Le recours à un système hybride présente plusieurs avantages stratégiques, notamment dans les contextes isolés ou mal desservis par le réseau électrique conventionnel [27]:

- Une réduction significative de la consommation de carburant, et donc des coûts d'exploitation.
- Une meilleure autonomie énergétique et une moindre dépendance à l'énergie fossile, dans les zones rurales et isolées.
- Des difficultés d'approvisionnement en carburant, particulièrement dans les régions éloignées.
- Une continuité d'approvisionnement grâce à la diversification des sources et au stockage d'énergie.
- Une diminution des émissions de gaz à effet de serre, favorisant la protection de l'environnement en réduisant les émissions de CO₂
- Une prolongation de la durée de vie des équipements, en réduisant le temps de fonctionnement des générateurs
- Une réduction des nuisances sonores, notamment grâce au fonctionnement silencieux du solaire et des batteries.
- Une contribution au développement durable local et à l'amélioration des conditions de vie dans les zones reculées.

Ainsi, le recours à un système hybride constitue une solution efficace et durable pour électrifier les zones rurales, en prenant en compte les dimensions économique, environnementale et sociale.

1.13 Conclusion :

Ce chapitre a permis de passer en revue les composants clés des SEH, leurs configurations possibles, ainsi que les stratégies de gestion et de commande adaptées. Toutefois, la réussite d'un projet de système hybride dépend de plusieurs facteurs : un dimensionnement rigoureux, une connaissance précise du profil de charge, une évaluation réaliste du potentiel renouvelable et des ressources disponibles. Avec l'évolution constante des technologies, notamment dans le domaine du stockage et de l'intelligence embarquée, les SEH s'annoncent comme une voie d'avenir incontournable pour répondre aux enjeux énergétiques du 21^e siècle.

Les éléments présentés dans ce chapitre serviront de base pour le dimensionnement détaillé du système étudié dans les chapitres suivants.

Chapitre 2
Présentation et évaluation des données
météorologiques du site

2.1 Introduction :

Dans le cadre du développement de solutions durables pour la production d'énergie, le recours aux systèmes photovoltaïques autonomes s'impose comme une alternative pertinente, notamment dans les régions isolées ou mal desservies par le réseau électrique. Le dimensionnement optimal de ce type d'installation repose sur une évaluation rigoureuse des ressources énergétiques renouvelables locales, en particulier le rayonnement solaire et le potentiel éolien.

Ce chapitre présente et analyse les ressources naturelles disponibles sur le site d'étude, situé à Tin-Zaouatine, une région saharienne bénéficiant d'un ensoleillement abondant et, dans certains cas, de régimes de vents exploitables. L'analyse des données climatiques, telles que l'irradiation solaire et la vitesse du vent, constitue une étape fondamentale pour garantir la performance, la fiabilité et la rentabilité du système envisagé, qu'il soit purement solaire ou intégré dans une configuration hybride. [28]

2.2 Présentation du site d'étude :

La région de Tin-Zaouatine constitue un site à fort potentiel pour l'implantation d'un système hybride de production d'énergie renouvelable. Elle bénéficie d'un niveau d'irradiation solaire élevé, ce qui en fait l'une des régions les plus prometteuses pour le solaire. De plus, les vitesses moyennes du vent y sont favorables à l'exploitation de l'énergie éolienne. Ces conditions font de Tin-Zaouatine un site stratégique pour le développement de solutions énergétiques durables, notamment pour les zones isolées. [28]

2.2.1 Données géographiques :

La commune de Tin-Zaouatine, rattachée administrativement à la wilaya d'In Guezzam, dispose de caractéristiques géographiques et climatiques favorables au développement des énergies renouvelables. Située à l'extrême nord-ouest de la chaîne de l'Adrar des Ifoghas, elle culmine à une altitude de 630 mètres. Sa population est estimée à environ 20 000 habitants.

Le climat y est aride, chaud et extrêmement sec, avec des températures élevées tout au long de l'année et un fort taux d'ensoleillement, conditions idéales pour l'exploitation solaire. Les rares précipitations se concentrent principalement durant les mois d'août et septembre. [28]



Figure 2.1 : Localisation de la région Tin-zaouatine [28]

Les coordonnées géographiques du site d'implantation du projet sont :

Tableau 2.1 :Données géographiques obtenues avec HOMER Pro.

Caractéristiques	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
Site			
Tin-Zaouatine	2.58	19.57	630

2.2.2 Données météorologiques :

L'exploitation des données météorologiques permet d'évaluer précisément le potentiel solaire et éolien du site, ainsi que l'impact de la température sur les performances du système photovoltaïque. Ces données sont indispensables pour le dimensionnement optimal des composants du système, notamment :

- la taille et la capacité des équipements,
- la puissance nécessaire pour couvrir la demande,
- les coûts d'investissement et de maintenance.

2.2.2.1 Irradiation solaire :

Les données extraites du logiciel HOMER Pro présentées dans le tableau et le graphique suivants représentent les variations mensuelles de l'irradiation solaire dans la ville de Tin-Zaouatine.

Tableau 2.2 : Radiation solaire moyenne

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m ² /day)
Jan	0.614	4.600
Feb	0.679	5.760
Mar	0.696	6.710
Apr	0.711	7.480
May	0.699	7.620
Jun	0.670	7.360
Jul	0.673	7.340
Aug	0.662	7.030
Sep	0.668	6.620
Oct	0.686	6.030
Nov	0.660	5.080
Dec	0.616	4.410



Figure 2.2 : Évolution de l'ensoleillement mensuelle superposé à l'indice de clarté.

Les données obtenues montrent une irradiation solaire très favorable, mensuellement variant entre 4,41 et 7,62 kWh/m²/jour, avec une moyenne annuelle de 6,34 kWh/m²/jour.

Il y a une grande variation du rayonnement solaire tout au long de l'année, car les valeurs de rayonnement atteignent leur pic en mai et diminuent à leurs niveaux les plus bas en décembre.

Valeurs maximales et minimales

Les pics d'irradiation sont enregistrés en mai (7,620 kWh / m² / jour), tandis que décembre présente les valeurs les plus basses (4,410 kWh / m² / jour).

Ces variations saisonnières sont importantes à considérer lors de la conception du système.

Indice de clarté

l'indice de clarté (K_t) est souvent calculé la proportion du rayonnement solaire global qui atteint le sol par rapport au rayonnement solaire extraterrestre (c'est-à-dire ce que recevrait le site sans atmosphère). Sa valeur varie généralement entre 0 (ciel très couvert) et 1 (ciel parfaitement clair). Par exemple, un indice proche de 0,2 indique une forte couverture nuageuse, tandis qu'un indice proche de 1 correspond à un ciel clair.

Cet indice permet d'estimer l'état de l'atmosphère et d'adapter les modèles de calcul du rayonnement solaire, notamment pour dimensionner et optimiser les systèmes photovoltaïques ou thermiques

La Formule simplifiée :

$$K_t = \frac{G}{G_o} \quad 2.1$$

G : irradiation solaire globale reçue au sol (sur une surface horizontale) [kWh.m⁻².j⁻¹].

G_o : irradiation solaire extraterrestre reçue au sommet de l'atmosphère, pour la même période [kWh.m⁻².j⁻¹].

Dans notre cas, l'indice de clarté (K_t), oscillant entre 0,614 et 0,711, des valeurs proches de 1 traduisant un ciel clair, propice à une production solaire optimale

La variation du rayonnement solaire durant toute la journée est également visible à partir de la figure (2.3) où on constate que le lever du soleil se fait entre 5h00 et 7h00 et que le coucher, quant à lui, se fait entre 18h00 et 19h00. Ce qui signifie que l'irradiation solaire dure environ 12h avec un pic autour de 13h.

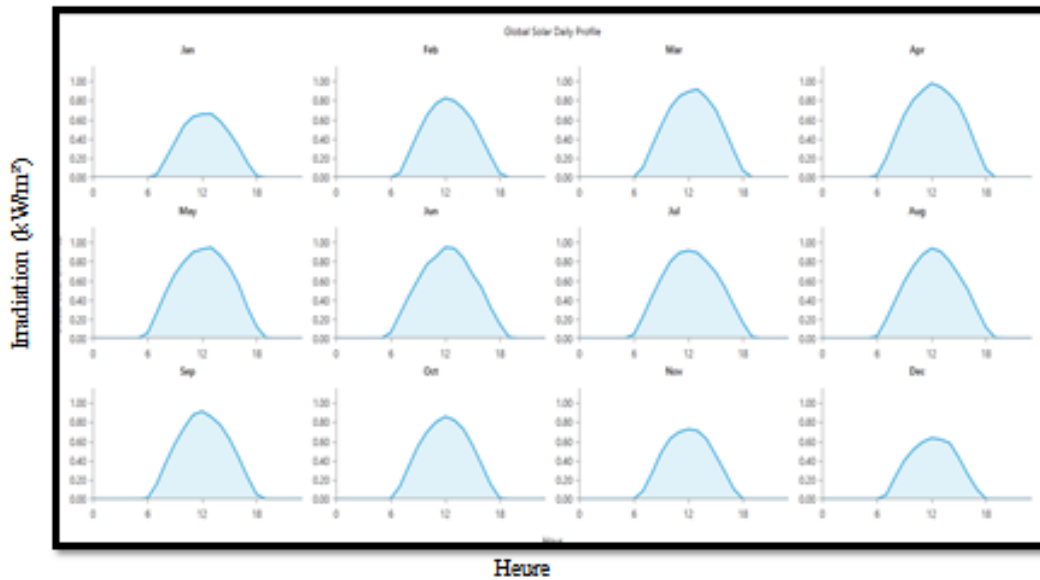


Figure 2.3 : Profil de l'éclairement pour tous les mois en fonction du temps

2.2.2.2 Effet de l'éclairement sur les caractéristiques d'une cellule solaire [29,30]:

Le rayonnement solaire constitue l'un des paramètres physiques fondamentaux influençant directement les performances des cellules photovoltaïques, notamment en ce qui concerne le rendement et la puissance électrique maximale délivrée. En effet, lorsque l'intensité lumineuse augmente, le courant de court-circuit (**I_{cc}**) croît de manière proportionnelle, tandis que la tension en circuit ouvert (**V_{oc}**) varie beaucoup plus faiblement.

La figure 2.4 suivante illustre les courbes courant-tension (I-V) obtenues sous différentes conditions d'éclairement. Elle met également en évidence les points de puissance maximale (Maximum Power Points) associés à chaque niveau d'irradiation, ce qui permet d'analyser le comportement de la cellule solaire en fonction des variations d'éclairement.

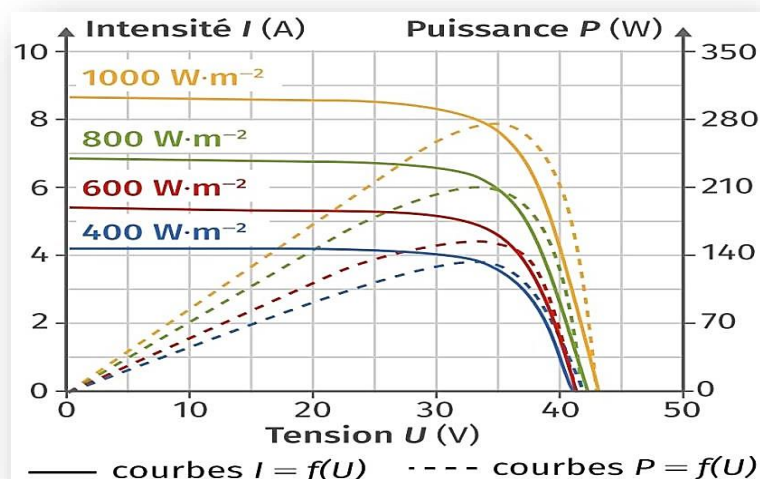


Figure 2.4 : Effets de l'éclairement sur la cellule PV [30].

Sur cette figure, on remarque que le courant et la puissance sont directement proportionnels au rayonnement solaire. Par contre, la tension est relativement peu dégradée. On en déduit donc que la cellule peut fournir une tension acceptable, même à faible éclairage.

Les cellules au **silicium amorphe** présentent de meilleures performances en conditions de faible luminosité, comparées aux technologies monocristallines ou polycristallines. Cela les rend intéressantes pour les environnements à ensoleillement variable ou diffus.

2.2.2.3 Données de la température

La température est un paramètre clé dans l'évaluation du rendement d'un système photovoltaïque. Les données présentées dans le tableau et le graphique indiquent que la région de Tin-Aouatine bénéficie d'un climat relativement chaud avec une variation saisonnière marquée. La température moyenne annuelle (26,71 °C) montre que le climat varie entre modéré et chaud. Le schéma de variation thermique suit les saisons de l'hémisphère nord, les mois d'été (juin à août) étant les plus chauds, tandis que les températures baissent en hiver (décembre à février).

Tableau 2.3 Relevé de la température moyenne:

Month	Daily Temperature (°C)
Jan	16.190
Feb	19.250
Mar	23.720
Apr	28.610
May	32.440
Jun	34.310
Jul	33.490
Aug	32.540
Sep	31.520
Oct	28.080
Nov	22.570

Annual Average (°C): 26.71

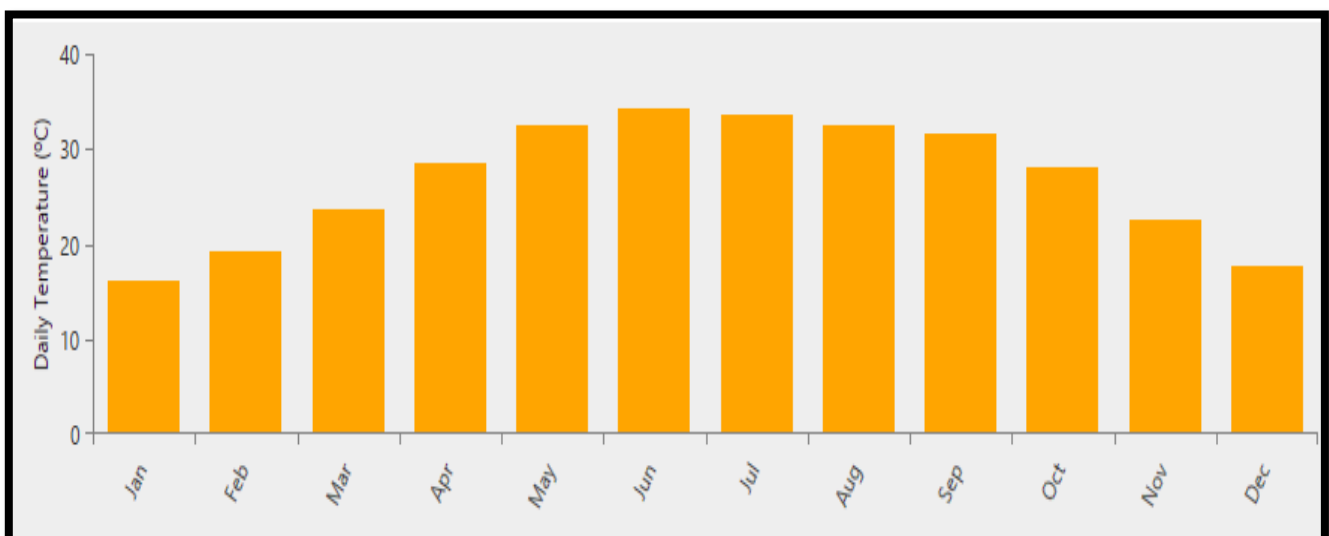


Figure 2.5 : l'évolution des températures mensuelles moyennes de la région de Tin-Zaouatine

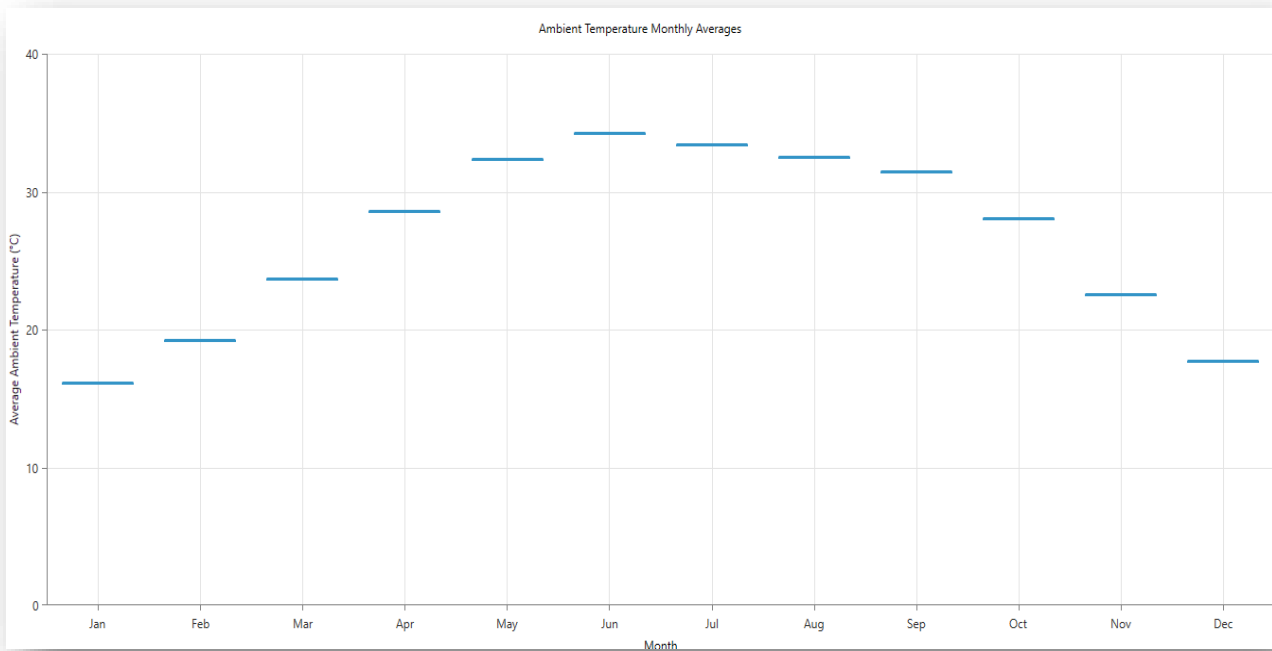


Figure 2.6 : Moyennes Mensuelles de la température ambiante

▪ **évaluation des résultats de température mensuelle moyenne :**

Les mois d'hiver (décembre, janvier et février) enregistrent les températures moyennes les plus basses, allant d'environ 16.2 °C en janvier à 19.3 °C en février.

