الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Électrotechnique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Électrotechnique

Spécialité : Énergies Renouvelables en électrotechnique

Par : - MOUKHTARAHDOUGA Messaouda

- MERZOUGUI Sonia

Sujet

Dimensionnement et évaluation des performances d'un système PV autonome avec stockage

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2026 , devant le jury composé de :

Mr. AISSA Oualid	MCA	**Univ-BBA**	Président
Mr. FALEH Abdallah	MCB	**Univ-BBA**	Examinateur
Mr. SLAMA Fateh	MCB	**Univ-BBA**	Encadrant

Année universitaire 2025/2026

Remerciement

Nous remercions **ALLAH** le Tout-Puissant de nous avoir accordé la force et le courage pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur **Dr. Fateh Slama** pour ses orientations précieuses et ses conseils avisés, et nous le prions de bien vouloir agréer le témoignage de notre sincère reconnaissance et de notre profond respect.

Nous exprimons également notre profonde gratitude aux membres du jury, le président : **Dr. Aissa Oualid** et l'examinateur : **Dr. Faleh abdallah** pour avoir accepté d'examiner notre travail. Leurs suggestions constructives ont grandement contribué à l'amélioration de ce projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de MASTER.

Nous adressons également nos vifs remerciements **aux membres du corps enseignant** de l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj.

À toute la promotion 2025/2026, et nous citons particulièrement les étudiants de la spécialité Énergies Renouvelables du département d'Électromécanique

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

***À mon cher père et à ma précieuse mère**, pour leurs sacrifices et leur dévouement inestimable ; ils ont été mon soutien et la lumière de mon chemin à chaque étape. Je demande à Allah de les préserver et de leur accorder santé et bien-être.*

***À mon cher époux**, pour sa patience, son soutien indéfectible et ses encouragements tout au long des étapes de réalisation de ce travail ; qu'il trouve ici l'expression sincère de ma profonde gratitude.*

***À mes chers frères et sœurs**, qui ont toujours été ma source de force et mon appui.*

*À ma collègue et amie qui a partagé ce parcours avec moi, **Sonia Merzougui**, pour sa coopération et sa bienveillance tout au long de ce cheminement*

Massouda Mokhtar Ahdougha ✍️

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À mon cher frère **Mohamed Amine**, qui a été un véritable soutien tout au long de ce parcours. Par son encouragement et son appui constant, il a contribué à ma motivation et à ma persévérance. Je lui exprime toute mon affection et ma profonde gratitude.*

*À mes chers parents, ma chère sœur **Noura**, qu'Allah lui accorde Sa miséricorde, à mes sœurs **Ibtissam, Chahra, Ahlam, Basma et Rabia**, ainsi qu'à mes neveux et nièces **Meriem, Afnane, Douaa, Adam et Rabah**.*

*À mon amie **Zina**, à mon fiancé **Abdessalem** et à ma collègue **Mokhtar Ahdougha** pour sa collaboration et sa bienveillance tout au long de ce travail.*

À toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin, j'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude.

Merzougui Sonia ✍️

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Spectre du rayonnement solaire 4
Figure I.2 : Les types du rayonnement solaire 5
Figure I.3 : Description du nombre de masse d'air AM 6
Figure I.4 : Description d'une cellule photovoltaïque 7
Figure I.5 : Cellules au silicium monocristallin (1) et polycristallin (2) 7
Figure I.6 : Exemple de module utilisant le silicium amorphe 8
Figure I.7 : Cellule organique 8
Figure I.8 : La structure de la cellule photovoltaïque 9
Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire 10
Figure I.10 : Schéma électrique représentant une cellule photovoltaïque 11
Figure I.11 : Caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque 13
Figure I.12 : évolution de la caractéristique i(v).1et p(v).2 pour différents niveaux d'éclairements… 14
Figure I.13 : Evolution de la caractéristique I(v) .1 et P(v).2 pour différent températures… 15

Chapitre II

Figure II.1 : Les différents composants d'un système photovoltaïque autonome 16
Figure II.2 : Exemple d'un panneau solaire 17
Figure II.3 : Comment incliner le panneau solaire 18
Figure II.4 : Processus de charge et de décharge d'une batterie au plomb 19
Figure II.5 : Caractéristique charge et décharge d'une batterie 20
Figure II.6 : Branchement des batteries en série 21
Figure II.7 : Branchement des batteries en parallèle 21
Figure II.8 : Symbole de l'onduleur 21
Figure II.9 : Schéma de régulateur série 23

Liste des figures

Figure II.10 : Schéma de régulateur shunt 23
Figure II.11 : Régulateur MPPT 24
Figure II.12 : Graphe rendement-puissance MPPT 25
Figure II.13 : Exemple sur les câbles 26

Chapitre IV

Figure IV.1 : organigramme de sélection du bâtiment avec charge 36
Figure IV.2 : Organigramme d'ensoleillement 37
Figure IV.3 : Organigramme d'irradiation par ville 38
Figure IV.4 : Irradiation par ville 39
Figure IV.5 : Algorithme de l'angle d'inclinaison optimal 40
Figure IV.6 : Organigramme de dimensionnement du générateur photovoltaïque 43
Figure IV.7 : Organigramme de dimensionnement des batteries 44
Figure IV.8 : Organigramme du nombre de panneaux et batteries en fonction de la consommation journalière 46
Figure IV.9 : Nombre de panneaux et batteries en fonction de la consommation journalière 47
Figure IV.10 : Algorithme de choix de l'onduleur et du régulateur 48
Figure IV.11 : Algorithme de dimensionnement du câble 49
Figure IV.12 : Algorithme de production PV et consommation 51
Figure IV.13 : Production PV et consommation 51
Figure IV.14 : Algorithme de l'état de charge de la batterie (SOC) 53
Figure IV.15 : État de charge de la batterie (SOC) 53
Figure IV.16 : Organigramme d'optimisation du DOD et durée de vie 55
Figure IV.17 : Organigramme de nombre de cycles et durée de vie en fonction du DOD 56
Figure IV.18 : Nombre de cycles et durée de vie en fonction de la profondeur de décharge . 57
Figure IV.19 : Organigramme de l'autonomie de batterie 58
Figure IV.20 : L'autonomie de batterie 58
Figure IV.21 : Organigramme de performance et pertes 60
Figure IV.22 : Organigramme du Performance Ratio (PR) en fonction du rendement global 61
Figure IV.23 : Le Performance Ratio (PR) en fonction du rendement global η_sys 61
Figure IV.24 : Organigramme des pertes du système 62

Liste des figures

Figure IV.25 : Les pertes du système 63
Figure IV.26 : Organigramme du coût du système..... 64
Figure IV.27 : Organigramme du coût en fonction de la consommation..... 66
Figure IV.28 : Coût en fonction de la consommation..... 66
Figure IV.29 : Organigramme de la relation entre le DOD, la durée de vie et le coût 67
Figure IV.30 : La relation entre le DOD, la durée de vie de décharge et le coût..... 68

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Comparaison entre les technologies des cellules photovoltaïques 9

Chapitre III

Tableau III.1 : Rayonnement solaire par région – Algérie 28

Tableau III.2 : Les tensions du système correspondantes à chaque intervalle de puissance crête 30

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Caractéristiques des charges 41

Tableau IV.2 : Paramètres du système..... 42

Tableau IV.3 : Coût estimatif des composants du système photovoltaïque autonome (2025) 42

Tableau IV.4 : Site et ressources solaires 69

Tableau IV.5 : Dimensionnement des panneaux 69

Tableau IV.6 : Onduleur et appareils électroniques..... 69

Tableau IV.7 : Régulateur de charge 69

Tableau IV.8 : Câblage et sections des conducteurs..... 70

Tableau IV.9 : Dimensionnement des batteries et stockage 70

Tableau IV.10 : Performance et efficacité du système 70

Tableau IV.11 : Analyse économique et coûts détaillés..... 71

Liste des symboles

h : la constante de Planck.

c : la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.

λ : la longueur d'onde du rayonnement.

θ : l'angle formé entre la direction du Soleil et la ligne d'horizon

$\mathbf{R_{SH}}$: la fuite de courant entre la borne positive et négative de la cellule, simulant le court-circuit qui se produit notamment dans le silicium.

$\mathbf{R_S}$: reflète les diverses résistances électriques rencontrées par le courant lors de son passage (résistance des matériaux internes et résistances des points de contact).

I : Courant de sortie (Le courant produit par la cellule en Ampère).

$\mathbf{I_{Ph}}$: Photo courant (Le courant photovoltaïque généré par l'exposition à la lumière).

$\mathbf{I_o}$: Courant de saturation (Le courant de saturation inverse de la diode dans l'obscurité).

q : Charge de l'électron (1.6×10^{-19} C).

V : Tension (La tension aux bornes de la cellule solaire en Volt).

FF : Le facteur de forme.

m : Facteur d'idéalité (Le facteur d'idéalité de la diode, sa valeur est entre 1 et 2).

K : Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).

T : Température (La température de la cellule en Kelvin).

$\mathbf{P_{in}}$: puissance lumineuse incidente (W).

$\mathbf{P_{max}}$: puissance maximale délivrée (W).

P : La puissance consommé (W)

t : temps d'utilisation par jour (h)

Bj : la consommation journalière totale.

E : Énergie produite (kWh).

P : Puissance-crête du système photovoltaïque (kWc).

H : Rayonnement solaire journalier (kWh/m²/jour).

$\boldsymbol{\eta_{sys}}$: Rendement global du système.

$\mathbf{H_o}$: rayonnement solaire hors atmosphère ; rayonnement astronomique (kWh/m²/jour)

n : durée réelle d'insolation journalière mesurée (h/jour)

N : durée astronomique maximale du jour (h/jour)

a, b : constantes empiriques d'Angström (dépendent du site et du climat)

$\mathbf{I_s^c}$: constante solaire = 0,0820 MJ/m²/min

φ : latitude géographique du site (°).

δ : déclinaison solaire [varie chaque jour selon (°)

ω_s : angle horaire du coucher du soleil.

E_{Tot} : Énergie totale consommée par jour (Wh/J).

P_i : Puissance de la charge i (W)

t_i : Durée d'utilisation journalière de la charge i (h/j)

S_M : Surface du module (m^2).

G : Irradiation globale sur un plan incliné ($Wh/J/m^2$).

F_{CG} : Énergie totale consommée par jour (Wh/J).

P_C : Puissance crête nécessaire pour alimenter la charge.

P_P : Puissance crête du module photovoltaïque utilisé.

V_{sys} : Tension du système (V).

V_{mp} : Tension au point de puissance maximale (V)

N_{PP} : Nombre de modules en parallèle.

N_P : Nombre total de modules.

N_{PS} : Nombre de modules en série.

A_{UT} : Autonomie en jours.

V_{bat} : Tension de la batterie.

C_{bat} : Capacité de la batterie de stockage (Ah).

$C_{bat\ unit}$: Capacité de la batterie (Ah).

N_{BP} : Nombre de batteries en parallèle

N_{BS} : Nombre de batteries en série.

N_B : Nombre total de batteries.

P_{DD} : Profondeur de décharge.

T_{projet} : Durée du projet (années).

L_{bat} : Durée de vie de la batterie (années).

P_{PV} : Puissance crête du champ photovoltaïque (W).

I_{reg} : Courant du régulateur (A).

V_{mp} : Tension au point de puissance maximale (V).

L : Longueur du câble (m).

I : Courant dans le câble (A).

γ : Conductivité du cuivre = 56 $m/\Omega \cdot mm^2$.

ΔV : Chute de tension admissible (V).

$\mathbf{E_{consommee}}$: Énergie journalière consommée (Wh/j)

$\mathbf{E_{produite}}$: Énergie journalière produite par le champ PV (Wh/j)

$\boldsymbol{\eta_{pv}}$: Rendement des panneaux (0.85)

$\boldsymbol{\eta_{bat}}$: Rendement de la batterie (0.90)

$\boldsymbol{\eta_{inv}}$: Rendement de l'onduleur (0.95)

$\mathbf{C_{TDV}}$: Coût total estimé pour la durée de vie de l'installation.

$\mathbf{C_{RB}}$: Coût de remplacement des batteries.

$\mathbf{C_{ONS}}$: Consommation annuelle du système.

$\mathbf{C_{OM}}$: Coût d'opération et de maintenance.

$\mathbf{C_{ond}}$: Coût de l'onduleur.

$\mathbf{C_{B}}$: Coût du parc de stockage.

$\mathbf{C_{0}}$: Coûts indirects tels que la structure et le câblage.

$\mathbf{C_{GPV}}$: Coût du générateur photovoltaïque.

$\mathbf{C_{REG}}$: Coût du régulateur.

$\mathbf{C_{T}}$: Coût initial total du système.

$\mathbf{T_{cons}}$: Durée de vie de l'installation.

Sommaire

Remerciement
Dédicace
Liste des figures
Liste des tableaux
Liste des symboles et des abréviations
Introduction générale 1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques
I.1 Introduction 4
I.2 Énergie solaire 4
I.3 Rayonnement solaire 4
I.4 Nombre de masse d'air 6
I.5 Effet photovoltaïque 6
I.6 Cellule photovoltaïque 7
I.6.1 Technologies des cellules photovoltaïques 7
I.6.2 Structure de la cellule photovoltaïque 9
I.6.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire 10
I.6.4 Schéma électrique de la cellule photovoltaïque 11
I.6.5 Caractéristique courant-tension (I-V) 12
I.7 Influence de l'éclairement et de la température 14
I.8 Conclusion 15

Chapitre II : Système photovoltaïque autonome avec stockage
II.1 Introduction 16
II.2 Système photovoltaïque autonome 16
II.2.1 Générateur photovoltaïque 16
II.2.2 Système de stockage 18
II.2.2.1 La batterie 18
II.2.2.2. Les caractéristiques principales d'une batterie 19
II.2.2.3 Groupement des batteries… 20
II.2.3 L'onduleur 21
II.2.3.1 Différents types d'onduleurs autonomes 22
II.2.3.2 Caractéristiques des onduleurs 22
II.2.3.3 Critères de choix de l'onduleur… 22
II.2.4 Le régulateur de charge 22
II.2.4.1 Les différents types de régulateurs de charge 23
II.2.5 La charge 25
II.2.6 Le câblage 26
II.3 Conclusion 26

Sommaire

Chapitre III : Méthode de dimensionnement du système PV autonome

III.1 Introduction 27
III.2 Évaluation des besoins énergétiques 27
III.3 Données météorologiques et irradiation solaire 27
III.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque 29
III.5 Dimensionnement du système de stockage 31
III.6 Dimensionnement de l'onduleur 32
III.7 Dimensionnement du régulateur 32
III.8 Dimensionnement du câble 33
III.9 Calcul du Performance du Système 33
III.10 Calcul du coût de l'installation photovoltaïque 34
III.11 Conclusion 34

Chapitre IV : Résultats, performances et étude économique

IV.1 Introduction 35
IV.2 Présentation du site d'étude 35
IV.3 Irradiation solaire du site 36
IV.4 Calcul de l'angle d'inclinaison optimal 39
IV.5 Résultats du dimensionnement 41
IV.5.1 Nombre de panneaux photovoltaïques 42
IV.5.2 Nombre de batteries 44
IV.5.3 Choix de l'onduleur et du régulateur 47
IV.5.4 Dimensionnement du câble 48
IV.6 Évaluation des performances du système 50
IV.6.1 Production PV et consommation 50
IV.6.2 État de charge de la batterie (SOC) 52
IV.6.3 Profondeur de décharge (DOD) et durée de vie 54
IV.6.4 Autonomie du système 57
IV.6.5 Rendement et Performance Ratio (PR) 59
IV.6.6 Analyse des pertes du système 62
IV.7 Étude économique 63
IV.7.1 Coût total du système 63
IV.7.2 Coût en fonction de la consommation 64
IV.7.3 Influence du DOD sur le coût et la durée de vie 67
IV.8 Discussion des résultats 68
IV.9 Conclusion 71

Conclusion générale 73
Références bibliographiques
Résumés

Introduction Générale

Introduction Générale :

La transition énergétique mondiale s'impose désormais comme une nécessité incontournable, sous la double pression d'une demande croissante en électricité et de l'épuisement progressif des ressources fossiles, dont l'exploitation intensive engendre des émissions de gaz à effet de serre responsables de l'accélération du changement climatique. Face à ces défis, la communauté internationale s'oriente résolument vers les énergies renouvelables, considérées comme la solution stratégique la plus appropriée pour garantir une sécurité énergétique durable [1]. Parmi ces énergies, le solaire photovoltaïque occupe une place de premier rang, en raison de la quasi-permanence de la ressource solaire, de la facilité de son exploitation et de la compétitivité croissante de son coût d'exploitation par rapport aux autres sources d'énergie [2]. L'Algérie, de par son potentiel solaire exceptionnel (avec un rayonnement dépassant 2000 kWh/m²/an sur la majeure partie de son territoire, notamment sur les Hauts Plateaux et les régions sahariennes), représente un terrain particulièrement favorable au développement et à l'ancrage de cette filière énergétique, son gisement solaire étant estimé à plus de 169 400 TWh/an [3].

Le recours aux systèmes photovoltaïques autonomes s'avère d'autant plus pertinent dans le contexte algérien que la vaste étendue du territoire national abrite de nombreuses zones rurales et enclavées (notamment dans le Grand Sud et les Hauts Plateaux) où l'extension du réseau électrique conventionnel se heurte à des contraintes économiques et techniques rédhibitoires. Dans ce cadre, les besoins énergétiques de ces zones se diversifient selon la nature de l'usage, qu'il soit résidentiel, agricole ou industriel, impliquant des charges électriques et des durées de fonctionnement variables. Cela rend nécessaire l'adoption d'une méthodologie de dimensionnement générale et flexible, applicable à tout site géographique du territoire national et à toute valeur de charge, plutôt que de se limiter à un cas prédéfini.

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome ne repose pas sur une formule figée; il exige la prise en compte d'un ensemble de paramètres variables, au premier rang desquels figurent : les caractéristiques du site (latitude, irradiation solaire, température), les caractéristiques techniques des composants du système (modules photovoltaïques, batteries, régulateurs, onduleurs) et une étude fine et détaillée de la charge à alimenter en termes de puissance et de durée d'utilisation [4]. L'intégration d'un système de stockage par batteries revêt dans ce contexte une importance cruciale, dans la mesure où il constitue un élément essentiel pour garantir de la continuité d'alimentation de la charge durant les périodes d'absence ou de faiblesse de l’irradiation solaire ; le choix de sa capacité du système de stockage et de sa

technologie représente dès lors un facteur déterminant tant pour la fiabilité du système que pour son coût global [5].

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail, dont l'objectif est de proposer une méthodologie complète de dimensionnement et d'évaluation des performances d'un système photovoltaïque autonome couplé à un système de stockage, applicable à tout site géographique en Algérie et adaptée à des charges électriques de valeurs différentes. Cette démarche vise à répondre à la diversité des besoins énergétiques réels des utilisateurs tout en étudiant l'influence du choix des technologies de modules photovoltaïques et de la capacité de stockage sur les performances techniques de l'installation ainsi que sur son coût global. Afin de répondre à cette problématique, le présent mémoire est organisé en quatre chapitres principaux.

