REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
TLEMCEN

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
تلمسان

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Énergie et Environnement

Présenté par : **TIOURSI Salah eddine**

BOUKADRI Hicham

Thème

Modélisation d'un système hybride (solaire + réseau) pour l'alimentation d'un chauffe-eau électrique domestique

Soutenu publiquement, le **30 / 09 / 2026**, devant le jury composé de :

Mr Bachir Chikh-BLED	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme Djamila KHERBOUCHE	MCA	ESSA Tlemcen	Co-Encadreur
Mr Mohamed MEBROUKI	MCA	ESSA Tlemcen	President
Mr Anis CHIALI	MCA	ESSA Tlemcen	Examinateur
Mme Amina GHOMRI	Pr	ESSA Tlemcen	Examinateur

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciements

En tout premier lieu, on remercie le Dieu, tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail n'aurait pas pu voir le jour ni atteindre cette qualité sans l'aide et l'encadrement de ***Mr .Bachir Chikh BLED*** *et* ***Mme. Djamila KHERBOUCHE****.*
Nous leur adressons nos sincères remerciements pour la qualité exceptionnelle de leur encadrement, ainsi que pour leur patience.

,
Nous adressons nos sincères remerciements à ***Mr.Mohamed MEBROUKI*** *président du jury, ainsi qu'à* ***Mr. Anis CHIALI*** *et* ***Mme. Amina GHOMRI*** *, membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.*

Nous les remercions pour le temps consacré à son évaluation ainsi que pour leurs remarques et recommandations constructives.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation,

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de près ou de loin à la réalisation de ce modeste mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail :

- *à mon père (paix à son âme) et ma mère et pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, pour leur soutien continu tout au long de ma période d'études ;*

- *à mes frères Yasser et Rachad, et ma sœur Feriel que Dieu les garde, je leurs souhaite une vie pleine de succès et de réussite ;*

- *à tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'á ce jour présent ;*

- *enfin, à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.*

TIOURSI
Salaheddine
Tlemcen, le

Dédicace

Je dédie ce travail :

- *À ma chère maman, qui m'a soutenu et encouragé durant toutes ces années d'études. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude et de ma sincère reconnaissance pour son amour, sa patience et ses sacrifices.*
- *À mon cher père, qui a toujours été un pilier de force, de courage et de sagesse dans ma vie.. Sans toi, ce travail n'aurait jamais vu le jour.*

- *À mes chers frères, Mostafa, Anis et Yaagoub, ainsi qu'à ma chère sœur Rania,. Que Dieu les protège et leur accorde bonheur, santé et réussite.*

- *Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.*

BOUKADRI
Hicham
Tlemcen, le

Résumé

Ce mémoire présente l'étude et la modélisation d'un petit système hybride associant l'énergie solaire photovoltaïque et le réseau électrique pour l'alimentation d'un chauffe-eau électrique domestique. L'objectif principal est de réduire la consommation d'énergie provenant du réseau tout en assurant une alimentation fiable du système.
Le travail débute par le dimensionnement du système de chauffe-eau solaire selon les besoins énergétiques domestiques. Ensuite, une modélisation du système hybride est réalisée en prenant en compte les différents composants de l'installation. Enfin, des simulations et une analyse des résultats sont effectuées afin d'évaluer les performances énergétiques, économiques et environnementales du système ainsi que son optimisation.
Les résultats obtenus montrent que l'intégration de l'énergie solaire permet de diminuer la consommation électrique du réseau et d'augmenter la part des énergies renouvelables dans l'alimentation du chauffe-eau.

Abstract

This thesis presents the study and modeling of a small hybrid system combining photovoltaic solar energy and the electrical grid to power a domestic electric water heater. The main objective is to reduce energy consumption from the grid while ensuring a reliable power supply to the system.
The work begins with sizing the solar water heater system according to the household's energy needs. Next, a model of the hybrid system is developed, taking into account the various components of the installation. Finally, simulations and an analysis of the results are performed using Homer Pro software to evaluate the system's energy, economic, and environmental performance, as well as its optimization.
The results obtained show that integrating solar energy reduces grid electricity consumption and increases the share of renewable energy in the water heater's power supply.

ملخص

تتناول هذه الأطروحة دراسة وتصميم نموذج لنظام هجين صغير يجمع بين الطاقة الشمسية الكهروضوئية وشبكة الكهرباء لتشغيل سخان مياه كهربائي منزلي. يهدف النظام بشكل أساسي إلى تقليل استهلاك الطاقة من الشبكة مع ضمان إمداد موثوق للطاقة .تبدأ الدراسة بتحديد حجم نظام سخان المياه الشمسي وفقًا لاحتياجات الطاقة المنزلية. ثم يتم تطوير نموذج للنظام الهجين، مع مراعاة مختلف مكونات التركيب. وأخيرًا، تُجرى عمليات محاكاة وتحليل للنتائج باستخدام برنامج Homer Pro لتقييم أداء النظام من حيث الطاقة والاقتصاد والبيئة، بالإضافة إلى تحسينه .
وتُظهر النتائج أن دمج الطاقة الشمسية يقلل من استهلاك الكهرباء من الشبكة ويزيد من نسبة الطاقة المتجددة في إمداد سخان المياه بالطاقة .

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE **1**

CHAPITRE I : Évaluation des besoins énergétiques et généralités sur l'énergie photovoltaïque **2**

I.1 Introduction 3

I.2 Contexte énergétique en Algérie 3

I.2.1 Situation énergétique nationale 3

I.2.2 Développement des énergies renouvelables 3

I.2.3 Transition énergétique 3

I.3 Choix du site et données climatiques 4

I.4 Généralités sur l'eau chaude sanitaire 5

I.5 Importance de l'eau chaude sanitaire dans le secteur résidentiel 5

I.6 Besoins énergétiques du chauffe-eau 6

I.6.1 Calcul de l'énergie nécessaire 6

I.6.2 Consommation électrique réelle du chauffe-eau 8

I.7 Généralités sur l'énergie photovoltaïque : 9

I.7.1 Définition 9

I.7.2 Historique du développement photovoltaïque 10

I.7.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 10

I.7.4 Caractéristiques d'un module photovoltaïque 11

I.7.5 Rendement d'un module photovoltaïque 12

I.7.6 Avantages et limites 13

I.7.7 Potentiel photovoltaïque en Algérie 14

I.8 Conclusion 14

CHAPITRE II : Dimensionnement du système de chauffe-eau hybride photovoltaïque–réseau **15**

II.1 Introduction 16

II.2 Systèmes photovoltaïques 17

II.2.1 Système autonome 17

II.2.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau 17

II.3 Présentation du système hybride 18

Table des matières

II.3.1 Description des composants du système hybride 20

II.3.2 Principe de fonctionnement du système hybride 21

II.4 Dimensionnement du système hybride photovoltaïque–réseau 22

II.4.1 Dimensionnement du générateur photovoltaïque 22

II.4.2 Dimensionnement du convertisseur Boost DC/DC 24

II.4.3 Dimensionnement de l'onduleur 25

II.4.4 câbles électriques 26

II.4.5 Vérification énergétique du système 26

II.5 Conclusion 26

CHAPITRE III : Simulation d'un chauffe eau hybride photovoltaïque–réseau 27

III.1 Introduction 28

III.2 Présentation du logiciel HOMER Pro 28

III.3 Méthodologie de simulation dans HOMER Pro 29

III.3.1 Les données climatiques 29

III.3.2 L'architecture du système 30

III.3.3 Modélisation des composants 31

III.4 Analyse des résultats de la simulation et interprétation 36

III.4.1 Résultats énergétique 36

III.4.2 Performance énergétique et évaluation de la contribution des énergies renouvelables 38

III.4.3 Rendement global 39

III. 5 Etude économique 39

III. 6 Optimisation des performances du système hybride (PV + Réseau) 41

III.6.1 Intégration d'un système de stockage 41

III.6.2 Optimisation du dimensionnement du PV 42

III.7 Comparaison avec le système classique (100 % réseau) 44

III.8 Conclusion 45

CONCLUSION GENERALE 46

Bibliographie 46

Liste des Figures

Figure 1: Localisation géographique et potentiel solaire de la région de Béchar 4
Figure 2: Composition d'un panneau PV 9
Figure 3: Energie photovoltaïque 9
Figure 4: Cellule photovoltaïque 10
Figure 5: Caractéristiques d'une cellule PV typique 11
Figure 6: schéma électrique complet d'un modèle hybride photovoltaïque 16
Figure 7: Système PV autonome 17
Figure 8: système PV raccordé au réseau 18
Figure 9: Schéma synoptique du système hybride étudié 19
Figure 10: l'irradiation horizontale globale annuelle 29
Figure 11: La température ambiante du site 30
Figure 12: Schéma de système étudié 31
Figure 13: Caractéristiques du PV 32
Figure 14: Caractéristiques d'onduleur 33
Figure 15: Paramètres du réseau électrique 34
Figure 16: Charge électrique et consommation 35
Figure 17: Production électrique mensuelle 36
Figure 18 : Résumé des coûts 40
Figure 19: intégration des batteries de stockage 41
Figure 20 : Résultats techniques d'intégration des batteries 42
Figure 21: Caractéristiques du PV optimisé 42
Figure 22 : Résultats d'optimisation du PV 43
Figure 23 : Résultats de simulation d'un système classique (100% réseau) 44

Liste des Tableaux

Tableau 1: Paramètres d'un chauffe eau domestique *7*
Tableau 2: Paramètres du générateur PV..... *32*
Tableau 3: Paramètres d'onduleur *33*
Tableau 4 : Résumé de la Production *37*
Tableau 5 : Résumé de la consommation *37*
Tableau 6: Taux du réseau électrique..... ***Error! Bookmark not defined.***
Tableau 7: Résumé des indicateurs de performance des énergies renouvelables..... *39*
Tableau 8: coûts annualisés *40*

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque

CES : Chauffe Eau Solaire

CESI : Chauffe Eau Solaire Individuel

ECS : Eau chaude sanitaire

SWH : Solar Water Heater

SCC : Système Solaire Combiné

GHI : Rayonnement Global Horizontal

TDC : Taux De Couverture

VAN : valeur actuelle nette

TRI : Temps de Retour sur Investissement

AC : Courant Alternatif

DC : Courant Continu

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
Q	Energie ou quantité de chaleur	(J) ou (kWh)
m	Masse	Kg
C_p	Capacité thermique	(J / Kg . K)
ΔT	Différence de température	(°C) ou (K)
V	Volume	(L) ou (m^3)
G	Irradiation horizontale moyenne annuelle	kWh/m²
Tes	Température de l'eau de soutirage	°C
Tef	Température de l'eau froide entrant dans le ballon de stockage	°C
L	longueur	m
T	Température	(°C) ou (K)
D	Diamètre	m
v	Vitesse de fluide	m/s
$\dot{m}$	Débit massique de fluide	Kg/s
ρ	Masse volumique	Kg/m^3
f	Coefficient de frottement	//
ΔP	Pertes des charges	W
A	Surface	m^2
R	Résistance	Ω
V	Tension	V
I	Courant	A

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis plusieurs décennies, les préoccupations liées à l'épuisement des ressources fossiles et aux impacts environnementaux de leur exploitation ont conduit à une orientation progressive vers les énergies renouvelables. La hausse de la demande énergétique mondiale ainsi que les enjeux environnementaux ont renforcé la nécessité de développer des systèmes énergétiques plus propres, plus économiques et plus durables. Dans ce contexte, l'énergie solaire apparaît comme l'une des solutions les plus prometteuses, notamment dans les pays bénéficiant d'un fort potentiel d'ensoleillement comme l'Algérie.

Dans le secteur résidentiel, le chauffe-eau électrique représente une part importante de la consommation énergétique domestique. L'alimentation de ce type d'équipement uniquement par le réseau électrique entraîne une augmentation de la consommation d'électricité ainsi que des charges énergétiques. Afin de réduire cette dépendance au réseau conventionnel et de valoriser les ressources renouvelables disponibles, les systèmes hybrides associant l'énergie solaire photovoltaïque et le réseau électrique constituent une alternative intéressante et efficace. [1]

Le présent mémoire s'inscrit dans cette perspective et porte sur la modélisation d'un petit système hybride (solaire + réseau) destiné à l'alimentation d'un chauffe-eau électrique domestique. L'objectif principal est d'étudier les performances énergétiques et économiques du système proposé tout en recherchant une solution capable d'assurer une alimentation fiable avec une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Cette étude se concentre sur le dimensionnement du système photovoltaïque selon les besoins énergétiques du chauffe-eau, puis sur la conception et la modélisation de l'architecture hybride intégrant les différents composants nécessaires au fonctionnement du système. Une attention particulière est également portée à la simulation et à l'analyse des performances à l'aide du logiciel HOMER Pro, permettant d'évaluer la production énergétique, la consommation du réseau, la fraction renouvelable ainsi que les coûts du système.

Ce travail vise à proposer une solution énergétique adaptée au contexte domestique, contribuant à la réduction de la consommation électrique conventionnelle et à la promotion de l'utilisation des énergies renouvelables dans le domaine résidentiel .