Au printemps (mars, avril et mai), on observe une augmentation progressive des températures. Elles débutent à 23.7 °C en mars et atteignent un maximum de 32.4 °C en mai. L'augmentation entre avril (28.6 °C) et mai est particulièrement notable.

L'été (juin, juillet et août) est la période la plus chaude, avec des températures moyennes qui se stabilisent entre le début et le milieu des années 30 (°C). Juin affiche une moyenne de 34.3 °C, juillet est légèrement plus bas à 33.5 °C, et août reste chaud à 32.5 °C.

L'automne (septembre, octobre et novembre) est marqué par une diminution graduelle des températures. Septembre commence à 31.5 °C, descendant à 28.1 °C en octobre et chutant davantage à 22.6 °C en novembre.

L'évaluation de ces résultats indique un profil de température typique d'une région désertique avec des saisons bien définies, caractérisée par un été chaud et un hiver doux.

les données présentées illustrent clairement les variations mensuelles moyennes de température, soulignant une différence significative entre les températures estivales et hivernales, avec une tendance au réchauffement au printemps et au refroidissement en automne. La température annuelle moyenne fournit un point central pour comprendre le climat général de la région.

2.2.2.4 Effets de la température sur les caractéristiques d'une cellule solaire [2] :

La température ambiante joue un rôle significatif dans le comportement électrique des cellules photovoltaïques. Lorsqu'elle augmente, elle affecte principalement la tension de sortie de la cellule, ce qui entraîne une baisse de la puissance générée.

Pour connaître la courbe caractéristique d'une cellule solaire, on part de la caractéristique d'une diode au silicium (jonction P-N dans l'obscurité) et on prend ensuite en compte l'illumination. On obtient alors la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s(e^{U/t} - 1) \quad 2.2$$

Avec

I_s : Courant de saturation de la diode.

I_p : Photocourant .

U : Tension imposée à la diode.

$$U/t = K \cdot \frac{T}{q} \quad 2.3$$

$K = 1,38 \times 10^{-23}$ constante de Boltzmann

$q = 1,602 \times 10^{-19}$ charge de l'électron[C].

T : Température absolue [K].

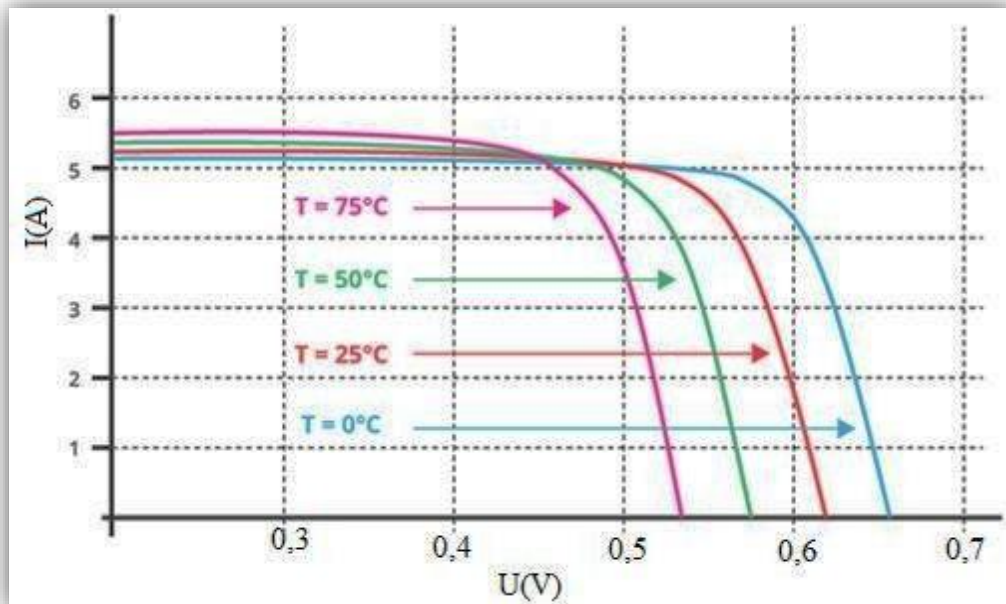


Figure 2.7 : Figure : Effet de la température sur la cellule

Selon la figure 2.7 On observe que la température de la cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Par contre, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable.

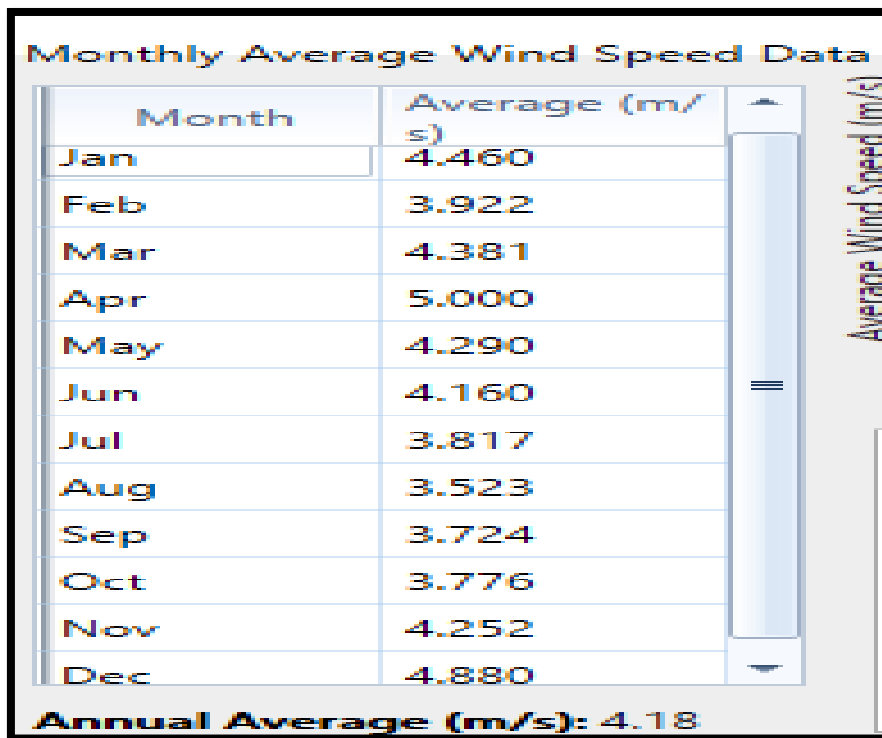
Plus la température de la cellule augmente, plus la tension à vide de celle-ci diminue. La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même règle s'applique sur la puissance : plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue. En conclusion, la température est un paramètre déterminant qui influence directement la capacité de production des modules solaires, et son impact doit être intégré à toute étude de faisabilité ou de conception d'un système photovoltaïque efficace.

2.2.2.5 Potentiel éolien :

L'analyse du potentiel éolien est essentielle pour envisager l'intégration d'une production d'énergie complémentaire à celle du photovoltaïque, notamment dans le cadre d'un système hybride.

D'après les données issues du logiciel HOMER Pro, la vitesse moyenne annuelle du vent à Tin-Zaouatine est estimée à 4,18 m/s. Cette valeur indique un potentiel modéré, mais exploitable dans certaines conditions, notamment avec des aérogénérateurs à démarrage à basse vitesse. Les données de la vitesse du vent sont présentées sous forme de tableau suivant :

Tableau 2.4 : Vitesses moyenne du vent



Month	Average (m/s)
Jan	4.460
Feb	3.922
Mar	4.381
Apr	5.000
May	4.290
Jun	4.160
Jul	3.817
Aug	3.523
Sep	3.724
Oct	3.776
Nov	4.252
Dec	4.880

Annual Average (m/s): 4.18

Homer permet aussi la représentation du profil de la vitesse pendant tous les jours de l'année comme présenté sur la figure 2.8 suivante.

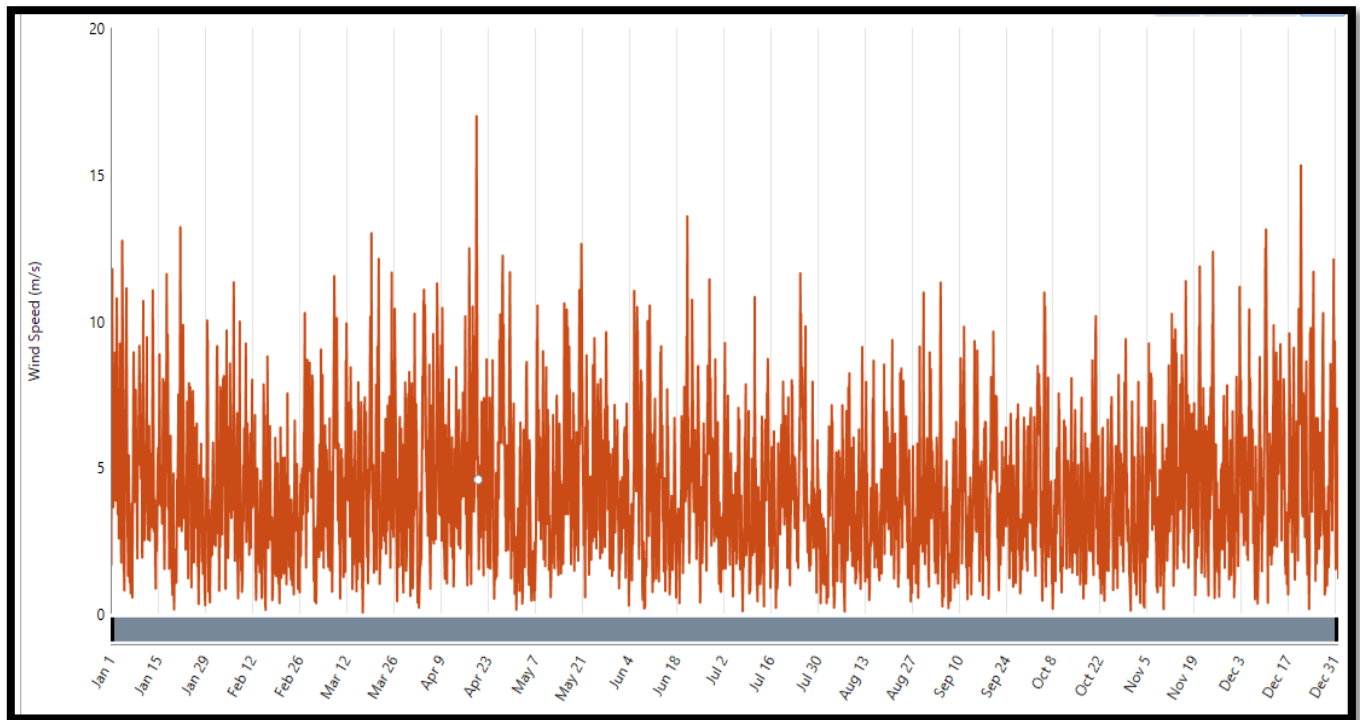


Figure 2.8 : Evolution journalière de la vitesse moyenne du vent

Cette figure confirme que les périodes ventées se situent en d'avril 17m/s , et décembre enregistrent les vitesses moyennes les plus élevées

Analyse des résultats :

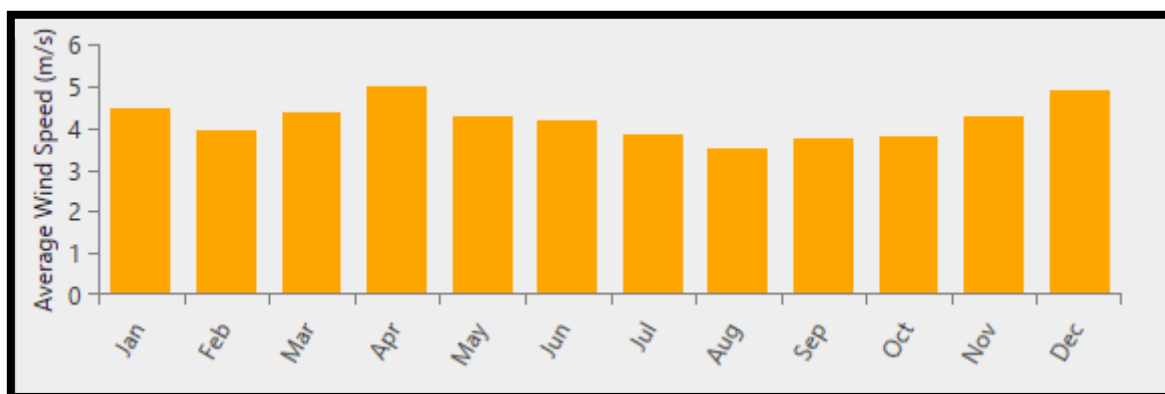


Figure 2.9 Évolutions mensuelle et annuelle de la vitesse moyenne du vent

La figure 2.8 met en évidence la variation de la vitesse moyenne du vent tout au long de l'année :

Les mois d'avril et de décembre enregistrent les vitesses moyennes les plus élevées, atteignant près de 5 m/s, ce qui indique une activité éolienne plus marquée pendant ces périodes.

En revanche, le mois d'août affiche la vitesse moyenne la plus basse, avoisinant 4 m/s, ce qui traduit une période de calme relatif.

La vitesse moyenne du vent reste globalement stable au fil des mois, avec une variation principalement entre 4 et 5 m/s.

Cette figure montre une tendance saisonnière claire : le vent est généralement plus fort en hiver et au printemps, et plus calme en été.

▪ **La distribution de Weibull :**

La distribution de Weibull est la plus utilisée dans la littérature, elle peut être utilisée pour décrire les variations du vent dans un régime, avec un niveau de précision acceptable. C'est d'ailleurs la seule méthode recommandée pour déterminer le potentiel éolien. Cette distribution régie par l'équation 2.3 admet deux paramètres [31] :

$$f(v) = \left(\frac{k}{v}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} - \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad 2.4$$

$$c = \frac{v}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad 2.5$$

k : Paramètre de forme

c : Paramètre d'échelle [m.s⁻¹] ;

v : Vitesse de vent [m.s⁻¹] ;

f(v) = Fonction de distribution de la vitesse du vent.

HOMER s'appuie sur cette loi pour répartir la vitesse du vent d'un site en différentes classes .

HOMER permet non seulement le calcul des paramètres de forme et d'échelle (k et c), mais aussi la mise en évidence de la distribution du vent pour un site donné à partir des données relatives à la vitesse du vent qui sont fonction de la hauteur à laquelle l'anémomètre est placé par rapport au sol.

Pour le site considéré Tin-Zaouatine avec un anémomètre situé à 10 m du sol on a :

Les paramètres sont présentés dans la figure :

v : La vitesse moyenne du vent (v_{moy} = 5 ,96 m.s⁻¹) .

(k) : Le facteur de forme de la distribution de Weibull (k=2) .

c :Le facteur d'échelle de la distribution de Weibull (6.73 m.s⁻¹) .

r :Le facteur d'autocorrélation (r=0,85) .

Le modèle de force journalier (δ=0,25) .

L'heure du pic de la vitesse du vent (φ=15h).

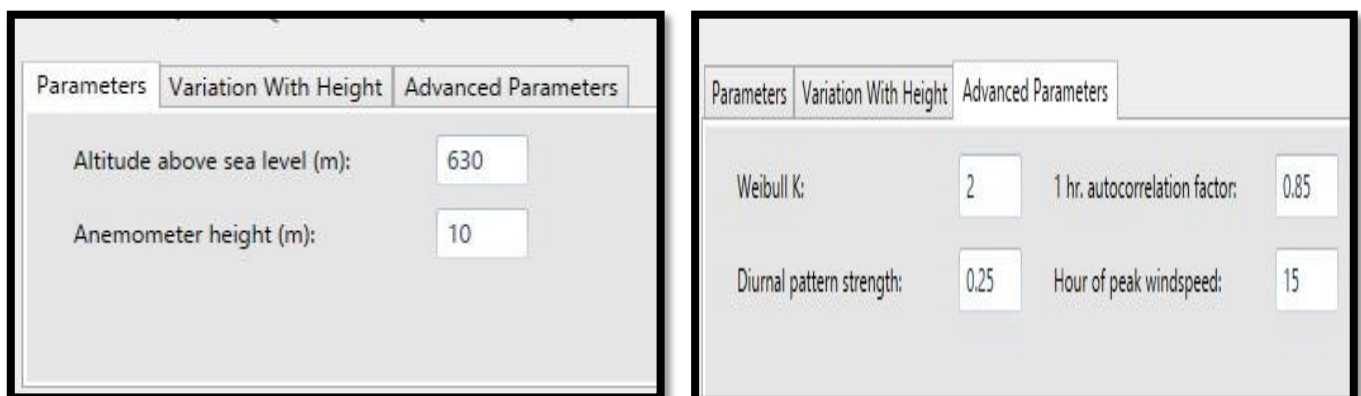


Figure 2.10 : Les paramètres de vent

Les données de HOMER Pro révèlent une vitesse moyenne annuelle de 4,18 m/s. Les mois d'avril et décembre présentent des vitesses maximales (jusqu'à 17 m/s), tandis qu'août est le mois le moins venteux. L'analyse de la distribution de Weibull (k = 2, c = 6,73 m/s) confirme ce potentiel exploitable.