Le premier chapitre présente les généralités relatives aux systèmes photovoltaïques, en abordant successivement le rayonnement solaire, le principe de l'effet photovoltaïque, les technologies des cellules solaires, ainsi que leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques électriques.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du système photovoltaïque autonome couplé à un système de stockage, à travers l'analyse de ses principaux composants, à savoir : le générateur photovoltaïque, les batteries (leurs caractéristiques et leurs modes d'association), ainsi que les onduleurs, leurs différentes technologies et les critères de leur sélection.

Le troisième chapitre présente une méthodologie de dimensionnement générale et flexible, allant de l'évaluation des besoins énergétiques et de l'analyse des données d'irradiation solaire pour tout site donné jusqu'au dimensionnement du générateur photovoltaïque, du système de stockage, de l'onduleur et du régulateur, tout en intégrant une estimation du coût prévisionnel de l'installation.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à l'application de la méthodologie proposée à une étude de cas. Il présente le site d'étude ainsi que les données d'irradiation solaire utilisées. Les résultats du dimensionnement sont ensuite exposés, suivis d'une évaluation des performances du système (production énergétique, état de charge, profondeur de décharge, autonomie et rendement), puis d'une analyse économique complétée par une étude de sensibilité des résultats. Le chapitre se termine par une discussion approfondie des résultats obtenus.

Chapitre I :
Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque figure parmi les sources d'énergie renouvelables les plus importantes, car elle repose sur la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique à travers des unités appelées cellules photovoltaïques, qui fonctionnent selon un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons étudier et analyser les éléments suivants : le concept de l'énergie solaire, le mécanisme de l'effet photovoltaïque, ainsi que le principe de fonctionnement des cellules solaires et leurs principales caractéristiques techniques.

I.2 Énergie solaire

L'énergie solaire repose sur la conversion directe des rayonnements lumineux d'origine solaire en énergie électrique. La distance séparant le Soleil de la planète Terre est estimée à environ 150 millions de kilomètres, tandis que la vitesse de propagation de la lumière est d'environ 300 000 km/s.

I.3 Rayonnement solaire

Le Soleil émet son énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont le spectre s'étend sur une plage de longueurs d'onde comprise entre 0,22 et 10 micromètres (µm). Ce rayonnement est composé de minuscules particules lumineuses connues sous le nom de photons, où l'énergie de chaque photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, selon la relation mathématique suivante :

$$E_p = \frac{h\ c}{\lambda} \qquad \text{(I.1)}$$

Où chaque symbole représente :

h : la constante de Planck (une constante quantique fondamentale).

c : la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.

λ : la longueur d'onde du rayonnement.

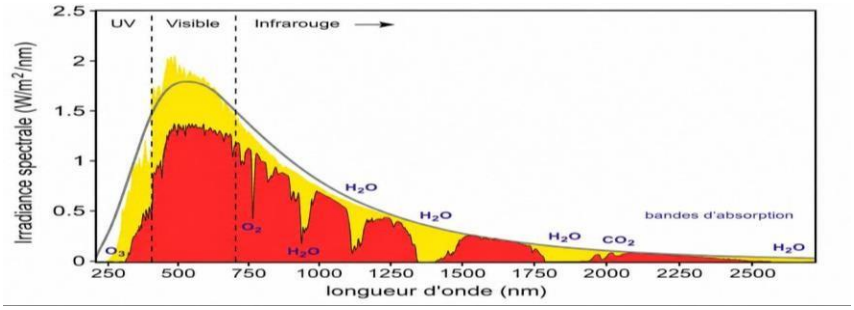


Figure (I.1) : Spectre du rayonnement solaire

L'atmosphère reçoit ce rayonnement avec une puissance moyenne de 1,30 kW/m² ; ce qui est représenté par le pic de la courbe jaune aux longueurs d'ondes visibles. Il existe quatre composantes du rayonnement solaire illustré dans la figure I.2:

- Rayonnement Direct

Il parvient directement du Soleil sans se disperser à travers l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux, ce qui forme des ombres et peut être concentré par des miroirs [6]. Sur la figure I.1, la zone rouge qui atteint directement la surface terrestre.

- Rayonnement Diffus

Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols), c'est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Sur la figure I.1, la différence entre la zone jaune et la zone rouge.

- Rayonnement Réfléchi (Albédo)

C'est la partie réfléchie par le sol, et elle dépend de l'environnement du site. Sur la figure I.1, l'énergie perdue absorbée par O_3, H_2O, CO_2.

- Rayonnement Global

Le rayonnement global correspond à la somme de l'ensemble des composantes du rayonnement solaire reçues par une surface, incluant le rayonnement direct, diffus ainsi que le rayonnement réfléchi par le sol et les objets environnants. Il est mesuré à l'aide d'un pyranomètre. Sur la figure I.1, il correspond à la surface totale délimitée sous les courbes jaune et rouge.

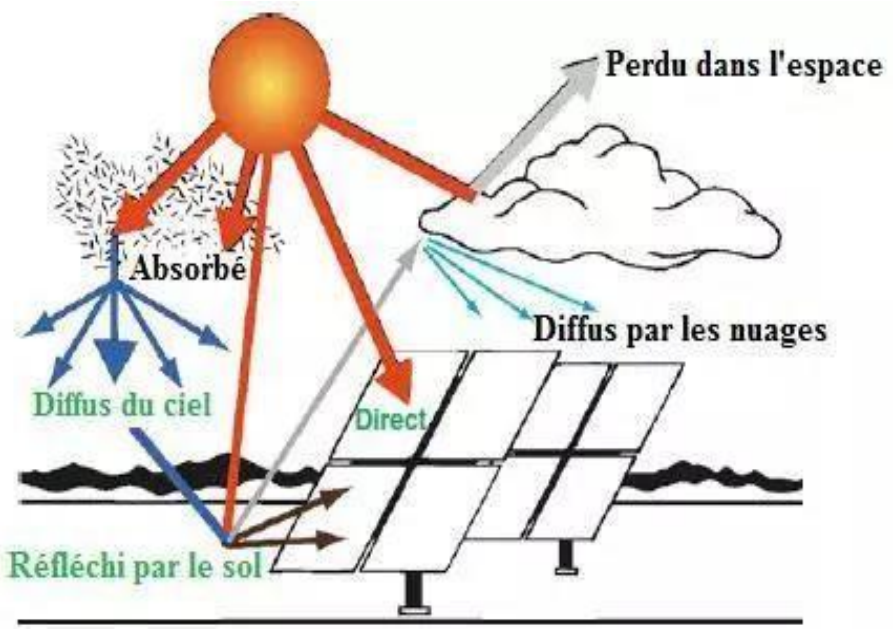


Figure I.2 : Les types de rayonnement solaire

I.4 Nombre de masse d'air

La masse d'air (AM) est définie comme la quantité d'énergie solaire perdue en raison de son passage à travers l'atmosphère et de son absorption par celle-ci. Elle se mesure par la longueur relative du trajet parcouru par le rayonnement solaire à l'intérieur de l'atmosphère terrestre.

$$AM \approx \frac{1}{\sin(\theta)} \qquad \text{(I.2)}$$

θ : est l'angle formé entre la direction du Soleil et la ligne d'horizon, tel qu'il est illustré dans la **figure I.3**

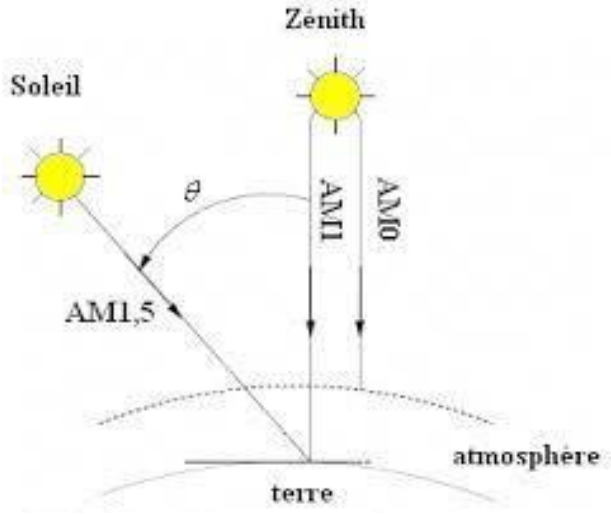


Figure I.3 : Description du nombre de masse d'air AM

I.5 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui se produit lorsque les rayons solaires tombent sur un matériau semi-conducteur ; les photons expulsent alors les électrons de valence de leurs couches externes, ce qui génère une différence de potentiel électrique entre les deux extrémités de la jonction.

La cellule photovoltaïque repose directement sur ce principe, car les électrons arrachés qui ne retournent pas à leur état initial produisent une tension électrique continue et de faible valeur, constituant ainsi la source fondamentale d'énergie électrique générée par la cellule.

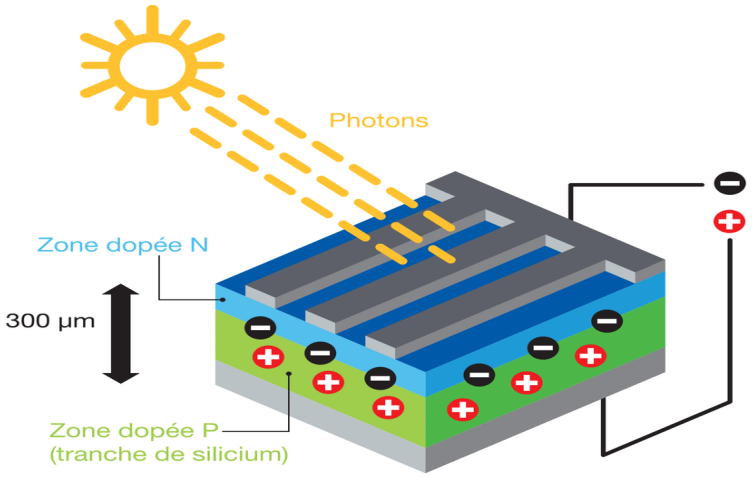


Figure I.4: Description d'une cellule photovoltaïque.

I.6 Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques (également connues sous le nom de panneaux solaires) constituent des composants essentiels dans le domaine de l'optoélectronique, et se distinguent par leur capacité à convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique de manière directe, grâce aux matériaux semi-conducteurs qui entrent dans leur composition.

I.6.1 Technologies des cellules photovoltaïques

On distingue trois générations de cellules photovoltaïques selon leur niveau de développement technologique.

- **Technologies de la première génération à base de silicium cristallin** :

Les cellules de première génération reposent sur une jonction P-N unique fabriquée à partir de silicium cristallin de haute pureté, et se distinguent par leur coût de production élevé en raison de leur grande consommation d'énergie. Elles se divisent en deux types principaux : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin.

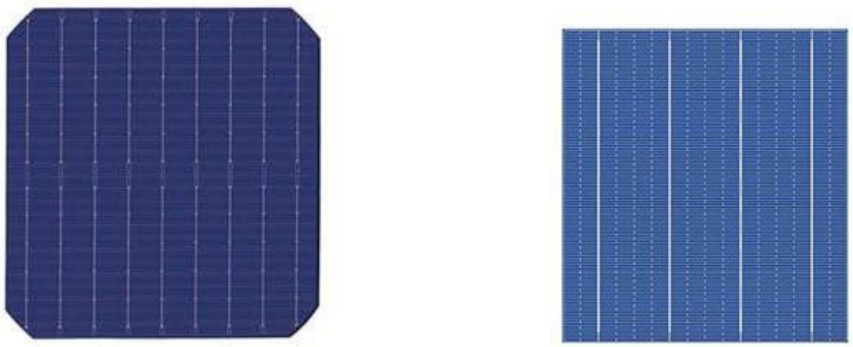


Figure I.5 : Cellules au silicium Monocristallin (1) et Cellule au Silicium Poly cristallin (2).

➢ **Technologies de deuxième génération à base de couches minces**

La technologie des couches minces représente une orientation moderne dans l'industrie des cellules solaires, se distinguant par sa très faible épaisseur par rapport aux cellules de première génération, ce qui a contribué à une croissance rapide de sa présence sur le marché. On distingue trois types principaux au sein des cellules de deuxième génération :

- Silicium amorphe (a-si).
- Tellurure de cadmium (CdTe).
- Cuivre / Indium / Sélénium ou Cuivre / Indium / Gallium / Sélénium (CIS ou CIGS).

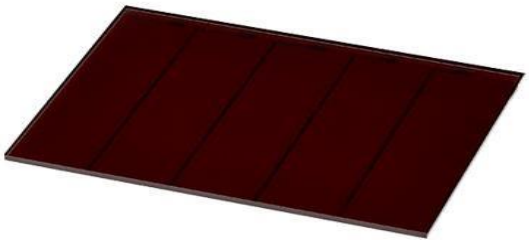


Figure I.6 : Exemple de module utilisant le silicium amorphe

➢ **Technologies de la 3ème génération « les cellules organiques »**

Les cellules de la troisième génération se distinguent par leur composition basée sur des molécules organiques, ce qui leur confère des propriétés de légèreté et de flexibilité. Elles se répartissent en trois catégories principales : les cellules moléculaires, les cellules à base de polymères, et les cellules organiques hybrides. Cependant, ces technologies sont encore au stade de la recherche et du développement et n'ont pas encore atteint le stade d'application à grande échelle.

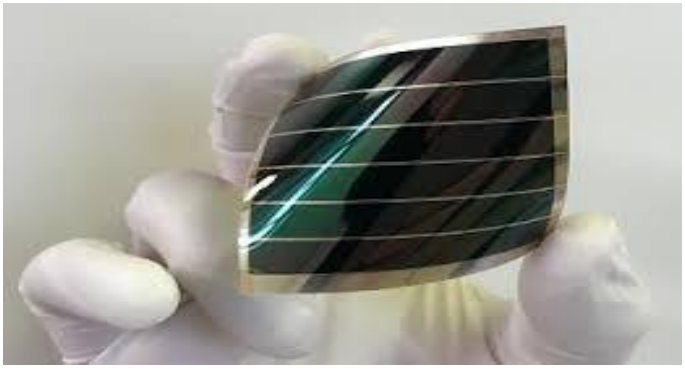


Figure I.7: Cellule photovoltaïque organique.

➢ **Comparaison entre les technologies des cellules photovoltaïques**

Le tableau I.1 présente les caractéristiques des différentes technologies les plus utilisées dans les cellules photovoltaïques.

Tableau I.1 : Comparaison entre les technologies des cellules photovoltaïques

Type	**Silicium monocristallin**	**Silicium polycristallin**	**Amorphe**
Durée de vie	25 ans	15 ans	Moins de 10 ans
Avantages	• Bon rendement en soleil direct	• Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais meilleur que l'amorphe)	• Grande flexibilité • Prix moins élevé que le cristallin • Bon rendement en lumière diffuse
Inconvénients	• Mauvais rendement en lumière diffuse (temps nuageux) • Prix élevé	• Mauvais rendement en lumière diffuse (temps nuageux) • Prix élevé	• Mauvais rendement en plein soleil

I.6.2 Structure de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un ensemble de couches superposées, au cœur desquelles se trouve une jonction entre deux couches semi-conductrices ; la première à charge négative (N) et la seconde à charge positive (P). Ce noyau est entouré d'une couche conductrice métallique (K) résistante à la corrosion, répartie sous forme de cathode (pôle +) au-dessus de la couche N et d'anode (pôle -) en dessous de la couche P.

Étant donné que le silicium réfléchit fortement la lumière, un revêtement anti-réflexion a été ajouté sur la surface de la cellule, ainsi qu'une couche de verre assurant la protection nécessaire de ce composant fragile. L'épaisseur totale de la cellule ne dépasse pas le millimètre. Pour obtenir une énergie suffisante, ces cellules sont assemblées pour former ce qu'on appelle le panneau solaire [7].

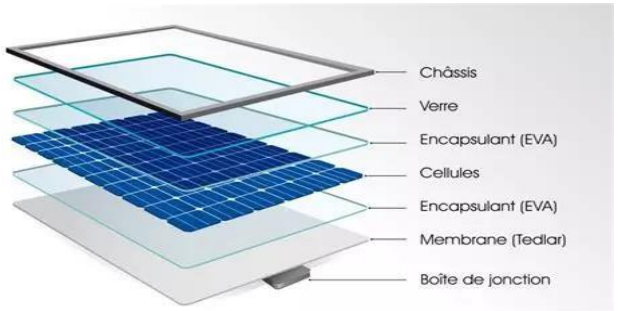


Figure I.8: La structure de la cellule photovoltaïque

I.6.3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

La cellule photovoltaïque fonctionne en convertissant l'énergie solaire en énergie électrique à travers trois étapes successives, comme illustré ci-dessous dans la figure I.9 :

Absorption : le matériau semi-conducteur absorbe les photons dont l'énergie est suffisante et dépasse la valeur du gap énergétique

Conversion : l'énergie du photon absorbé se transforme en énergie électrique par la génération de paires électron/trou au sein du matériau (silicium dopé P et silicium dopé N).

Collecte : ces particules générées sont collectées grâce à un champ électrique interne, présent au niveau de la jonction P-N, qui les sépare et les empêche de se recombiner ; les électrons sont dirigés vers l'électrode négative (grille conductrice) et les trous vers l'électrode positive (plaque conductrice).

Pour garantir l'efficacité de ce processus, le matériau utilisé doit posséder une conductivité suffisante permettant l'écoulement du courant électrique. La séparation des particules est généralement assurée par une jonction P-N, bien que d'autres structures telles que les hétérojonctions et les jonctions Schottky soient également utilisées à cet effet.

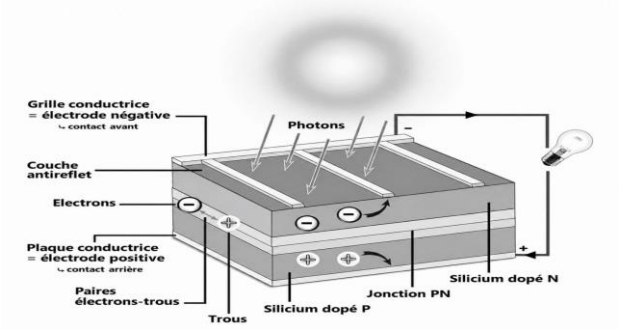


Figure I.9: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Les photons incidents provoquent une génération de porteurs dans les zones N et P ainsi que dans la zone de charge d'espace, et leur mécanisme de fonctionnement diffère d'une zone à l'autre :

- Dans les zones N et P : les porteurs minoritaires parvenant à la zone de charge d'espace sont entraînés sous l'effet du champ électrique, les trous se dirigeant vers la zone P et les électrons vers la zone N, ce qui conduit à l'apparition d'un photo-courant de diffusion lorsqu'ils deviennent porteurs majoritaires.
- Dans la zone de charge d'espace : le champ électrique se charge de dissocier les paires électron/trou issues des photons incidents, les électrons empruntant leur chemin vers la zone N tandis que les trous se dirigent vers la zone P, générant ainsi un photo-courant de génération.