CHAPITRE I : Évaluation des besoins énergétiques et généralités sur l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction

L'évaluation des besoins énergétiques constitue une étape essentielle dans la conception et le dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides. Dans le cas d'un chauffe-eau électrique domestique alimenté par un système hybride photovoltaïque-réseau, une estimation précise de la demande énergétique permet de déterminer la puissance nécessaire du générateur photovoltaïque ainsi que la contribution du réseau électrique.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les besoins en eau chaude sanitaire (ECS) d'une habitation résidentielle située à Béchar, puis d'estimer l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du chauffe-eau.

I.2 Contexte énergétique en Algérie

I.2.1 Situation énergétique nationale

L'Algérie possède d'importantes ressources en hydrocarbures qui constituent encore la principale source de production d'électricité. Toutefois, l'augmentation continue de la demande énergétique, liée à la croissance démographique, à l'urbanisation et à l'amélioration du niveau de vie, exerce une pression croissante sur le système électrique national. Les pouvoirs publics accordent ainsi une attention particulière à la maîtrise de la consommation énergétique et à l'amélioration de l'efficacité énergétique [2] .

I.2.2 Développement des énergies renouvelables

Face aux défis énergétiques et environnementaux, l'Algérie a engagé une stratégie nationale visant à diversifier son mix énergétique par l'intégration progressive des énergies renouvelables. Le développement de l'énergie solaire photovoltaïque constitue l'un des axes majeurs de cette stratégie, compte tenu du potentiel solaire exceptionnel dont dispose le pays [3] .

I.2.3 Transition énergétique

La transition énergétique représente aujourd'hui une priorité nationale. Les autorités algériennes poursuivent la modernisation de leur stratégie de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique afin de renforcer l'exploitation des ressources renouvelables dans les secteurs résidentiel, industriel, agricole et des transports [4] .

I.3 Choix du site et données climatiques

Dans cette étude, la région de Béchar a été retenue comme site d'implantation du système hybride photovoltaïque. Ce choix est motivé par le fort potentiel solaire de cette région du sud-ouest algérien, caractérisée par un ensoleillement important durant toute l'année [5] .

Les données climatiques et solaires du site ont été intégrées dans le logiciel HOMER Pro afin de réaliser une simulation réaliste de la production énergétique du système photovoltaïque [6] .

La moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale du site est estimée à :

$$G_{moy} = 5.38 kWh / m^2 / jour$$

Cette valeur élevée montre que la région de Béchar possède des conditions climatiques favorables à l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque.

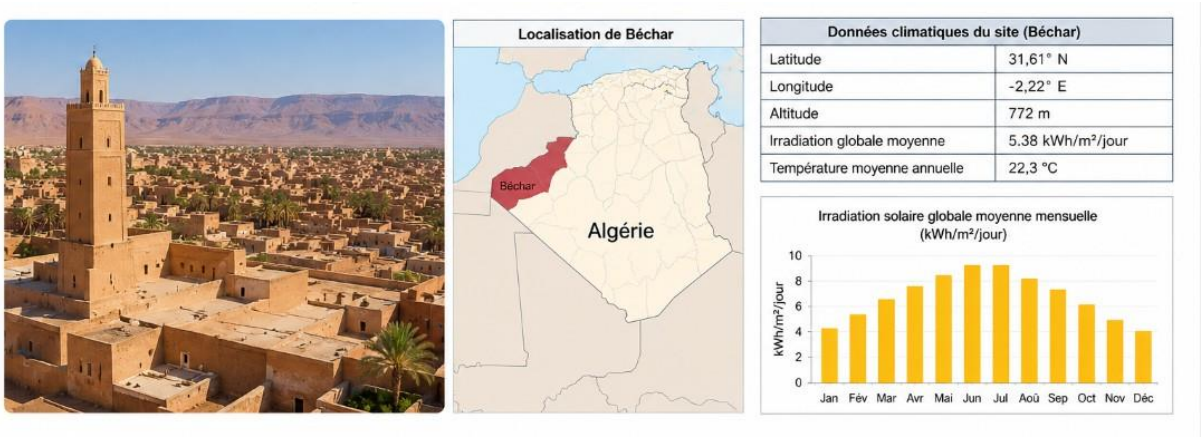

Figure 1: Localisation géographique et potentiel solaire de la région de Béchar

I.4 Généralités sur l'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire (ECS) désigne l'eau chauffée destinée aux usages domestiques et sanitaires tels que la douche, le bain, le lavage des mains, la vaisselle et certaines opérations de nettoyage. Elle est produite indépendamment du système de chauffage des locaux et constitue un poste important de consommation énergétique dans le secteur résidentiel [7] .

Dans les habitations modernes, la production d'eau chaude sanitaire représente une part significative de la consommation énergétique totale du logement. Cette part varie selon le nombre d'occupants, les habitudes de consommation, les conditions climatiques et le type d'équipement utilisé pour la production de l'eau chaude [8] .

L'ECS doit répondre simultanément à des exigences de confort, d'hygiène et de sécurité. La température de l'eau utilisée est généralement comprise entre 40 °C et 50 °C pour les usages corporels (douche, bain) et peut atteindre 55 °C pour certains usages domestiques. Afin d'éviter les risques liés au développement des bactéries de type légionelles, l'eau est généralement stockée à une température comprise entre 55 °C et 60 °C.

I.5 Importance de l'eau chaude sanitaire dans le secteur résidentiel

Dans une habitation, l'eau chaude sanitaire représente une part importante de la consommation énergétique globale. Elle est utilisée quotidiennement pour :

- les douches ;
- le lavage des mains ;
- la vaisselle ;
- le nettoyage domestique.

Selon plusieurs études sur la consommation énergétique des bâtiments résidentiels, la production d'eau chaude sanitaire constitue l'un des principaux postes de consommation après le chauffage et la climatisation.

Dans le cas d'un chauffe-eau électrique classique, toute l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau est fournie par le réseau électrique. L'intégration d'une source photovoltaïque permet alors de réduire cette dépendance énergétique et de diminuer les coûts d'exploitation.

I.6 Besoins énergétiques du chauffe-eau

I.6.1 Calcul de l'énergie nécessaire

Le dimensionnement du système hybride nécessite l'évaluation préalable des besoins énergétiques du chauffe-eau. Le besoin en eau chaude sanitaire constitue la première étape de l'évaluation de la demande énergétique du chauffe-eau. Il dépend principalement du volume d'eau chaude consommé quotidiennement et des conditions d'utilisation du système.

Dans le cadre de cette étude, le système considéré est un chauffe-eau électrique domestique équipé d'un ballon de stockage d'une capacité de **80 L**. Cette capacité est retenue comme base pour l'évaluation des besoins énergétiques du système.

Pour calculer l'énergie dans la section suivante, on utilise :

$$\boldsymbol{m = \rho \times V}$$

avec :

- $\boldsymbol{m}$: masse d'eau (kg) ;
- $\boldsymbol{\rho}$: masse volumique de l'eau, approximativement 1000 kg/m3 ;
- $\boldsymbol{V}$: volume d'eau (m^3).

Pour **80 L = 0.08 m^3**

$$\boldsymbol{m} = 1000 \times 0.08 = \mathbf{80\ kg}$$

L'énergie thermique nécessaire pour chauffer l'eau peut être calculée à partir de la relation suivante :

$$\boldsymbol{Q = m \times C_\rho \times \left[T_f - Ti\right]} \qquad (1)$$

avec :

- Q : énergie thermique nécessaire (J) ;
- m : masse d'eau (kg) ;
- C_p : capacité thermique d'eau ;
- T_f :température finale ;
- T_i : température initiale ;

Cette relation permet d'estimer la puissance énergétique que devra fournir le système photovoltaïque.

On considère un chauffe-eau domestique ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau 1: Paramètres d'un chauffe eau domestique

Paramètre	Valeur
Volume du ballon	**80 L**
Puissance de la résistance	**1200 W**
Température initiale de l'eau	**25 °C**
Température finale souhaitée	**60 °C**

Sachant que :

- **m** = 80 kg
- $\mathbf{C_p}$ = 4180 J / kg.°C
- $\mathbf{T_f}$ = 60°C
- $\mathbf{T_i}$ = 25°C

On obtient :

$$Q = 80 \text{ x } 4180 \times (60 - 25)$$

$$\boldsymbol{Q = 11.7 \text{ x } 10^6 \text{ J}}$$

E : l'énergie quotidienne nécessaire pour le chauffe-eau :

$$\text{E} = \frac{11.7 \text{ x } 10^6}{3.6 \text{ x } 10^6} \approx \boldsymbol{3.26\ kWh/jour}$$

Les besoins énergétiques ne sont pas constants durant l'année.

En hiver

- eau froide plus froide ;
- énergie nécessaire plus importante.

En été

- eau froide plus chaude ;
- consommation énergétique réduite.

I.6.2 Consommation électrique réelle du chauffe-eau

Après avoir déterminé l'énergie thermique nécessaire au chauffage de l'eau, il est nécessaire d'évaluer l'énergie électrique absorbée par le chauffe-eau afin de définir la charge électrique à alimenter par le système hybride photovoltaïque–réseau.

La consommation électrique journalière du chauffe-eau est répartie selon les périodes d'utilisation de l'eau chaude sanitaire. Dans le cas étudié, la demande est considérée selon deux principales périodes de consommation : le matin et le soir.

Par exemple :

$$V_{matin} = 30\ L$$

$$V_{soir} = 50\ L$$

L'énergie nécessaire pour chauffer **30 L** d'eau de **25** à **60 °C** est :

$$\mathrm{E} = \frac{m \times C_\rho \times (T_f - T_i)}{3.6 \text{ x } 10^6} = \frac{30 \times 4180 \times (60 - 25)}{3.6 \text{ x } 10^6} = \mathbf{1.22\ kWh}$$

Le temps de fonctionnement théorique correspondant est :

$$E = P \times t$$

Avec **P** : la puissance de la résistance = **1200 W**

$$\boldsymbol{t = \frac{E}{P} = \frac{1.22}{1.2} = 1.02\ h}$$

La consommation réelle peut donc être exprimée par :

$$E_{réelle} = E_{Chauffage} + E_{pertes}$$

où :

- $E_{chauffage}$: représente l'énergie nécessaire pour augmenter la température de l'eau .
- E_{pertes} : représente l'énergie nécessaire pour compenser les pertes thermiques du ballon.

Par conséquent :

$$\boldsymbol{E_{réelle} > 3,26\ kWh}$$

I.7 Généralités sur l'énergie photovoltaïque :

I.7.1 Définition

L'énergie photovoltaïque est une forme d'énergie électrique obtenue par la conversion directe de la lumière solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Cette conversion repose sur l'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel. Lorsqu'un photon issu du rayonnement solaire frappe un matériau semi-conducteur, il peut transférer son énergie à un électron et provoquer la création d'une paire électron-trou. Sous l'action du champ électrique interne de la cellule, ces charges sont séparées, générant ainsi un courant électrique continu [9].

Les cellules photovoltaïques sont généralement fabriquées à partir de silicium, matériau semi-conducteur abondant et présentant de bonnes performances de conversion énergétique.

Plusieurs technologies existent actuellement, notamment :

- le silicium monocristallin ;
- le silicium polycristallin ;
- les couches minces ;
- les cellules photovoltaïques à haut rendement.



Figure 3: Energie photovoltaïque

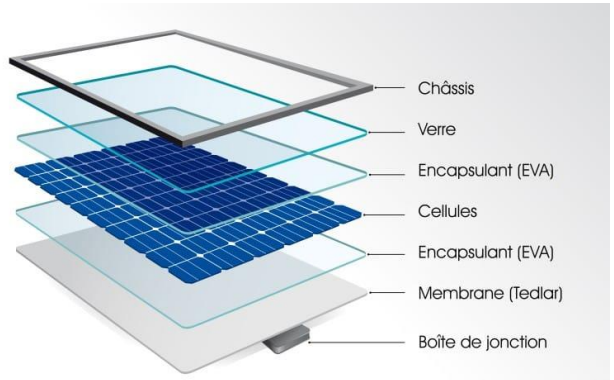

Figure 2: Composition d'un panneau PV

I.7.2 Historique du développement photovoltaïque

Le développement de la technologie photovoltaïque a connu plusieurs étapes majeures :

- 1839 : découverte de l'effet photovoltaïque par Becquerel ;
- 1954 : première cellule photovoltaïque au silicium développée par les chercheurs des Bell Laboratories ;
- années 1960 : utilisation des panneaux photovoltaïques dans les satellites spatiaux ;
- années 2000 : développement industriel à grande échelle ;
- aujourd'hui : intégration massive dans les secteurs résidentiel, industriel et agricole.

L'amélioration continue des rendements et la réduction des coûts de fabrication ont fortement contribué à la diffusion mondiale de cette technologie.

I.7.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée principalement de deux couches de matériau semi-conducteur dopé :

- une couche de type N (riche en électrons) ;
- une couche de type P (riche en trous).

Lorsque le rayonnement solaire atteint la surface de la cellule :

1. les photons sont absorbés ;
2. des paires électron-trou sont créées ;
3. les charges sont séparées par le champ électrique interne ;
4. un courant électrique est produit ;
5. ce courant peut être utilisé pour alimenter une charge électrique.