2.3 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'évaluer les conditions climatiques spécifiques au site de Tin-Zaouatine, en mettant l'accent sur les principaux paramètres influençant la performance d'un système de production d'énergie renouvelable. L'analyse détaillée de l'irradiation solaire, de la température ambiante et du potentiel éolien montre que la région bénéficie d'un excellent ensoleillement, combiné à un gisement éolien modéré mais exploitable.

Ces caractéristiques confirment la faisabilité de la mise en œuvre d'un système énergétique hybride, combinant photovoltaïque, éolien et éventuellement stockage. Une telle solution permettrait d'assurer une alimentation électrique stable, fiable et durable pour répondre aux besoins de la population locale tout en réduisant la dépendance aux sources fossiles. Les données météorologiques analysées dans ce chapitre constituent ainsi une base solide pour le dimensionnement technique et économique du système envisagé.

Chapitre 03
**Dimensionnement et simulation du système
hybride**

3.1 Introduction

Le dimensionnement optimal des systèmes énergétiques hybrides constitue un défi technique majeur, nécessitant l'analyse de multiples variables interdépendantes. HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources Professional) est l'une des plateformes de référence pour la modélisation de tels systèmes, car elle permet d'évaluer simultanément les aspects techniques et économiques des configurations combinant sources renouvelables et conventionnelles.

Dans ce chapitre, nous proposons une étude théorique de la faisabilité technique d'un système hybride à l'aide de HOMER Pro, afin d'analyser et d'optimiser différentes configurations en fonction des conditions météorologiques locales et des charges électriques estimées. Nous étudierons un système hybride **PV/Éolien/Diesel avec stockage par batteries**, conçu pour satisfaire la demande électrique de **30 habitations** dans le village de Toundart, commune de Tin Zaouatine, wilaya d'In Guezzam, au sud de l'Algérie. Les données climatiques (vent, rayonnement solaire et température) ont été extraites de la base météorologique intégrée à HOMER Pro, fournissant ainsi une base fiable pour l'optimisation du système énergétique destiné à l'électrification rurale de cette zone isolée.

3.2 Présentation de l'outil de simulation (HOMER) :

HOMER Pro est un logiciel développé par **UL Solutions**, reconnu comme le standard mondial pour l'optimisation des micro-réseaux dans divers secteurs : électrification de villages isolés, services publics insulaires, campus universitaires et bases militaires. Son objectif est d'identifier les solutions électriques les plus économiques qui respectent les exigences techniques, grâce à des simulations d'ingénierie couplées à une analyse économique rigoureuse.

Initialement conçu par le **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, HOMER Pro bénéficie d'une solide base scientifique. Son adoption mondiale, avec plus de **250 000 utilisateurs répartis dans 193 pays**, témoigne de sa robustesse et de sa fiabilité. [32]

3.2.1 Critères de choix de HOMER [2]

Le choix de HOMER Pro repose sur plusieurs critères essentiels :

- Facilité d'utilisation (langue) et interface conviviale;
- Accessibilité (prix raisonnable, disponibilité sur Internet);
- Capacité à simuler des systèmes hybrides connectés ou hors réseau dans plusieurs pays;
- Possibilité d'analyse économique détaillée et d'optimisation technico-économique

3.2.2 Fonctionnalités principales de HOMER Pro :

Homer Pro permet de réaliser des simulations, des analyses détaillées et d'optimiser les systèmes obtenus [34]

Tableau 3.1 : Les fonctions de HOMER Pro

Fonction	Description
1. Simulation	<ul style="list-style-type: none">- HOMER Pro peut simuler un ou plusieurs systèmes.- Il utilise un pas de temps allant d'une minute à une heure sur une année.- À chaque pas, il compare la demande en électricité et chaleur à l'énergie disponible.- Il détermine la faisabilité technique de chaque configuration.- Il calcule le rendement énergétique, le coût du système et le pourcentage d'émissions de gaz à effet de serre.
2. Optimisation	<ul style="list-style-type: none">- Après simulation, HOMER optimise les systèmes simulés.- Il trie et filtre les systèmes selon les critères définis.- Par défaut, il les trie selon le Coût Présent Net (CPN).
3. Comparaison des configurations	<ul style="list-style-type: none">- Il est possible de comparer plusieurs configurations pour un même système.- Le logiciel simule chaque configuration et identifie la moins coûteuse.- L'objectif est de trouver le système optimal au niveau du coût.
4. Analyse de sensibilité	<ul style="list-style-type: none">- On peut tester les variations des paramètres (coût des technologies, ressources, etc.).- Permet de vérifier si la solution optimale reste valide malgré les changements.- Plusieurs analyses peuvent être réalisées en quelques minutes.

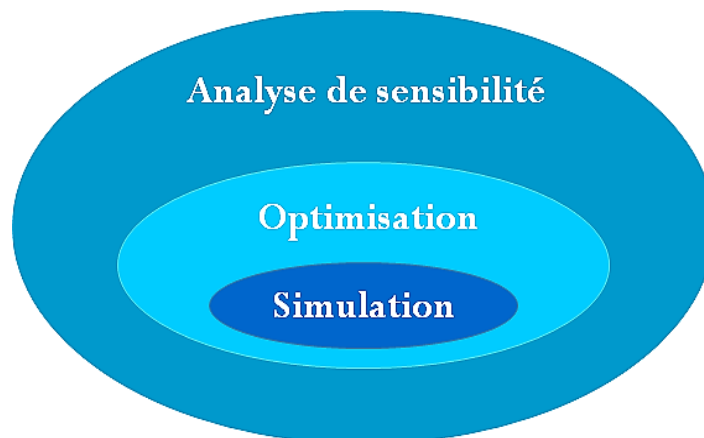


Figure 3.1 : Opérations du HOMER. [34]

3.2.3 Méthodologie d'utilisation de HOMER Pro :

Tableau 3.2 : les étapes de simulation avec leurs représentations visuelles

Étape 1

Création d'un nouveau projet :

Lancer HOMER Pro, cliquez sur 'Nouveau Projet' et renseignez les informations de base telles que le nom du projet, la localisation géographique et l'unité monétaire.

Name: Systeme hybride_Autonomie
Author: NE_RANIA-université de hassiba ben boualli_Chlef
Description: Ce projet consiste à dimensionner un système hybride autonome pour l'électrification d'un village isolé sans accès au réseau national. Le système étudié combine l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne, un générateur diesel et un système de stockage par batteries. L'objectif principal est de concevoir une solution fiable, durable et à faible coût, en optimisant la production d'énergie renouvelable et en réduisant au maximum l'utilisation du diesel. Le logiciel HOMER Pro est utilisé pour simuler plusieurs configurations et identifier la meilleure option technico-économique.
 Systeme hybride_Autonomie

Map: XX5C+J38, Tin Zautoutine, Algeria (19°57.5'N , 2°58.2'E)
 Location Search: (UTC+01:00) Afrique centrale - C

Financial Parameters:
 Discount rate (%): 8.00
 Inflation rate (%): 2.00
 Annual capacity shortage (%): 0.00
 Project lifetime (years): 25.00

Étape 2

Définition de la charge électrique :

Accédez à l'onglet 'Loads' pour définir les profils de consommation électrique. Vous pouvez importer des données mesurées ou créer des profils horaires.

ELECTRIC LOAD Name: LA CHARGE Year to model: 2020

January Profile:

Hour	Load (kW)
0	6.450
1	6.450
2	6.450
3	6.450
4	6.450
5	6.450
6	6.900
7	7.000
8	30.000
9	24.900

Daily Profile: Bar chart showing load (kW) over 24 hours.

Seasonal Profile: Box plot showing load (kW) distribution for each month (Jan to Dec).

Yearly Profile: Heatmap showing load (kW) over 365 days.

Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/day)	500.07	600
Average(kW)	20.84	25
Peak (kW)	145.8	174.94
Load factor	.14	.14

Load Type: AC DC

Time Step Size: 60 minutes
 Random Variability: Day-to-day (%): 10, Timestep (%): 20
 Peak Month: None

Scaled Annual Average (kWh/day): 600.00

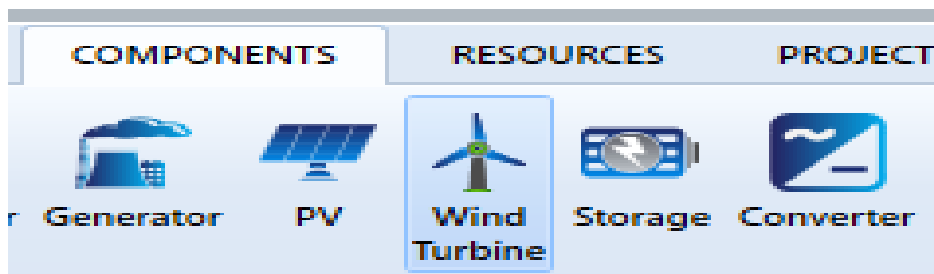
Efficiency (Advanced): Efficiency multiplier: 1, Capital cost (\$): 0, Lifetime (yr): 10

Buttons: Plot..., Export...

Etape 3

Ajout des composants du système :

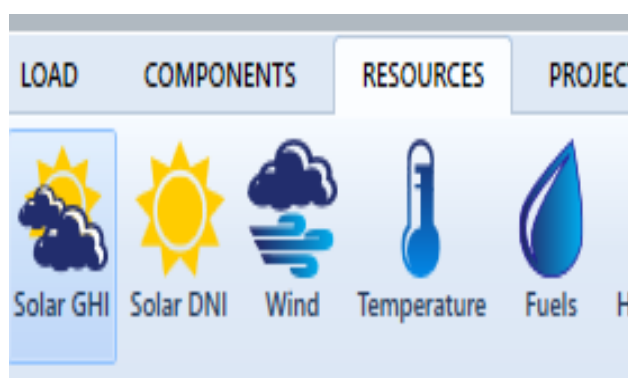
Dans l'onglet 'Components', ajouter les éléments du système tels que les panneaux photovoltaïques, éoliennes, générateurs diesel, batteries, convertisseurs, etc., en spécifiant leurs caractéristiques techniques et économiques.



Etape 4

Définition des ressources climatiques :


Utilisez l'onglet 'Resources' pour entrer les données climatiques du site, comme l'ensoleillement, la vitesse du vent et la température. HOMER peut importer automatiquement des données météorologiques à partir de bases de données telles que celle de la NASA.









Etape 5

Paramètres économiques :

Dans l'onglet 'Economics', définissez les paramètres économiques du projet, y compris le taux d'intérêt, la durée de vie du projet, les coûts fixes et les pénalités de déficit de capacité.

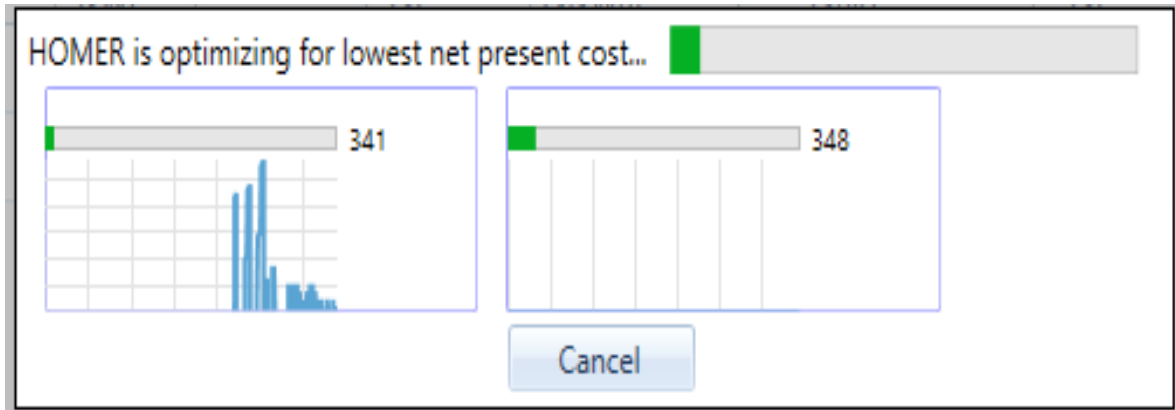
ECONOMICS 

Nominal discount rate (%):	<input type="text" value="8.00"/>	
Expected inflation rate (%):	<input type="text" value="2.00"/>	
Project lifetime (years):	<input type="text" value="25.00"/>	
System fixed capital cost (\$):	<input type="text" value="0.00"/>	
System fixed O&M cost (\$/yr)	<input type="text" value="0.00"/>	
Capacity shortage penalty (\$/kWh):	<input type="text" value="0.00"/>	
Currency:	<input type="text" value="US Dollar (\$)"/>	

Etape 6

Simulation du système :

Cliquez sur 'Calculate' pour lancer la simulation. HOMER simule le fonctionnement du système heure par heure sur une année complète, en équilibrant la production et la consommation d'énergie.



Etape 7

Optimisation des configurations :

HOMER explore différentes configurations du système pour identifier celle qui minimise le coût actualisé net (Net Present Cost - NPC). Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques pour faciliter la comparaison.

Architecture										Cost					System			Pr
	Jin550 (kW)	XL10	CAT-200 (kW)	TeslaPP2 (#)	Gro50 (kW)	Dispatch	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Fuel cost (\$/yr)	OPEX (\$/yr)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	ROI (%)			
	140	2	160	7	200	LF	\$400,447	\$0.141	\$12,581	\$237,800	\$1,023	\$9,672	93.5	4,447	-8			
	140	2	160	7	194	LF	\$400,833	\$0.142	\$12,696	\$236,710	\$1,144	\$9,687	92.7	4,974	-10			
	140	2	160	7	193	LF	\$400,995	\$0.142	\$12,701	\$236,800	\$1,144	\$9,693	92.7	4,974	-10			
	140	2	160	7	193	LF	\$400,995	\$0.142	\$12,701	\$236,800	\$1,144	\$9,693	92.7	4,974	-10			
	144	2	160	7	193	LF	\$407,000	\$0.144	\$12,876	\$240,550	\$1,108	\$9,905	93.0	4,816	-10			
	144	2	160	7	193	LF	\$407,000	\$0.144	\$12,876	\$240,550	\$1,108	\$9,905	93.0	4,816	-10			
	144	2	160	7	193	LF	\$407,000	\$0.144	\$12,876	\$240,550	\$1,108	\$9,905	93.0	4,816	-10			
	147	1	160	7	200	LF	\$411,408	\$0.145	\$13,089	\$242,200	\$1,092	\$10,099	93.1	4,748	-11			
	147	2	160	7	200	LF	\$412,563	\$0.146	\$12,939	\$245,300	\$957.52	\$10,097	93.9	4,163	-8			
	147	2	160	7	200	LF	\$412,563	\$0.146	\$12,939	\$245,300	\$957.52	\$10,097	93.9	4,163	-8			
	147	2	160	7	200	LF	\$412,563	\$0.146	\$12,939	\$245,300	\$957.52	\$10,097	93.9	4,163	-8			
	148	2	160	7	200	LF	\$412,563	\$0.146	\$12,939	\$245,300	\$957.52	\$10,097	93.9	4,163	-8			
	147	2	160	7	200	LF	\$412,563	\$0.146	\$12,939	\$245,300	\$957.52	\$10,097	93.9	4,163	-8			

Etape 8

Analyse des résultats :

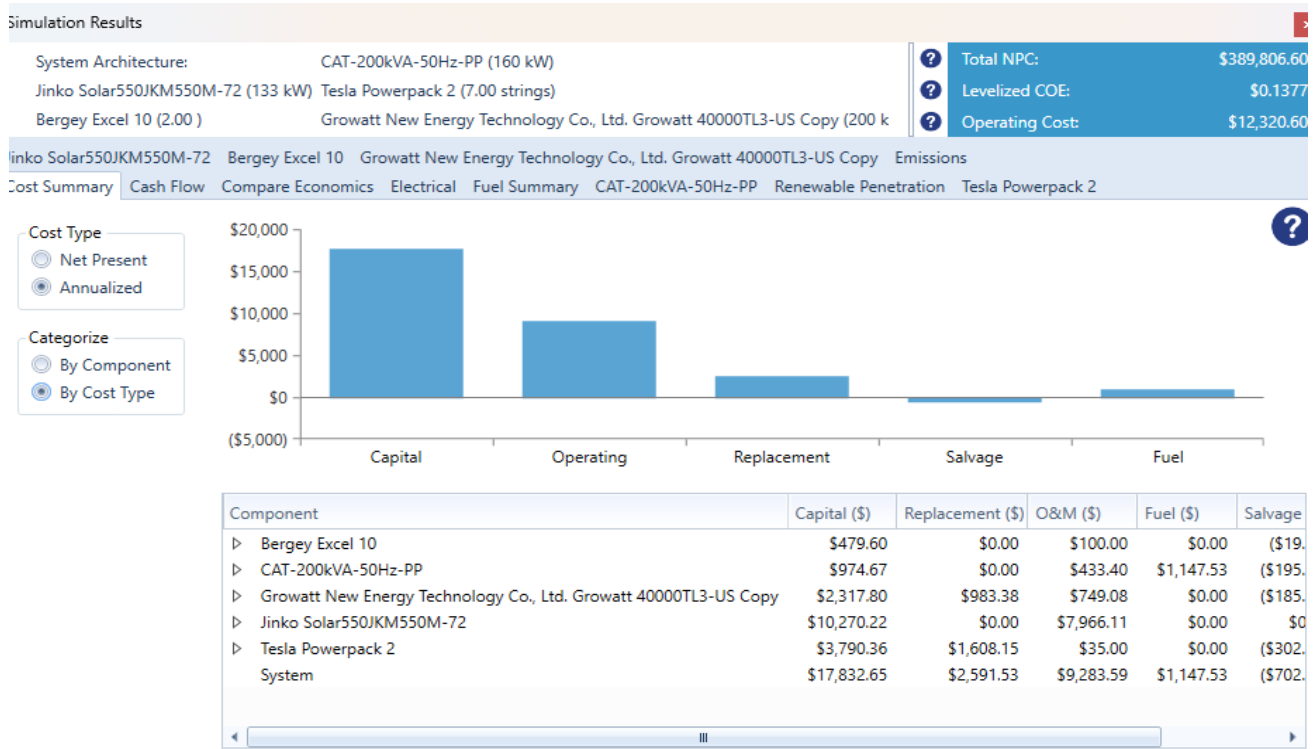
Utilisez l'onglet 'Sensitivity' pour évaluer l'impact des variations de certains paramètres (prix du carburant, coût des composants, ressources disponibles, etc.) sur les performances du système.