I.6.4 Schéma électrique de la cellule photovoltaïque.

La figure I.9 illustre la représentation électrique équivalente d'une cellule photovoltaïque.

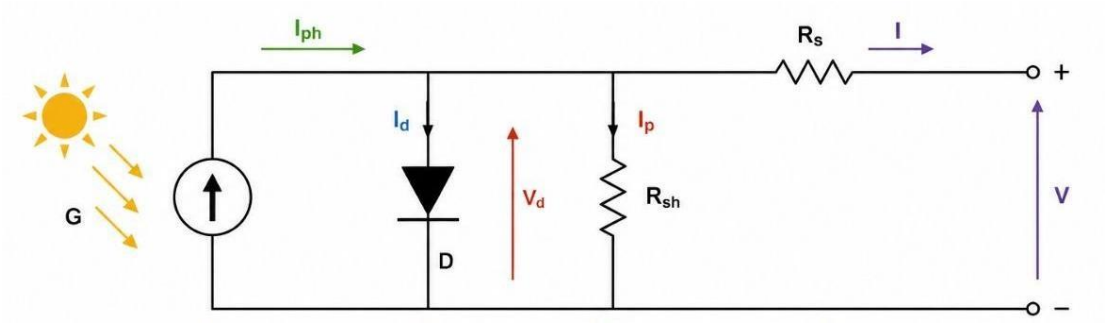


Figure I.10 : schéma électrique représentant une cellule photovoltaïque.

Les composants principaux.

G : source de courant.

D : élément diode.

R_{SH} : résistance de shunt.

R_S : résistance en série

V : tension aux bornes de la cellule lumineuse

U : tension aux bornes de la charge

I : courant traversant la charge

D : diode théorique

Interprétation des résistances :

R_{SH} : représente la fuite de courant entre la borne positive et négative de la cellule, simulant les courts-circuits microscopiques qui se produisent notamment dans le silicium.

R_S : reflète les diverses résistances électriques rencontrées par le courant lors de son passage (résistance des matériaux internes et résistances des points de contact).

L'équation du modèle du générateur photovoltaïque est donnée par :

$$I = I_{Ph} - I_0[\exp(\frac{q\,V + I\,R_s}{mKT}) - 1] - (\frac{V + I\,R_s}{R_{SH}}) \qquad (I.3)$$

I : Courant de sortie (Le courant produit par la cellule en Ampère).

I_{Ph} : Photo courant (Le courant photovoltaïque généré par l'exposition à la lumière).

I_0 : Courant de saturation (Le courant de saturation inverse de la diode dans l'obscurité).

q : Charge de l'électron ($q = 1.602\times10^{-19}$ C).

V : Tension (La tension aux bornes de la cellule solaire en Volt).

R_s : Résistance série (La résistance série représentant les pertes internes).

m : Facteur d'idéalité (Le facteur d'idéalité de la diode, sa valeur est entre 1 et 2).

K : Constante de Boltzmann ($K = 1.38\times10^{-23}$ J/K).

T : Température (La température de la cellule en Kelvin).

R_{SH} : Résistance shunt (La résistance shunt représentant les fuites de courant internes).

I.6.5 Caractéristique courant-tension (I-V)

À partir de la caractéristique I-V sous éclairement de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

- **Le courant de court-circuit (Isc)**

Mesuré en milliampères, il représente le courant circulant dans la cellule sous éclairement sans application de tension, et est donné par la relation [9] :

$$\frac{I_{ph}}{(1+\frac{R_s}{R_{SH}})} \qquad (I.4)$$

Où dans le cas idéal :

$$I_{cc} \approx I_{ph} \qquad (I.5)$$

- **Tension de circuit ouvert (V_{co})**

C'est la tension maximale produite par la cellule photovoltaïque lorsque le courant débité est nul, et elle est donnée par la relation :

$$\mathrm{I_{Ph}} - I_0(\exp[\frac{V_{co}}{V_T}] - \frac{V_{co}}{R_{SH}}) = 0 \qquad (I.6)$$

Et dans le cas idéal on obtient :

$$V_{OC} = \mathrm{V}_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o} + 1\right) \qquad (I.7)$$

- **Le facteur de forme (FF)**

$$\mathbf{FF} = \frac{\boldsymbol{V_m I_m}}{\boldsymbol{V_{c0} I_{cc}}} \qquad (\mathbf{I.8})$$

Il représente le rapport de la puissance maximale au produit de la tension de circuit ouvert par le courant de court-circuit, et est donné par :

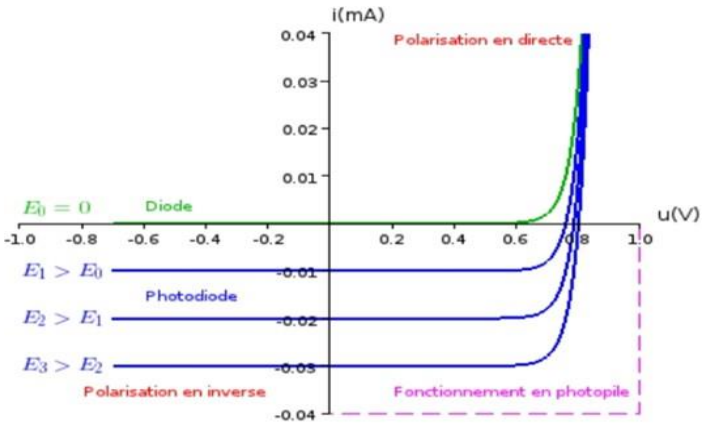


Figure I.11 : Caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque [8].

- **Le rendement photovoltaïque (η)**

C'est le rapport de la puissance électrique maximale produite à la puissance lumineuse incidente:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF\ I_{cc} V_{co}}{P_{in}} \qquad (I.9)$$

Pin : puissance lumineuse incidente (W)

Pmax : puissance maximale délivrée (W)

I.7. Influence de l'éclairement et de la température

Les caractéristiques de la cellule photovoltaïque sont étroitement liées aux conditions météorologiques environnantes, notamment l'éclairement et la température.

- **Eclairement**

À une température constante de 25°, on remarque que le courant de court-circuit **(Icc)** augmente proportionnellement à l'augmentation du niveau d'éclairement, tandis que la tension reste quasi

stable avec une légère variation, ce qui se traduit positivement par une augmentation de la puissance maximale **(P_{max})** [10].

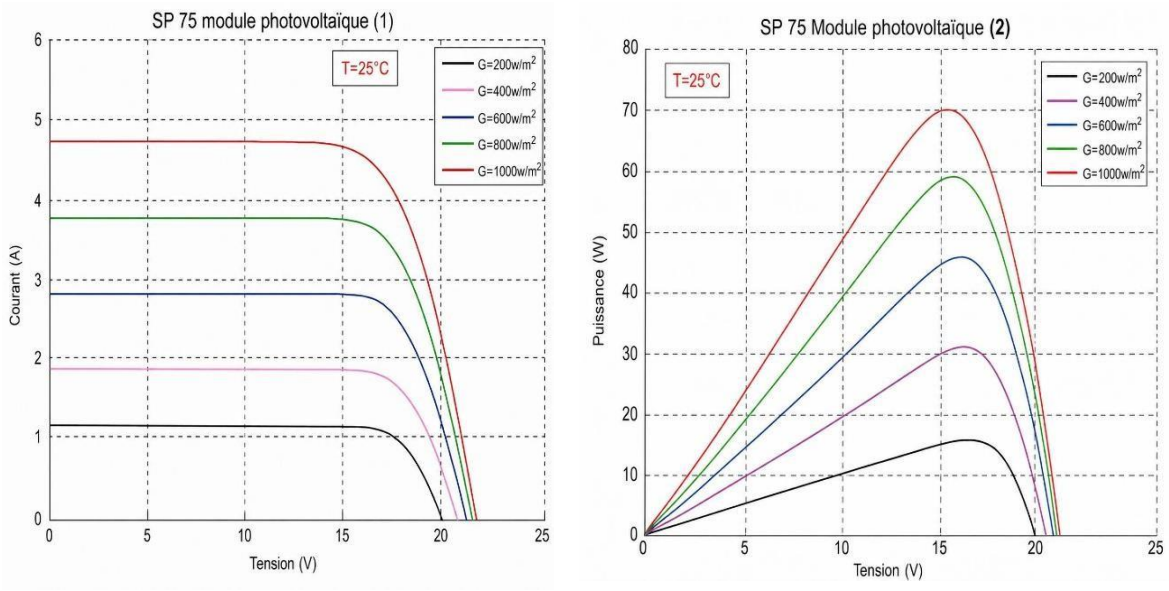


Figure I.12 : évolution de la caractéristique i(v).1et p(v).2 pour différents niveaux d'éclairements [8].

- **Température**

La température est l'un des facteurs les plus importants dans la détermination des performances des cellules solaires. Lorsqu'elle augmente à éclairement constant, le courant de court-circuit **(I_{cc})** augmente légèrement, tandis que la tension en circuit ouvert **(V_{co})** diminue de manière remarquable, ce qui conduit finalement à une diminution de la puissance maximale **(P_{max})**.

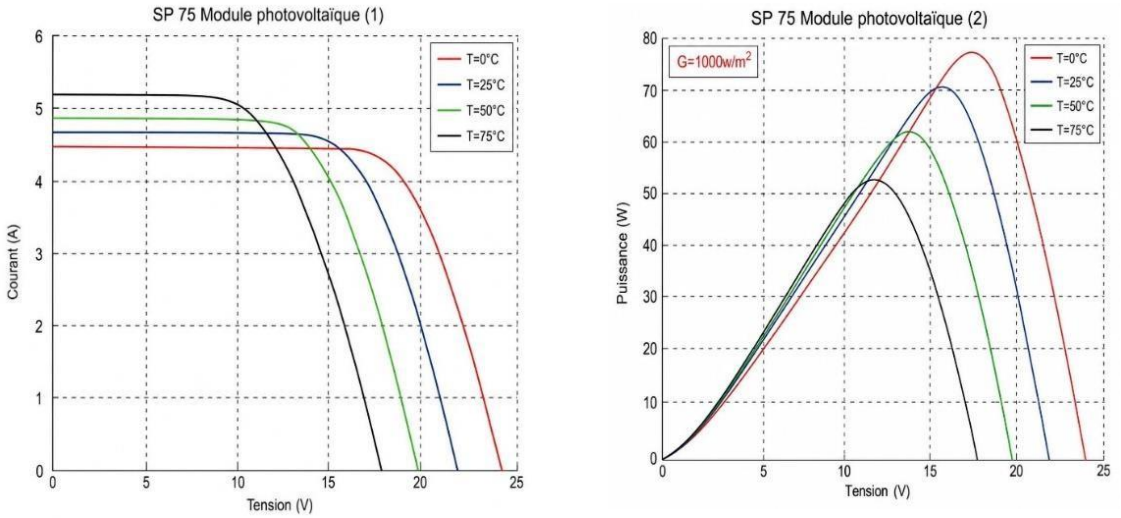


Figure I.13 : Evolution de la caractéristique I(v) .1 et P(v).2 pour différent températures [8].

➤ **L'effet photovoltaïque est une fonction de deux grandeurs physiques** : L'éclairement et la température.

• Plus l'éclairement E (W/m^2) est important, plus la cellule ne va délivrer un courant important.

• A l'inverse. Plus la température (T°) est élevée, plus la tension de sortie est faible.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales liées à l'énergie solaire photovoltaïque, en commençant par le rayonnement solaire et l'effet photovoltaïque, puis en étudiant la cellule photovoltaïque, ses technologies, sa structure et son principe de fonctionnement. Nous avons également analysé ses caractéristiques courant-tension (I-V) ainsi que l'influence de l'éclairement et de la température sur ses performances.

Ces bases théoriques nous serviront de fondement pour aborder, dans le chapitre suivant, le système photovoltaïque autonome avec stockage, en étudiant ses différents composants tels que les panneaux, les régulateurs de charge, les onduleurs et les batteries.

Chapitre II:
Système photovoltaïque autonome avec stockage

II.1 Introduction

Ce chapitre porte sur l'étude des systèmes photovoltaïques autonomes, en identifiant leurs composants essentiels tels que les panneaux solaires, les régulateurs, les onduleurs et les unités de stockage, tout en expliquant leur fonctionnement et leurs principaux types.

II.2 Système photovoltaïque autonome

Système destiné aux sites isolés du réseau public, qui stocke l'énergie solaire et la convertit du courant continu en courant alternatif pour les besoins domestiques.

- Générateur photovoltaïque.
- Système de stockage.
- Régulateur.
- Onduleur.
- La charge (a courant alternatif, courant direct).
- Câblage.

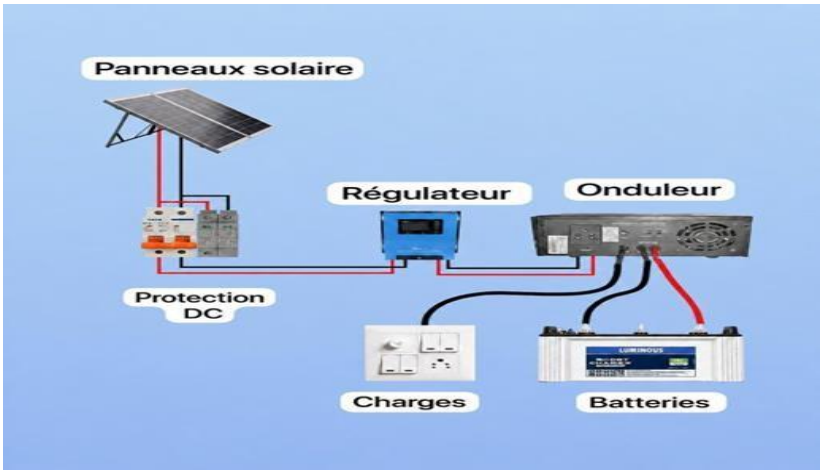


Figure II.1: Les différents composants d'un système photovoltaïque autonome.

II.2.1 Générateur photovoltaïque

- **Le panneau photovoltaïque**

Le panneau solaire, également appelé champ solaire, est défini comme une combinaison de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle, caractérisés par leur capacité à convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Ces modules sont fixés sur un support métallique spécialement conçu pour assurer la stabilité du champ solaire et ajuster avec précision son angle d'inclinaison [11].



Figure II.2 : Exemple d'un panneau solaire.

La quantité d'électricité générée dans un système photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs essentiels :

• La superficie et les dimensions propres au panneau solaire.

• Le degré de rayonnement solaire dominant dans la zone d'installation.

• La saison durant laquelle le système est en fonctionnement.

De plus, la puissance électrique fournie par le panneau atteint son maximum durant les heures de fort ensoleillement, tandis qu'elle chute à presque zéro durant les heures nocturnes, ce qui rend la présence d'un système de stockage indispensable.

- **Choix de l'orientation du module**

En ce qui concerne l'orientation des modules photovoltaïques, il est recommandé de les installer en direction du sud pour les sites situés dans l'hémisphère Nord, tandis qu'ils doivent être orientés vers le nord pour les sites appartenant à l'hémisphère Sud [12].

- **Choix de l'inclinaison du module**

Afin de garantir un rendement énergétique optimal, la surface du module photovoltaïque doit être perpendiculaire aux rayons solaires. Étant donné que l'ajustement répété de l'angle d'inclinaison tout au long de l'année est considéré comme peu pratique, les spécialistes optent généralement pour l'adoption d'un angle d'inclinaison moyen fixe calculé sur une base annuelle comme dans la figure II.3.

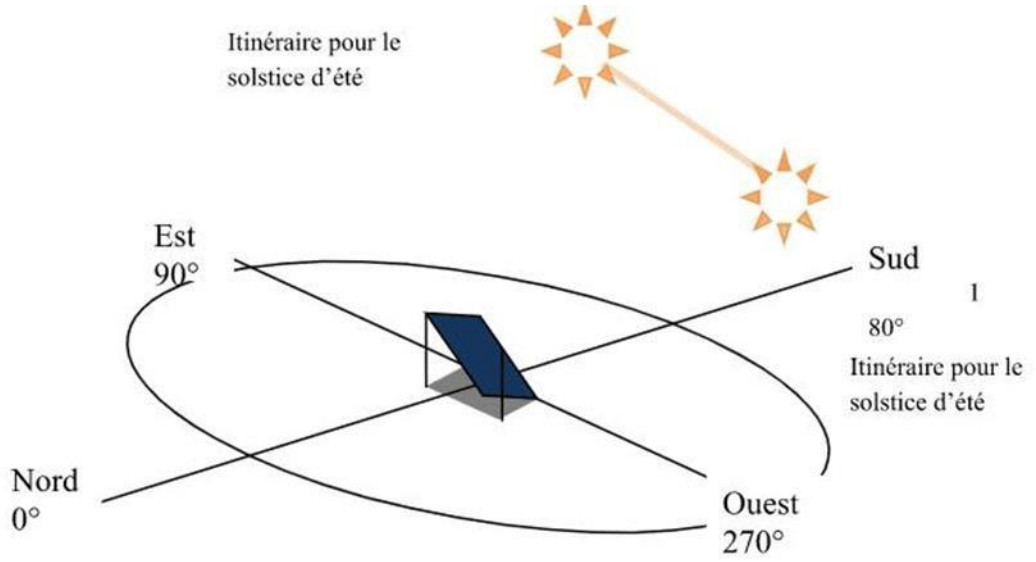


Figure II.3 : Comment incliné le panneau solaire.

II.2.2. Système de stockage

Le système de stockage dans les installations photovoltaïques autonomes vise à garantir la disponibilité de l'énergie électrique à tout moment, indépendamment du niveau d'ensoleillement, et cela est assuré par l'utilisation des batteries.

II.2.2.1. La batterie

La batterie est un ensemble de cellules électrochimiques connectées en série qui convertissent l'énergie chimique en énergie électrique, elle est composée de deux électrodes positive et négative [13].

• **A la charge :** l'énergie électrique est stockée dans les cellules sous forme d'énergie chimique.

• **A la décharge :** l'énergie chimique est convertie en énergie électrique lorsque la batterie est connectée à la charge.

Les types de batteries les plus utilisés sont le plomb-acide et le nickel-cadmium.

- **Batterie au plomb**

Elle est la plus répandue dans les systèmes solaires autonomes, composée d'une électrode positive en dioxyde de plomb (PbO_2) et d'une électrode négative en plomb (Pb), avec une durée de vie variant entre 10 et 15 ans.