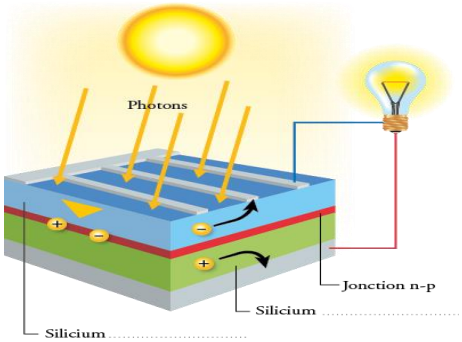

Figure 4: Cellule photovoltaïque

Le courant produit est un courant continu (DC) qui doit généralement être converti en courant alternatif (AC) à l'aide d'un onduleur pour être compatible avec les équipements domestiques et le réseau électrique [10] .

I.7.4 Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules photovoltaïques interconnectées afin d'obtenir les niveaux de tension et de courant nécessaires à l'utilisation souhaitée. Son comportement électrique est généralement caractérisé par plusieurs grandeurs permettant d'évaluer ses performances dans différentes conditions de fonctionnement.

- **La tension à vide V_{oc}** correspond à la tension mesurée aux bornes du module lorsque le circuit extérieur est ouvert, c'est-à-dire lorsque le courant délivré par le module est nul. Cette grandeur dépend notamment de la température des cellules et des conditions d'irradiation. [11]
- **Le courant de court-circuit I_{cc}** représente le courant maximal fourni par le module lorsque ses bornes sont directement reliées, ce qui correspond à une tension nulle.
  Il est principalement influencé par l'irradiance solaire reçue par la surface du module.

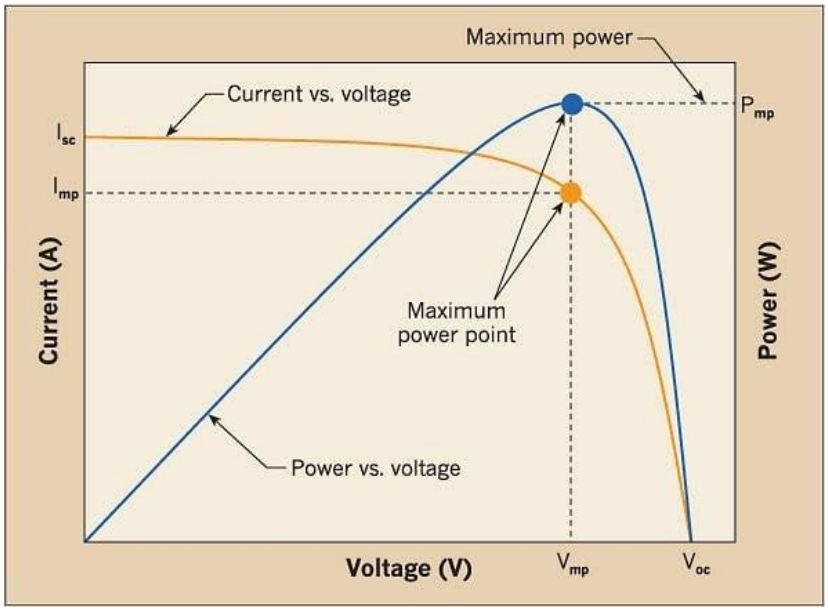

Figure 5: Caractéristiques d'une cellule PV typique

Le module photovoltaïque possède également un **point de puissance maximale (MPP)** correspondant à la combinaison particulière de tension et de courant pour laquelle la puissance électrique délivrée est maximale. Les deux grandeurs associées à ce point sont la tension au point de puissance maximale **Vmp** et le courant au point de puissance maximale **Imp.**

La puissance électrique produite par le module peut être déterminée à partir de :

$$\boldsymbol{P = V \times I}$$

Au point de puissance maximale, on obtient :

$$\boldsymbol{P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}}$$

Les caractéristiques électriques d'un module sont généralement représentées par les courbes **courant-tension (I−V)** et **puissance-tension (P−V)**.

La courbe **I−V** permet d'observer la variation du courant en fonction de la tension, tandis que la courbe **P−V** permet d'identifier directement le point de puissance maximale. Ces caractéristiques varient en fonction des conditions météorologiques, notamment de l'irradiance solaire et de la température des cellules.

I.7.5 Rendement d'un module photovoltaïque

Le rendement d'un module photovoltaïque représente sa capacité à convertir l'énergie solaire reçue en énergie électrique utile. Il correspond au rapport entre la puissance électrique maximale produite par le module et la puissance solaire incidente sur sa surface.

Le rendement peut être exprimé par la relation [12] :

$$\boldsymbol{\eta_{pv} = \frac{P_{max}}{G \times A} \times 100} \qquad (2)$$

où :

- $\mathbf{P_{max}}$: puissance électrique maximale produite par le module (W) ;
- **G** : irradiance solaire incidente sur le module (W/m²) ;
- **A** : surface du module photovoltaïque (m²).

Par exemple, pour un module dont la puissance maximale est de P_{max}=400W, soumis à une irradiance de référence de G=1000W/m^2, et possédant une surface de A= 2m^2,
le rendement est :

$$\boldsymbol{\eta_{pv} = \frac{400}{1000 \times 2} \times 100 = 20\%}$$

I.7.6Avantages et limites

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages :

- **Source d'énergie renouvelable** : Le soleil constitue une ressource naturelle inépuisable à l'échelle humaine.
- **Absence d'émissions polluantes :** La production d'électricité photovoltaïque n'émet pas directement de dioxyde de carbone (CO_2) ni d'autres polluants atmosphériques.
- **Faibles coûts d'exploitation :** Après l'installation, les coûts de maintenance sont relativement faibles.
- **Modularité :** Les systèmes photovoltaïques peuvent être dimensionnés pour de petites applications domestiques ou pour de grandes centrales électriques.
- **Adaptation aux zones isolées :** Ils permettent l'électrification de régions éloignées du réseau électrique.

Malgré ses nombreux avantages, la technologie photovoltaïque présente certaines contraintes :

- Production dépendante de l'ensoleillement ;
- Diminution de la production pendant la nuit ;
- Sensibilité aux conditions météorologiques ;
- Nécessité éventuelle d'un système de stockage ou d'une source d'appoint ;
- Investissement initial relativement élevé.

Ces limites justifient souvent le recours à des systèmes hybrides associant le photovoltaïque à d'autres sources d'énergie, notamment le réseau électrique.

I.7.7 Potentiel photovoltaïque en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel solaire exceptionnel grâce à sa position géographique et à l'étendue de son territoire saharien. Le pays bénéficie de :

- Plus de 3000 heures d'ensoleillement par an dans les régions du Sud ;
- Une irradiation solaire annuelle parmi les plus élevées au monde ;
- De vastes espaces favorables à l'installation de systèmes photovoltaïques.

La région de Béchar est particulièrement bien adaptée aux applications photovoltaïques en raison de son fort rayonnement solaire tout au long de l'année. Cette caractéristique constitue un avantage majeur pour l'alimentation des chauffe-eaux électriques domestiques à partir d'un système hybride photovoltaïque-réseau.

I.8 Conclusion

L'évaluation des besoins énergétiques constitue une étape fondamentale dans la conception et le dimensionnement des systèmes énergétiques destinés au secteur résidentiel. Dans le cadre de cette étude, l'analyse des besoins en eau chaude sanitaire a permis de mettre en évidence l'importance de cette charge dans la consommation énergétique d'un logement. Les résultats obtenus montrent que la production d'eau chaude nécessite une quantité non négligeable d'énergie électrique, ce qui justifie la recherche de solutions plus efficaces et plus durables pour réduire la dépendance au réseau électrique conventionnel.

CHAPITRE II : Dimensionnement du système de chauffe-eau hybride photovoltaïque – réseau

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude et le dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque destiné à l'alimentation d'un chauffe-eau électrique domestique.

L'objectif principal est d'optimiser l'exploitation de l'énergie solaire afin de réduire la consommation d'électricité provenant du réseau tout en assurant un confort thermique continu pour l'utilisateur.

Le système étudié combine deux sources d'énergie complémentaires : l'énergie photovoltaïque et le réseau électrique. Cette configuration permet d'assurer une alimentation stable du chauffe-eau même durant les périodes de faible ensoleillement.

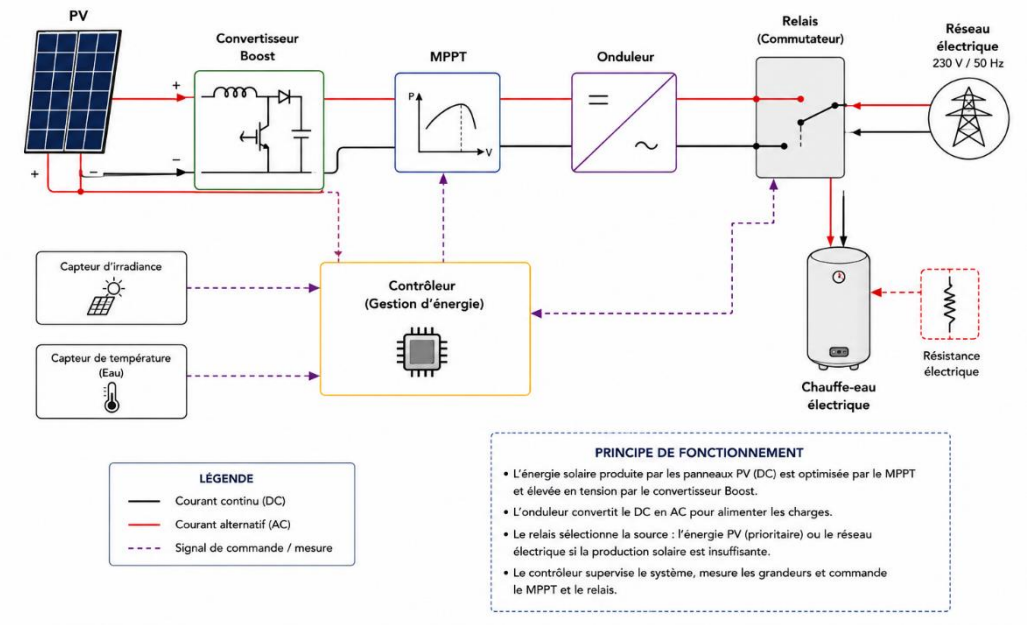

Figure 6: schéma électrique complet d'un modèle hybride photovoltaïque

Dans un premier temps, nous présenterons les besoins énergétiques du chauffe-eau ainsi que les principaux composants du système hybride, notamment les panneaux photovoltaïques, le convertisseur DC/DC, l'onduleur et le réseau électrique de secours. Ensuite, nous effectuerons le dimensionnement des différents éléments du système en tenant compte des conditions climatiques du site choisi et de la consommation énergétique de la charge

II.2 Systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques se classent principalement en deux catégories selon le mode d'utilisation de l'énergie produite.

II.2.1 Système autonome

Le système autonome est constitué essentiellement d'un ensemble de panneaux photovoltaïques associés à un dispositif MPPT permettant de suivre le point de puissance maximale. Il comprend également un parc de batteries, un régulateur de charge, ainsi qu'un onduleur destiné à alimenter les charges en courant alternatif (AC), en plus des charges en courant continu (DC) [13].

Ce type de système est principalement utilisé dans les zones isolées où le raccordement au réseau électrique est difficile ou engendre des coûts élevés.

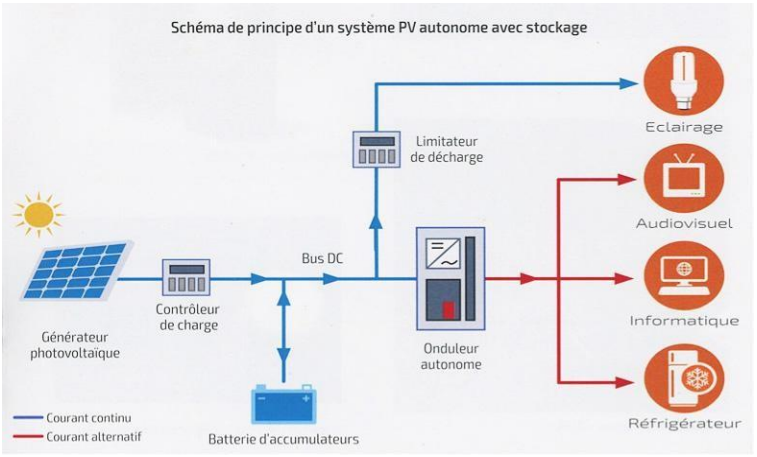

Figure 7: Système PV autonome

II.2.2 Système photovoltaïque raccordé au réseau

Le système photovoltaïque raccordé au réseau est principalement constitué de panneaux solaires et, dans certains cas, de batteries de stockage. Son raccordement au réseau électrique nécessite l'installation de compteurs destinés à mesurer la consommation ainsi que l'énergie injectée au réseau.

Cette configuration requiert également un dispositif de synchronisation garantissant, lors de l'injection de l'énergie produite, la concordance des amplitudes, des fréquences et des phases entre le signal du réseau électrique et celui généré par les panneaux photovoltaïques après conversion en courant alternatif (AC) [14].