Export...		Export All...		Sensitivity Cases					Compare Economics ?		Column Choices...					
										Click on a sensitivity case to see its Optimization Results.						
Architecture							Cost									
⚠	☀	🌬	🔌	🔋	Jin550 (kW)	XL10	CAT-200 (kW)	TeslaPP2 (#)	Gro50 (kW)	Dispatch	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Fuel cost (\$/yr)	OPEX (\$/yr)
☀	🌬	🔌	🔋	🔌	133	2	160	7	200	LF	\$389,807	\$0.138	\$12,321	\$230,532	\$1,148	\$9,284

Etape 9

Interprétation des résultats :

Interprétation des résultats détaillés, y compris la production d'énergie par source, la consommation de carburant, l'état de charge des batteries, les émissions de CO₂ et les coûts totaux, pour prendre des décisions éclairées sur la conception et l'exploitation du système énergétique.



3.3 Configuration du système hybride proposé

Le système autonome étudié associe trois sources d'énergie principales : **photovoltaïque (PV)**, **éolien** et **groupe électrogène diesel** en secours. L'électricité produite est stockée dans des batteries électrochimiques, et un convertisseur bidirectionnel assure la conversion du courant continu (CC) en courant alternatif (CA) pour les besoins domestiques.

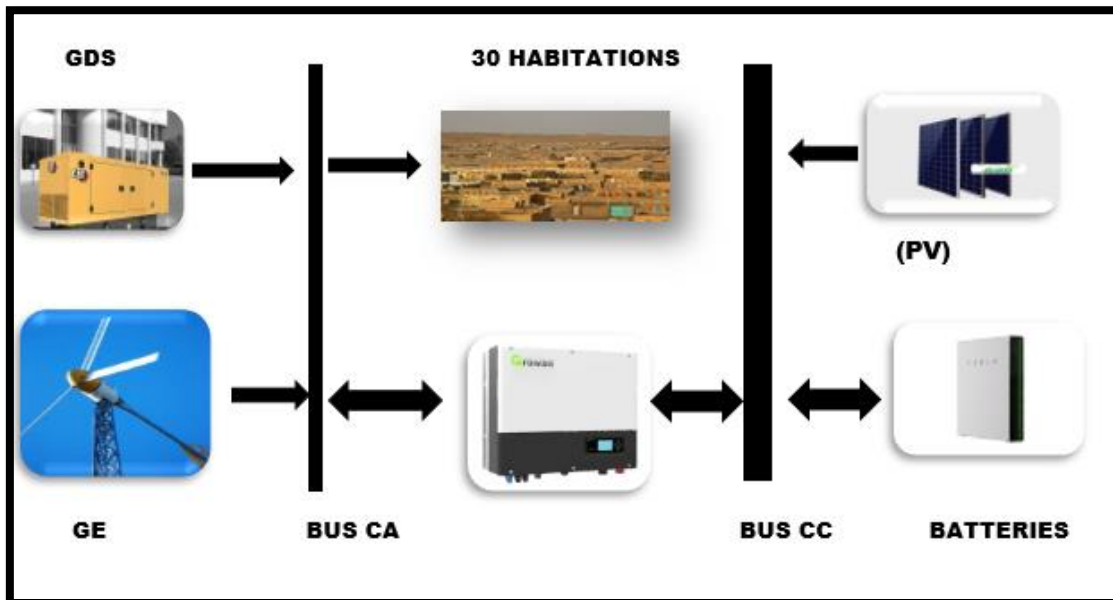


Figure 3.2: Configuration de l'installation à dimensionner

Le schéma ci-dessous, généré à l'aide du logiciel HOMER Pro, présente l'architecture optimale d'un système hybride hors réseau proposé pour l'électrification d'un village isolé. Cette configuration optimale a été obtenue suite à l'intégration des composants principaux du système, à savoir : des panneaux photovoltaïques, une éolienne, un groupe électrogène, un système de stockage par batteries et un convertisseur. Le diagramme illustre les flux énergétiques entre les différentes sources de production, le système de stockage et la charge électrique.

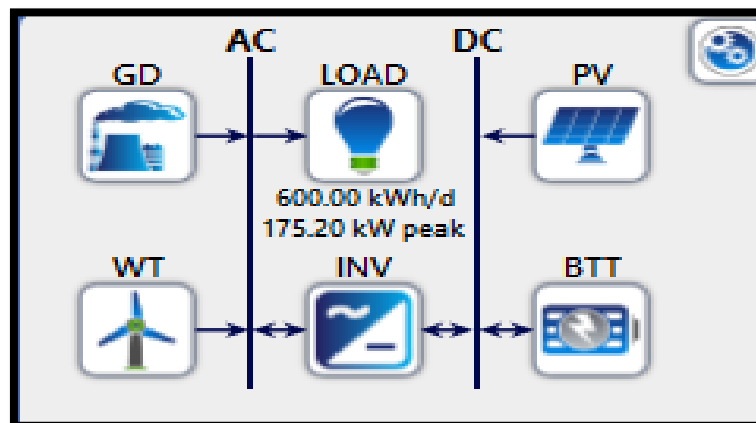


Figure 3.3 : Architecture du système

3.4 Dimensionnement technico-économique :

Les modèles de dimensionnement sont des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les SEH.

La démarche pour le dimensionnement du système hybride est la suivante:

- évaluation de la demande énergétique (charge).
- Dimensionnement d'un générateur photovoltaïque.
- Dimensionnement d'un aérogénérateur.
- Dimensionnement du système du groupe diésel.

- Dimensionnement du système de stockage (batteries).
- Dimensionnement du système de convertisseur bidirectionnel (onduleur/redresseur).

3.5 Modélisation de la demande énergétique :

Le village de Toundart est isolé du réseau électrique national. Pour estimer la demande énergétique, un profil de consommation type par maison a été établi, basé sur les appareils électroménagers usuels. La charge a ensuite été extrapolée à 30 habitations.

Les profils horaires ont été générés pour les quatre saisons (hiver, printemps, été, automne), puis intégrés à HOMER Pro. La demande maximale atteint environ 46 kW, avec une consommation quotidienne de 600 kW.

Les tableaux ci-dessous représentent l'évolution horaire de la charge pendant les quatre principales saisons:

Tableau 3.3 : Charge d'une habitation en saison hivernale (Wh)

équipements	nombre	puissance (w)	00h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	
réfrigérateur	1	200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
tv	2	150													1						1	2	2	2	1		
micro-ondes	1	800											1														
led	6	15							1	3	2		1	1	1					3	4	4	3	2	1		
ordinateur	1	300																	1								
machine à laver	1	700											1														
chauffage	1	1000																			1	1	1				
pompe d'eau	1	700									1																
autre équipements	1	400										1															
	puissance		200	200	200	200	200	200	215	245	930	600	900	1015	365	215	200	200	200	545	1410	1560	1545	515	365	200	

Tableau 3.4 : Charge d'une habitation en saison été

	nombre	puissance (w)	00h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	
réfrigérateur	1	200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
tv	2	150																					1	2	1		
micro-ondes	1	800												1													
led	6	15						1					1									2	2	3	4	3	1
ordinateur	1	300											1							1							
machine à laver	1	700										1															
climatiseur	2	1200	1	1	1	1							1	1	1	2	2	2	1	1				1	1	1	
pompe d'eau	1	700									1	1															
autre équipements	1	400																				1					
	puissance		1400	1400	1400	1400	200	215	200	200	200	1600	2400	2215	1400	2600	2600	2600	1600	1615	230	630	395	1760	1545	1415	

Tableau 3.5 : Charge d'une habitation en saison printemps

équipements	nombre	puissance (w)	00h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
réfrigérateur	1	200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
tv	2	150																				1	2	2	1	
micro-ondes	1	800											1													
led	6	15							1	1	1		1	1						1	3	3	3	2	1	
ordinateur	1	300																	1							
machine à laver	1	700									1															
pompe d'eau	1	700									1		1													
autres équipements	1	400														1										
	puissance		200	200	200	200	200	200	215	215	915	900	900	1015	215	600	200	200	500	215	245	395	545	530	365	200

Tableau 3.6 : Charge d'une habitation en saison l'automne

équipements	nombre	puissance (w)	00h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
réfrigérateur	1	200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
tv	2	150												1										2	2	
micro-ondes	1	800													1											
led	6	15							1	1			1	1						2	3	2	4	3	2	
ordinateur	1	300																								
machine à laver	1	700									1															
pompe d'eau	1	700									1									1						
autres équipements	1	400																								
ventilateur	2	50																				1	2	2		
	puissance		200	200	200	200	200	200	215	215	900	900	200	365	1015	200	200	200	200	930	245	330	660	645	215	200

Tableau 3.7 : Charge du site pour les différentes saisons

Horaire	Charge d'une habitation en hiver (Wh)	Charge d'une habitation en été (Wh)	Charge d'une habitation en automne (Wh)	Charge d'une habitation au printemps (Wh)	Charge de 30 habitations en hiver (kWh)	Charge de 30 habitations en été (kWh)	Charge de 30 habitations en automne (kWh)	Charge de 30 habitations au printemps (KWh)
00h-01h	200	1400	200	200	6	42	6	6
01h-02h	200	1400	200	200	6	42	6	6
02h-03h	200	1400	200	200	6	42	6	6
03h-04h	200	1400	200	200	6	42	6	6
04h-05h	200	200	200	200	6	6	6	6
05h-06h	200	215	200	200	6	6,45	6	6
06h-07h	215	200	215	215	6,45	6	6,45	6,45
07h-08h	245	200	215	215	7,35	6	6,45	6,45
08h-09h	930	200	900	915	27,9	6	27	27,45
09h-10h	600	1600	900	900	18	48	27	27
10h-11h	900	2400	200	900	27	72	6	25
11h-12h	1015	2215	200	1015	30,45	66,45	6	28
12h-13h	365	1400	365	215	10,95	42	10,95	6,45
13h-14h	215	2600	1015	600	6,45	78	30,45	18
14h-15h	200	2600	200	200	6	78	6	6
15h-16h	200	2600	200	200	6	78	6	6
16h-17h	200	1600	200	500	6	48	6	15
17h-18h	545	1615	930	215	16,35	48,45	27,9	6,45

18h-19h	1410	230	245	245	42,3	6,9	7,35	7,35
19h-20h	1560	630	330	395	46,8	18,9	9,9	11,85
20h-21h	1545	395	660	545	46,35	11,85	19,8	16,35
21h-22h	1545	1760	545	530	46,35	52,8	16,35	15,9
22h-23h	365	1545	215	315	10,95	46,35	6,45	9,45
23h-00h	200	1415	200	200	6	42,45	6	6

3.6 Profil de consommation par mois pour l'année 2021

Le profil de charge journalier de notre système, tel que simulé par HOMER et représenté à la figure 3.4 , révèle une consommation énergétique quotidienne de 600 kW et une demande maximale de 46 kW atteinte à 18 :30h jusqu'à 21 :00h (pour un seul habitation)

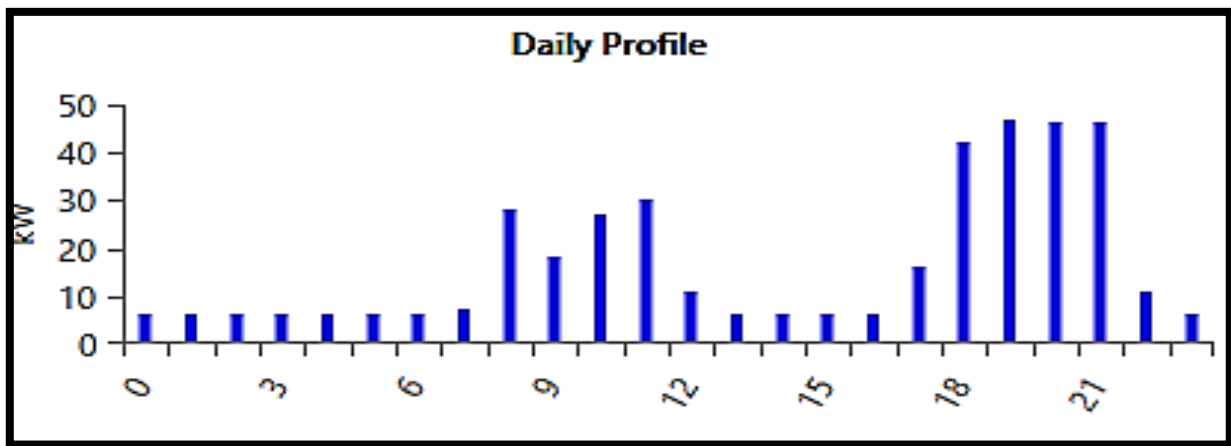


Figure 3.4 : Profil de charge journalière HOMER.

Et la figure 4.5 suivante représente la consommation mensuelle avec un pic 140 KW de au mois de Aout

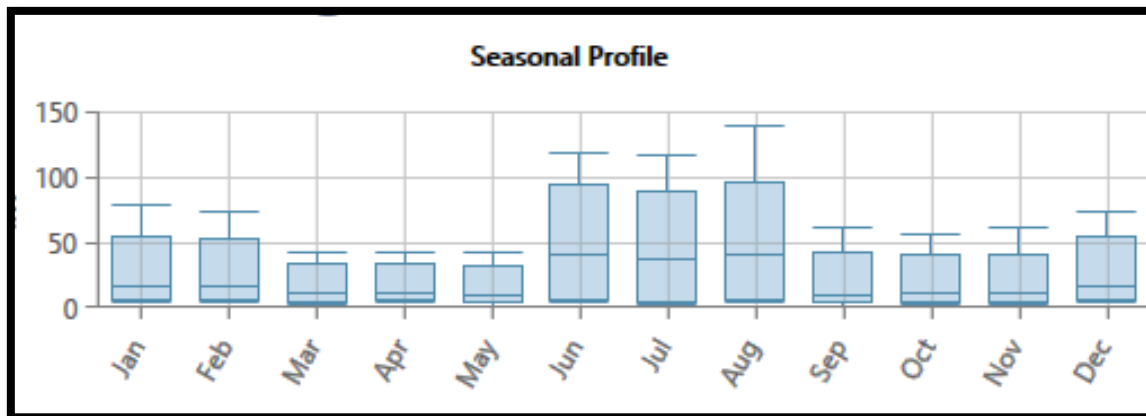


Figure 3.5 : Profil de charge dans une année sur HOMER.

3.7 Modélisation des générateurs (PV, aérogénérateur, diesel) et du stockage d'énergie (batterie) :

3.7.1 Modélisation du générateur PV :

La puissance délivrée par le générateur PV P_{gPV} (W) dépend principalement de l'irradiation $G_{inc}(t)$ et de la température ambiante. Les calculs intègrent [26] :

- Rendement du panneau photovoltaïque η_{PV} (%) .

- Rendement de l'onduleur .
- Facteurs de pertes liés à la température et aux connexions.

La puissance horaire délivrée par le générateur solaire PV est donnée par :

$$P_{gpv}(t) = \eta(t) \cdot A_{pv} \cdot G_{inc}(t) \quad 3.1$$

Avec le rendement du système $\eta(t)$ est donné par :

$$\eta(t) = \eta_m(t) \cdot \eta_{ond} \cdot F_p \quad 3.2$$

Et le rendement des modules $\eta_m(t)$ est donné par :

$$\eta_m(t) = \eta_{ref.m} \cdot [1 - \beta_T \cdot (T_c(t) - T_{ref.c})] \quad 3.3$$

$\eta_{ref.m}$ = Rendement de référence du module PV [%].