- **Principe de fonctionnement d'une batterie au plomb**

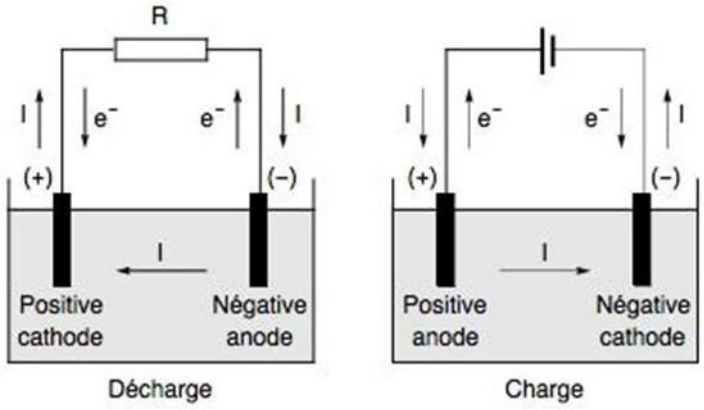


Figure II.4 : Processus de charge et de décharge d'une batterie au plomb

• **A la décharge :** les deux polarités se sulfatent et l'électrolyte est progressivement consommé, où l'oxygène libéré s'unit aux ions H^+ pour former de l'eau, et lorsque la décharge est complète il ne reste que de l'eau distillée.

• **A la charge :** l'électrolyte est régénéré par le retour des ions SO_4^{2-} en solution, et la plaque positive s'oxyde en formant PbO_2 avec une augmentation de la concentration en H^+.

- **Batterie au nickel**

Cette batterie est utilisée pour les applications de faible puissance, son coût élevé par rapport à la batterie au plomb limite sa diffusion. Cependant elle se distingue par une durée de vie plus longue variant entre 15 et 20 ans [14].

II.2.2.2. Les caractéristiques principales d'une batterie

- **Capacité**

Elle représente la quantité d'énergie pouvant être stockée et restituée sous tension nominale, et se mesure en ampère-heure (Ah) [7].

- **Rapports de chargement et déchargement**

La capacité disponible est influencée par la vitesse de charge ou de décharge, plus la décharge est lente plus la capacité augmente légèrement, et plus elle est rapide plus elle diminue.

- **La durée de vie**

Elle est exprimée par le nombre de cycles de charge/décharge complets que peut supporter l'accumulateur avant que ses caractéristiques ne se dégradent, elle peut également être exprimée en années.

- **Profondeur de décharge**

C'est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est consommé lors d'un seul cycle de charge/décharge.

- **La tension d'utilisation**

C'est la valeur de tension à laquelle l'accumulateur restitue l'énergie stockée à la charge dans des conditions normales d'utilisation.

- **Le rendement**

Il est défini comme le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie électrique qui lui est fournie lors de la charge.

- **Le taux d'autodécharge**

Il désigne la perte de capacité spontanée qui se produit lorsque l'accumulateur est laissé au repos sans être connecté à une charge pendant une certaine période.

- **La charge**

Durant la charge, l'accumulateur fonctionne comme un récepteur avec une tension d'environ 2,2V, et en fin de charge (point M) la tension monte rapidement pour atteindre 2,6 ou 2,7V avec une polarisation complète des plaques.

- **La décharge**

La tension reste stable à environ 2V tout au long de la période d'utilisation, puis chute brusquement au point N à 1,8V, niveau qui impose une recharge immédiate Comme le montre **Figure II.5** .

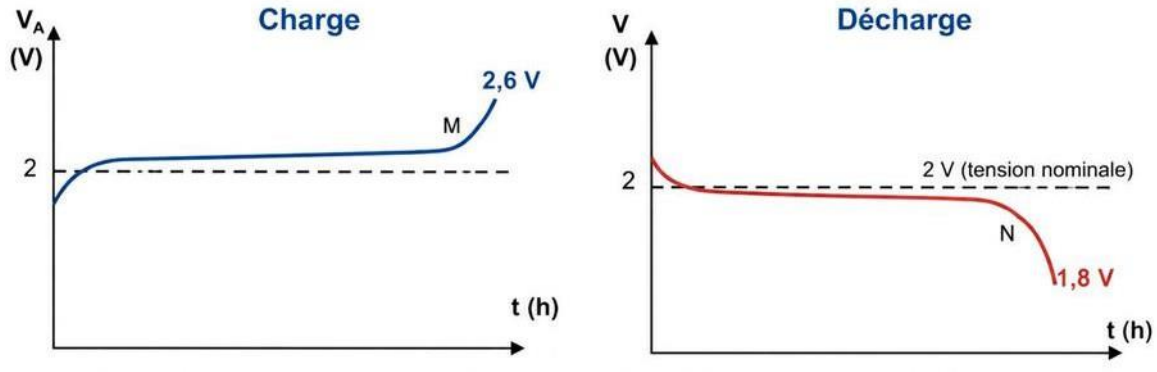


Figure II.5: caractéristique charge et décharge d'une batterie [8]

II.2.2.3 Groupement des batteries

La capacité de stockage peut être augmentée en connectant plusieurs batteries identiques et de durée de vie similaire, soit en série soit en parallèle [14].

- **Montage en série**

Ce type de connexion est utilisé pour augmenter la tension du groupement, où la tension totale se multiplie tout en maintenant l'intensité du courant inchangée.

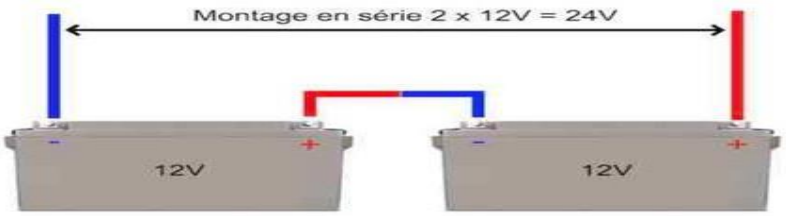


Figure II.6 : branchement des batteries en série.

- **Montage en parallèle**

Ce type de connexion est utilisé pour augmenter la capacité totale du groupement, où la capacité de stockage se multiplie tout en maintenant la tension constante.

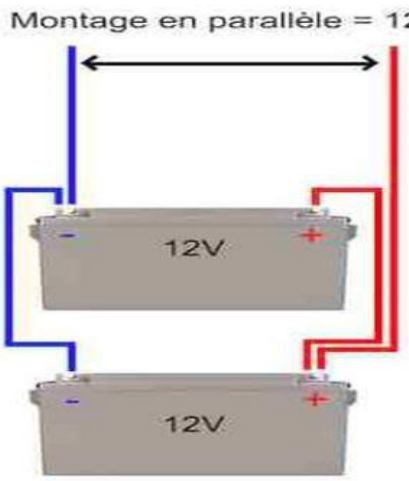


Figure II.7 : blanchement des batteries en parallèle.

II.2.3 L'onduleur

L'onduleur est un appareil électrique dont la fonction est de convertir le courant continu provenant des panneaux photovoltaïques ou des batteries en courant alternatif utilisable. Dans le cas d'un onduleur autonome, l'appareil assure lui-même le contrôle de la fréquence et de la forme d'onde [10].

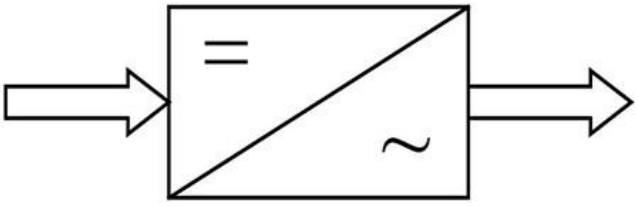


Figure II.8 : symbole de l'onduleur.

II.2.3.1 Différents types d'onduleurs autonomes

- **Onduleur à onde carrée**

Il est considéré comme le plus simple et le plus ancien pour générer du courant alternatif, cependant il n'est pas capable d'alimenter correctement certains appareils électriques [13].

- **Onduleur à onde sinusoïdale modifiée**

Il se distingue par une technologie plus avancée que l'onde carrée, et il est le plus adapté aux installations photovoltaïques autonomes en raison de sa meilleure efficacité et de son rendement supérieur.

- **Onduleur à onde sinusoïdale pure**

C'est le plus élaboré et le plus coûteux parmi tous les types.

II.2.3.2 Caractéristiques des onduleurs

Les principales caractéristiques des onduleurs sont :

• La puissance nominale.

• La puissance de pointe ou de surcharge.

• La consommation en veille ou en attente.

• La tension d'entrée et de sortie.

• Le rendement et la durée de vie.

II.2.3.3 Critères de choix de l'onduleur

Lors du choix de l'onduleur approprié, il convient de vérifier les points suivants :

• Sa capacité à démarrer la charge avec succès.

• L'acceptation par la charge des variations de la tension de sortie.

• Sa protection contre les surcharges côté DC et AC et contre la surchauffe.

• Sa coupure automatique en cas de basse tension DC pour protéger la batterie.

• La tolérance de la charge à la forme d'onde de l'onduleur.

• La suffisance de son rendement au point de fonctionnement de la charge.

II.2.4 Les régulateurs de charge

Le régulateur de charge est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome, il est installé entre les panneaux solaires et les batteries, et il assure la protection de la batterie contre les surcharges et les décharges profondes afin de prolonger sa durée de vie et garantir la continuité du système [8].

II.2.4.1 Les différents types de régulateurs de charge

- **Les régulateurs série**

Il fonctionne à l'aide de relais ou de commutateurs électriques connectés en série entre le panneau et la batterie, où il déconnecte le générateur photovoltaïque lorsque la batterie atteint une tension prédéfinie, puis le reconnecte automatiquement lorsque le niveau de charge baisse pour reprendre la charge lors du cycle solaire suivant [13].

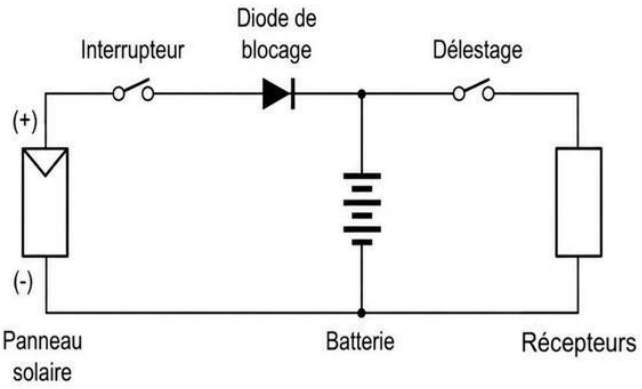


Figure II.9 : schéma de régulateur série.

- **Les régulateurs shunt**

Ce régulateur est connecté en parallèle entre le panneau solaire et la batterie, il agit en déviant le courant excédentaire à l'aide d'un interrupteur tout en dissipant l'énergie en excès sous forme de chaleur. Lorsque la batterie atteint sa pleine charge, il court-circuite le générateur photovoltaïque, et dès que le courant atteint le seuil critique il est automatiquement dévié par l'interrupteur [14].

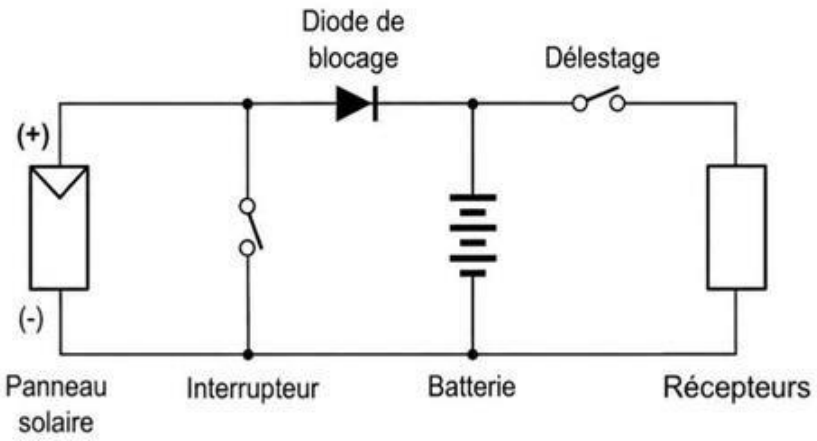


Figure II.10 : schéma de régulateur shunt.

- **Le régulateur PWM**

C'est le régulateur solaire classique piloté par un microprocesseur, il s'adapte automatiquement à la tension du système photovoltaïque et connecte directement le panneau solaire à la batterie, où la tension de la batterie est celle qui détermine la tension de fonctionnement du module. Lorsque la batterie est déchargée les impulsions sont longues et quasi continues, et lorsqu'elle est chargée elles deviennent plus courtes et plus espacées.

- **Le régulateur MPPT**

Ce régulateur s'appuie sur un circuit électronique spécial qui suit en permanence le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, dans le but de charger la batterie avec le courant le plus élevé possible. Ce qui le distingue des autres types est sa capacité à fonctionner efficacement dans une large plage de températures.



Figure II.11 : Régulateur MPPT.

- **Fonctionnement d'un régulateur MPPT**

Pour un même niveau d'éclairement, la puissance fournie varie selon la charge connectée. Le contrôleur MPPT pilote le convertisseur statique reliant le panneau à la charge, afin de garantir la transmission du maximum de puissance à chaque instant.

La puissance extraite du panneau est calculée en multipliant le courant I par la tension V :

$$P_{PV} = I_{PV} V_{PV} \qquad (II.1)$$

La commande MPPT ajuste ensuite le rapport cyclique du convertisseur statique vers une valeur de référence constante, à l'aide d'un signal électrique approprié pour extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

À titre d'exemple, si la tension de la batterie est d'environ 11.5V, le régulateur reçoit 7.1A sous 16.9V et les convertit en 9.6A sous 12.5V avant de les fournir à la batterie :

Panneau solaire : P = 7.1 × 16.9 ≈ 120 Watts

Batterie : P = 9.6 × 12.5 = 120 Watts

Pour atteindre un rendement de 100%, il faudrait disposer de 10A sous 11.5V, cependant la charge de la batterie nécessite une tension supérieure à sa tension nominale, c'est pourquoi le régulateur MPPT fonctionne sous 12.5V plutôt que 11.5V.

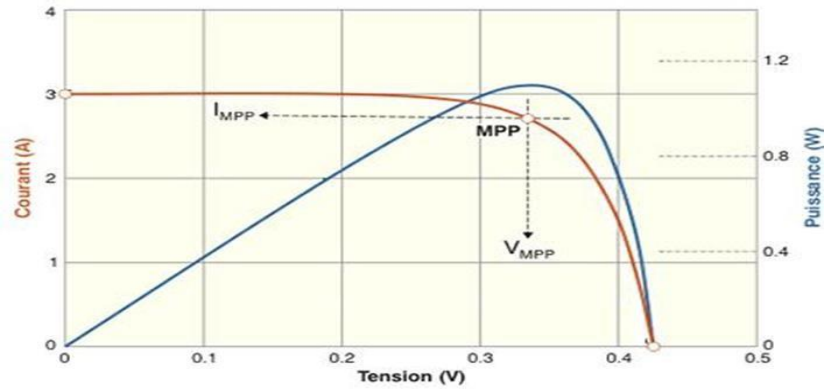


Figure II.12 : graphe rendement puissance MPPT.

II.2.5 La charge

La charge représente l'ensemble des appareils électriques alimentés par le système, elle peut être de type courant continu comme les équipements de télécommunication et les pompes à eau, ou de type courant alternatif ce qui nécessite la présence d'un onduleur.

- **Les lampes**

Elles constituent le principal élément de consommation dans les systèmes autonomes, les lampes fluorescentes sont privilégiées pour leur rendement élevé, tandis que les lampes à incandescence et à halogène sont réservées uniquement aux utilisations de courte durée.

- **Réfrigération**

Les réfrigérateurs conçus pour les systèmes autonomes s'appuient sur des compresseurs à moteur DC avec une armoire dotée d'une isolation thermique renforcée.

- **Ventilation**

Des ventilateurs DC de différentes tailles sont disponibles pour la ventilation des petits espaces, certains sont même intégrés avec des cellules solaires dans des bouches de ventilation destinées aux bateaux et aux caravanes.

- **Le pompage de l'eau**

Il est considéré comme l'une des principales applications de l'énergie solaire dans les régions éloignées, où il est utilisé essentiellement pour assurer la mise en pression de l'eau dans les habitations des régions du nord.

- **Les ordinateurs**

La plupart des ordinateurs portables nécessitent une tension de charge comprise entre 15 et 20V, ce qui impose la présence d'un convertisseur DC/DC adapté.

- **L'imprimante**

Les imprimantes à jet d'encre sont les moins énergivores avec une puissance variante entre 12 et 150W, suivies des imprimantes à impact avec plus de 100W, et les plus consommatrices sont les imprimantes laser entre 300 et 1500W.

II.2.6 Câblage

Toute installation photovoltaïque est équipée de câbles électriques assurant le transfert de l'énergie depuis les panneaux solaires vers les batteries puis vers les charges.



Figure II.13 : exemple sur les câbles.

Il est recommandé d'utiliser des câbles en cuivre souples multibrins du côté courant continu, en raison du meilleur rapport prix/conductivité que présente le cuivre, de plus sa structure multibrin garantit des connexions de qualité optimale qui minimisent les pertes d'énergie dues à la chute de tension.

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents composants d'un système photovoltaïque autonome, notamment le générateur photovoltaïque, le système de stockage, les onduleurs, les régulateurs de charge et le câblage.

Ces connaissances constituent une base essentielle pour aborder le chapitre suivant, consacré à la méthode de dimensionnement du système photovoltaïque autonome.

Chapitre III :

Méthode de dimensionnement du système PV autonome

III.1 Introduction

Sur la base de ce qui a été abordé dans le chapitre précédent concernant les composants du système photovoltaïque autonome, nous traitons dans ce chapitre la méthode de dimensionnement de ce système, à travers l'évaluation des besoins énergétiques et des données météorologiques, puis le dimensionnement des différents composants et le calcul du coût de l'installation.

III.2 Évaluation des besoins énergétiques

Étant donné que le kilowattheure solaire est coûteux, il est essentiel de penser à réduire la consommation dès le départ, soit en choisissant des appareils basse consommation, soit en utilisant des appareils fonctionnant directement en courant continu. Cela implique moins de panneaux et de batteries, donc un coût global allégé.

- **La tension des récepteurs**

Puisque l'énergie solaire est un courant continu, il est préférable que les appareils alimentés fonctionnent eux aussi en courant continu. Plus la puissance requise est élevée, plus il faut augmenter la tension pour éviter des intensités trop fortes, ce qui fait du choix de la tension une décision qui demande réflexion.

- **Calcul du besoin énergétique de l'application**

Pour calculer le besoin journalier en énergie d'une application, on utilise la formule suivante :

$$E = P\ t \qquad (III.1)$$

P : La puissance consommé (W)

t : temps d'utilisation par jour (h)

Pour obtenir la consommation journalière totale Bj de l'application, on additionne l'énergie de chaque appareil :

$$Bj = E_1 + E_2 + E_3 + \cdots \qquad (III.2)$$

Cette consommation peut s'exprimer soit en (Wh) [15].

III.3 Données météorologiques et irradiation solaire

Le rayonnement solaire est la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface pendant une période donnée, exprimée en kWh/m²/jour. Il constitue le paramètre fondamental pour le dimensionnement de tout système photovoltaïque.