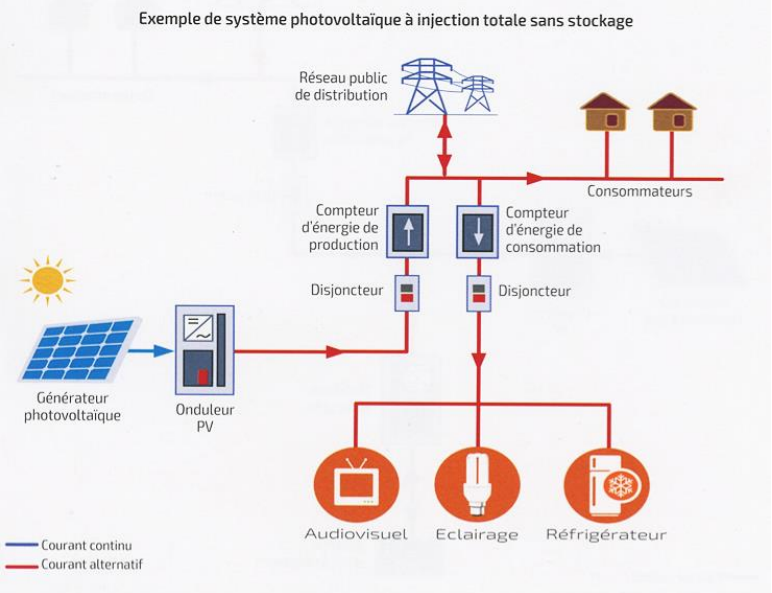

Figure 8: système PV raccordé au réseau

II.3 Présentation du système hybride

Le système étudié dans ce travail est un système hybride de faible puissance destiné à l'alimentation d'un chauffe-eau électrique domestique. Il associe deux sources d'énergie complémentaires : les panneaux photovoltaïques, qui exploitent l'énergie solaire, et le réseau électrique, utilisé comme source de secours lorsque la production solaire est insuffisante.

Les panneaux photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique sous forme de courant continu. Cette énergie peut être utilisée directement par le système ou transformée en courant alternatif à l'aide d'un onduleur intégré. Le réseau électrique intervient automatiquement afin d'assurer la continuité de fonctionnement du chauffe-eau, notamment pendant les périodes de faible ensoleillement ou durant la nuit [13].

L'intégration de ces deux sources dans un même système permet d'améliorer la fiabilité énergétique et d'optimiser la consommation électrique. Ce couplage offre plusieurs avantages, parmi lesquels :

- assurer une alimentation continue du chauffe-eau .
- diminuer la consommation d'énergie provenant du réseau .
- valoriser l'utilisation de l'énergie solaire disponible .
- garantir un fonctionnement stable malgré les variations climatiques .
- réduire l'impact environnemental grâce à l'exploitation d'une énergie renouvelable.

La Figure **-9-** présente la structure globale du système hybride étudié. L'énergie solaire, caractérisée par l'irradiance G et la température T est convertie par le générateur photovoltaïque en énergie électrique continue. Un algorithme MPPT permet d'extraire la puissance maximale disponible du générateur PV. Cette énergie est ensuite transmise à un convertisseur Boost DC/DC, qui adapte et élève la tension continue.

L'onduleur DC/AC convertit ensuite cette tension en tension alternative afin d'alimenter le chauffe-eau électrique ou d'échanger de l'énergie avec le réseau électrique. Un système de commande et de commutation assure la gestion du transfert d'énergie entre la production photovoltaïque, le chauffe-eau et le réseau [15] .

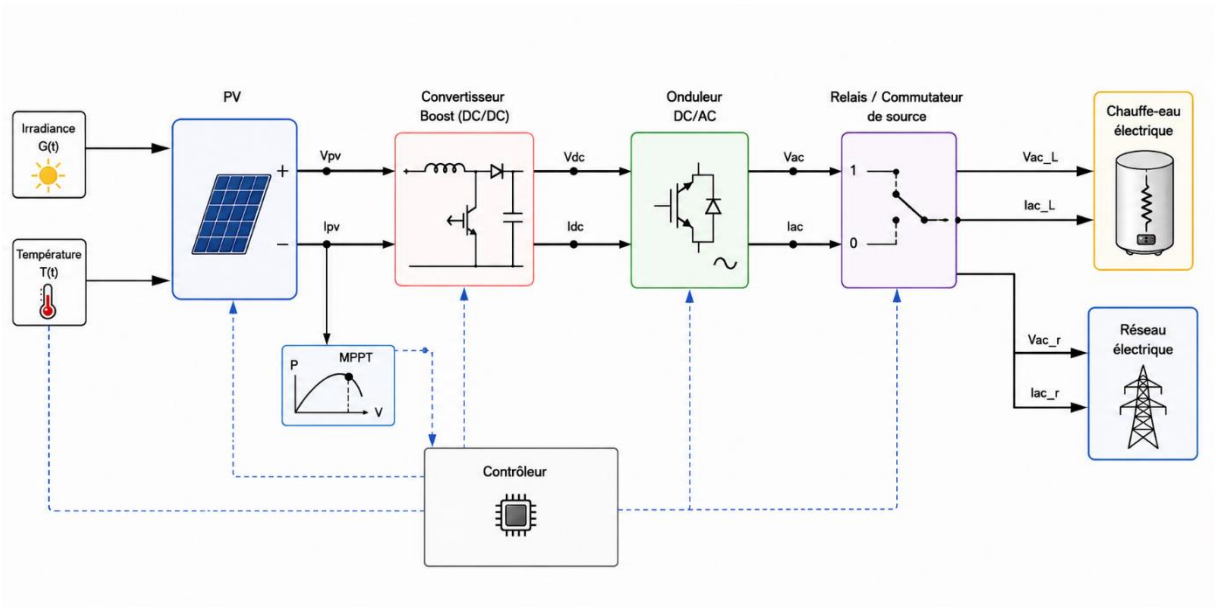

Figure 9: Schéma synoptique du système hybride étudié

II.3.1 Description des composants du système hybride

a. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque constitue la principale source d'énergie du système. Il est composé d'un ensemble de modules photovoltaïques connectés en série et en parallèle afin d'obtenir la tension et la puissance désirées .

La puissance produite dépend principalement :

- l'irradiation solaire .
- la température .
- l'orientation des panneaux .
- l'inclinaison des modules photovoltaïques [16].

b. Convertisseur DC/DC

Le convertisseur DC/DC permet d'adapter la tension délivrée par les panneaux photovoltaïques afin d'optimiser le transfert de puissance vers la charge.

Ce convertisseur est généralement associé à une commande MPPT dont le rôle est d'extraire en permanence la puissance maximale disponible des panneaux photovoltaïques malgré les variations climatiques.

c. Onduleur

L'onduleur assure la conversion du courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif compatible avec le chauffe-eau ou le réseau électrique [13] .

d. Chauffe-eau électrique

Le chauffe-eau électrique est la charge principale du système hybride. Son fonctionnement repose sur une résistance électrique permettant de transformer l'énergie électrique en énergie thermique afin de chauffer l'eau [17] . La consommation énergétique du chauffe-eau dépend principalement :

- Le volume d'eau .
- La température souhaitée .
- La puissance de la résistance .
- La durée d'utilisation .

e. Réseau électrique

Le réseau électrique représente la source de secours du système hybride. Il intervient lorsque la puissance produite par les panneaux photovoltaïques devient insuffisante pour satisfaire les besoins du chauffe-eau.

Cette complémentarité garantit la continuité du service et améliore la fiabilité du système.

II.3.2 Principe de fonctionnement du système hybride

Le fonctionnement du système hybride repose sur la complémentarité entre l'énergie photovoltaïque et le réseau électrique.

Pendant les périodes d'ensoleillement, les panneaux photovoltaïques produisent une énergie électrique utilisée pour alimenter le
chauffe-eau. Lorsque la puissance générée est suffisante, le chauffe-eau fonctionne principalement grâce à l'énergie solaire [13].

En revanche, lorsque la production photovoltaïque diminue à cause des conditions climatiques ou pendant la nuit, le réseau électrique intervient automatiquement afin de compléter l'alimentation.

Le système de commande assure la gestion de l'énergie entre les deux sources afin de garantir un fonctionnement optimal du chauffe-eau.

Cette stratégie permet :

- d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire .
- de réduire la consommation du réseau .
- d'assurer un fonctionnement continu .
- d'améliorer le rendement énergétique global [16].

II.4 Dimensionnement du système hybride photovoltaïque–réseau

Le dimensionnement du système hybride consiste à déterminer les caractéristiques principales des différents composants nécessaires à l'alimentation du chauffe-eau électrique. Le système étudié est constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur continu-continu de type Boost, d'un onduleur continu-alternatif, d'un dispositif de commutation et du réseau électrique comme source complémentaire.

Le dimensionnement est réalisé successivement à partir de la demande énergétique du chauffe-eau, puis de la puissance photovoltaïque nécessaire et des caractéristiques des convertisseurs. [18]

II.4.1 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque doit être capable de fournir l'énergie nécessaire au chauffe-eau pendant les périodes d'ensoleillement.

La puissance du champ photovoltaïque est donnée par :

$$\boldsymbol{P_{PV} = \frac{E_j}{H \times \eta}} \qquad \textit{(3)}$$

Avec :

- E_j : énergie journalière consommée ;
- H : irradiation solaire équivalente en heures de soleil de pointe (h/jour);
- η : rendement global du système ;

On considère :

- E_j : **3.26 kWh / jour** ;
- H : **5.38 h / jour** ;
- η : **0.8** ;

Donc :

$$\boldsymbol{P_{pv}} = \frac{3.26}{5.38 \times 0.8} \approx \boldsymbol{0.755\ kW_c}$$

➢ **Détermination du nombre de modules photovoltaïques :**

Le nombre de modules nécessaires dépend de la puissance nominale du module choisi. En considérant, à titre d'exemple, des modules photovoltaïques de:

$$P_m = \boldsymbol{400\ W_c}$$

le nombre de modules est donné par :

$$N = \frac{P_{PV}}{P_{module}}$$

En remplaçant les valeurs :

$$N = \frac{755}{400} \approx \mathbf{1.88}$$

Le nombre de modules devant être entier, il est nécessaire de retenir :

$$N_{pv} = \mathbf{2\ modules}$$

La puissance photovoltaïque installée devient alors **:**

$$\boldsymbol{P_{pv,inst}} = N_{pv} \times P_m$$

$$\boldsymbol{P_{pv,inst}} = 2 \times 400 = \mathbf{800\ W_c}$$

La puissance installée de **0.8 kWc** est donc légèrement supérieure à la puissance théorique calculée de **0,755 kWc**. Cette marge permet de mieux tenir compte des variations de l'irradiance solaire et des pertes réelles du système .

- **Tension à vide V_{oc} :**

La tension à vide correspond à la tension du module lorsque le courant est nul :

$$I = 0$$

Si le module contient N_s cellules en série :

$$V_{oc,mod} = N_s \times V_{oc,cell}$$

Par exemple, pour 30 cellules en série et

$$V_{oc,cell} = 0.62\ V$$

on obtient :

$$\boldsymbol{V_{oc,mod}} = 30 \times 0.62 = \mathbf{18.6\ V}$$

- **Courant de court-circuit I_{cc}**

Le courant de court-circuit correspond au courant maximal lorsque :

$$V = 0$$

Pour des cellules identiques montées en parallèle :

$$I_{cc,mod} = N_p \times I_{cc,cell}$$

Si toutes les cellules sont uniquement en série, le courant du module reste pratiquement celui d'une cellule :

$$\boldsymbol{I_{cc,mod} \approx I_{cc,cell}}$$

- **Tension au point de puissance maximale V_{MPP}**

La tension V_{MPP} est la tension correspondant au point où le module délivre sa puissance maximale.

Si les cellules sont en série : $V_{mpp,mod} = N_s \times V_{mpp,cell}$

Par exemple :

$$V_{mpp,cell} = 0.51\ V$$

Avec 60 cellules

$$V_{mpp,mod} = 60 \times 0.51 = 30.6\ V$$

Le courant I_{MPP} peut être obtenu directement à partir de la puissance maximale :

$$I_{mpp} = \frac{P_{pv}}{V_{mpp}} = \frac{400}{30.6} = \mathbf{13.07\ A}$$

II.4.2 Dimensionnement du convertisseur Boost DC/DC

Le convertisseur Boost permet d'adapter la tension délivrée par les panneaux photovoltaïques. La puissance nominale du convertisseur doit être supérieure ou égale à la puissance maximale du générateur photovoltaïque

$$\boldsymbol{P_{boost} \geq P_{pv,inst}}$$

$$\boldsymbol{P_{boost} \geq 800\ W_c}$$

Pour tenir compte d'une marge de sécurité de 20 %, la puissance de dimensionnement peut être calculée par :

$$\boldsymbol{P_{boost} = 1.2 \times P_{pv,inst}} \quad (4)$$

$$P_{boost} = 1.2 \times 800$$

$$\boldsymbol{P_{boost}} = 960\ W \approx \mathbf{1\ kW}$$

Le convertisseur Boost devra donc être capable de traiter une puissance supérieure ou égale à environ **1 kW**.