η_{ond} = Rendement de l'onduleur [%].

F_p = Facteur de pertes du système (pertes de connexion, pertes dues à la température, etc....) . β_T = Coefficient de variation du rendement .

$T_{ref.c}$ = Température de référence de la cellule [°] . T_c = Température de la cellule [°].

La température à un instant t de la cellule est calculée d'après Duffie et Beckman [35] par l'équation suivante :

$$T_c(t) = T_a(t) + (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \cdot \frac{G_{inc}(t)}{G_{T,NOCT}} \quad 3.4$$

Avec :

$T_a(t)$: Température ambiante horaire [°C] .

NOCT : Température normale de fonctionnement des cellules PV (Normal Operating Cell Temperature) [°C]

$G_{T,NOCT}$: Rayonnement dans les condition NOCT ($G_{T,NOCT} = [800 \text{ W.m}^{-2}]$) .

$T_{a,NOCT}$: Température ambiante dans les condition NOCT ($T_{a,NOCT} = 20 \text{ [°C]}$).

3.7.2 Modélisation de l'aérogénérateur :

La puissance moyenne annuelle fournie par l'aérogénérateur [31]

Etant donné que la vitesse du vent est variable et que chaque éolienne est caractérisée par une vitesse de démarrage v_d , une vitesse nominale v_n et une vitesse d'arrêt v_m spécifiques, la puissance éolienne utilisable est donnée par la relation suivante :

$$P(v) \begin{cases} 0 \\ \alpha + \beta v + \gamma v^2 \\ P_n \end{cases} \quad 3.5$$

$$\text{si } \begin{cases} v < v_d \\ v_d < v < v_n \\ v_n < v < v_m \end{cases} \quad v > v_m \quad 3.6$$

Avec α , β et γ déterminés par les conditions suivantes :

$$\alpha + \beta v_d + \gamma v_d^2 = 0$$

$$\alpha + \beta v_n + \gamma v_n^2 = P_n$$

$$\alpha + \beta(v_d + v_n) + \gamma(v_d^2 + v_n^2) = P_n \left(\frac{v_d + v_n}{v_n} \right)^3 \quad 3.7$$

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} P(v)f(v)dv \quad 3.8$$

$P(v)$: Fonction de puissance de l'aérogénérateur.

$f(v)$: Fonction de distribution de la vitesse du vent.

La fonction de distribution de la vitesse du vent est donnée par :

$$f(v) = \left(\frac{k}{v}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad 3.9$$

k : Le facteur de forme .

c : Le facteur d'échelle.

Cette puissance dépend fondamentalement de deux paramètres : le fonctionnement de l'éolienne qui est défini par sa courbe de puissance et la vitesse de vent sur le site.

On obtient après intégration la relation suivante :

$$\bar{P} = \int_{v_d}^{v_n} (\alpha + \beta V + \gamma V^2) \left(\frac{K_1}{C_1}\right) \left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1}\right) dV + \int_{V_n}^{V_m} P_n \frac{K_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1}\right) dV \quad 3.10$$

\bar{P} : S'écrit donc en fonction de deux intégrales s'écrit donc en fonction de deux intégrales

$$\bar{P} = I_1 + I_2 \quad 3.11$$

L'intégrale I2 donnée par :

$$I_2 = \int_{V_m}^{V_n} P_n \frac{K_1}{C_1} \left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1}\right) dV \quad 3.12$$

S'écrit sous la forme :

$$I_2 = P_n (F(V_m) - F(V_n)) \quad 3.13$$

$F(V)$ représente la primitive de la fonction $f(V)$.

Donc l'expression finale donnant la puissance produite par un aérogénérateur est :

$$\bar{P} = \int_{v_d}^{v_n} (\alpha + \beta V + \gamma V^2) \left(\frac{K_1}{C_1}\right) \left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C_1}\right)^{K_1}\right) dV + P_n \left[\exp\left[-\left(\frac{V_n}{C_1}\right)^{K_1}\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_m}{C_1}\right)^{K_1}\right] \right] \quad 3.14$$

Facteur de puissance :

Le facteur de puissance d'un système de conversion de l'énergie éolienne défini par le rapport de la puissance produite dans un régime de vent par sa puissance nominale (maximale) est représenté sous la forme suivante

:

$$C_1 = \left(\frac{\bar{P}}{P_n}\right) \quad 3.15$$

Avec :

\bar{P} : Puissance moyenne annuelle fournie par l'aérogénérateur [W] .

P_n : Puissance nominale de l'aérogénérateur [W].

3.7.3 Modélisation du générateur diesel :

Les caractéristiques qui nous permettent de choisir le type et le modèle du groupe électrogène convenable aux exigences de notre installation, sont les suivants: la puissance, la régulation et le type de carburant. [26]

La Puissance d'un groupe électrogène :

Le générateur diesel est nécessaire en secours pour couvrir les déficits de production. La puissance est le critère de choix le plus important pour un groupe électrogène. Il s'agit de la puissance électrique délivrée, et non de celle du moteur thermique. La puissance nécessaire du groupe électrogène dépend de la puissance globale du site, des pics de consommation et des appareils connectés.

Le courant fourni par un générateur diesel à un instant t est donné par :

$$I_{GD}(t) = I_{GD,max} \cdot X_{GD}(t) \quad 3.16$$

Où :

$I_{GD,max}$: Intensité maximale du générateur diesel .

$X_{GD}(t)$: Taux de charge (exprimé en pourcentage de sa puissance nominale) à un instant t.

Pour un nombre n_{GD} de générateurs, le courant total généré à un instant t est donné par :

$$I_{GD}(t) = \sum_i^{n_{GD}} I_{GD,max} \cdot X_{GD,i}(t) \cdot \varepsilon_i(t) \quad 3.17$$

$\varepsilon_i(t)$: traduit l'état d'arrêt ou de marche du générateur diesel i à un instant t [$\varepsilon_i(t)=1$ si le GD est en marche et $\varepsilon_i(t)=0$ si le GD est à l'arrêt].

Un générateur diesel est caractérisé par sa consommation (horaire ou spécifique) de carburant. La consommation horaire d'un générateur diesel est donnée par l'expression suivante :

$$q_{GD} = a \cdot P_{GD}(t) + b \cdot P_{GD,nom} \quad 3.18$$

Avec :

a (l/kWh) et b (l/kWh)=Constantes.

$P_{GD}(t)$ et $P_{GD,nom}$: Respectivement la puissance délivrée à un instant t et la puissance nominale du générateur diesel. Leurs expressions sont:

$$P_{GD}(t) = \sqrt{3} \cdot I_{GD}(t) \cdot U_{GD,nomAC} \cdot \cos(\phi) \quad 3.19$$

$$P_{GD,nom} = \sqrt{3} \cdot I_{GD,max} \cdot U_{GD,nomAC} \cdot \cos(\phi) \quad 3.20$$

$U_{GD,nomAC}$ et $\cos(\phi)$ sont respectivement la tension nominale du générateur diesel et le facteur de puissance.

Pour un nombre n_{GD} de générateur, on a :

$$P_{GD,i}(t) = \sum_i^{n_{GD}} \sqrt{3} I_{GD,i}(t) \cdot U_{GD,i,nomAC} \cdot \cos(\phi) \cdot \varepsilon_i(t) \quad 3.21$$

$$P_{GD,i}(t) = \sum_i^{n_{GD}} \sqrt{3} I_{GD,i,max}(t) \cdot U_{GD,i,nomAC} \cdot \cos(\phi) \cdot \varepsilon_i(t) \quad 3.22$$

D'où à un instant t, la consommation en carburant des générateurs diesels est donnée par :

$$q_{GD}(t) = \sqrt{3} \cdot \cos(\phi) \cdot \sum_i^{n_{GD}} [I_{GD,i,max} \cdot U_{GD,i,nomAC} \cdot (a \cdot X_{GD,i}(t) + b) \cdot \varepsilon_i(t)] \quad 3.23$$

➤ Régulation et démarrage d'un groupe électrogène :

Pour garantir la stabilité de la fréquence du courant produit par un groupe électrogène et assurer une alimentation électrique continue avec un générateur diesel, il est généralement préférable d'utiliser un régulateur et un système de démarrage automatique [71]. La fréquence du courant alternatif généré par l'alternateur est directement liée aux variations de la vitesse de rotation du moteur du groupe électrogène.

3.7.4 Modélisation du système de stockage par batteries :

➤ Modèle de charge de batterie :

L'état de charge de batterie (E_{bat}) est l'un des paramètres électriques employé pour caractériser une batterie à un instant (t). Il est défini par la quantité d'énergie encore disponible en (Ah) divisé par la capacité nominale de la batterie [35]

$$E_{bat}(t) = SOC = \frac{c_{bat}}{c_{bat}} = E_{bat}(t-1)(t-\theta) + (E_S(t) - \frac{E_C(t)}{n_{ond}})n_{ond} \quad 3.24$$

$E_{bat}(t)$ = SOC (State of Charge) = Énergie stockée dans la batterie à t , [Wh] ou [Ah]; $E_{bat}(t-1)$ = Énergie stockée dans la batterie à l'instant initiale ($t-1$), [Wh] ou [Ah]; σ = Taux horaire d'autodécharge;

$E_S(t)$ = Énergie produite par la source, [Wh].

$E_L(t)$ = Énergie demandée par la charge à une date t , [Wh];

η_{ond} = Rendement de l'onduleur.

Avec: $0 \leq SOC \leq 1$

Si $SOC=1$, la batterie est totalement chargée, si $SOC=0$, la batterie est totalement déchargée. L'état de charge actuel de batterie dépend de plusieurs facteurs:

État de charge initiale de batterie.

L'énergie produite par l'éolienne E_E .

L'énergie produite par le groupe électrogène E_{GD} .

L'énergie photovoltaïque E_{PV} .

L'énergie demandée par la charge E_{Ch} .

➤ Modèle décharge de la batterie

Le déchargement de la batterie s'explique par l'énergie consommé par la charge lorsqu'elle est supérieure à l'énergie fournie par le générateur éolien et le photovoltaïque. Pour altérer le manque; dans ce cas, l'énergie stockée à un instant t , peut être exprimée par l'équation ci-dessous [36]:

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1)(t-\theta) + (\frac{E_L}{n_{ond}} - E_S(t)) \quad 3.25$$

3.8 Dimensionnement des composants :

➤ Générateur photovoltaïque :

La modélisation d'un système hybride dans HOMER Pro requiert une définition rigoureuse des composants techniques et de leurs aspects économiques. Dans cette optique, les éléments suivants ont été intégrés au modèle :

- Coûts des composants : Cela inclut l'investissement initial, le coût de remplacement et les dépenses annuelles d'opération et de maintenance (O&M), exprimés en dollars (\$) et en tels que détaillés dans le Tableau
- Spécifications des modules photovoltaïques : Les caractéristiques électriques et thermiques des panneaux solaires, , sont définies dans le Tableau

Dans cette étude, des panneaux photovoltaïques équipés d'un système de suivi à deux axes ont été choisis permettant de maximiser l'irradiation captée dans la région d'étude (Tinzouatine).

Dans le logiciel HOMER Pro, l'option "2 Axis Tracking" a été activée dans les paramètres du module PV, ce qui a eu un impact positif sur l'énergie produite, comme le montreront les résultats de simulation.

➤ **Tracking systems cost :**

Deux axes :1000\$/KW

Tableau 3.8 : Coût de GPV [37]

Capacity (KW)	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$/an)
1	1000	1000	10

Tableau 3.9 : Tailles GPV considérées.

Sizing	Taille
lower	100
upper	350

Tableau 3.10 : Caractéristiques du module PV [38]

Caractéristique	Détail
Type de cellule	Monocristallin PERC (144 cellules)
Puissance maximale (Pmax)	550 W
Efficacité du module (Rendement)	21,33 %
Tolérance de puissance	0 à +3 %
Dimensions	2274 x 1134 x 35 mm
Résistance mécanique (neige)	5400 Pa
Résistance mécanique (vent)	2400 Pa
Tension maximale système	1500 V
Plage de température fonctionnement	-40 °C à +85 °C
Garantie performance	25 ans

➤ **Dimensionnement de l'aérogénérateur :**

Notre choix s'est porté sur l'éolienne BERGEY EXCEL10 à axe horizontal dont les caractéristiques techniques et économiques sont présentées ci-dessous.

La puissance délivrée pour chaque vitesse donnée représente un critère clé comme présenté sur la figure .

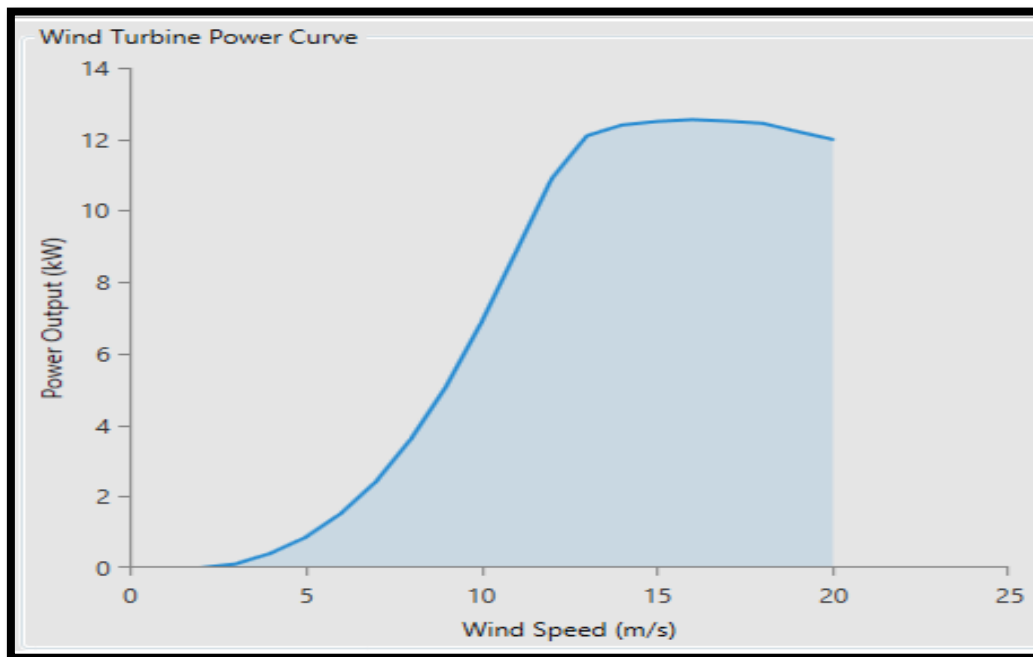


Figure 3.6 : Courbe de puissance obtenue en fonction de la vitesse du vent

Tableau 3.11 : Informations techniques du BERGEY EXCEL10 [39]

Caractéristique	Détail
Puissance nominale	10 kW
Puissance crête	12,6 kW
Vitesse nominale du vent	15,6 m/s
Nombre de pales	3
Tension	220 V
Production annuelle estimée	~13 800 kWh à 11 m/s de vent moyen

Tableau 3.12 : Coût de GE [40]

Quantity	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$/an)
1	27900	27900	270

Tableau 3.13 : Nombre d'éoliennes considéré.

Quantité
0
2
3
4

➤ Dimensionnement du générateur diesel

Le recours à un générateur diesel s'avère nécessaire pour satisfaire la demande énergétique en cas de déficit de production. Dans cette optique, un groupe électrogène de marque Caterpillar, d'une puissance de 180 KW,

a été sélectionné afin de garantir la continuité de l'alimentation électrique, de jour comme de nuit. Les caractéristiques technico-économiques de cet équipement sont exposées dans les tableaux

Tableau 3.14 : Coût GD [41]

Quantity	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$/an)
1	32000	32000	0.16

Tableau 3.15 : Caractéristiques électriques Générateur diesel à Démarrage automatique [41]

Caractéristique	Spécifications
Modèle	Caterpillar
Puissance électrique	180 kW
Vitesse moteur	1800 tr/min
Type de moteur	Diesel, 6 cylindres
Cylindrée	8,8 litres
Taux de compression	16,1 : 1

➤ **Dimensionnement des batteries :**

Le dimensionnement du système de stockage représente une étape cruciale dans la conception d'un système autonome. Dans notre étude, nous avons opté pour la technologie lithium-ion à travers le choix de la batterie Tesla, en raison de ses performances supérieures, notamment en matière de densité énergétique, durée de vie et efficacité de charge/décharge. Contrairement aux batteries plomb-acide, TESLA intègre un système de gestion intelligent (BMS - Battery Management System) qui assure la surveillance continue des paramètres critiques tels que la température, le courant et la tension, garantissant ainsi un fonctionnement sécurisé et optimal. De plus, cette technologie permet un nombre élevé de cycles de charge/décharge, ce qui la rend particulièrement adaptée aux sources renouvelables intermittentes comme le solaire et l'éolien.

Tableau 3.16 : Coût de batterie[42]

Quantity	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$/an)
1	10000	10000	50

Tableau 3.17 : Tailles de string considérées.