➢ **Rayonnement solaire d'Algérie**

Le tableau suivant présente les valeurs moyennes annuelles du rayonnement solaire pour chacune des 48 wilayas d'Algérie [16] :

Tableau III.1 : Rayonnement solaire par région – Algérie

Région	**Exemples de wilayas**	**Type climatique**	**Rayonnement (kWh/m²/j)**	**Insolation (h/j)**
Extrême-Sud	Tamanrasset, Illizi	Saharien aride	7,20 – 7,50	10,5 – 10,8
Sud-Ouest	Adrar,Tindouf, Béchar	Saharien méridional	6,80 – 7,20	10,0 – 10,4
Semi-aride	Ouargla, Biskra, Ghardaïa, El Oued	Semi-aride	6,20 – 6,50	9,5 – 9,8
Hauts Plateaux	Laghouat, M'Sila, Tiaret, Djelfa, Naâma	Continental	5,10 – 5,80	8,3 – 9,2
Nord-Ouest / Intérieur	Tlemcen, Sidi Bel Abbès, Mascara, Relizane	Semi-humide	4,80 – 5,20	8,0 – 8,6
Nord Côtier	Alger, Oran, Jijel, Béjaïa, Boumerdès	Méditerranéen	4,20 – 4,80	7,0 – 8,0
Nord-Est	Constantine, Batna, Oum El Bouaghi, Annaba	Semi-humide	4,40 – 5,20	7,4 – 8,5

➢ **Calcul de l'énergie solaire produite**

$$E = P\ H\ \eta sys \qquad (III.3)$$

E : Énergie produite (kWh).

P : Puissance-crête du système photovoltaïque (KW_c).

H : Rayonnement solaire journalier (kWh/m²/jour).

η_{sys} : Rendement global du système.

Formule simplifiée **:**

$$E = P\ H\ 0{,}75 \qquad (III.4)$$

Le coefficient 0,75 représente le rendement global du système et tient compte des pertes par câblage, onduleur, température, poussière…

- **Détermination du rayonnement H**

Le modèle d'Angström-Prescott est utilisé pour estimer le rayonnement solaire horizontal global H à partir de la durée d'insolation mesurée. C'est le modèle le plus employé dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

$$H = H_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right) \qquad (III.5)$$

H_0 : rayonnement solaire hors atmosphère ; rayonnement astronomique (kWh/m²/jour)

n : durée réelle d'insolation journalière mesurée (h/jour)

N : durée astronomique maximale du jour (h/jour)

a, b : constantes empiriques d'Angström (dépendent du site et du climat)

- **Relation entre H_0, la latitude φ et le mois**

$$H_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right) I_s^c \left[cos\varphi \ cos\delta \ sin\omega_s + \left(\frac{\pi \ \omega_s}{180}\right) sin\varphi \ sin\delta \right] \qquad (III.6)$$

I_s^c : constante solaire = 0,0820 MJ/m²/min

φ : latitude géographique du site (°).

δ : déclinaison solaire [varie chaque jour selon: $\delta = 23{,}45 \ sin\left(360 \frac{(284 + n_j)}{365}\right)$ (°)

ω_s : angle horaire du coucher du soleil [obtenu par: $cos(\omega_s) = -tan\varphi \ tan\delta$ (°)

III.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Pour dimensionner le générateur photovoltaïque, il convient de commencer par calculer le nombre total de modules nécessaires pour alimenter la charge.

- **Énergie journalière consommée E_{Tot}**

$$E_{Tot} = \Sigma \ Pi \ ti \quad (i = 1 \dots n) \qquad (III.7)$$

E_{Tot} : Énergie totale consommée par jour (Wh/J).

P_i : Puissance de la charge i (W)

t_i : Durée d'utilisation journalière de la charge i (h/j)

- **La puissance crête du générateur :**

$$P_C = \frac{E_{Tot}}{\eta_{sys} h} \qquad (III.8)$$

h: Durée d'ensoleillement du jour critique (h)

- **Le nombre total de modules N_{Tot} :**

$$N_{Tot} = \frac{E_{Tot}}{\eta_M \, G \, S_M \, F_{CG}} \qquad (III.9)$$

η_M : Rendement du module photovoltaïque

S_M : Surface du module (m^2).

G: Irradiation globale sur un plan incliné ($Wh/J/m^2$).

F_{CG}: Énergie totale consommée par jour (Wh/J).

- **Ou en fonction de la puissance crête de la charge et du module**

$$N_{Tot} = \frac{P_C}{P_P} \qquad (III.10)$$

P_C : Puissance crête nécessaire pour alimenter la charge.

P_P : Puissance crête du module photovoltaïque utilisé.

- **La tension du système**

Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, la tension est choisie selon la puissance afin de limiter le courant et les pertes.

Tableau III.2 : les tensions du système correspondantes à chaque intervalle de puissance crête.

Puissance crête (Wc)	<1000	1000 -3000	>3000
Tension du système (V)	12	24	48

- **Le nombre de modules en série**

$$N_{PS} = \frac{V_{sys}}{V_{mp}} \qquad (III.11)$$

V_{sys} : Tension du système (V).

V_{mp} : Tension au point de puissance maximale (V)

- **Le nombre de modules en parallèle**

$$N_{PP} = \frac{N_P}{N_{MS}} \qquad (III.12)$$

- **En alternatif**

$$N_{PP} = \frac{N_P}{\eta_{ond}} \qquad (III.13)$$

N_{PP} : Nombre de modules en parallèle.

N_P : Nombre total de modules.

N_{PS} : Nombre de modules en série.

η_{ond} : Rendement de l'onduleur.

III.5 Dimensionnement du système de stockage

Pour assurer la continuité de l'alimentation électrique lors des jours de mauvais temps, un système de stockage composé de batteries est prévu, dont la capacité est déterminée en fonction de la tension de la batterie (V_{bat}), de son rendement (η_{bat}) et de sa profondeur de décharge (P_{DD} = 0.8), en plus de l'énergie journalière requise (E_{Tot}) et du nombre de jours d'autonomie (A_{UT}).

- **La capacité de la batterie**

$$C_{bat} = \frac{E_{Tot}\, A_{UT}}{P_{DD}\, V_{bat}\, \eta_{bat}} \qquad \text{(III. 14)}$$

A_{UT} : Autonomie en jours.

E_{Tot} : Énergie totale consommée par jour (Wh/J).

V_{bat} : Tension de la batterie.

P_{DD} : Profondeur de décharge.

η_{bat} : Rendement de la batterie.

- **Nombre de batteries en parallèle**

$$N_{BP} = \frac{C_{bat}(Ah)}{C_{bat\ unit}} \qquad \text{(III. 15)}$$

C_{bat} : Capacité de la batterie de stockage (Ah).

$C_{bat\ unit}$: Capacité de la batterie (Ah).

- **Nombre de batteries en série**

$$N_{BS} = \frac{V_{sys}}{V_{bat}} \qquad \text{(III. 16)}$$

V_{bat} : Tension de la batterie (V)

V_{sys} : Tension d'installation (V)

- **Nombre de batteries**

$$N_B = N_{BP} \quad N_{BS} \qquad (III. 17)$$

N_{BP} : Nombre de batteries en parallèle

N_{BS} : Nombre de batteries en série.

N_B : Nombre total de batteries.

- **Durée de vie de la batterie Lbat**

P_{DD} : Profondeur de décharge.

365 : Conversion cycles (années).

- **Nombre de remplacements des batteries (N_{rpl})**

$$N_{rpl} = \frac{T_{projet}}{L_{bat}} - 1 \qquad \text{(III. 19)}$$

T_{projet} **:** Durée du projet (années).

L_{bat} : Durée de vie de la batterie.

III.6 Dimensionnement de l'onduleur

Dans un système autonome, l'onduleur est dimensionné en se basant sur les caractéristiques des modules, des batteries et des récepteurs fonctionnant en courant alternatif.

- **Paramètres de dimensionnement**

  • **La tension d'entrée :** la tension CC délivrée par le générateur photovoltaïque ou le système de stockage.

  • **La tension de sortie :** la forme d'onde est sinusoïdale, carrée ou pseudo sinusoïdale selon la nature des appareils utilisés, en Algérie elle est fixée à 220V, 50Hz.

  • **La puissance nominale :** la puissance que l'onduleur fournit en continu en fonctionnement permanent.

  • **La puissance maximale :** une surcharge temporaire provenant du démarrage de certains moteurs, que l'onduleur supporte pendant une très courte durée.

  • **La consommation à vide :** elle doit être à la valeur la plus faible possible.

- **Puissance de l'onduleur P_{inv}**

$$P_{inv} = 1.25\ P_{PV} \qquad (III. 20)$$

P_{PV} : Puissance crête du champ photovoltaïque (W).

III.7 Dimensionnement du régulateur

Pour dimensionner le régulateur, trois éléments principaux sont pris en considération :

• **La tension nominale entre les panneaux et la batterie :** les régulateurs acceptent des plages de tension variables.

• **L'intensité maximale du régulateur :** elle doit dépasser l'intensité de court-circuit des panneaux solaires.

• **L'intensité maximale de sortie :** elle concerne uniquement les régulateurs charge-décharge et représente le courant maximal fourni simultanément par tous les récepteurs.

$$I_{reg} = 1.25\ \frac{P_P}{V_{mp}} N_p \qquad \text{(III. 21)}$$

I_{reg} : Courant du régulateur (A).

V_{mp} : Tension au point de puissance maximale (V).

III.8 Dimensionnement du câble

Détermination de la section des câbles appropriée pour chaque partie du système, de manière à ne pas dépasser la chute de tension admissible.

- **Courants de la ligne**

$$I_{PV} = \frac{P_P}{V_{sys}} \quad \text{(III. 22)}$$

$$I_{inv} = \frac{P_{inv}}{V_{sys}} \quad \text{(III. 23)}$$

$$I_{bat} = \frac{P_{inv}}{V_{sys}\,\eta_{bat}} \quad \text{(III. 24)}$$

η_{bat} : Rendement de la batterie

- **Section des câbles**

$$S = \frac{2\,L\,I}{\gamma\,\Delta V} \quad \text{(III. 25)}$$

L : Longueur du câble (m).

I : Courant dans le câble (A).

γ: Conductivité du cuivre = 56 m/Ω·mm².

ΔV: Chute de tension admissible (V).

III.9 Calcul du Performance du Système

- **Performance Ratio (PR)**

$$\text{PR} = \frac{E_{consommee}}{E_{produite}} \quad \text{(III. 26)}$$

$E_{consommee}$: Énergie journalière consommée (Wh/j)

$E_{produite}$: Énergie journalière produite par le champ PV (Wh/j)

- **Pertes du système**

$$P_{perte_{pv}} = (1 - \eta_{pv})\,E_{prod} \quad (III.27)$$

$$P_{perte_{bat}} = (1 - \eta_{bat})\,E_{prod}\;\eta_{pv} \quad (III.28)$$

$$P_{perte_{inv}} = (1 - \eta_{inv})\,E_{prod}\,\eta_{pv}\,\eta_{bat} \quad (III.29)$$

η_{pv}: Rendement des panneaux (0.85)

η_{bat}: Rendement de la batterie (0.90)

η_{inv}: Rendement de l'onduleur (0.95)

III.10 Calcul du coût de l'installation photovoltaïque

Pour calculer le coût total d'une installation photovoltaïque, le modèle suivant est utilisé

$$C_T = C_{PV} + C_{Bat} + C_{Reg} + C_{ond} + C_0 \qquad (III.30)$$

Le coût du kilowattheure du système photovoltaïque est calculé par la relation :

$$C_{PVKWh} = \frac{C_{TDV}}{T_{CONS}} \qquad (III.31)$$

Où C_{TDV} représente le coût total estimé sur toute la durée de vie de l'installation, donné par

$$C_{TDV} = C_T + C_{OM} + C_{RB} \qquad (III.32)$$

C_{TDV} : Coût total estimé pour la durée de vie de l'installation.

C_{RB} : Coût de remplacement des batteries.

C_{ONS} : Consommation annuelle du système.

C_{OM} : Coût d'opération et de maintenance.

C_{ond} : Coût de l'onduleur.

C_B : Coût du parc de stockage.

C_0 : Coûts indirects tels que la structure et le câblage.

C_{GPV} : Coût du générateur photovoltaïque.

C_{REG} : Coût du régulateur.

C_T : Coût initial total du système.

T_{cons} : Durée de vie de l'installation.

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la méthode de dimensionnement du système photovoltaïque autonome en évaluant les besoins énergétiques, en dimensionnant les différents composants et en calculant le coût global de l'installation.

Ces résultats constitueront le point de départ du chapitre suivant, consacré à la présentation des résultats, à l'évaluation des performances et à l'étude économique.

Chapitre IV :
Résultats, performances et étude économique

IV.1 Introduction

Dans la continuité de la méthodologie de calcul du système photovoltaïque autonome présentée au chapitre précédent, ce chapitre est consacré à l'application de cette méthodologie à l'aide d'un programme développé sous MATLAB. Ce programme repose sur des fichiers de type M-File (.m), qui permettent l'implémentation et l'exécution automatique des algorithmes ainsi que des différents calculs numériques, assurant ainsi un traitement fiable et efficace des données.

Le programme a été utilisé pour effectuer l'ensemble des calculs relatifs au système photovoltaïque autonome à partir des données du site d'étude et des caractéristiques de la charge électrique. Il permet notamment de déterminer la production énergétique, l'état de charge des batteries (SOC), la profondeur de décharge (DOD), l'autonomie du système, le rendement global, le Performance Ratio (PR), ainsi que d'évaluer les différentes pertes énergétiques. Il intègre également une étude économique portant sur l'estimation du coût global du système et l'analyse de l'influence du niveau de consommation et de la profondeur de décharge sur le coût et la durée de vie des batteries.

Les résultats obtenus à l'aide de ce programme seront présentés, analysés et discutés dans les différentes sections de ce chapitre afin d'évaluer les performances techniques et économiques du système photovoltaïque autonome.

IV.2 Présentation du site d'étude

La première étape du programme permet de sélectionner le type de bâtiment à alimenter par le système photovoltaïque et de définir les charges électriques correspondantes. Selon le choix de l'utilisateur, les puissances des appareils, leurs durées d'utilisation quotidiennes ainsi que leurs noms sont automatiquement attribuées. Une option de saisie manuelle est également disponible pour introduire des charges personnalisées. Les données obtenues seront ensuite utilisées pour calculer l'énergie journalière demandée et dimensionner les différents composants du système photovoltaïque.

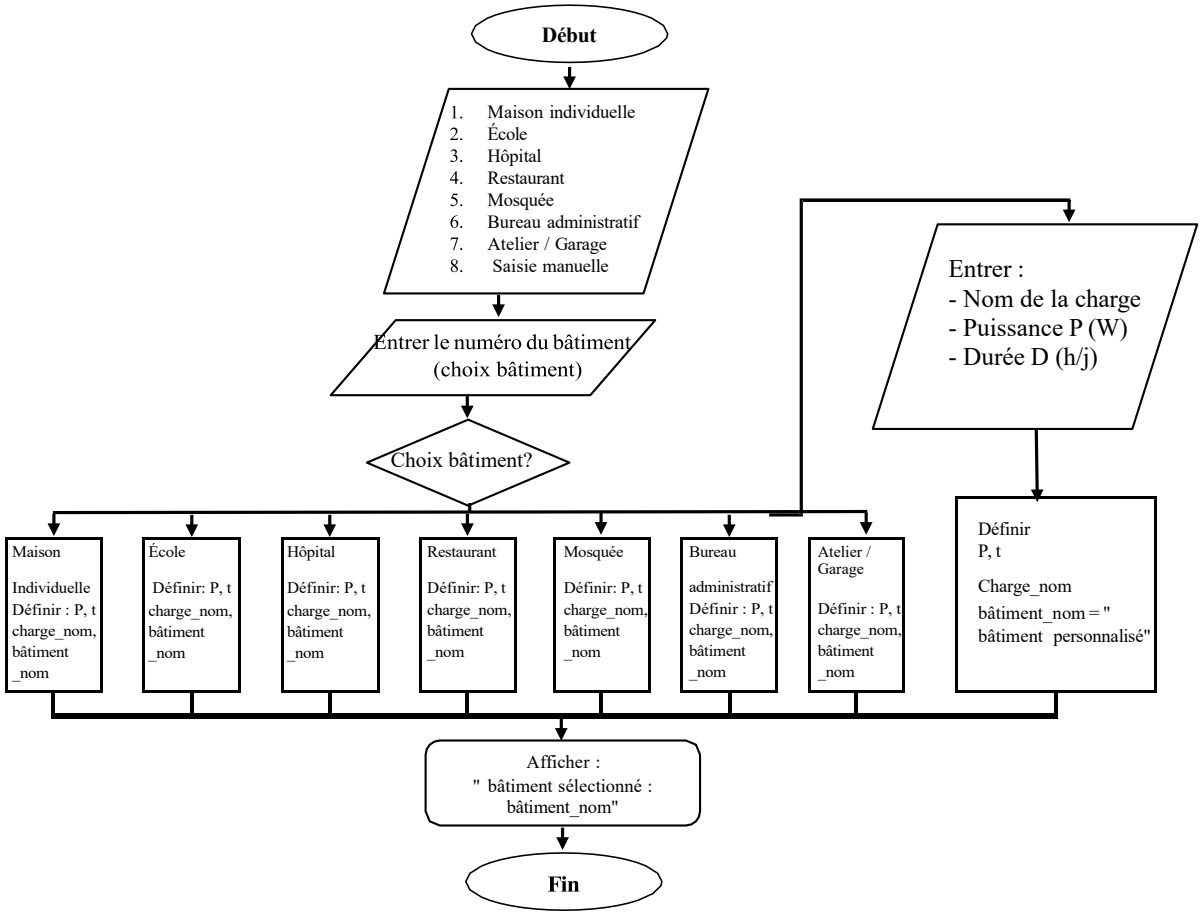


Figure IV.1 : organigramme de sélection du bâtiment avec charge

IV3 Irradiation solaire du site

L'irradiation solaire d'une zone dépend principalement de sa position géographique, en particulier de la latitude, qui conditionne la durée du jour ainsi que la quantité d'énergie solaire reçue au cours de l'année. Dans ce contexte, le programme présenté permet de modéliser l'évolution de l'irradiation solaire sur 365 jours en fonction de la latitude du site. Dans la première partie du programme, après la sélection du site, la latitude est introduite puis convertie en radians afin de faciliter les calculs. Le modèle repose ensuite sur le calcul de la déclinaison solaire et de l'angle horaire du coucher du soleil, permettant de déterminer la durée du jour pour chaque journée de l'année. À partir de cette durée, l'irradiation solaire (PSH) est estimée de manière approchée. Enfin, le programme identifie la valeur minimale de PSH ainsi que le jour correspondant.