- **Rapport cyclique du convertisseur Boost :**

  Pour un convertisseur Boost idéal, la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie est :

$$v_{out} = \frac{v_{in}}{1 - D}$$

Le rapport cyclique est donc :

$$\boldsymbol{D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}} \qquad (5)$$

Avec :

- $\mathbf{V_{in}}$: tension d'entrée V_{PV} ;
- $\mathbf{V_{out}}$: tension de sortie V_{DC};
- **D** : représente le rapport cyclique de commande du transistor du convertisseur .

Supposons que :

- $\mathbf{V_{in}} = 48$ V
- $\mathbf{V_{out}} = 220$ V

Le rapport cyclique est :

$$D = 1 - \frac{48}{220}$$

$$\boldsymbol{D = 0.78}$$

II.4.3 Dimensionnement de l'onduleur

L'onduleur doit être capable de supporter la puissance du chauffe-eau.

La puissance nominale de l'onduleur est choisie avec une marge de sécurité de 20 % :

$$\boldsymbol{P_{ond} = 1.2 \times P_{ch}} \qquad (6)$$

Avec :

$$P_{charge} = 1200\ W$$

Donc :

$$P_{ond} = 1.2 \times 1200 = \mathbf{1440\ W}$$

On choisit un onduleur de $\boldsymbol{P_{ond} = 1.5\ kW}$

La tension alternative délivrée doit être compatible avec le réseau domestique et le chauffe-eau :

$$\boldsymbol{V_{AC} = 230\ V}$$

avec une fréquence :

$$\boldsymbol{f = 50\ Hz}$$

II.4.4 câbles électriques

Le choix des câbles dépend du courant circulant dans le système. le courant fourni par les panneaux est :

$$\boldsymbol{I = \frac{P}{V} = \frac{800}{48} = 16.66\ A}$$

II.4.5 Vérification énergétique du système

L'énergie produite quotidiennement par les panneaux est :

$$\boldsymbol{E_{pv} = P_{PV} \times H} \qquad (7)$$

$$E_{pv} = 0.8 \times 5{,}38 = \boldsymbol{4.3\ kWh/jour > 3.26\ kWh\ /jour}$$

Cette énergie est supérieur aux besoins du chauffe eau . donc le système est donc correctement dimensionné .

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude et le dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque destiné à l'alimentation d'un chauffe-eau électrique domestique. Après avoir évalué les besoins énergétiques du chauffe-eau, les différents composants du système ont été dimensionnés, notamment le générateur photovoltaïque, le convertisseur DC/DC, l'onduleur ainsi que les dispositifs de protection et de stockage.

Les résultats obtenus montrent que le système proposé permet de satisfaire les besoins énergétiques du chauffe-eau tout en réduisant la consommation d'énergie provenant du réseau électrique. L'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque contribue ainsi à améliorer l'efficacité énergétique du système et à diminuer l'impact environnemental .

CHAPITRE III : Simulation d’un chauffe-eau hybride photovoltaïque – réseau

III.1 Introduction

Dans le cadre de cette étude, la simulation constitue une étape essentielle pour analyser le comportement et les performances du système de chauffe-eau solaire photovoltaïque connecté au réseau. Après avoir défini l'architecture du système et les caractéristiques de ses composants, il est nécessaire de recourir à des outils de simulation permettant de reproduire son fonctionnement dans des conditions réelles.

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer les performances énergétiques et économiques du système proposé, en tenant compte des variations des conditions climatiques, de la demande en énergie ainsi que des interactions avec le réseau électrique. Cette approche permet de valider le dimensionnement du système et d'optimiser son fonctionnement.

Pour ce faire, le logiciel HOMER Pro a été utilisé comme outil principal de simulation. Grâce à ses capacités avancées de modélisation et d'optimisation, il permet d'analyser différents scénarios de fonctionnement et de déterminer la configuration la plus adaptée [19].

Ainsi, ce chapitre est structuré autour de la présentation de l'outil de simulation, de la méthodologie adoptée, ainsi que de l'analyse des résultats obtenus .

III.2 Présentation du logiciel HOMER Pro

Le logiciel **HOMER Pro** (**H**ybrid **O**ptimization of **M**ultiple **E**nergy **R**esources) est un outil de simulation et d'optimisation largement utilisé pour la conception et l'analyse des systèmes énergétiques hybrides. Développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL), il permet de modéliser des systèmes intégrant différentes sources d'énergie telles que le photovoltaïque, le réseau électrique, les batteries et les générateurs [19].

HOMER Pro se distingue par sa capacité à simuler le fonctionnement d'un système sur une base temporelle (horaire ou annuelle), en prenant en compte les données climatiques, les profils de charge et les paramètres économiques. Il permet ainsi d'évaluer plusieurs configurations possibles et d'identifier la solution optimale en fonction de critères techniques et économiques, tels que le coût total du système, le coût de l'énergie produite et le taux de pénétration des énergies renouvelables [20].

Par ailleurs, le logiciel offre une interface intuitive facilitant la saisie des données, la configuration des composants et la visualisation des résultats sous forme de graphiques et de tableaux détaillés. Il constitue donc un outil puissant pour la prise de décision dans les projets d'énergies renouvelables.

III.3 Méthodologie de simulation dans HOMER Pro

Dans le but d'évaluer les performances du système de chauffe-eau photovoltaïque connecté au réseau, une méthodologie de simulation rigoureuse a été adoptée à l'aide du logiciel HOMER Pro. Cette démarche repose sur plusieurs étapes successives, allant de la définition de l'architecture du système jusqu'à l'analyse des résultats obtenus .

III.3.1 Les données climatiques

La simulation nécessite l'introduction des données climatiques du site étudié. Ces données incluent principalement :

- **L'irradiation solaire globale :**

Dans cette étude, les données solaires du site (Béchar) ont été introduites dans le logiciel HOMER Pro afin de simuler de manière réaliste la production énergétique. La valeur moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale est estimée à **5,38 kWh/m²/jour .**

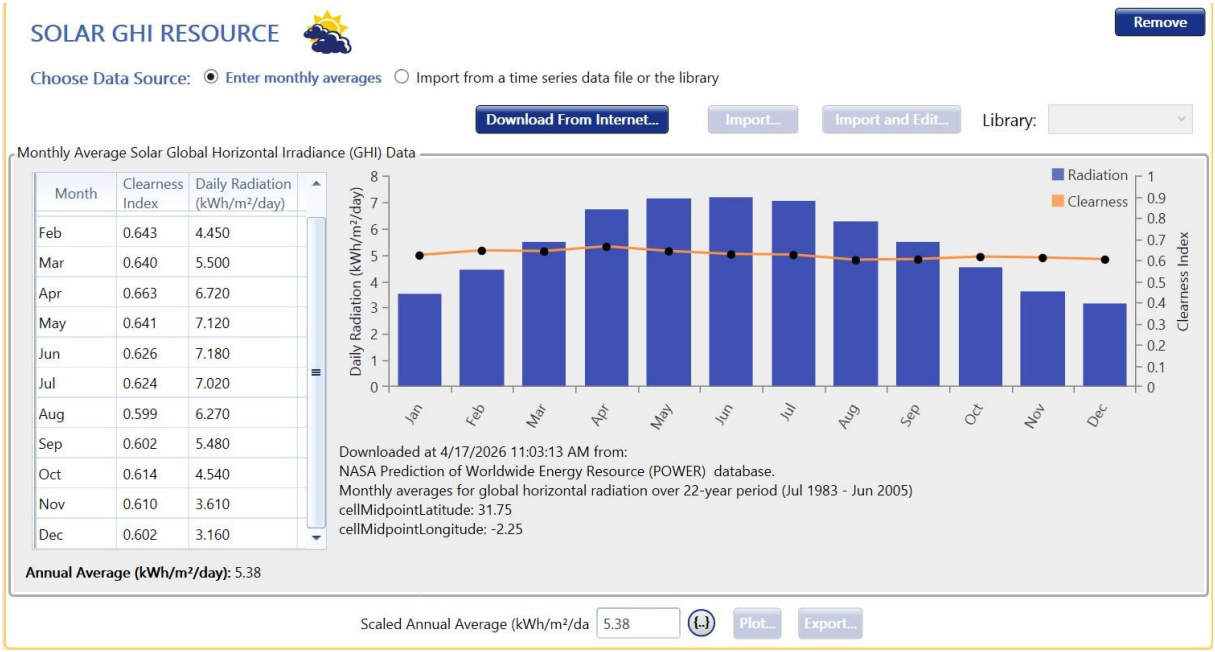

Figure 10: l'irradiation horizontale globale annuelle

- **La température ambiante :**



Figure 11: La température ambiante du site

D'un point de vue interprétatif, cette température moyenne **(20°C)** est **modérée** et **globalement favorable** au fonctionnement du système photovoltaïque. Toutefois, les températures élevées en été peuvent entraîner une légère diminution du rendement des panneaux solaires, car leur efficacité décroît avec l'augmentation de la température. Néanmoins, cet effet reste limité et est généralement compensé par une irradiation solaire plus importante durant cette période, ce qui permet de maintenir une production énergétique globale satisfaisante.

III.3.2 L'architecture du système

La première étape consiste à définir la configuration du système étudié dans l'interface du logiciel. Le système considéré est composé des éléments suivants :

- Générateur photovoltaïque (PV)
- Onduleur (DC/AC)
- Réseau électrique (Grid)
- Charge électrique représentant la résistance chauffante du chauffe-eau .

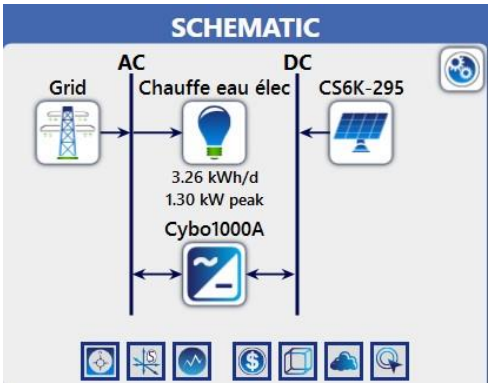

Figure 12: Schéma de système étudié

L'architecture adoptée repose sur le principe suivant :

- Le générateur photovoltaïque alimente en priorité la charge
- En cas d'insuffisance de production, le réseau électrique prend le relais
- En cas de surplus de production, l'énergie peut être injectée dans le réseau ou perdue

Cette configuration correspond à un système photovoltaïque **connecté au réseau sans stockage**.

III.3.3 Modélisation des composants

Chaque composant du système est ensuite modélisé en introduisant ses caractéristiques techniques et économiques .

1. Générateur photovoltaïque (PV) :

Le générateur photovoltaïque constitue la source principale d'énergie du système. Il est composé d'un ensemble de panneaux solaires capables de convertir le rayonnement solaire en énergie électrique sous forme de courant continu (DC). La production d'électricité dépend principalement de l'irradiation solaire et de la température ambiante.

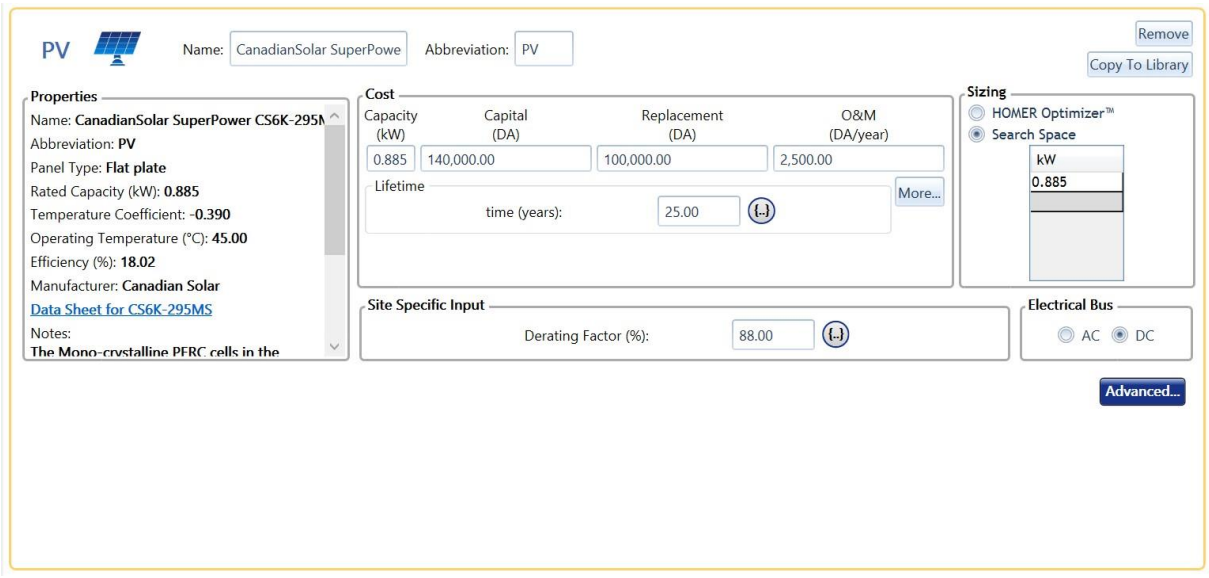

Figure 13: Caractéristiques du PV

Dans HOMER Pro, ce composant est modélisé en fonction de sa puissance nominale, de son coût d'investissement, de sa durée de vie et de ses performances. Le générateur photovoltaïque alimente en priorité la charge électrique, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie provenant du réseau électrique .