Tailles de string considérées
0
5
10
15

Tableau 3.18 : Caractéristiques techniques de la batterie Tesla [43]

Information	Valeur
Nom du produit	Tesla
Type de batterie	Lithium-ion (NMC)
Capacité nominale	210 kWh
Puissance nominale	50 kW
Durée de vie estimée	Jusqu'à 15 ans ou plus
Système de gestion de batterie (BMS)	Intégré
Extensibilité	Oui – modules multiples en parallèle

➤ **Dimensionnement du convertisseur bidirectionnel :**

Le convertisseur bidirectionnel est un élément essentiel au fonctionnement du système, en ce sens où il permet à la fois la conversion du courant continu en courant alternatif (onduleur) et réciproquement (redresseur). Les informations liées au coût, à la taille ainsi qu'aux caractéristiques électriques sont respectivement mentionnées dans les tableaux,

Tableau 3.19 : Coût de convertisseur [44]

Capacity (KW)	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$/an)
60	5200	5200	105

Tableau 3.20 : Taille de convertisseur

Sizing	Taille
lower	60
upper	600

Tableau 3.21 : Caractéristiques techniques principales [44]

Caractéristique	Valeur
Puissance nominale	60 kW
Rendement maximal	98 %
Température de fonctionnement	-25 °C à +60 °C
Garantie	5 ans

3.9 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel HOMER Pro ainsi que sa méthodologie de simulation. La modélisation des générateurs, des systèmes de stockage et des convertisseurs a permis d'aboutir à une configuration optimale répondant aux besoins énergétiques du site. Cette configuration optimale fera l'objet d'une évaluation détaillée dans le chapitre suivant.

Chapitre 04

Analyse des résultats de la simulation

4.1 Introduction :

Après le dimensionnement des composants des systèmes énergétiques hybrides (SEH) pour Tin-Zaouatine (chapitre précédent), une simulation détaillée a été réalisée à l'aide du logiciel HOMER. Cette simulation a pris en compte les coûts (investissement, exploitation, maintenance, remplacement) ainsi que les performances (production, taux et profils d'utilisation, durée de vie) des différents éléments du système.

HOMER a généré un large éventail de configurations potentielles, classées selon deux critères principaux : les coûts et le cycle de vie, ainsi que le type de système. Dans chaque cas, le Coût Net Actualisé (NPC) et le Coût de l'Énergie (COE) ont été les indicateurs économiques fondamentaux utilisés pour évaluer et comparer les options. Ces critères nous permettent d'identifier la solution hybride la plus pertinente pour le site de Tin-Zaouatine.

Ce chapitre est consacré à l'analyse approfondie des résultats obtenus. Nous mettrons en lumière les configurations les plus prometteuses en termes de rentabilité économique et de performance technique. Enfin, le système optimal sélectionné sera comparé à une éventuelle extension du réseau électrique existant afin de déterminer la distance seuil à partir de laquelle la solution autonome devient économiquement plus intéressante.

4.2 Analyse des résultats de simulation :

Les simulations menées avec HOMER Pro ont permis d'évaluer la performance technico-économique de plusieurs configurations de systèmes hybrides. L'analyse met en évidence les options les plus avantageuses selon le NPC et le LCOE, tout en respectant les contraintes de fiabilité et de disponibilité énergétique.

Le tableau suivant illustre les flux énergétiques, les coûts et les émissions associés à chaque configuration, facilitant ainsi la comparaison et l'identification des compromis les plus pertinents.

Tableau 4.1 : Tableau des résultats de calcul pour le système

Export...		Export Details...		Optimization Results															Compare Economics	Column Choices...
															Categorized		Overall			
Architecture								Cost					System			CAT-180				
	PV (kW)	WT	CAT-180 (kW)	B (#)	SMA59.86 (kW)	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Fuel cost (\$/yr)	OPEX (\$/yr)	Ren. Frac. (%)	Total Fuel (L/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M			
	173		180	10	262	\$508,080	\$0.179	\$15,039	\$313,667	\$1,007	\$11,712	96.5	3,250	170	7,771	3,250	27.			
	173		180	10	235	\$509,931	\$0.180	\$15,367	\$311,278	\$1,419	\$11,675	95.0	4,577	240	10,921	4,577	38.			
	173		180	10	285	\$513,898	\$0.182	\$15,338	\$315,617	\$1,205	\$11,755	95.6	3,887	195	9,635	3,887	31.			
	173		180	10	262	\$514,912	\$0.182	\$15,567	\$313,667	\$1,505	\$11,724	94.5	4,856	245	11,978	4,856	39.			
	173		180	10	308	\$516,017	\$0.182	\$15,351	\$317,567	\$1,132	\$11,792	95.9	3,651	183	9,053	3,651	29.			
	183		180	10	240	\$525,277	\$0.186	\$15,714	\$322,133	\$1,140	\$12,301	96.0	3,676	193	8,764	3,676	30.			
	183		180	10	285	\$529,535	\$0.187	\$15,742	\$326,033	\$996.51	\$12,375	96.4	3,215	164	7,856	3,215	26.			
	183		180	10	330	\$529,716	\$0.187	\$15,454	\$329,933	\$555.09	\$12,442	98.0	1,791	93.0	4,309	1,791	14.			
	183		180	10	240	\$529,880	\$0.187	\$16,070	\$322,133	\$1,475	\$12,309	94.7	4,758	244	11,577	4,758	39.			
	183		180	10	330	\$534,271	\$0.189	\$15,806	\$329,933	\$886.66	\$12,451	96.8	2,860	144	7,068	2,860	23.			
	149	2	180	10	251	\$542,067	\$0.191	\$15,240	\$345,054	\$1,487	\$10,839	94.8	4,796	251	11,466	4,796	40.			
	183		180	10	420	\$542,157	\$0.191	\$15,813	\$337,733	\$549.21	\$12,600	98.1	1,772	92.0	4,264	1,772	14.			
	149	2	180	10	257	\$542,443	\$0.192	\$15,231	\$345,542	\$1,457	\$10,848	94.9	4,701	246	11,241	4,701	39.			

Après avoir généré de nombreux scénarios, le logiciel a sélectionné automatiquement quatre configurations optimales répondant aux exigences techniques tout en minimisant les coûts. Nous les analysons ci-après pour déterminer la solution la plus adaptée à notre projet.

Tableau 4.2 : Résultats de la simulation par catégorie.

Export...		Export Details...		Optimization Results														Categorized		Overall	
Architecture										Cost				System				GD			
	PV (kW)	WT	GD (kW)	BTT (#)	INV (kW)	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Fuel cost (\$/yr)	OPEX (\$/yr)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (\$/yr)				
151			180	10	262	\$393,278	\$0.139	\$6,725	\$306,338	\$1,535	\$2,484	92.0	4,952	119	17,509	4,952	19.0				
139	2		180	10	262	\$450,923	\$0.159	\$7,759	\$350,613	\$1,544	\$2,909	91.9	4,980	117	17,715	4,980	18.7				
230				20	341	\$590,262	\$0.208	\$10,016	\$460,783	\$0.00	\$3,899	100	0								
225	2			20	319	\$651,794	\$0.230	\$11,013	\$509,425	\$0.00	\$4,348	100	0								

Selon les résultats de simulation, la configuration la plus avantageuse économiquement combine des panneaux photovoltaïques (PV), un générateur diesel (GD) et des batteries de stockage (BTT). Ce système affiche un NPC de 393 278 \$ et un LCOE de 0,139 \$/kWh, avec un taux de pénétration des énergies renouvelables de 92 %.

Le deuxième système, qui ajoute des éoliennes (WT) à cette configuration (PV + GD + BTT + WT), présente un NPC plus élevé (450 923 \$), un LCOE de 0,159 \$/kWh, et un taux de pénétration renouvelable légèrement inférieur (91,9 %).

Les deux autres configurations, exclusivement basées sur les énergies renouvelables (PV + BTT et PV + WT + BTT), atteignent une pénétration de 100 %, mais à un coût nettement plus élevé (respectivement 590 262 \$ et 651 794 \$).

Ces résultats montrent que les systèmes hybrides intégrant un générateur de secours offrent le meilleur compromis entre rentabilité économique et durabilité énergétique

4.2.1 Analyse de la configuration optimale (PVDS) :

Ci-dessous la configuration optimale obtenue :

Architecture						Cost					System			GD				
	PV (kW)	WT	GD (kW)	BTT (#)	INV (kW)	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	CAPEX (\$)	Fuel cost (\$/yr)	OPEX (\$/yr)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)	O&M Cost (\$/yr)	Fuel C (\$/yr)
151			180	10	262	\$393,278	\$0.139	\$6,725	\$306,338	\$1,535	\$2,484	92.0	4,952	119	17,509	4,952	19.0	1,535

Figure 4.1: Résultat optimal

La configuration optimale, illustrée dans la figure 4.1, présente les caractéristiques suivantes :

Tableau 4.3: Caractéristiques de la configuration optimale

Élément	Détails
Production d'énergie	- Panneaux photovoltaïques : 151 kW - Groupe électrogène diesel : 180 kW
Stockage	- Nombre de batteries : 10 unités - Capacité unitaire : 210 kWh
convertisseur	5 onduleurs bidirectionnels - Puissance nominale : 60 kW
Coûts	Coût initial : 306338 \$. Coût d'exploitation 6725 \$/yr. Coût net actuel (NPC) 393278 \$. Coût d'énergie (COE) 0.139 \$/kWh
Énergies renouvelables	- Fraction d'énergie renouvelable: 92 %

4.2.1.1 Analyse économique :

La figure 4.2 présente la répartition des coûts du système énergétique hybride selon ses principaux composants. On remarque que les panneaux photovoltaïques représentent la part la plus importante, bien que le système de suivi à deux axes augmente le coût d'investissement initial (CAPEX) en raison de la complexité mécanique, mais il améliore la production énergétique et permet de réduire les besoins en composants supplémentaires (comme le nombre de panneaux ou la capacité de stockage).

Les batteries arrivent en seconde position, soulignant l'importance du stockage pour garantir la continuité de l'approvisionnement. Les coûts associés au convertisseur et au groupe électrogène sont relativement modérés, indiquant un rôle de soutien dans le fonctionnement du système. Les autres coûts sont marginaux.

Cette répartition montre clairement l'orientation du système vers une autonomie énergétique basée sur les énergies renouvelables, tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles, ce qui renforce la durabilité du projet à la fois sur les plans environnemental et économique.

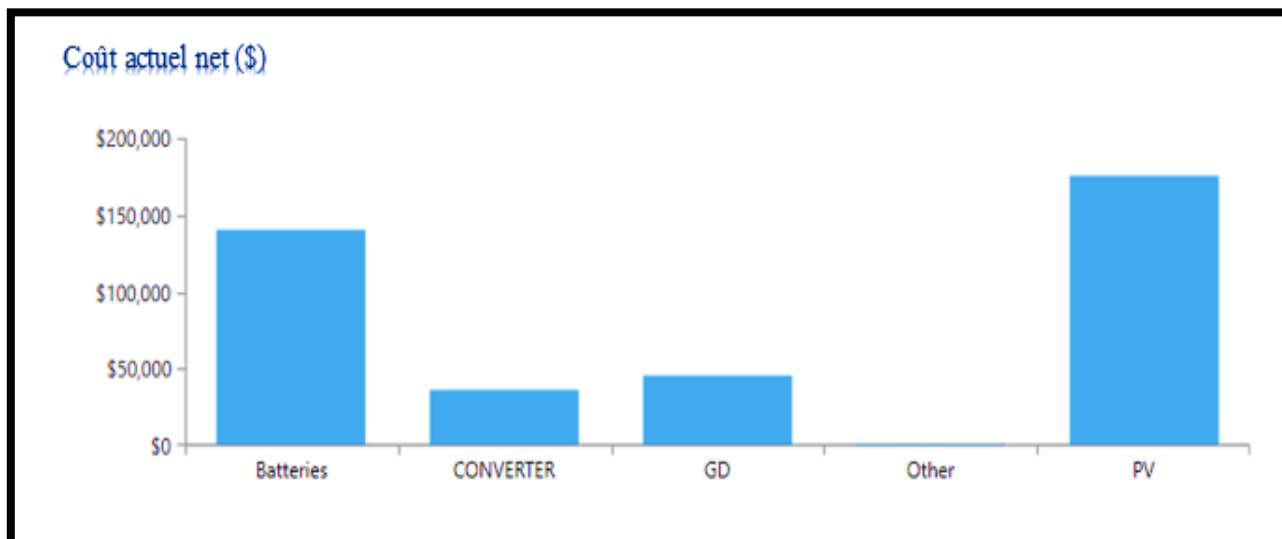


Figure 4.2 : NPC total pour le système

Tableau 4.4 : Les coûts des composants du système hybride

Composants	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M(\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
PV	150618.49	0	19471.17	0	0	170089.66
GD	32000	0	246.14	19846.47	-7285.75	44806.85
Batterie	100000	42427.38	6463.76	0	-7985.26	140905.88
Convertisseur	22719.99	9639.30	5930.63	0	-1814.21	36475.25
Other	1000	0	0	0	0	1000
Systeme	306338.02	52066.68	32111.69	19846.47	-17085.23	393277.63

Les données économiques du système étudié indiquent un coût total s'élevant à **(393277.63\$)**, réparti entre l'investissement initial, les coûts de remplacement, d'exploitation et de maintenance, ainsi que les dépenses en carburant, avec prise en compte de la valeur résiduelle en fin de vie du projet.

L'investissement initial représente la part la plus importante, avec un montant de **(306338.02 \$)**, ce qui reflète la nature capitalistique de ce type de système reposant majoritairement sur les énergies renouvelables. Les coûts de remplacement atteignent **(52066.68 \$)**, traduisant la nécessité de renouveler certains composants au cours de la période de fonctionnement. Les frais d'exploitation et de maintenance sont estimés à **(32111.69 \$)**, soulignant l'importance de la maintenance préventive pour assurer la pérennité du système. En parallèle, les dépenses en carburant s'élèvent à **(19846.47 \$)**, ce qui montre un recours limité, mais stratégique, au

générateur thermique. Enfin, une valeur résiduelle négative de (**-17085.23\$**) a été intégrée, représentant la valeur récupérable des équipements en fin de projet.

4.2.1.2 Analyse technique :

Nous remarquons que le système hybride présenté dépend fortement de l'énergie solaire (PV), qui assure **95,7 %** de la production annuelle d'électricité (**389 930 kWh**), tandis que le générateur diesel (GD) n'intervient que marginalement avec **4,3 % (17 509 kWh)**. La demande électrique annuelle est entièrement couverte, avec un total de **219 000 kWh** en charges AC, sans aucune charge différable ni charge en courant continu. Aucun déficit ni interruption de l'alimentation n'est observé, ce qui montre la fiabilité du système. Toutefois, une grande quantité d'électricité, soit **170 347 kWh par an (41,8 %)**, est produite en excès et non utilisée. La fraction renouvelable atteint 92 %, avec une pénétration maximale de **6.329 %**, ce qui indique une surproduction ponctuelle élevée. Le graphique mensuel montre une prédominance de la production solaire tout au long de l'année, avec une légère contribution du générateur diesel entre juin et août. Ce système bien dimensionné offre une solution fiable et durable

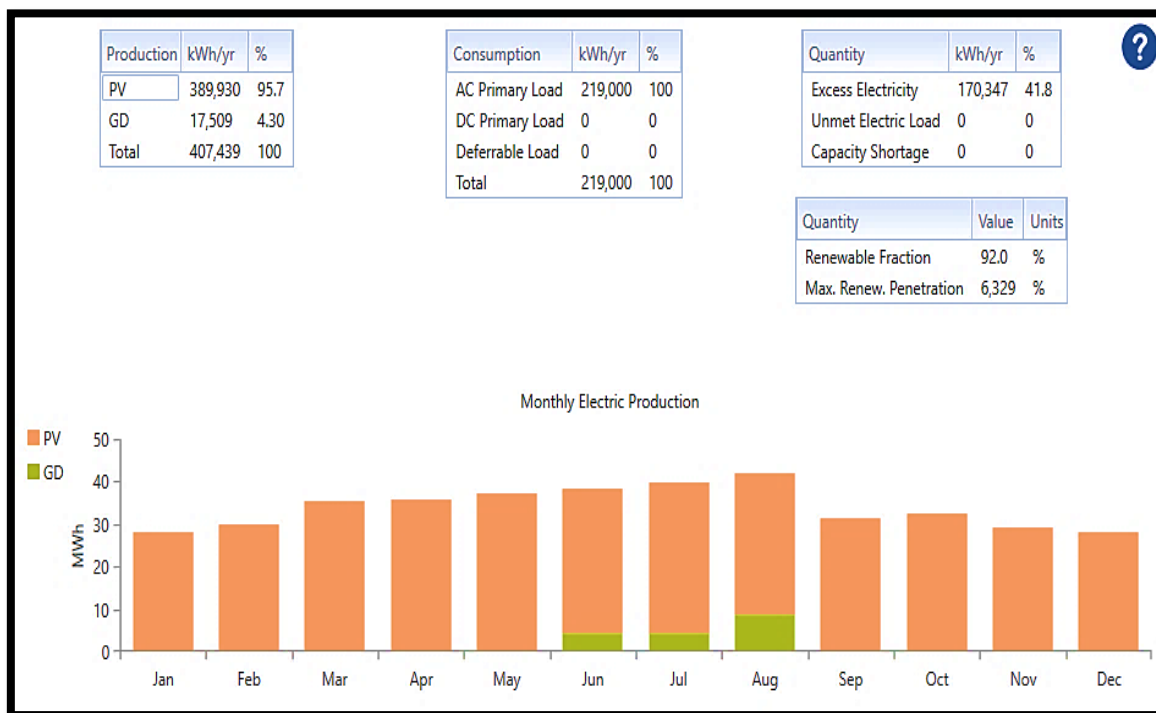


Figure 4.3: Production électrique par mois de chaque composant.