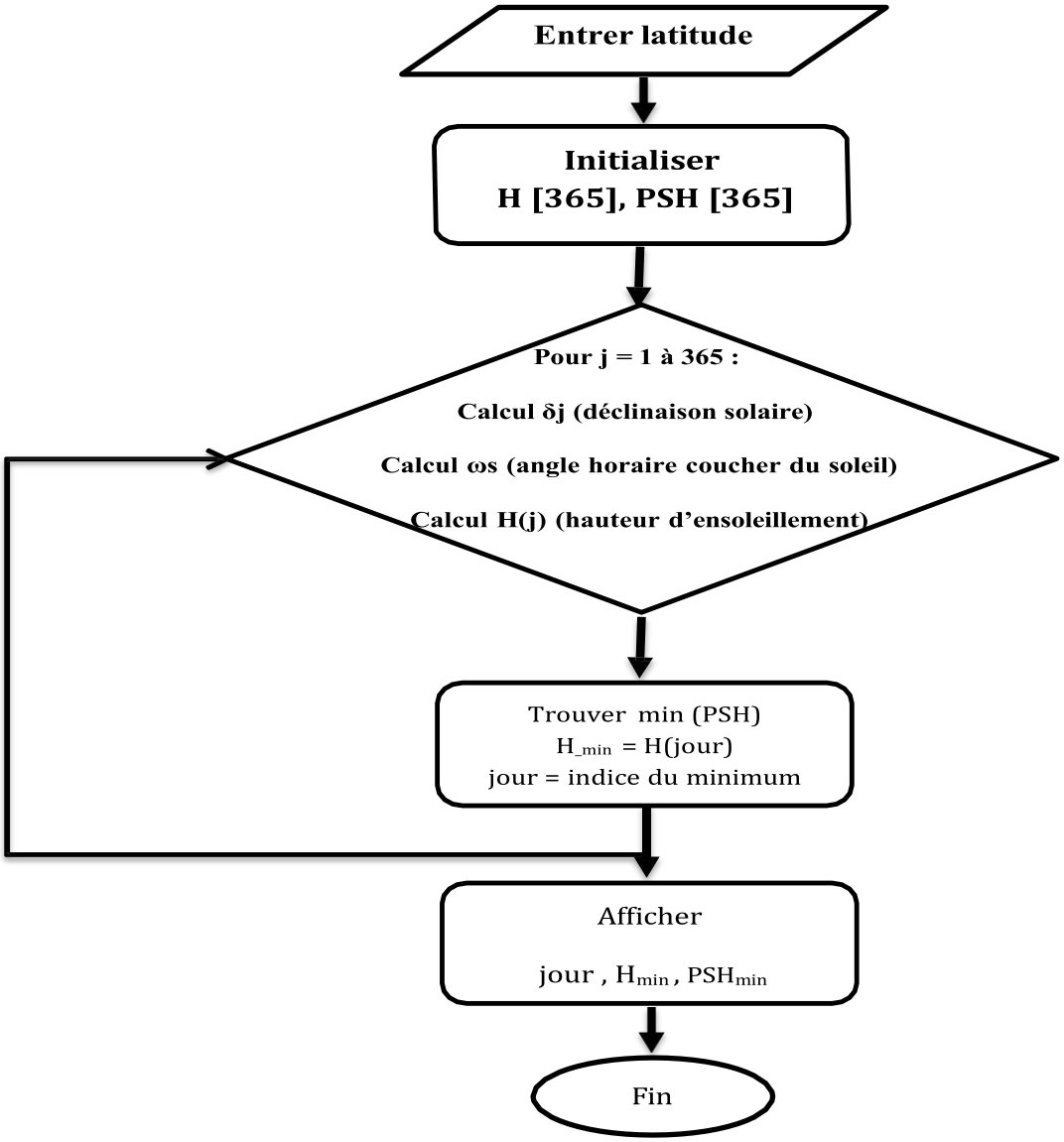


Figure IV.2 : Organigramme d'ensoleillement

- **Irradiation solaire journalière par ville**

La figure IV.3 présente l'évolution annuelle de l'irradiation solaire journalière pour un ensemble de villes algériennes, calculée pour chacun des trois cent soixante-cinq jours de l'année à partir de leur position géographique définie par leur latitude. La courbe révèle le rythme saisonnier régulier du rayonnement solaire, depuis son pic estival où il atteint son maximum, jusqu'à son creux hivernal où il descend à son niveau le plus bas, avec une disparité notable entre les villes selon leur éloignement de l'équateur. Des lignes de repère mettent en évidence le jour critique enregistrant le niveau d'irradiation le plus faible de l'année, lequel constitue la référence adoptée dans le dimensionnement pour garantir que le système est en mesure de satisfaire les besoins énergétiques même dans les conditions d'ensoleillement les plus défavorables, faisant ainsi de cette figure un outil de référence fondamental dans le choix du site du projet et l'ajustement de ses paramètres de conception.

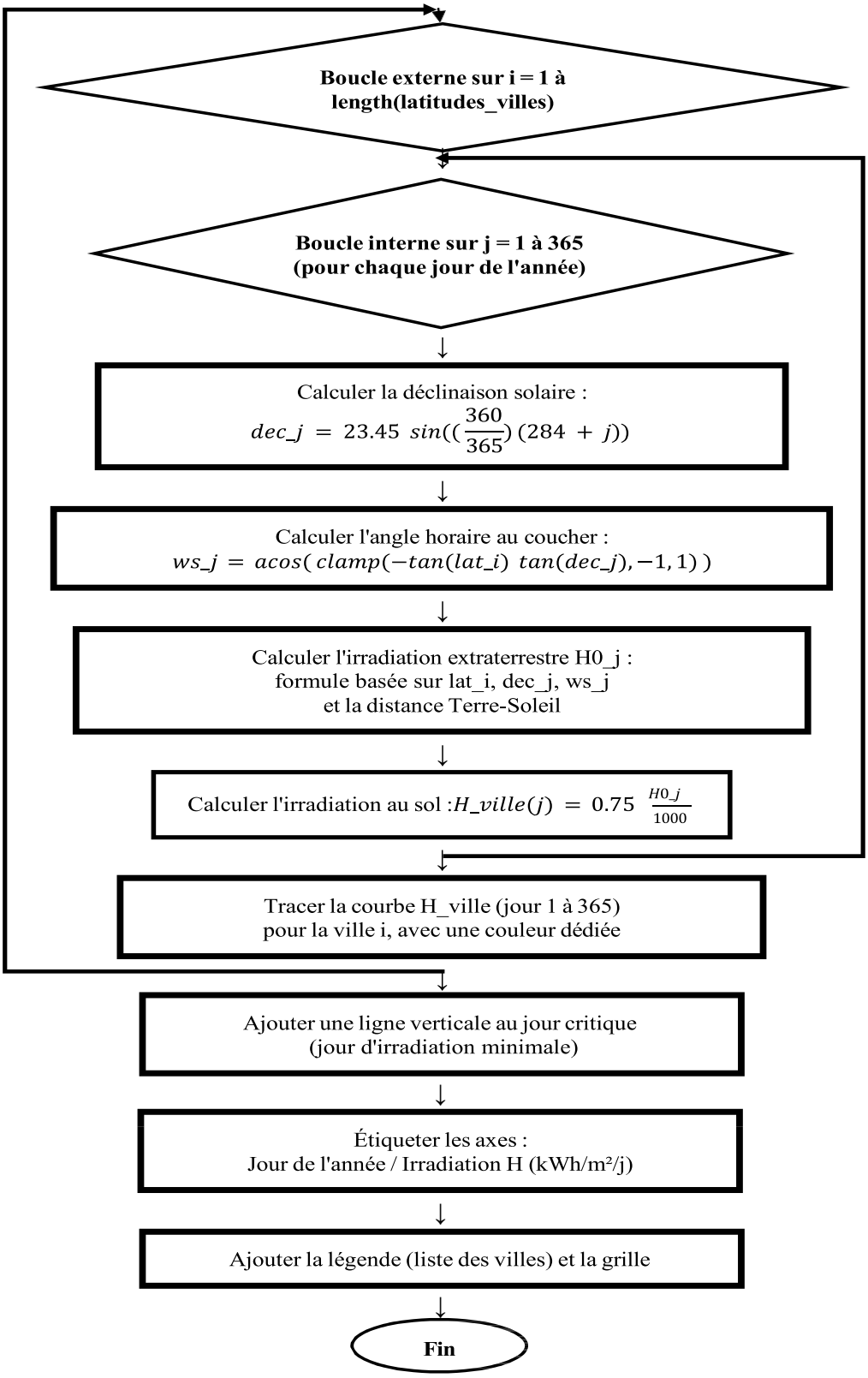


Figure IV.3 : Organigramme d'irradiation par ville

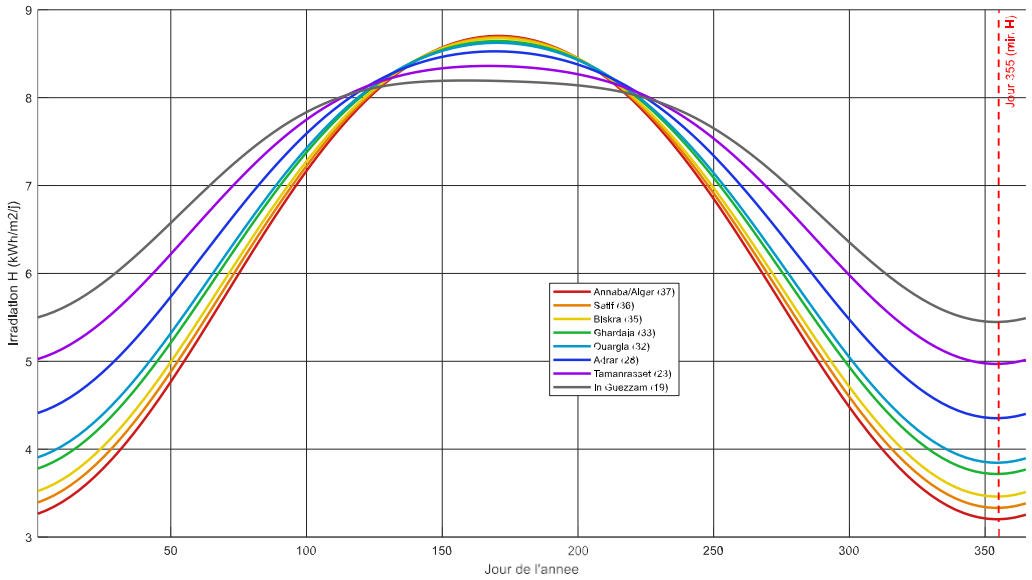


Figure IV.4 : Irradiation par ville

La figure IV.4 illustre la variation saisonnière de l'irradiation solaire journalière dans huit régions algériennes classées selon leur latitude, où l'ensemble des courbes convergent en été vers une valeur maximale quasi commune, tandis que l'écart entre elles s'élargit nettement en hiver. Les régions du nord, à latitude plus élevée (Annaba/Alger), enregistrent l'irradiation hivernale la plus faible et la plus grande amplitude saisonnière, alors que les régions du sud (In Guezzam) bénéficient d'une irradiation hivernale plus élevée et d'une plus grande stabilité tout au long de l'année, ce qui impose un dimensionnement plus important du système photovoltaïque dans le nord par rapport au sud.

IV.4 Calcul de l'angle d'inclinaison optimal

Cette partie du programme est consacrée au calcul de l'angle d'inclinaison optimal des panneaux photovoltaïques en fonction de la latitude géographique du site. L'angle est initialement estimé à l'aide de la relation :

$$\beta = Latitude - 5° \qquad (IV.1)$$

Afin d'optimiser la performance énergétique annuelle du système. Des contraintes physiques sont ensuite appliquées afin de garantir des valeurs réalistes, en limitant l'angle d'inclinaison entre 0° et 60°. Enfin, le programme affiche la latitude ainsi que la valeur de l'angle optimal calculé de manière structurée.

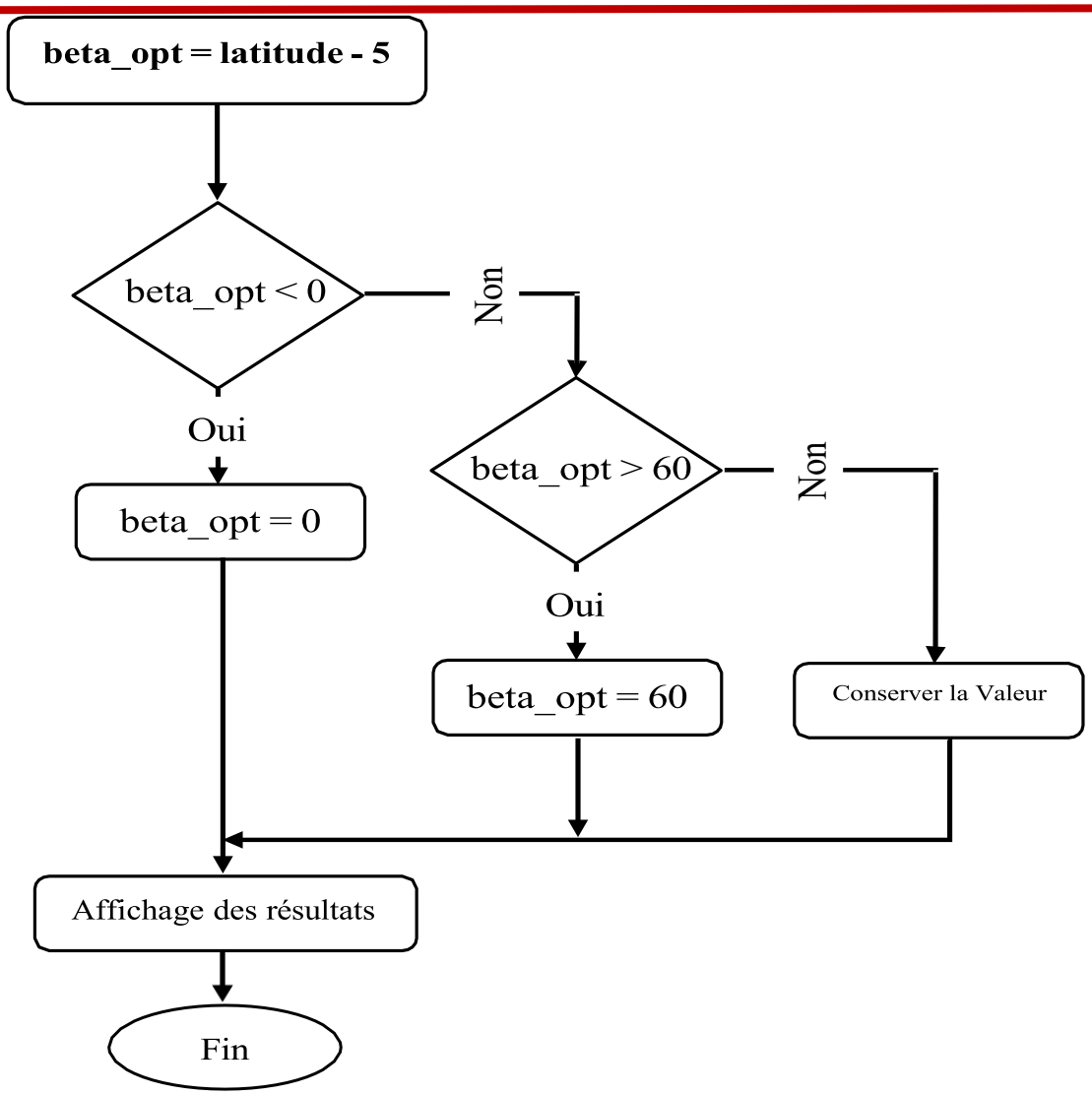


Figure IV.5 : Algorithme de l'angle d'inclinaison optimal

Dans le cadre de cette étude, la wilaya de Bordj Bou Arreridj a été retenue comme site d'application pour le dimensionnement du système photovoltaïque. Ce choix nécessite la connaissance de la latitude géographique du site, puisque celle-ci intervient directement dans le calcul de l'angle d'inclinaison optimal des panneaux solaires. Selon les données géographiques disponibles sur le site Geodatos [17], la ville de Bordj Bou Arréridj est située à une latitude d'environ 36,07° Nord et une longitude de 4,76° Est. Par conséquent, la valeur de latitude (Latitude = 36,07°) a été introduite dans le programme afin de déterminer l'angle d'inclinaison optimal et d'améliorer la production énergétique annuelle du générateur photovoltaïque. D'après l'algorithme adopté dans ce programme, l'angle d'inclinaison optimal obtenu est de 31,07°, ce qui permet d'assurer une meilleure captation du rayonnement solaire tout au long de l'année.

IV5 Résultats du dimensionnement

Les systèmes photovoltaïques peuvent être installés sur différents types de bâtiment tels que les habitations, les écoles, les hôpitaux, les bureaux administratifs ou encore les ateliers. Le choix du bâtiment d'application constitue une étape importante dans le dimensionnement du système, car les besoins énergétiques varient d'un utilisateur à un autre selon la nature des charges électriques et leur durée d'utilisation.

Dans cette étude, le choix s'est porté sur une maison individuelle. Ce choix est justifié par le fait que les habitations résidentielles représentent l'une des applications les plus répandues des systèmes photovoltaïques. De plus, les besoins énergétiques d'une maison individuelle sont généralement bien définis, ce qui facilite l'évaluation de la consommation électrique et le dimensionnement des différents composants du système photovoltaïque.

- **Consommation des appareils électriques d'une maison individuelle**

Dans cette partie, on présente les différents appareils électriques domestiques avec leur puissance nominale et leur durée d'utilisation quotidienne.

Ces données permettent de déterminer la consommation énergétique de chaque appareil et d'estimer la demande totale en énergie.

Tableau IV.1 : Caractéristiques des charges

Appareil	Puissance (W)	Durée de fonctionnement (h)
Éclairage	100	6
Télévision	60	5
Réfrigérateur	40	8
Climatiseur	200	3
Machine à laver	150	4
Chargeurs	20	10

- **Paramètres du système**

Ce tableau présente les principaux paramètres techniques du système photovoltaïque étudié. Ces valeurs incluent les rendements des différents composants ainsi que les caractéristiques physiques du système.

Tableau IV. 2 : Paramètres du système

Paramètre	Valeur	Unité
η_sys	0.75	–
η_bat	0.90	–
η_inv	0.95	–
η_pv	0.85	–
Njours	2	Jours
Pp	400	W
Vmp	33	V
Vbat	12	V
Cbat_unit	200	Ah
drop_percent	3	%
γ (gamma)	56	m/(Ω·mm²)
L_pv	15	m
L_bat	10	m
L_inv	20	m
project_years	10	Ans
DOD	0.5	–

Tableau IV.3 : Coût estimatif des composants du système photovoltaïque autonome (2025)

Élément	Prix unitaire	Quantité
Panneau PV (Condor)	95 000 DA/kWp	–
Batterie	3 500 DA/kWh	–
Onduleur	18 000 DA/kW	–
Régulateur PWM (base)	4 500 DA	+ 90 DA/A
Régulateur MPPT (base)	17 000 DA	+ 180 DA/A
Disjoncteur DC	6 000 DA	× 2
Disjoncteur AC	5 000 DA	× 2
Fusible	1 500 DA	× 4
Parafoudre	12 000 DA	× 1
Câble DC	150 DA/m	25 m
Câble AC	100 DA/m	20 m
Structure	45 000 DA	–
Installation	60 000 DA	–

IV.5.1 Nombre de panneaux photovoltaïques

Cette étape consiste au calcul de l'énergie quotidienne, puis de la puissance nécessaire d'un système photovoltaïque en tenant compte de l'ensoleillement et du rendement. Elle permet également de déterminer le nombre de panneaux solaires requis, de choisir la tension du système (12 V, 24 V ou 48 V), ainsi que de définir la configuration des panneaux en série et en parallèle.