Tableau 2: Paramètres du générateur PV

Model du générateur photovoltaïque	**CanadianSolar SuperPower CS6K-295MS**
type de panneau	**Plat**
Nombre des panneaux	**3**
Capacité nominale	**0.885 kW**
Rendement	**18.02 %**
facteur de déclassement	**88 %**
Durée de vie	**25ans**

2. Onduleur (Converter) :

L'onduleur, appelé « Converter » dans HOMER Pro, assure la conversion de l'énergie électrique du courant continu (DC), produite par les panneaux photovoltaïques, en courant alternatif (AC), compatible avec les équipements domestiques et le réseau électrique.

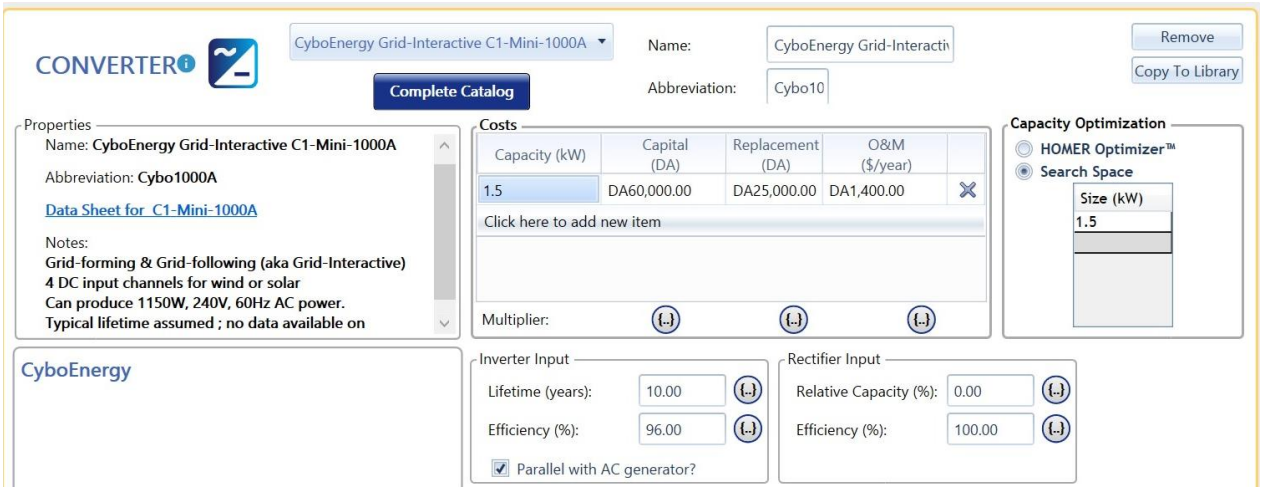

Figure 14: Caractéristiques d'onduleur

Ce composant est caractérisé par sa puissance nominale et son rendement, généralement compris entre 90 % et 95 %. Un bon dimensionnement de l'onduleur est essentiel pour garantir une conversion efficace de l'énergie et limiter les pertes dans le système.

Tableau 3: Paramètres d'onduleur

Type	**CyboEnergy Grid-Interactive C1-Mini-1000A**
Puissance	**1.5 KW**
Rendement	**96%**
Durée de vie	**10 ans**
rendement du redresseur	**95%**

3. Réseau électrique (Grid)

Le réseau électrique joue un rôle de source d'appoint dans le système. Il intervient lorsque la production photovoltaïque est insuffisante pour couvrir les besoins de la charge. Inversement, en cas de surplus de production, l'énergie excédentaire peut être injectée dans le réseau selon les conditions définies.

Dans HOMER Pro, le réseau est modélisé à travers des paramètres économiques tels que le coût d'achat de l'électricité et éventuellement le tarif de vente. Il permet d'assurer la continuité de l'alimentation électrique et d'améliorer la fiabilité du système.

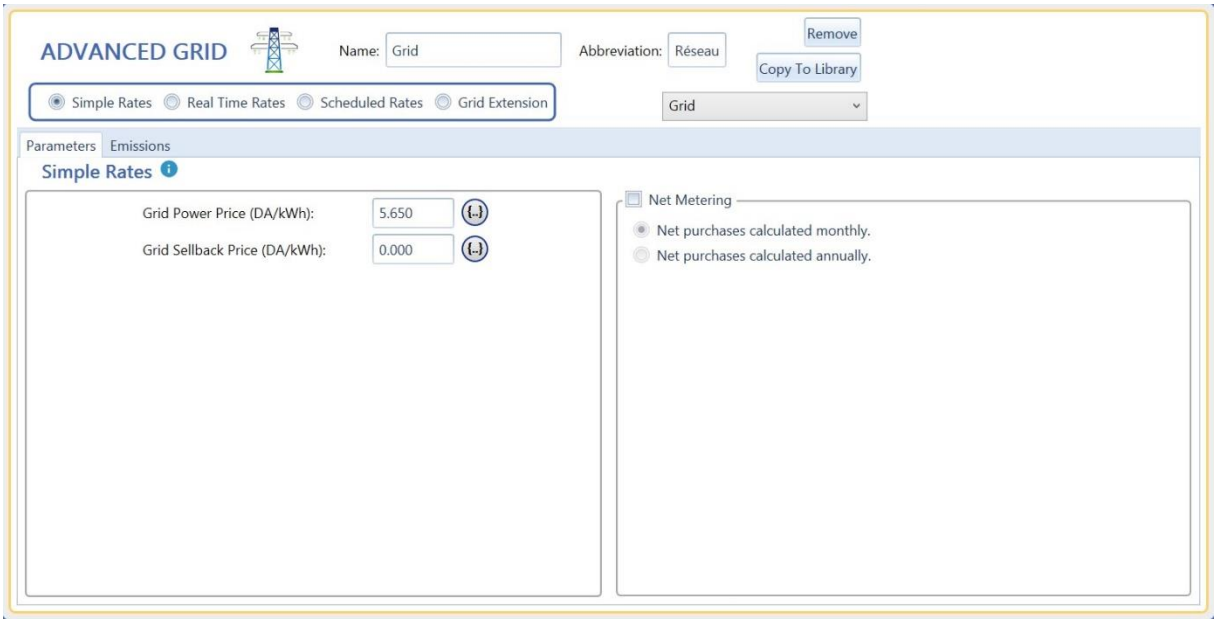

Figure 15: Paramètres du réseau électrique

Dans le contexte de cette étude, il est important de souligner que l'injection de l'énergie excédentaire produite par le système photovoltaïque dans le réseau électrique n'est pas prise en compte. En effet, le cadre réglementaire actuel en Algérie, notamment avec l'opérateur national Sonelgaz, ne permet pas aux particuliers de vendre leur surplus d'électricité au réseau dans des conditions standards. Par conséquent, toute énergie produite en excès par les panneaux photovoltaïques, lorsque la demande de la charge est satisfaite, est considérée comme perdue dans la simulation réalisée avec HOMER Pro. Cette hypothèse simplificatrice reflète la réalité actuelle du système électrique et influence directement les résultats énergétiques et économiques, en limitant la valorisation de la production photovoltaïque excédentaire [21] .

4. Charge électrique (Chauffe-eau) :

La charge du système est représentée par un chauffe-eau électrique fonctionnant à l'aide d'une résistance chauffante. Cette charge convertit l'énergie électrique en énergie thermique pour chauffer l'eau.

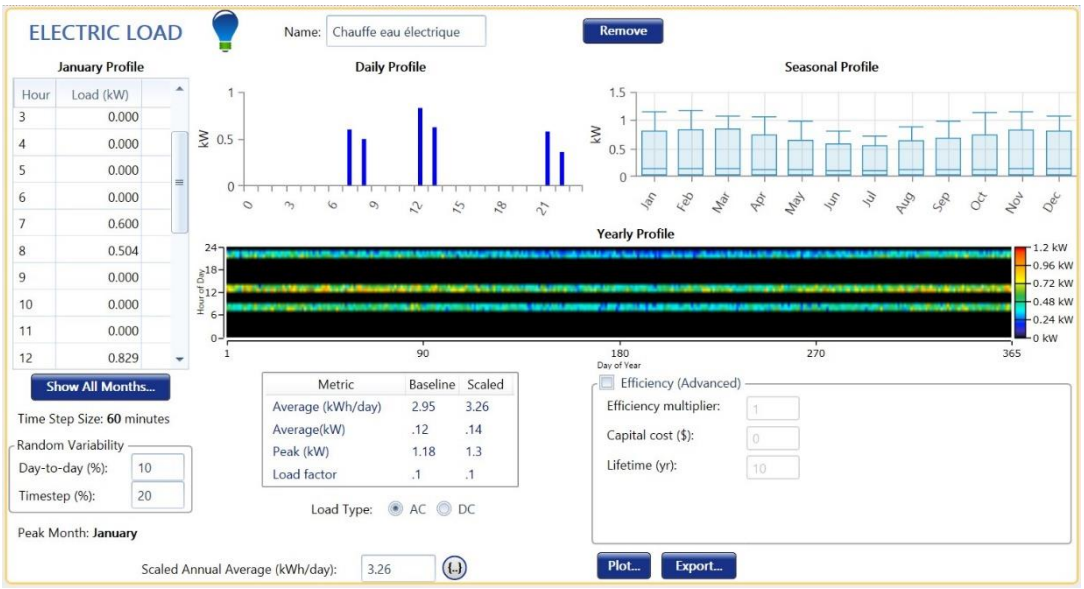

Figure 16: Charge électrique et consommation

Interprétation :

L'analyse du profil de charge montre que la consommation électrique est concentrée sur deux périodes principales de la journée, correspondant à l'utilisation du chauffe-eau, à savoir le matin et le soir. Ce fonctionnement intermittent est caractéristique des systèmes de chauffage d'eau domestiques, où la demande est liée aux habitudes des utilisateurs.

La consommation moyenne journalière est fixée à **3.26 kWh/jour**, avec une puissance de pointe d'environ **1,3 kW**, ce qui correspond à une résistance électrique typique. Le facteur de charge relativement faible (**0,1**) indique que l'énergie est consommée sur des périodes limitées dans la journée.

Par ailleurs, le profil saisonnier met en évidence une augmentation de la consommation durant la période hivernale**,** due à la baisse des températures ambiantes et à un besoin accru en eau chaude. En revanche, la consommation diminue légèrement en été, où les conditions climatiques sont plus favorables. Cette variation saisonnière permet de rendre la simulation plus réaliste en tenant compte des comportements réels des utilisateurs.

III.4 Analyse des résultats de la simulation et interprétation

III.4.1 Résultats énergétique



Figure 17: Production électrique mensuelle

- **Production d'électricité :**

Le système hybride simulé ci dessus (Figure 17) est composé d'un générateur photovoltaïque de **0,885 kW**, d'un onduleur de **1,5 kW** et d'un raccordement au réseau électrique fonctionnant en mode « **Load Following** ».

Les résultats montrent une production annuelle totale de **2 508 kWh**, dont **64,6 %** proviennent de l'énergie solaire et **35,4 %** du réseau.

La consommation annuelle de la charge est estimée à **1 825 kWh** , ce qui indique une surproduction d'énergie, avec environ **618 kWh** injectés vers le réseau ou perdu .

La fraction d'énergie renouvelable atteint **63,6 %**, traduisant une contribution significative du photovoltaïque dans la couverture des besoins énergétiques. Par ailleurs, l'absence de déficit énergétique (unmet load = 0) et de surcharge confirme la fiabilité et le bon dimensionnement du système .

Tableau 4 : Résumé de la Production

Composant	Production (kWh/an)	Pourcentage
CanadianSolar SuperPower CS6K-295MS	1,619	64.6
Réseau	889	35.4
Total	2,507	100

Tableau 5 : Résumé de la consommation

Composant	Consommation (kWh/an)	Pourcentage
Charge primaire CA	1,825	74.7
Charge primaire CC	0	0
Energie perdue	618	25.3
Total	2,443	100

- **Énergie prélevée du réseau :**

Tableau 6: Taux du réseau électrique

Mois	Énergie achetée (kWh)	Énergie perdue (kWh)	Énergie nette (kWh)	Demande de pointe (kW)		Charge énergétique
Janvier	119	49.1	69.9	2.07		DA674.50
Février	85.1	48.5	36.6	1.59		DA480.74
Mars	94.9	55.2	39.8	1.43		DA536.38
Avril	85.2	59.7	25.5	1.25		DA481.17
Mai	58.4	58.1	0.297	0.811		DA330.11
Juin	44.3	51.8	-7.55	0.709		DA250.03
Juillet	35.2	55.5	-20.3	0.658		DA199.12
Aout	43.4	52.7	-9.30	0.648		DA245.44
Septembre	48.2	51.2	-2.97	0.695		DA272.28
Octobre	68.2	49.5	18.6	0.924		DA385.24
Novembre	89.9	43.0	46.9	1.31		DA507.66
Décembre	117	43.3	73.7	1.73		DA659.09
Annuel	**889**	**618**	**271**	**2.07**		**DA 5,022**

L'analyse économique et énergétique montre que l'énergie prélevée du réseau électrique atteint **889 kWh/an**, soit **35,4 %** de l'approvisionnement total du système.