➤ Profil journalier de production :

La production suit une distribution caractéristique liée au cycle solaire. Elle débute après le lever du soleil (vers 6h00), atteint un pic maximal autour de midi solaire, puis décroît progressivement jusqu'au coucher du soleil. Cette tendance met en évidence la forte corrélation entre la disponibilité du rayonnement solaire et la production d'énergie, soulignant la nature diurne de la source photovoltaïque.

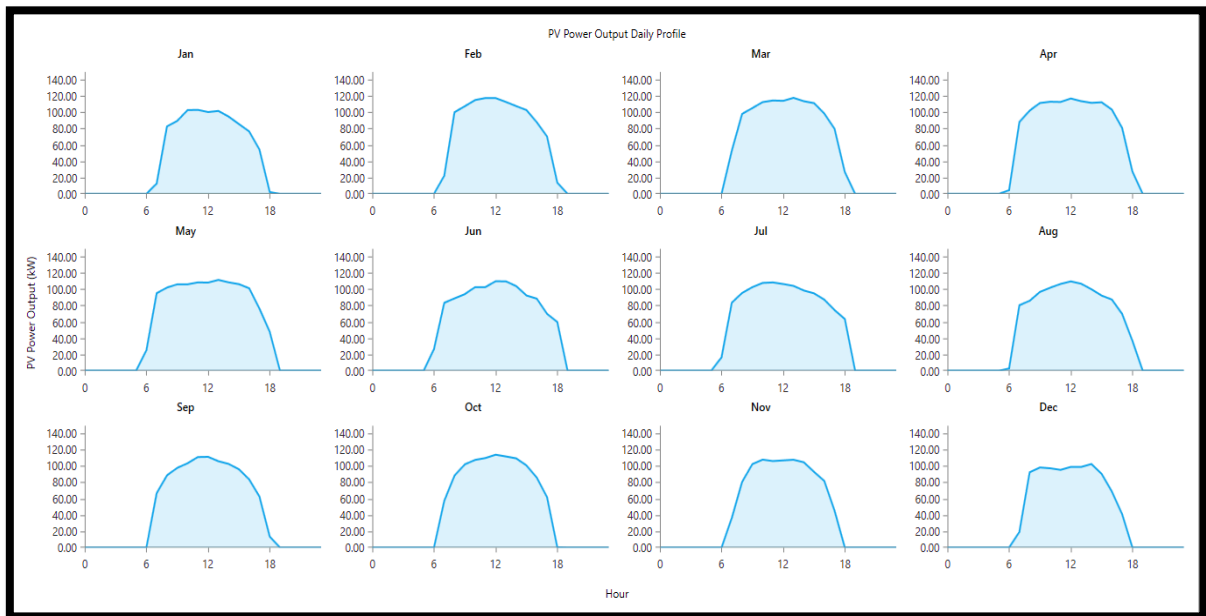


Figure 4.4 : Profil journalier de production

➤ **Profil saisonnier de production**

On remarque sur la figure une variation assez importante de la production solaire au fil des saisons. La période la plus productive s'étend généralement du printemps au début de l'automne (de mars/avril à septembre/octobre), grâce à des journées plus longues, un ensoleillement plus intense et un angle d'incidence des rayons solaires plus favorable.

À l'inverse, durant les mois d'hiver (de novembre à février), la production baisse de manière significative. Cette baisse s'explique par la diminution des heures d'ensoleillement, la baisse de l'angle solaire, mais aussi par des conditions météorologiques souvent défavorables

Cette analyse met bien en évidence le caractère intermittent de l'énergie solaire : pas de production la nuit, et une forte baisse en hiver. Dans le cas d'un système autonome, il devient donc essentiel de prévoir des solutions pour assurer une alimentation électrique continue, en particulier pendant les périodes de faible ensoleillement.

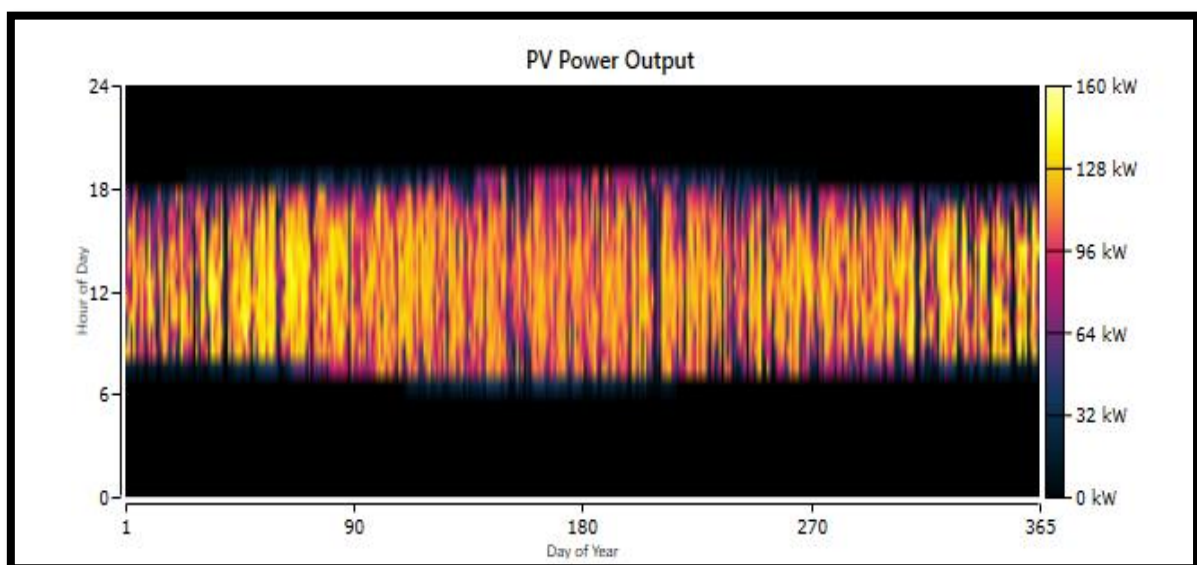


Figure 4.5 : Profil saisonnier de production.

✚ Comportement des batteries :

Les résultats de la simulation montrent que l'état de charge (SOC) de la batterie reste la plupart du temps à des niveaux très élevés, souvent proches de 100 %, tout au long de la journée et pendant une grande partie de l'année. Cela indique que le système fonctionne de manière stable et qu'il arrive à bien couvrir les besoins en énergie. Néanmoins, on remarque une période un peu plus critique durant les mois de juin, juillet et août, où l'état de charge moyen diminue légèrement, avec plus de fluctuations. Dans certains cas, le SOC baisse jusqu'à environ 40 %, ce qui montre que la batterie est plus sollicitée pendant cette période. En observant le graphique, on remarque aussi un schéma quotidien qui se répète : le SOC baisse légèrement pendant la nuit et tôt le matin, puis remonte progressivement pendant la journée. Ce comportement reste constant tout au long de l'année.

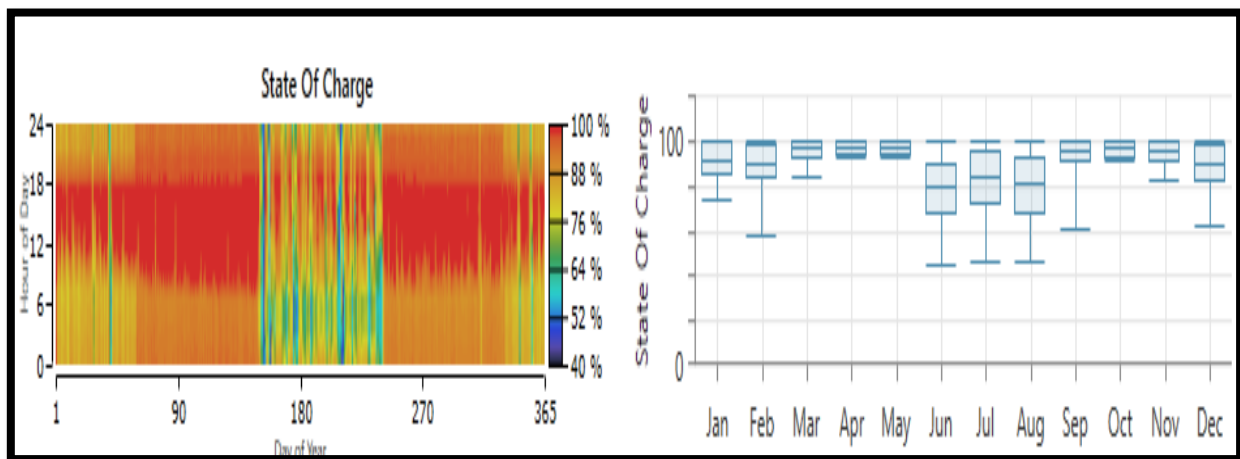


Figure 4.6 : Etat de charge quotidienne des batteries pendant toute l'année.

✚ Convertisseur bidirectionnel :

Le système hybride autonome repose principalement sur Le convertisseur bidirectionnel qui se compose d'un onduleur et d'un redresseur.

L'onduleur est utilisé pour alimenter les charges électriques et fonctionne presque toute l'année. Sa production reste stable, avec une moyenne d'environ 23,9 kW et un grand nombre d'heures de fonctionnement. À l'inverse, le redresseur est peu sollicité. Il fonctionne de manière ponctuelle, surtout pour gérer les excès d'énergie ou recharger les batteries, avec une production beaucoup plus faible.

Bien que les deux appareils aient la même puissance nominale, l'onduleur est nettement plus utilisé. Cela montre que la conversion d'énergie est efficace et que les pertes dans le système sont faibles.

Ce fonctionnement indique que le système a été bien pensé, en assurant un équilibre entre un fonctionnement stable et la capacité à s'adapter aux variations de production.

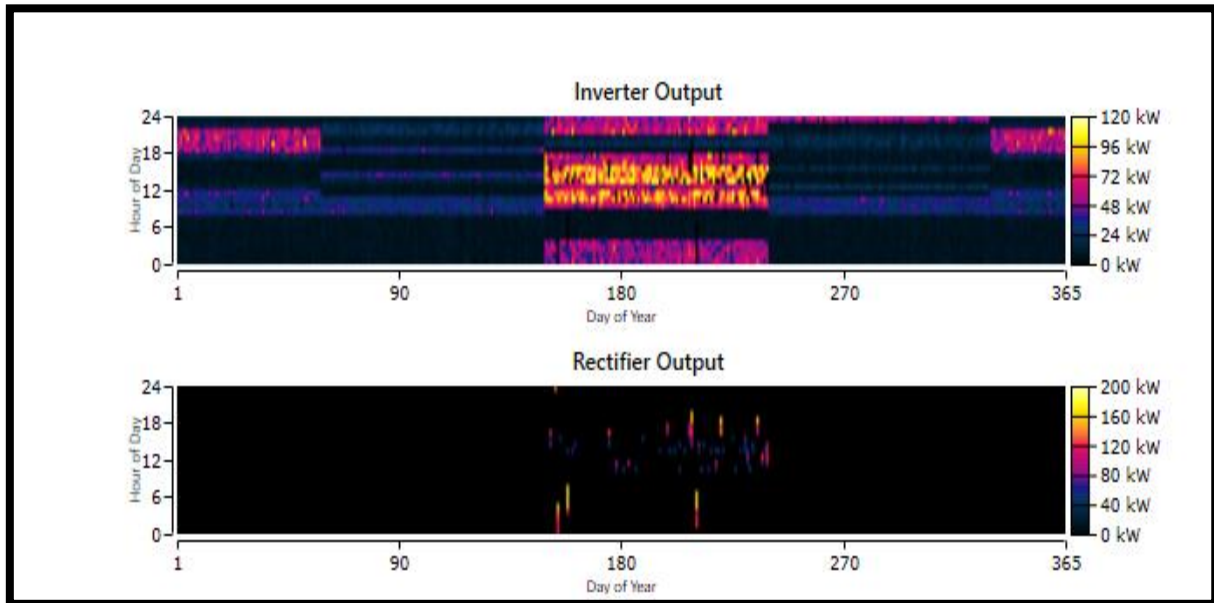


Figure 4.7 : Energie convertie à la sortie du convertisseur bidirectionnel.

Tableau 4.5 : Paramètres de fonctionnement du convertisseur.

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of Operation	8,672	88.0	hrs/yr
Energy Out	209,657	8,003	kWh/yr
Energy In	213,936	8,166	kWh/yr
Losses	4,279	163	kWh/yr

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	262	262	kW
Mean Output	23.9	0.914	kW
Minimum Output	0	0	kW
Maximum Output	115	171	kW
Capacity Factor	9.13	0.348	%

🚧 Générateurs diesel

Les résultats de la simulation montrent que le générateur électrique joue un rôle secondaire dans le système. Il n'est utilisé que 119 h / an, réparties sur 60 démarrages, ce qui indique qu'il est principalement utilisé comme solution de secours en cas de manque d'énergie renouvelable. Sa production annuelle atteint 17 509 kWh, avec un rendement électrique moyen de 35,9 %, pour une consommation totale de carburant de 4952 L de carburant. Son fonctionnement s'est surtout concentré durant les journées d'été, ce qui peut refléter une baisse temporaire de la production renouvelable ou une augmentation ponctuelle de la demande en électricité. En résumé, le générateur a renforcé la fiabilité du système sans être fortement sollicité, permettant ainsi de réduire la consommation de carburant et les coûts d'exploitation, tout en assurant la continuité de l'approvisionnement électrique.

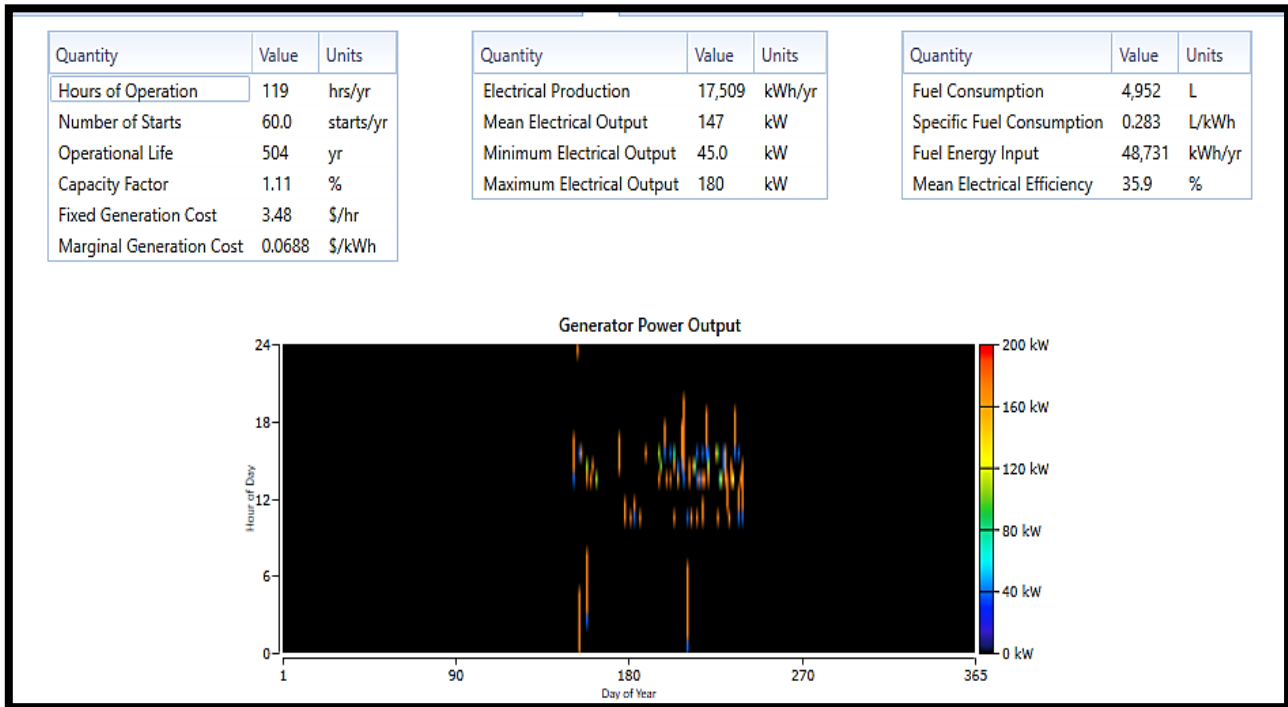


Figure 4.8 : Puissance délivrée par le GD pour toute l'année

4.2.2 Résultats écologiques :

Emissions de gaz à effet de serre:

L'étude des émissions de gaz à effet de serre est une étape importante puisque l'objectif principal des énergies renouvelable est de réduire au maximum l'effet de serre et de produire de l'électricité à partir des ressources propres. Le système hybride, reposant à 95,7 % sur l'énergie solaire et à 4,3 % sur un générateur diesel, a permis de réduire de manière significative les émissions polluantes. Cette solution est une option beaucoup plus respectueuse de l'environnement.