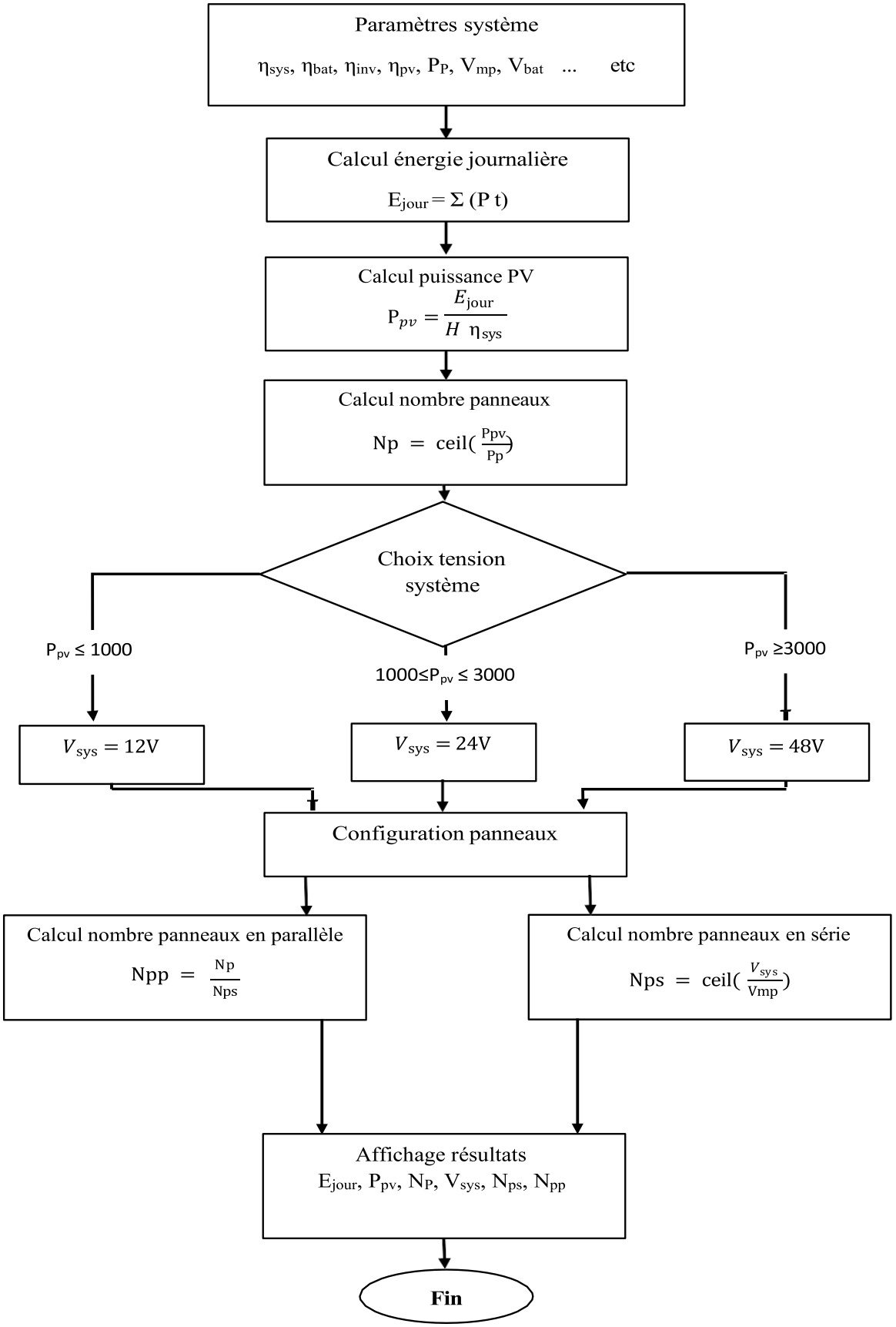


Figure IV.6 : Organigramme de dimensionnement de générateur photovoltaïques

IV.2 Nombre de batteries

La batterie constitue un élément essentiel dans un système photovoltaïque autonome, car elle permet de stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires et de l'utiliser en l'absence d'ensoleillement ou lors des périodes de forte demande énergétique. Elle assure ainsi la continuité de l'alimentation des charges électriques et garantit l'autonomie du système. Ce programme est consacré au dimensionnement du parc de batteries nécessaire au système. Il calcule d'abord la quantité d'énergie à stocker en fonction de la consommation journalière et du nombre de jours d'autonomie souhaité, puis détermine la capacité requise des batteries en tenant compte de la profondeur de décharge admissible. Ensuite, il évalue le nombre de batteries à connecter en série pour obtenir la tension du système désirée, ainsi que le nombre de branches parallèles nécessaires pour satisfaire la capacité demandée. Enfin, il détermine le nombre total de batteries requis pour l'installation.

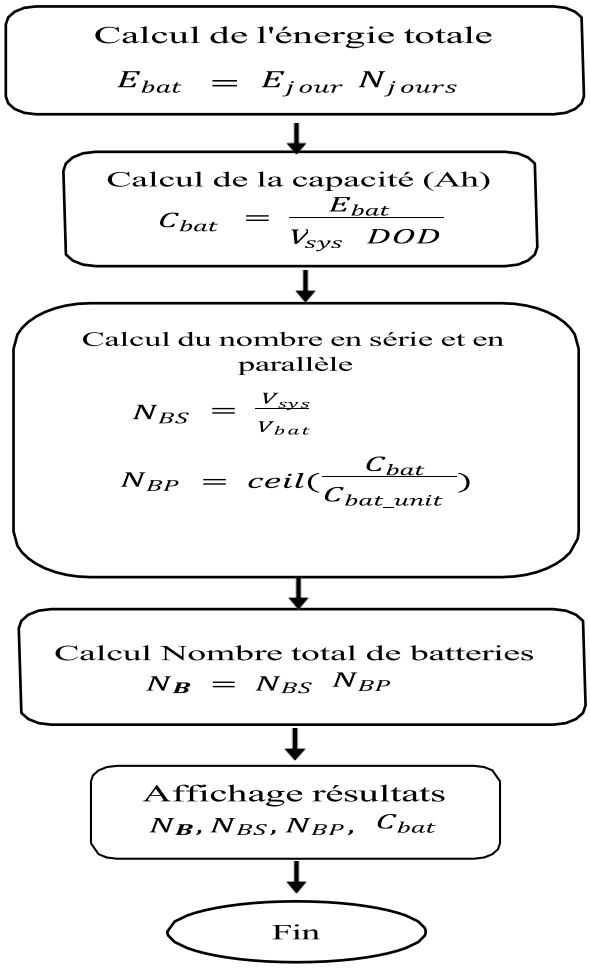


Figure IV.7 : Organigramme de dimensionnement des batteries

- **Nombre de panneaux et de batteries en fonction de la consommation journalière**

La figure IV.8 présente une vision comparative de l'évolution du dimensionnement du système photovoltaïque en fonction de la variation de la consommation énergétique journalière, à travers deux diagrammes en barres juxtaposés dont le premier affiche le nombre de panneaux solaires requis et le second le nombre de batteries nécessaires, tous deux calculés pour huit niveaux de consommation progressifs. La caractéristique la plus marquante de cette figure est la mise en évidence du projet actuel par une couleur distincte qui le fait ressortir parmi les autres scénarios, permettant ainsi au concepteur d'évaluer la position de son système au sein du spectre des configurations possibles, et d'appréhender l'impact direct de toute modification de la consommation sur le dimensionnement des composants principaux du système, ainsi que les implications techniques et économiques qui en découlent.

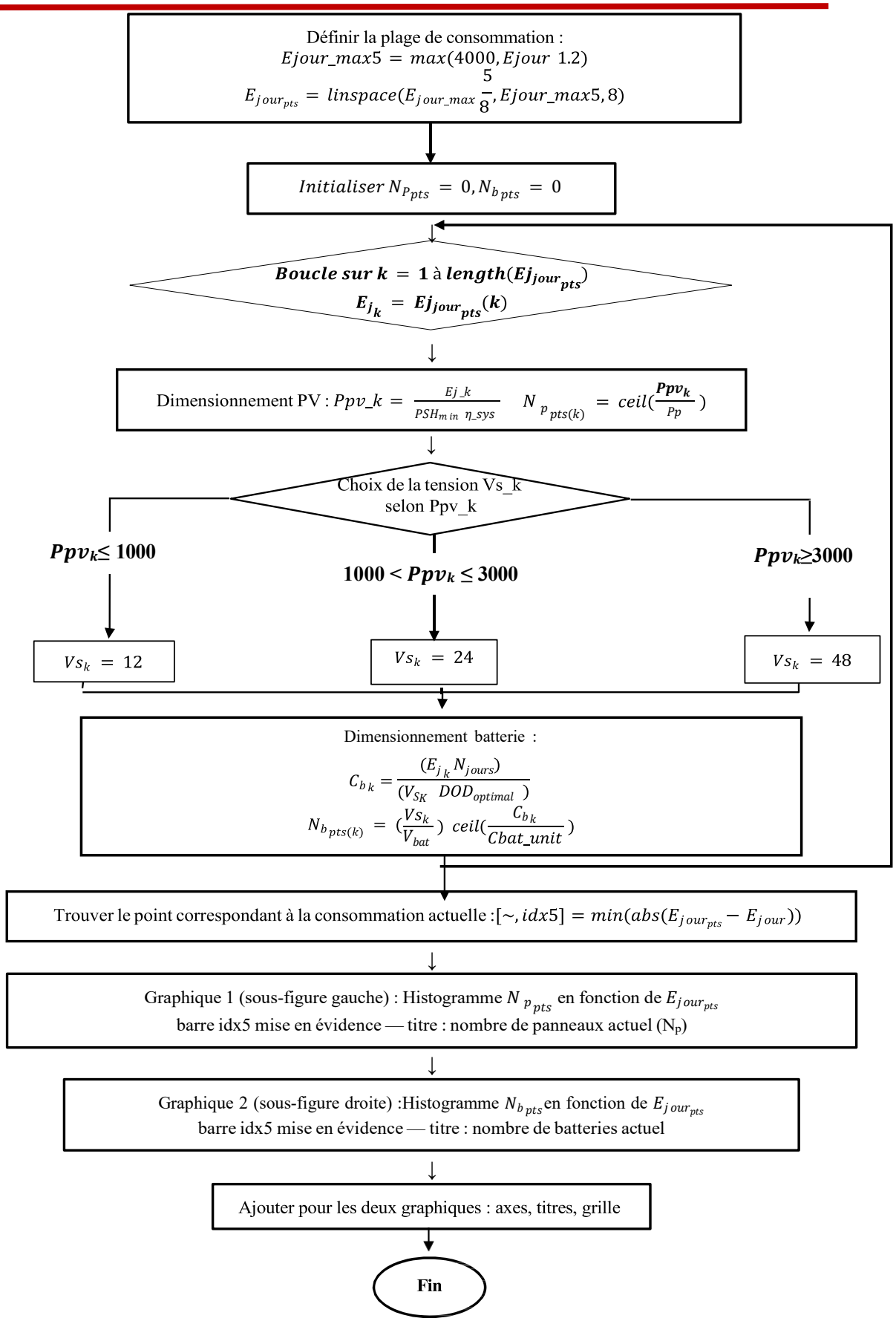


Figure IV.8 : Organigramme de Nombre de panneaux et de batteries en fonction de la consommation journalière

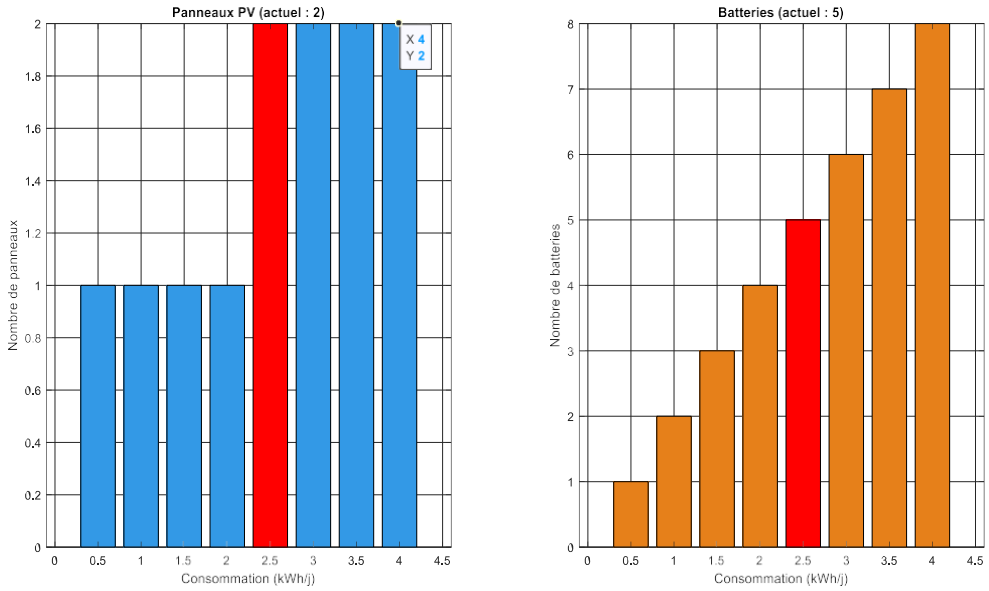


Figure IV.9 : Nombre de panneaux et de batteries en fonction de la consommation journalière

Les deux figures illustrent l'augmentation du nombre de panneaux photovoltaïques et du nombre de batteries en fonction de la croissance de la consommation journalière de la charge, selon une relation quasi linéaire mais discrète, reflétant la nature du dimensionnement en nombres entiers de composants. On remarque que le taux de croissance du nombre de batteries est relativement plus élevé que celui du nombre de panneaux, ce qui indique que le système de stockage constitue l'élément le plus sensible à la variation du niveau de charge. Ces résultats confirment par ailleurs la flexibilité de la méthodologie adoptée face à toute valeur de consommation donnée**.**

IV.5. 3 Choix de l'onduleur et du régulateur

L'algorithme permet de dimensionner l'onduleur et le régulateur de charge à partir des paramètres du système photovoltaïque calculés précédemment. Il calcule d'abord la puissance requise de l'onduleur en intégrant une marge de sécurité, puis sélectionne la puissance appropriée parmi les valeurs disponibles sur le marché et détermine le nombre d'onduleurs nécessaires.

Ensuite, il évalue le courant requis du régulateur de charge en tenant compte d'une marge de sécurité, choisit le type de régulateur adapté (PWM ou MPPT) ainsi que son calibre normalisé, puis détermine le nombre de régulateurs requis. Enfin, l'algorithme affiche les résultats finaux relatifs aux composants de conversion et de contrôle du système photovoltaïque.

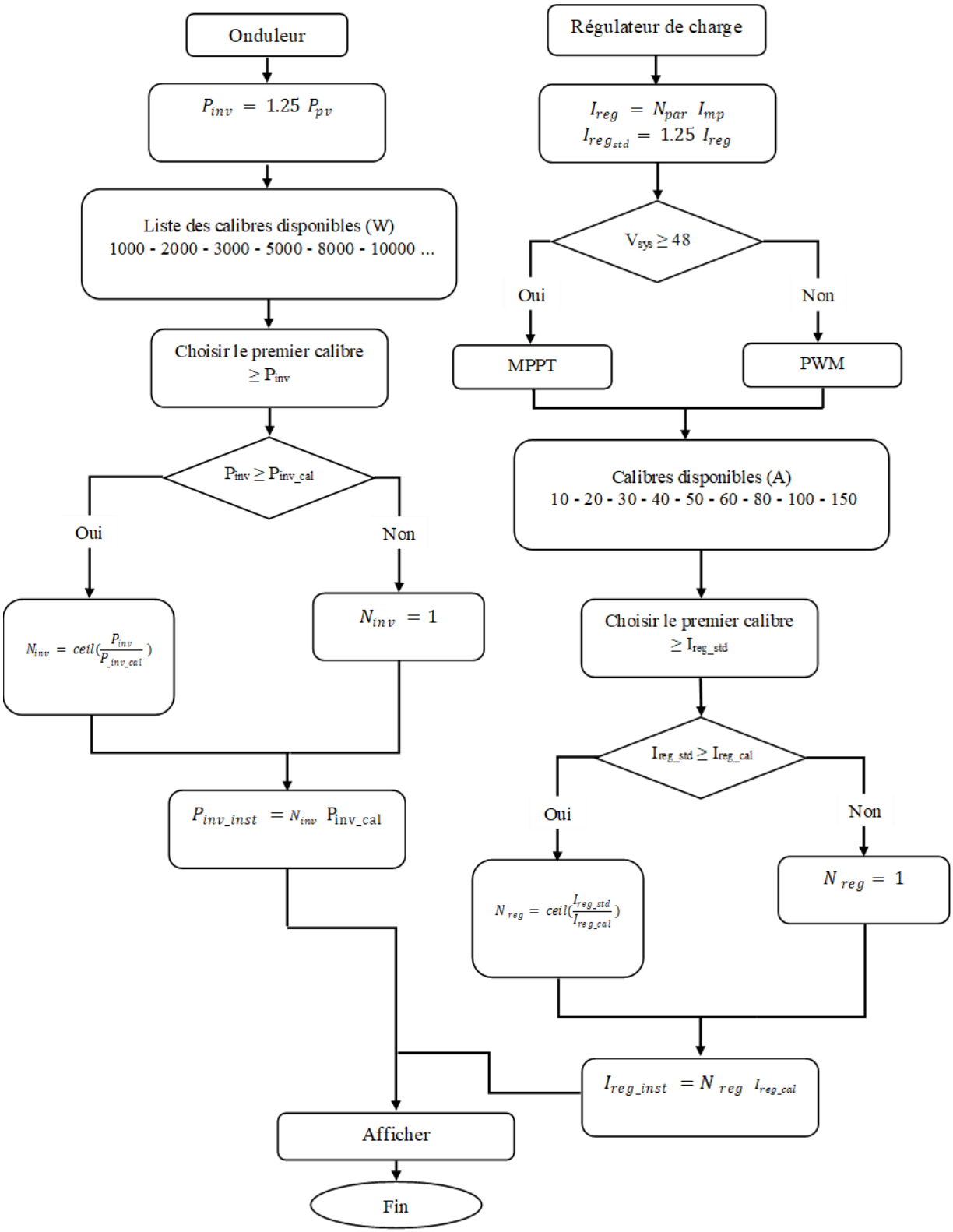


Figure IV.10 : L'algorithme de Choix de l'onduleur et du régulateur

IV.5. 4 Dimensionnement du câble

Cet algorithme permet de dimensionner les sections des câbles du système photovoltaïque en calculant d'abord les courants du champ PV, de la batterie et de l'onduleur.