Cette dépendance partielle au réseau se traduit directement par des coûts d'exploitation annuels estimés à **5 022 DA**, représentant la principale composante des dépenses du système. En effet, même si la production photovoltaïque couvre une part majoritaire des besoins (64,6 %), le recours au réseau demeure nécessaire durant les périodes de faible ensoleillement, ce qui engendre un coût récurrent lié à l'achat d'électricité.

Le coût actualisé de l'énergie (COE), évalué à **11,05 DA/kWh**, reflète un compromis acceptable entre l'investissement initial et les charges d'exploitation, tout en restant compétitif dans le contexte étudié.

Par ailleurs, bien que le système injecte un surplus de 618 kWh/an vers le réseau, cette production excédentaire n'annule pas totalement les coûts liés à l'énergie importée. Ainsi, le réseau joue un double rôle : source d'appoint garantissant la continuité de service, mais également facteur influençant le coût global du système .

III.4.2 Performance énergétique et évaluation de la contribution des énergies renouvelables

L'analyse met en évidence la performance énergétique du système hybride étudié. Les indicateurs basés sur l'énergie montrent que la production renouvelable représente **63,6 %** de la charge totale **«** Production totale d'énergies renouvelables divisée par la charge **»** , ce qui correspond directement au taux de couverture de la demande par le photovoltaïque.

Ce résultat signifie que près des deux tiers des besoins énergétiques sont assurés par la source solaire, tandis que le reste est couvert par le réseau électrique.

Par ailleurs, le ratio « Production totale d'énergies renouvelables divisée par génération » égal à **64,6 %** confirme que la majorité de l'énergie produite par le système provient du photovoltaïque.

En complément, l'indicateur « Production d'énergie renouvelable divisée par la charge (norme HOMER) » atteint **104 %,** ce qui traduit une **surproduction** ponctuelle d'énergie renouvelable par rapport à la demande. Cette situation explique l'injection d'une partie de l'énergie vers le réseau, notamment durant les périodes de fort ensoleillement. Ainsi, bien que le système soit capable de couvrir intégralement la charge à certains moments, le taux de couverture annuel réel reste de l'ordre de **88.7 %**, ce qui reflète une dépendance partielle mais maîtrisée au réseau.

En conclusion, le système présente un **bon niveau de couverture énergétique renouvelable**, supérieur à 60 %, garantissant une réduction significative de la consommation d'électricité issue du réseau, tout en assurant la continuité d'alimentation grâce à ce dernier.

Tableau 5: Résumé des indicateurs de performance des énergies renouvelables

Indicateurs basés sur la capacité	Valeur
Capacité renouvelable nominale divisée par la capacité nominale totale	100 %
Capacité renouvelable utilisable divisée par capacité totale	100 %
Production totale d'énergies renouvelables divisée par la charge	63.6 %
Production totale d'énergies renouvelables divisée par génération	64.6 %
Production d'énergie renouvelable divisée par la charge (norme HOMER)	104 %
Taux de couverture annuel d'énergie renouvelable	88.7 %

III.4.3 Rendement global

Le rendement global du système hybride n'est pas directement fourni par le logiciel HOMER Pro, en raison de la présence de multiples sources d'énergie, notamment le générateur photovoltaïque et le réseau électrique, ce qui rend difficile la définition d'une entrée énergétique unique. Toutefois, une estimation du rendement global peut être obtenue en considérant le rapport entre l'énergie utile consommée par la charge et l'énergie totale produite par le système.

Ce rendement peut être exprimé par la relation suivante :

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{E_charge}{E_production} = \frac{1825}{2507} = \mathbf{72,8}\ \%$$

III. 5 Etude économique

L'analyse économique du système hybride simulé sous HOMER Pro repose sur plusieurs indicateurs clés permettant d'évaluer la rentabilité et la viabilité du projet.

Le coût total actualisé du système (NPC) est estimé à **349 006 DA**. Cet indicateur représente la somme de tous les coûts engagés sur la durée de vie du projet, incluant l'investissement initial, les coûts de remplacement et les coûts d'exploitation.

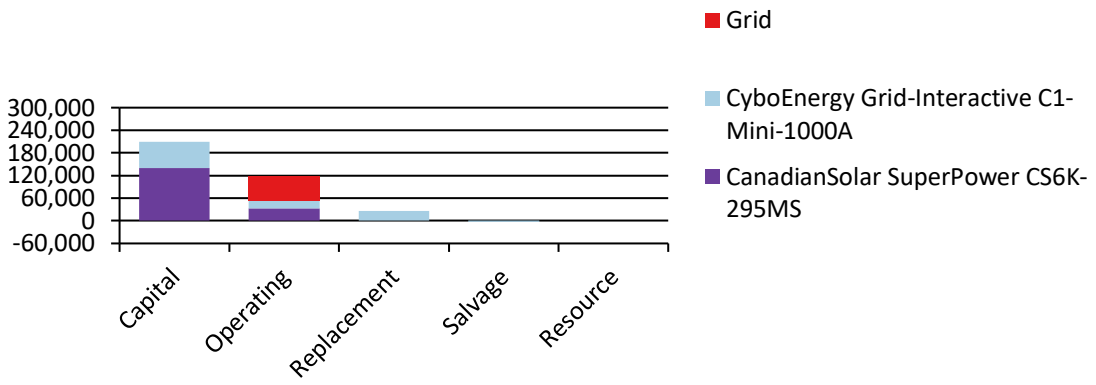

Figure 18 : Résumé des coûts

Tableau 6: coûts annualisés

Nom	Capital	Opération	Remplacement	Salvage	Resource	Total
CanadianSolar SuperPower CS6K-295MS	DA10,830	DA2,500	DA0.00	DA0.00	DA0.00	DA13,330
CyboEnergy Grid-Interactive C1-Mini-1000A	DA5,337	DA1,610	DA1,965	-DA266.38	DA0.00	DA8,646
Grid	DA0.00	DA5,022	DA0.00	DA0.00	DA0.00	DA5,022
System	DA16,167	DA9,132	DA1,965	-DA266.38	DA0.00	**DA26,997**

Le coût actualisé de l'énergie (COE – *Cost of Energy*) est évalué à **11,05 DA/kWh**. Cette valeur correspond au coût moyen de production d'un kilowattheure sur toute la durée de vie du système. Elle apparaît compétitive dans le contexte étudié, notamment en raison de la contribution importante de l'énergie photovoltaïque, qui permet de réduire l'achat d'électricité à partir du réseau.

Il est également important de noter que le système produit un excédent d'énergie estimé à **618 kWh/an**, perdue . Selon les conditions tarifaires en vigueur, cette énergie peut représenter une source de revenus ou, dans le cas contraire, une perte économique potentielle si elle n'est pas valorisée.

III. 6 Optimisation des performances du système hybride (PV + Réseau)

Les principales méthodes d'optimisation d'un système hybride reposent sur le dimensionnement optimal des composants, l'intégration de systèmes de stockage, l'amélioration de la stratégie de gestion énergétique et l'adaptation de la consommation à la production renouvelable. Ces approches permettent d'améliorer simultanément la performance technique et la rentabilité économique du système .

III.6.1 Intégration d'un système de stockage

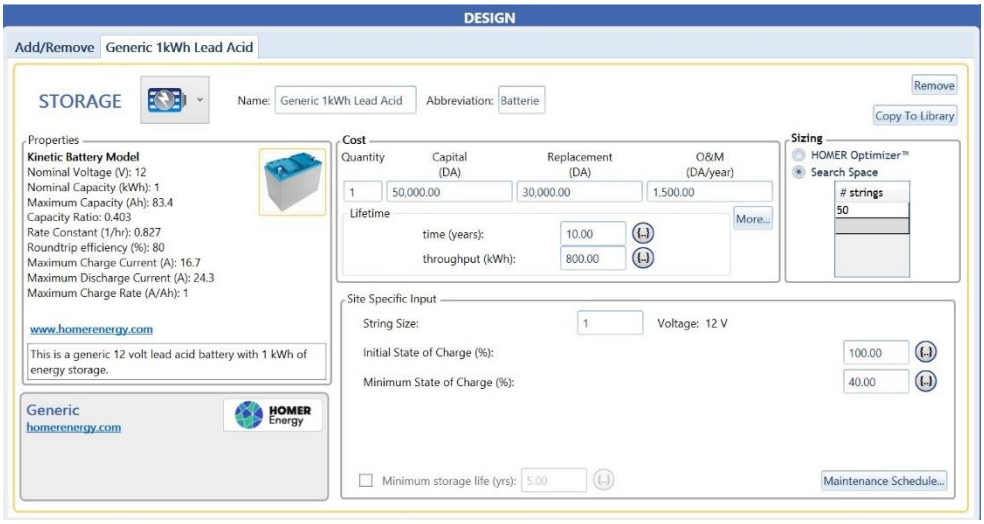

Figure 19: intégration des batteries de stockage

L'intégration des batteries dans le système hybride (Figure 19) permet d'améliorer significativement la performance énergétique globale. En stockant le surplus d'énergie photovoltaïque produit pendant les périodes d'ensoleillement, les batteries assurent une meilleure adéquation entre la production et la demande. Cela se traduit par une augmentation notable de la fraction renouvelable, qui atteint désormais **79,2 %,** en réduisant la dépendance au réseau électrique. Par ailleurs, cette stratégie contribue à diminuer les achats d'énergie depuis le réseau ainsi que les pertes d'énergie dues aux surplus non utilisés, améliorant ainsi l'efficacité globale du système et sa rentabilité énergétique .

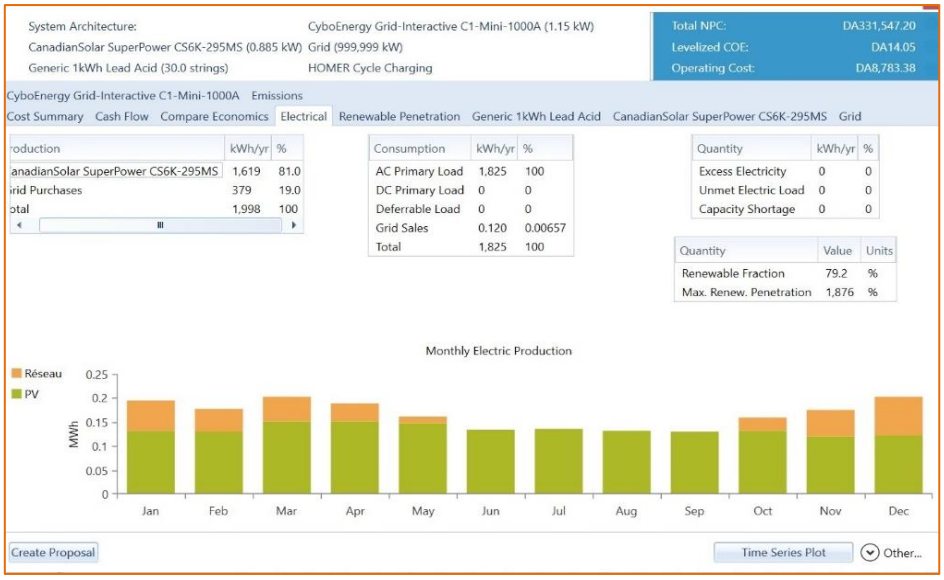

Figure 20 : Résultats techniques d'intégration des batteries

III.6.2 Optimisation du dimensionnement du PV

L'optimisation d'un système hybride ne se limite pas à l'intégration des batteries, mais repose sur plusieurs approches complémentaires, notamment le dimensionnement optimal des composants, la gestion intelligente de la charge et l'amélioration de la stratégie de dispatch. L'adaptation du profil de consommation aux périodes de production photovoltaïque permet de maximiser l'utilisation directe de l'énergie renouvelable, réduisant ainsi la dépendance au réseau et les pertes énergétiques [20].

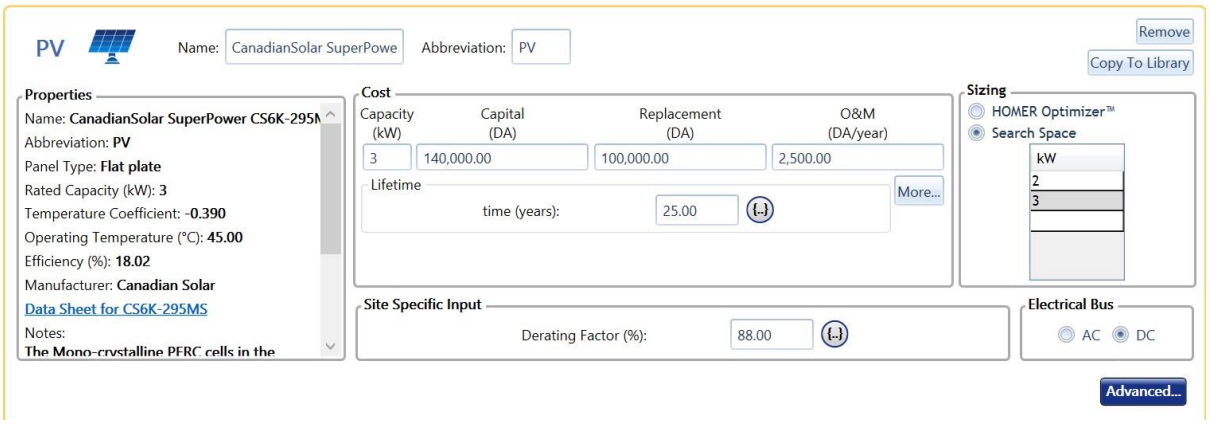

Figure 21: Caractéristiques du PV optimisé

L'optimisation de la puissance photovoltaïque vise à déterminer un compromis entre la production d'énergie, les pertes dues à la surproduction et le coût global du système. Un dimensionnement insuffisant entraîne une forte dépendance au réseau, tandis qu'un surdimensionnement augmente les pertes d'énergie non exploitée [22].