Tableau 4.5 : Quantité de gaz à effet de serre émise par le GD du système.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	13,086	kg/yr
Carbon Monoxide	9.21	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0.693	kg/yr
Particulate Matter	0.792	kg/yr
Sulfur Dioxide	32.5	kg/yr
Nitrogen Oxides	132	kg/yr

4.2.3 Comparaison avec une extension du réseau :

Comparaison entre le coût du système raccordé au réseau et celui du système autonome :

Dans cette étude, la distance exacte du site proposé par rapport au réseau n'est pas connue, mais il est possible de déterminer la distance critique à partir de laquelle l'extension du réseau devient économiquement non viable. Si le site se trouve à une distance inférieure à cette limite par rapport au réseau de distribution existant,

l'extension du réseau est plus rentable. En revanche, si le site est situé au-delà de cette distance, un système autonome devient économiquement plus avantageux.

L'analyse sur la Figure 4.10 compare les coûts des deux options (On-Grid et Off-Grid) et a permis de déterminer que la distance critique d'extension du réseau est de 3.13 km. Au-delà de cette limite, le système autonome devient économiquement plus avantageux qu'un raccordement au réseau avec un coût actualisé net (NPC) de 33 110 \$ par kilomètre. [45]

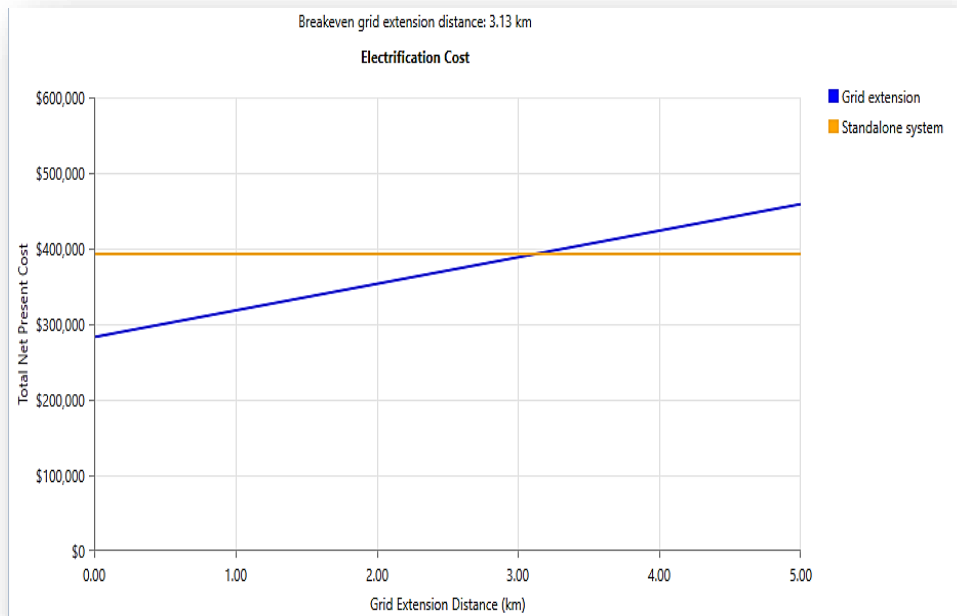


Figure 4.9 : Comparaison entre le coût du système raccordé au réseau et celui du système autonome.

4.3 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'analyser les résultats de simulation obtenus avec le logiciel HOMER Pro, en évaluant plusieurs configurations énergétiques sur les plans technique et économique.

D'après les résultats, la meilleure solution est un système hybride qui associe des panneaux photovoltaïques, un générateur diesel et un système de stockage par batteries. Ce système offre un bon compromis en termes de coût, avec une valeur actuelle nette (NPC) estimée à 393 278 \$, tout en assurant une couverture importante par les énergies renouvelables, atteignant 92 %.

Ce résultat montre clairement que l'hybride peut être une solution pertinente pour l'électrification des zones rurales isolées. En plus de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux solutions conventionnelles, il permet aussi de limiter la dépendance aux carburants fossiles. En somme, cette configuration représente un bon équilibre entre performance, coût et respect de l'environnement, ce qui en fait une option pertinente dans une logique de développement durable

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a porté sur la conception et l'optimisation d'un système énergétique hybride autonome combinant l'énergie photovoltaïque, un groupe électrogène diesel et un stockage par batteries, destiné à alimenter un village isolé de 30 habitations. Ce village, nommé Toundart, est situé dans la commune de Tin Zaouatine, relevant de la wilaya d'In Guezzam, au cœur du Sahara algérien.

À partir des données météorologiques locales et des besoins énergétiques spécifiques du site, le logiciel de simulation HOMER Pro a permis de dimensionner un système optimal répondant efficacement à une demande électrique annuelle estimée à 219 000 kWh. Le système proposé est composé de 151 kW de panneaux photovoltaïques, d'un groupe électrogène diesel de 180 kW et de 10 batteries pour le stockage de l'énergie.

Les résultats obtenus montrent que l'énergie photovoltaïque couvre **95,7 %** des besoins énergétiques annuels, tandis que le générateur diesel contribue à hauteur de **4,3 %**, garantissant ainsi une alimentation continue, même en cas de faible ensoleillement. Le système génère un excédent de production de **41,8 %**, offrant une marge de sécurité appréciable ainsi que des possibilités d'extension future.

Sur le plan économique, le coût actualisé de l'énergie (COE) est estimé à **0,139 \$/kWh**, pour un coût net actualisé (NPC) de **393 277,7 USD**, rendant cette solution compétitive, notamment pour les localités éloignées dont le raccordement au réseau dépasse **3,13 km**. Ce système hybride permet également de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre et la dépendance aux énergies fossiles, contribuant ainsi à la préservation de l'environnement.

Le système hybride PV/Diesel/Batteries étudié représente donc une solution fiable, économique et écologique pour l'électrification durable des zones isolées du Sahara algérien, où le raccordement au réseau conventionnel est difficile ou coûteux. Cette démarche ouvre la voie à une meilleure intégration des énergies renouvelables dans les régions désertiques, favorisant un développement durable et une amélioration des conditions de vie des populations locales.

Les résultats de cette étude ouvrent par ailleurs des perspectives prometteuses pour le développement futur des systèmes hybrides dans les zones isolées. Il serait pertinent d'améliorer les outils de simulation en intégrant des analyses environnementales plus approfondies, notamment en ce qui concerne les émissions de CO₂. Le recours à des systèmes de gestion intelligente basés sur l'intelligence artificielle pourrait également optimiser la gestion énergétique. Enfin, l'intégration de l'hydrogène vert et le développement de technologies avancées de stockage constituent des pistes d'amélioration majeures pour renforcer la durabilité et l'efficacité de ces systèmes, contribuant ainsi aux objectifs de développement durable en Algérie.

Références bibliographiques

- [1] STOYANOV, LUDMIL. « ETUDE DE DIFFERENTES STRUCTURES DE SYSTEMES HYBRIDES A SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLES », THESE DE DOCTORAT EN ENERGETIQUE, UNIVERSITE DE CORSE PASQUALE PAOLI ET UNIVERSITE TECHNIQUE DE SOFIA, 2011
- [2] I. VECHIU, «MODELISATION ET ANALYSE DE L'INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS UN RESEAU AUTONOME », PH.D. DISSERTATION, UNIV. DU HAVRE, FRANCE, 2006.
- [3] M. B. CAMARA, H. GUALOUS, F. GUSTIN ET A. BERTHON, « ÉTUDE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION HYBRIDE (EOLIEN, PHOTOVOLTAÏQUE, DIESEL ET BATTERIE) : MODELISATION ET SIMULATION », REVUE DES ENERGIES RENOUVELABLES, VOL. 12, NO. 3, PP. 607–620, 2009.
- [4] B. ASKAS ET R.SELLAH, « HYBRIDATION EN SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DES CENTRALES DIESEL DU GRAND SUD ALGERIEN : DIMENSIONNEMENT ET OPTIMISATION », MEMOIRE DE MASTER EN ELECTROTECHNIQUE, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER, 2021
- [5] BRIHMAT, « ETUDE CONCEPTUELLE D'UN SYSTEME DE CONDITIONNEMENT DE PUISSANCE POUR UNE CENTRALE HYBRIDE PV/EOLIEN », MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI- OUZOU, 2012.
- [6] BOUTARFIF BOUTHAINA, R. A. I. S. «DIAGNOSTIC DES DEFAUTS D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE PAR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE». DISS. UNIVERSITE ECHAHID CHIKH LARBI TEBESSI-TEBESSA, 2023.
- [7] F.SLAMA , «MODELISATION D'UN SYSTEME MULTI GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES INTERCONNECTES AU RESEAU ELECTRIQUE», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF, DEPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE, 2011
- [8] A.T.SINGO, «SYSTEME D'ALIMENTATION PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE HYBRIDE POUR L'HABITAT ENERGETIQUEMENT AUTONOME », THESE DE DOCTORAT EN GENIE ÉLECTRIQUE, UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY-I, 2010.
- [9] CONVERTISSEURS PHOTOVOLTAÏQUES , LUDOVIC PROTIN, STEPHANE ASTIER, TRAITE GENIE ELECTRIQUE D 3360, TECHNIQUES DE L'INGENIEUR
- [10] M. KEDAÏMIA, «EFFET DE LA TEXTURISATION SUR LES CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE A BASE D'UN MATERIAU SEMI-CONDUCTEUR EN COUCHES MINCES», MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE IBN KHALDOUN - TIARET, ANNEXE SOUGUEUR, DEPARTEMENT DE PHYSIQUE, 2020.
- [11] F. SLAMA, « MODELISATION D'UN SYSTEME MULTI GENERATEURS PHOTOVOLTAÏQUES INTERCONNECTES AU RESEAU ELECTRIQUE », MEMOIRE DE MAGISTER EN RESEAUX ELECTRIQUES, UNIVERSITE FERHAT-ABBAS DE SETIF, 2011.
- [12] F.GUESSOUMI ET A.SAADI, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES « COMMANDE DE PANNEAUX SOLAIRE À L'AIDE D'UNE CARTE APIC, UNIVERSITE BISKRA, 2010.
- [13] <https://www.solaris-store.com/content/36-installer-un-panneau-solaire>
- [14] S. M. ABD SETAR AND T. M. EL AMINE, «ÉTUDE DES PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES», MEMOIRE DE LICENCE, DEPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA, ALGERIE, 2020
- [15] S. MAHMOUDI ET S. RABEHI, « ETUDE DE CONCEPTION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME », MEMOIRE DE MASTER EN ELECTRONIQUE, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI- OUZOU, 2017.
- [16] HANKINS MARK, «INSTALLATION SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES : CONCEPTION ET INSTALLATION D'UNITES NON RECORDEES AU RESEAU», PARIS :DUNOD 2012
- [17] M. S. AÏT CHEIKH, M. CHIRK BELHADJ, M. BASSAID, M. BECHERIF, AND C. LARBES, «SIMULATION ET REALISATION D'UN CONTROLEUR DE BATTERIE SOLAIRE A BASE DE PIC16F876», REVUE DES ENERGIES RENOUVELABLES SIENR'12 GHARDAÏA, PP. 1–9, 2012
- [18] SYLVAIN BRIUGAND, «INSTALLATIONS SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE : DIMENSIONNEMENT INSTALLATIONS ET MISE EN ŒUVRE MAINTENANCE», PARIS : LE MONITEUR, 2011
- [19] S. BOUAMINE ET Y. SAYAD, «ÉTUDE DES CARACTERISTIQUES DES ELEMENTS D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE», MEMOIRE DE MASTER EN SCIENCES ET TECHNOLOGIE, UNIVERSITE 08 MAI 1945 - GUELMA, GUELMA, ALGERIE, JUIN 2011.
- [20] A. BOUKAROURA, «MODELISATION ET DIAGNOSTIC D'UN ONDULEUR TRIPHASE PAR L'APPROCHE BOND GRAPH», MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF, ALGERIE, DEC. 2009.
- [21] J. DELORD ET E. ROGER, « ETUDE D'UN AEROGENERATEUR », LYCEE MAXIMILIEN PERRET- ALFOTVILLE, ACADEMIE DE CRETEIL, 2009.

- [22] CONNAISSANCE DES ENERGIES, QUELS SONT LES CONSTITUANTS D'UNE EOLIENNE ?,
DISPONIBLE SUR
https://www.marne.gouv.fr/contenu/telechargement/33012/206407/file/3.4_Description_projet_Volet_commun_v202002.pdf
- [23] B. N. H. ERRAHMEN, «ENERGIE EOLIENNE», MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE, FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, DIRIGE PAR DR. ABDALLAH ABDERRAZAK.
- [24] https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne?utm_source=perplexity
- [25] I. VECHIU, « MODELISATION ET ANALYSE DE L'INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS UN RESEAU AUTONOME », THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DU HAVRE, FRANCE, 2006.
- [26] B. NEUWOUH, «ANALYSE, MODELISATION ET SIMULATION DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL», MEMOIRE DE MASTER, INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT, OUAGADOUGOU, 2011.
- [27] B. ASKAS AND R. SELLAH, «HYBRIDATION EN SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DES CENTRALES DIESEL DU GRAND SUD ALGERIEN : DIMENSIONNEMENT ET OPTIMISATION», MEMOIRE DE MASTER, ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER, 2021.
- [28] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Tin_Zaouatine_\(Alg%C3%A9rie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tin_Zaouatine_(Alg%C3%A9rie)).
- [29] S. MAHMOUDI ET S. RABEHI, « ETUDE DE CONCEPTION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME », MEMOIRE DE MASTER EN ELECTRONIQUE, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI- OUZOU, 2017.
- [30] LE LIVRE SOLAIRE, RENDEMENT D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE, DISPONIBLE SUR
<https://images.app.goo.gl/9LyG54xNmeT5E8rE7>.
- [31] B. HASSINI, « MODELISATION, SIMULATION ET OPTIMISATION D'UN SYSTEME HYBRIDE EOLIENPHOTOVOLTAÏQUE », MEMOIRE DE MAGISTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID DE TLEMCEM, 2010
- [32] https://homerenergy.com/products/pro/index.html?utm_source=chatgpt.com
- [33] C. AMMARI, « MODELISATION, SIMULATION ET OPTIMISATION D'UN SYSTEME HYBRIDE AUTONOME EN TROIS SOURCES», THESE DE DOCTORAT, UNIV. AHMED DRAIA ADRAR, FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE, DEP. D'HYDROCARBURES ET ENERGIES RENOUVELABLES, 2021.
- [34] [HTTPS://FR.SCRIBD.COM/DOCUMENT/833611874/HOMER-PRO-GETTING-STARTED-GUIDE?UTM_SOURCE=CHATGPT.COM](https://fr.scribd.com/document/833611874/HOMER-PRO-GETTING-STARTED-GUIDE?utm_source=chatgpt.com)
- [35] I.VECHIU, « MODELISATION ANALYSE DE L'INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS UN RESEAU AUTONOME», 2005
- [36] F. O. HOCAOGLU, O. N. GEREK, AND M. KURBAN, «A NOVEL HYBRID (WIND-PHOTOVOLTAIC) SYSTEM SIZING PROCEDURE», SOLAR ENERGY, 2009
- [37] www.groupe-soprec.com,
- [38] JINKO SOLAR CO., LTD., "JKM530-550M-72HL4-(V)-F1 MONOFACIAL SOLAR MODULE DATASHEET," JINKO SOLAR, VER. F1, 2020. [ONLINE]. AVAILABLE: [https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-\(V\)-F1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/5ff587a0/JKM530-550M-72HL4-(V)-F1-EN.pdf)
- [39] <https://fr.wind-turbine-models.com/turbines/501-bergey-bwc-excel-10?utm>
- [40] https://absak.com/product/bergey-excel-10kw-grid-tie-wind-turbine-12kw-powersync-special/?utm_source=chatgpt.com
- [41] K. BONGERS, "DPX POWER," EMAIL SIGNATURE, DPX POWER, DORDRECHT, THE NETHERLANDS. ACCESSED: JUN. 06, 2025. [ONLINE]. AVAILABLE: [HTTPS://WWW.DPXPOWER.NL](https://www.dpxpower.nl)
- [42] [HTTPS://WWW.ARCHICONTemporaine.ORG/QUEL-EST-LE-PRIX-DE-LA-BATTERIE-TESLA-PO](https://www.archicontemporaine.org/quel-est-le-prix-de-la-batterie-tesla-po)
- [43] https://handwiki.org/wiki/Engineering%3ATesla_Powerpack?utm_source=chatgpt.com
- [44] [HTTPS://WWW.ALMA-SOLARSHOP.FR/ONDULEUR-SMA/1626-ONDULEUR-SMA-TRIPower-X-25.HTML](https://www.alma-solarshop.fr/onduleur-sma/1626-onduleur-sma-tripower-x-25.html)
- [45] M. DEKKICHE, T. TAHRI, A. BETTAHAR, AND B. BELMADANI, «WEATHER DATA ANALYSIS AND OPTIMAL DESIGN OF HYBRID PV-WIND-DIESEL POWER SYSTEM FOR A VILLAGE IN CHLEF», ALGERIA," DESALINATION AND WATER TREATMENT, VOL. 77, PP. 1–10, 2017, DOI: 10.5004/DWT.2017.20714