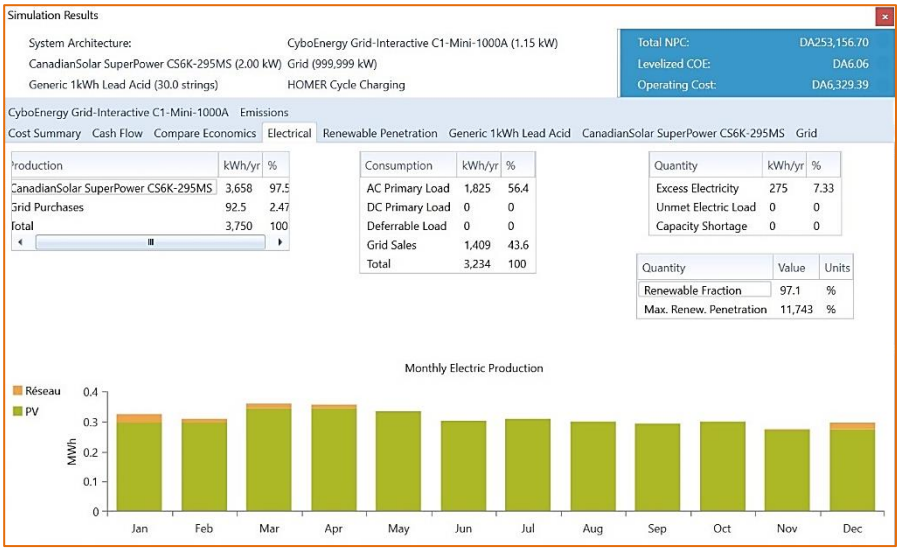

Figure 22 : Résultats d'optimisation du PV

L'analyse des résultats de simulation met en évidence que le générateur photovoltaïque assure une production annuelle de **3658 kWh**, soit près de **97,5 %** de l'énergie totale, tandis que les achats depuis le réseau restent très faibles, limités à **92,5 kWh/an** (2,47 %).

Cette configuration permet d'atteindre une fraction renouvelable élevée de **97,1 %,** traduisant une quasi-indépendance énergétique du système. Toutefois, la consommation annuelle de la charge n'est que de 1825 kWh, ce qui signifie que la production dépasse largement les besoins.

En conséquence, une quantité importante d'énergie, estimée à 1409 kWh/an (43,6 %), est stocker dans les batteries ou injecter au réseau , et environ **275 kWh/an** (7,33 %) sont perdus sous forme d'excès non exploité.

Cela met en évidence un certain surdimensionnement du champ photovoltaïque et une utilisation partielle du système de stockage, qui ne parvient pas à absorber l'intégralité du surplus. Sur le plan économique, le coût actualisé de l'énergie s'élève à **6,06 DA/kWh** pour un coût global (NPC) de **253 156 DA**, ce qui reste acceptable, mais pourrait être amélioré en ajustant la taille du générateur PV et la capacité de stockage afin de mieux correspondre aux besoins réels de la charge et de réduire les pertes énergétiques.

III.7 Comparaison avec le système classique (100 % réseau)

La comparaison entre le système hybride proposé et un système conventionnel alimenté exclusivement par le réseau électrique met en évidence des différences significatives. On a garder la même consommation avec élimination du PV et Onduleur .

Le système 100 % réseau présente une fraction renouvelable nulle et une dépendance totale vis-à-vis du réseau, bien qu'il ne nécessite pas un investissement initial important.

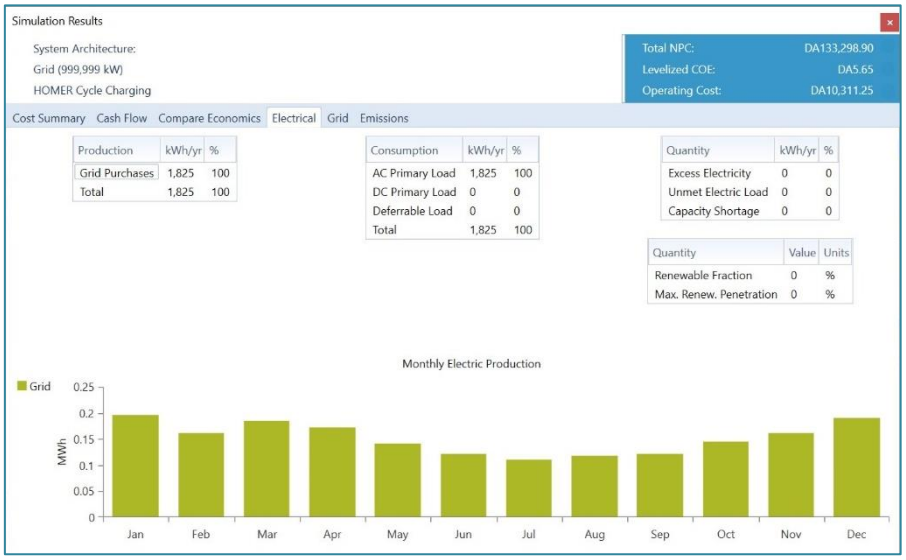

Figure 23 : Résultats de simulation d'un système classique (100% réseau)

En revanche, le système hybride étudié permet d'atteindre une fraction renouvelable élevée de 97 %, avec une consommation du réseau fortement réduite à seulement 92,5 kWh/an. Toutefois, cette amélioration énergétique s'accompagne d'un coût initial plus élevé et d'un excès de production non totalement valorisé. Ainsi, le choix entre les deux systèmes repose sur un compromis entre performance énergétique, coût global et impact environnemental.

Sur le plan économique, les résultats montrent que le système classique présente un coût global (NPC) plus faible, estimé à environ 133 000 DA, contre 349 006 DA pour le système hybride. Cette différence s'explique principalement par l'absence d'investissement initial dans les panneaux photovoltaïques [23].

En effet, en Algérie, le prix de l'électricité est relativement bas, de l'ordre de **5,65 DA/kWh** pour les ménages, soit largement inférieur à la moyenne mondiale . Cette tarification subventionnée rend l'utilisation du réseau particulièrement économique, ce qui favorise les systèmes conventionnels du point de vue financier [23].

Le choix entre les deux systèmes dépend des objectifs recherchés : le système classique est plus économique dans le contexte algérien grâce au faible coût du kWh, tandis que le système hybride se distingue par ses performances énergétiques et environnementales élevées [24].

III.8 Conclusion

En conclusion, l'étude de simulation a permis de mettre en évidence l'impact du dimensionnement et de l'intégration des composants sur les performances du système énergétique.

L'optimisation du générateur photovoltaïque et l'ajout de batteries ont conduit à une amélioration significative de la fraction renouvelable, atteignant des valeurs élevées proches de l'autonomie énergétique. Toutefois, cette performance s'accompagne d'un surdimensionnement partiel et d'un coût global plus élevé.

La comparaison avec un système classique alimenté uniquement par le réseau a montré que ce dernier reste plus économique dans le contexte algérien, en raison du faible coût de l'électricité.

Ainsi, le choix de la configuration optimale repose sur un compromis entre performance énergétique, coût et impact environnemental.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire a été consacré à l'étude et à la modélisation d'un petit système hybride associant l'énergie solaire photovoltaïque et le réseau électrique pour l'alimentation d'un chauffe-eau électrique domestique. L'objectif principal était d'évaluer la faisabilité technique et économique de cette solution tout en cherchant à réduire la consommation d'électricité provenant du réseau conventionnel.

Dans un premier temps, le dimensionnement du système a permis d'estimer les besoins énergétiques du chauffe-eau et de déterminer les caractéristiques des composants nécessaires à son fonctionnement. Cette étape a constitué une base essentielle pour la conception d'un système adapté aux conditions d'utilisation envisagées.

Par la suite, la modélisation et la conception du système hybride ont permis de mettre en place une architecture combinant la production photovoltaïque et l'alimentation par le réseau électrique. Cette configuration vise à exploiter au mieux l'énergie solaire disponible tout en garantissant la continuité de service lorsque la production photovoltaïque est insuffisante.

Les simulations réalisées à l'aide du logiciel HOMER Pro ont permis d'évaluer les performances du système selon plusieurs critères énergétiques et économiques. Les résultats obtenus montrent que l'intégration de l'énergie photovoltaïque contribue à réduire la consommation d'électricité issue du réseau et à augmenter la part d'énergie renouvelable utilisée pour le chauffage de l'eau sanitaire. L'étude d'optimisation a également mis en évidence l'influence du dimensionnement des composants sur les performances globales du système.

D'un point de vue économique, l'analyse a montré que le système hybride constitue une solution intéressante pour valoriser l'énergie solaire disponible. Toutefois, dans le contexte algérien où le coût de l'électricité demeure relativement faible, un système alimenté exclusivement par le réseau peut présenter un coût global inférieur. Néanmoins, le recours à une source renouvelable permet de réduire la dépendance énergétique aux ressources conventionnelles et s'inscrit dans les objectifs de transition énergétique et de développement durable.

En définitive, ce travail met en évidence le potentiel des systèmes hybrides photovoltaïque-réseau dans les applications domestiques. Il constitue une base de réflexion pour le développement futur de solutions énergétiques plus performantes intégrant, par exemple, des systèmes de stockage ou des stratégies avancées de gestion de l'énergie. Ces améliorations pourraient accroître davantage l'autonomie énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables dans le secteur résidentiel.

Bibliographie

[1] N. KADRI et A. FERDJI, «Etude comparative entre les différentes structures des installations hybrides (Doctoral dissertation, Directeur: Mme. LASSOUANI Fatiha/Co-directeur: Mme.FARADJI Djamila Née KHERBOUCHE).,» 2022.

[2] W. O. Hamouda, «Consommation énergétique: L'État intensifie le suivi du programme algérien,» *horizons-dz,* 2022.

[3] CREG, «Programme national de développement des énergies renouvelables,»

[4] CDER, «Le mix énergétique en Algérie,» 2019. [En ligne].

[5] Ministry Of Energy And Renewable Energies, 2025. [En ligne].

[6] HOMER Pro.

[7] Encyclopédie du Bois-Énergie, « Besoins d'eau chaude sanitaire,» *Biomasse Normandie,.*

[8] S. Rouchier, «Manuel de performance énergétique des bâtiments,» 2023.

[9] International Energy Agency (IEA), «Solar PV,» [En ligne].

[10] CDER, «Atlas Solaire Algérien,» 2025. [En ligne]. [Accès le Janvier 2026].

[11] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering, 2 éd., Acadimic press, 2013.

[12] T. Huld, Gottschalg, R., Beyer et Topič, «Mapping the performance of PV modules, effects of module type and data averaging,» *Solar Energy,* vol. 324–338, p. 84, 2010.

[13] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, New jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2004.

[14] R. A, Messenger et Amir Abtahi, Photovoltaic Systems Engineering, 3 éd., New York, 2010.

[15] Hariri, Mohd Khairunaz et Mohd Khairunaz, «Grid-Connected PV Generation System—Components and Challenges: A Review,» *Energies,* vol. 13, n° %14279, p. 17, 2020.

[16] M. G. Villalva, Jonas Rafael Gazoli et Ernesto Ruppert Filho, «Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,» *IEEE Transactions on Power Electronics,* vol. 24(5), pp. 1198 - 1208, June 2009.

[17] J. Duffie et Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4 éd., University of Wisconsin-Madison: John Wiley & Sons, 2013.

[18] Z. BENBOUABDELLAH & HADJAL, E. M., «SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE AUTONOME(Doctoral dissertation, Directeur: Mme. FARADJI Djamila Née KHERBOUCHE),» 2020.

[19] T. LAMBERT, G. PAUL et L. PETER , «MICROPOWER SYSTEM MODELING WITH HOMER,» *National Renewable Energy Laboratory,* 2006.

[20] HOMER Pro, «HOMER Pro User Manual,» National Renewable Energy Laboratory, 2023.

[21] Sonelgaz, «Grilles tarifaires de l'électricité pour les clients basse tension résidentiels,» 2023.

[22] Katsaprakakis et Dimitris Al, A hybrid power plant towards 100% energy autonomy for the island of Sifnos, Greece. Perspectives created from energy cooperatives, Greece, 2018.

[23] GlobalPetrolPrices, «Algeria electricity prices,» September 2025. [En ligne].

[24] Kherbouche, D, Ghomri, A et Lafri, I, «Conceptual Density Functional Theory (DFT) Study of Some Organic Dyes for Their Use as Sensitizers in Molecular Photovoltaics,» *Journal of Fundamental and Applied Sciences,* pp. 245-254, 2026.