Ensuite, les sections théoriques sont déterminées en fonction de la longueur des câbles, de la chute de tension admissible et de la conductivité du matériau. Enfin, les valeurs obtenues sont comparées aux sections normalisées disponibles afin de sélectionner les sections commerciales appropriées et d'assurer un fonctionnement sûr avec des pertes minimales.

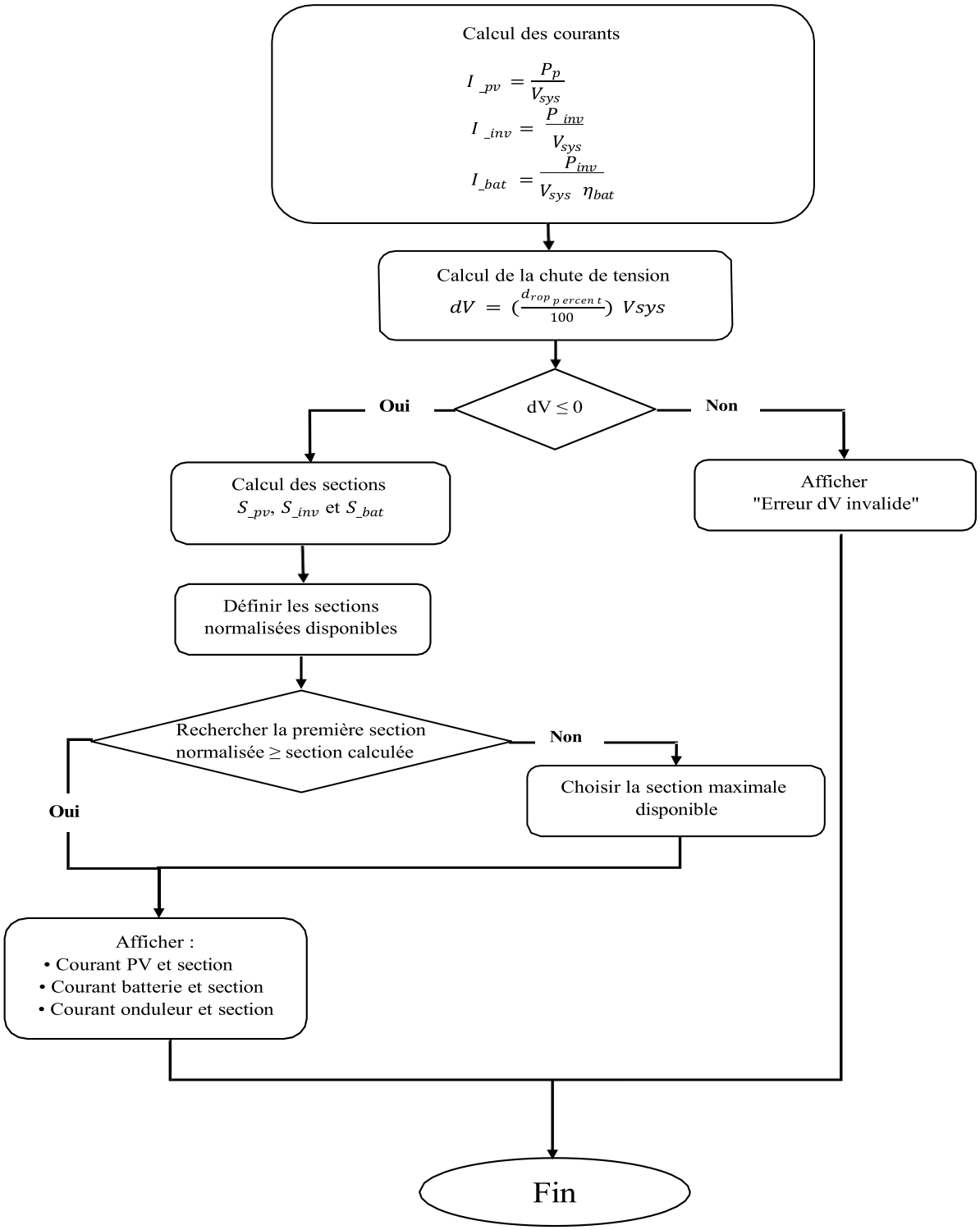


Figure IV.11 : L'algorithme de dimensionnement du câble

IV.6 Évaluation des performances du système

L'évaluation des performances du système consiste à mesurer le degré d'efficacité du système photovoltaïque dans la satisfaction effective de la charge électrique, à travers plusieurs indicateurs essentiels : la comparaison entre la production photovoltaïque et la consommation réelle, le suivi de l'état de charge de la batterie (SOC) et de sa profondeur de décharge (DOD), ainsi que le calcul du rendement du système et du Performance Ratio (PR) permettant de déterminer le taux des pertes. L'ensemble de ces indicateurs reflète la fiabilité et l'autonomie du système, et permet d'apprécier l'adéquation du dimensionnement adopté avec les besoins réels.

IV.6.1 Production PV et consommation

L'algorithme illustre la distribution temporelle de l'énergie produite et consommée sur l'ensemble d'une journée. La courbe de production photovoltaïque adopte un profil sinusoïdal reflétant la nature progressive du rayonnement solaire, depuis le lever du soleil jusqu'à son coucher, en passant par un pic de génération atteint au milieu de la journée. En parallèle, la courbe de consommation retrace le profil réel de la demande énergétique avec ses fluctuations caractéristiques, marquée par une pointe matinale liée à l'activité domestique aux heures de réveil, une période de relative accalmie en milieu de journée, puis une pointe vespérale plus prononcée coïncidant précisément avec l'arrêt de la production solaire. La superposition de ces deux courbes met en évidence les décalages temporels entre offre et demande, révélant ainsi les plages horaires durant lesquelles le système de stockage doit intervenir pour garantir la continuité de l'alimentation électrique.

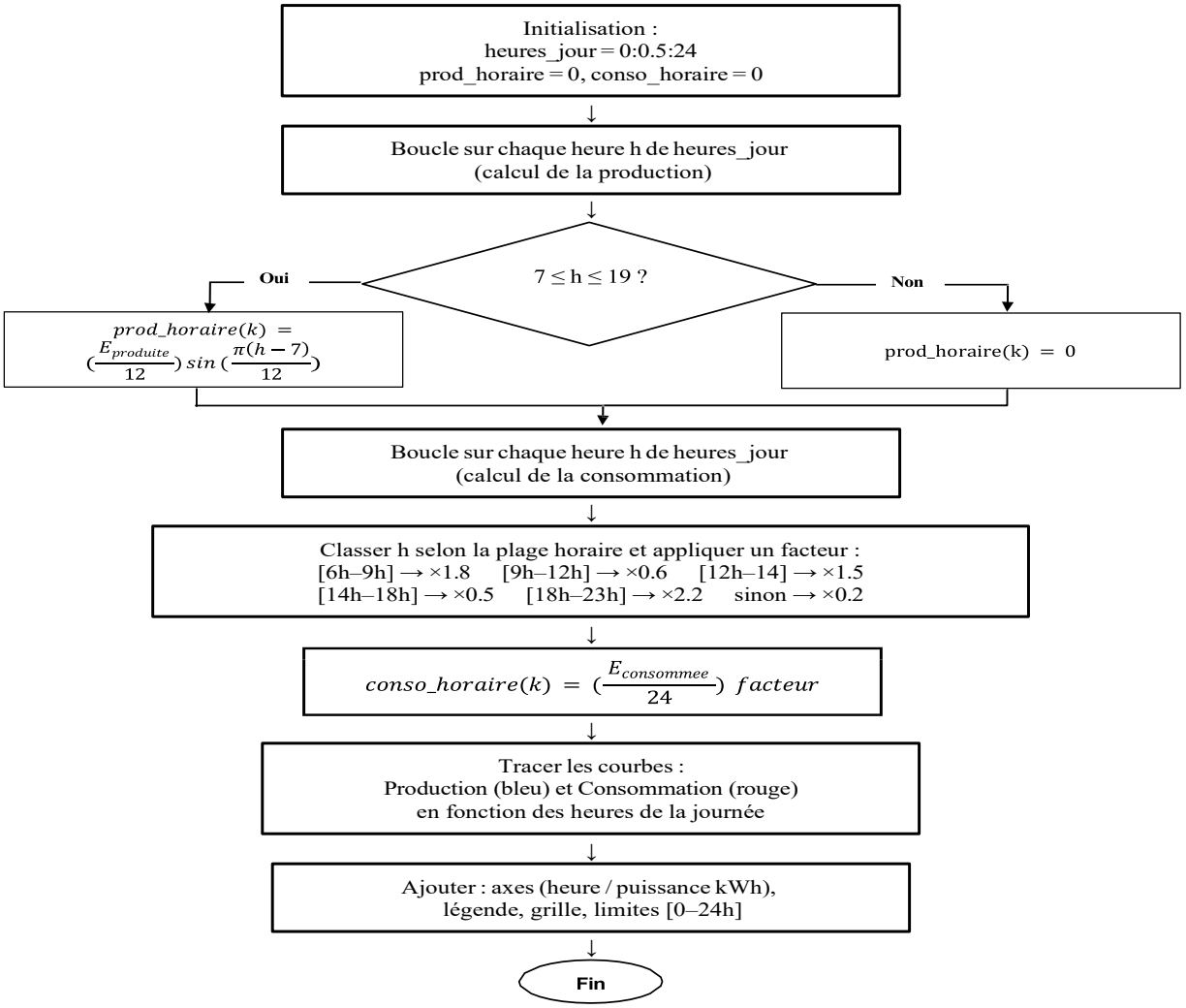


Figure IV.12 : L'algorithme de Production PV et consommation

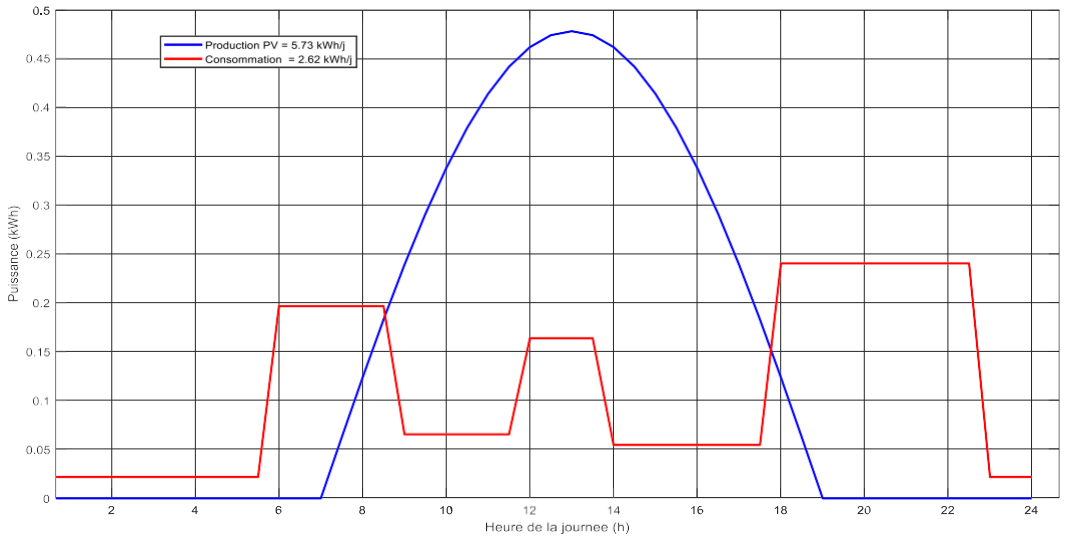


Figure IV.13 : Production PV et consommation

La figure **IV.13** illustre l'évolution temporelle de la production photovoltaïque (courbe bleue) et de la consommation (courbe rouge) sur une durée de 24 heures, où la production suit une distribution sinusoïdale atteignant son maximum vers midi, tandis que la consommation présente un profil discontinu reflétant deux pics distincts, matinal et soirée. On observe que la production photovoltaïque journalière (3,88 kWh/j) demeure supérieure à la consommation (2,62 kWh/j), mais avec un surplus moins marqué que dans les cas précédents, ce qui nécessite un dimensionnement plus précis du système de stockage afin de garantir la couverture des périodes où la consommation dépasse la production instantanée.

IV.6.2 État de charge de la batterie (SOC)

L'algorithme retrace l'évolution du niveau de charge de la batterie sur une période de vingt-quatre heures, révélant ainsi la dynamique des échanges énergétiques entre le système de production photovoltaïque et le système de stockage. La batterie entame sa journée à pleine charge, puis monte progressivement durant les heures d'ensoleillement lorsque la production solaire excède la consommation, jusqu'à atteindre son seuil maximal autorisé. Dès l'arrêt de la production au coucher du soleil, la batterie devient l'unique source d'alimentation, et son niveau de charge s'amenuise graduellement tout au long des heures nocturnes. Toutefois, le système veille en permanence à ce que cette décroissance ne franchisse pas le seuil de décharge maximale préalablement défini, afin de préserver la batterie d'une dégradation prématurée. Cette courbe illustre avec clarté dans quelle mesure le dimensionnement du système de stockage répond aux exigences de continuité de l'alimentation électrique.

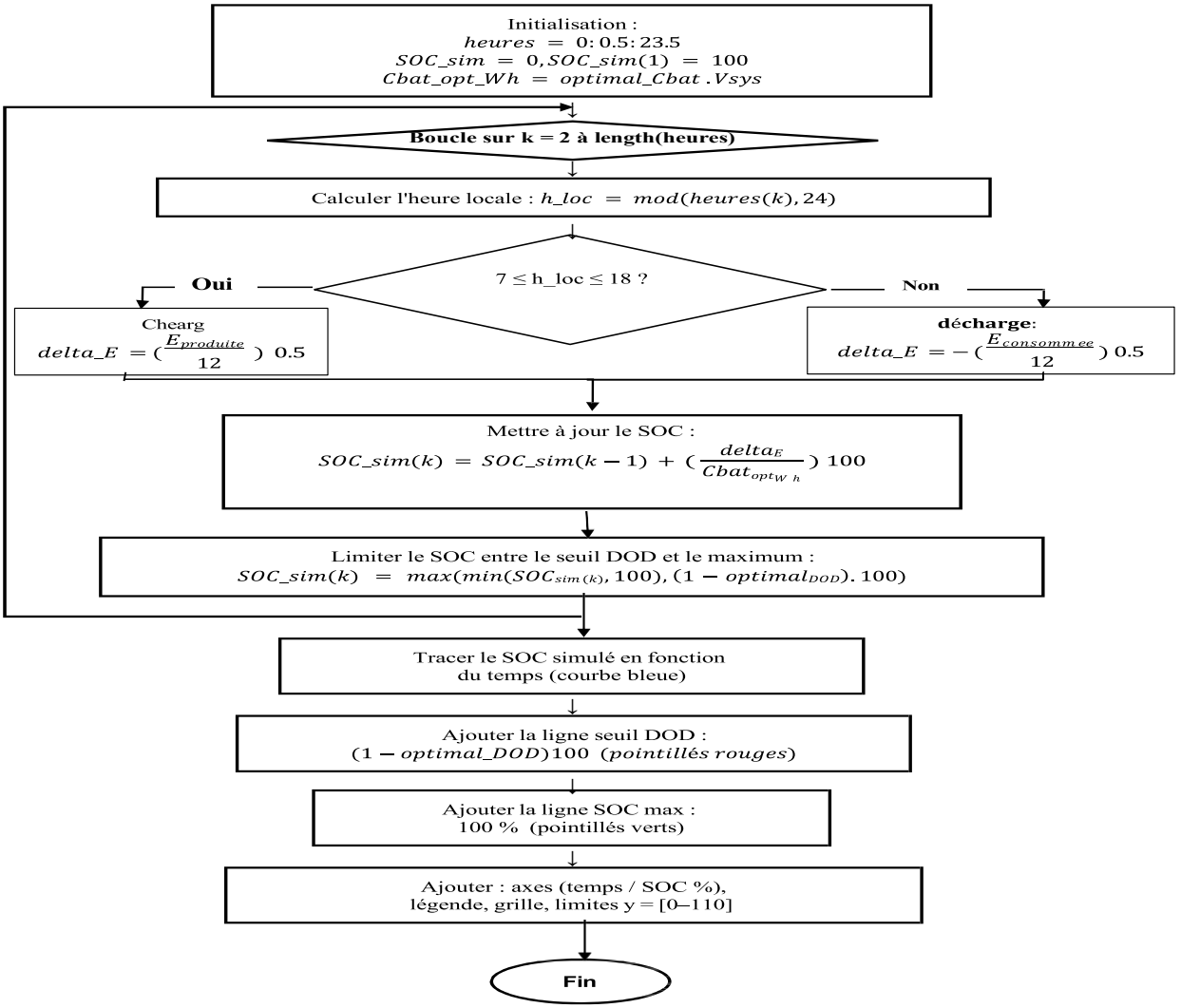


Figure IV.14 : L'algorithme de État de charge de la batterie (SOC)

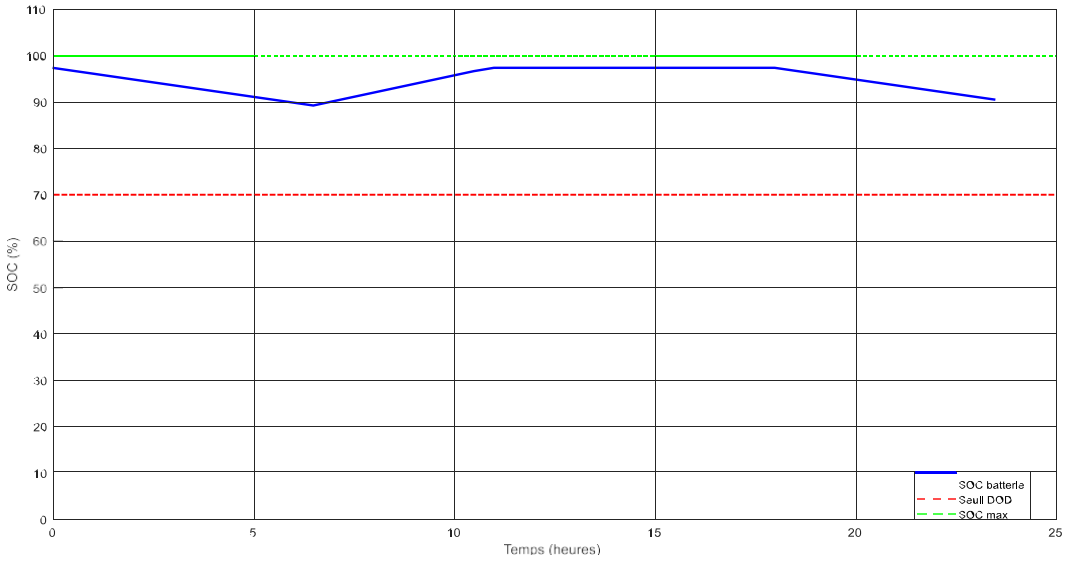


Figure IV.15 : État de charge de la batterie (SOC)

La figure IV.15 illustre l'évolution de l'état de charge de la batterie (SOC) sur une période de 24 heures, où la valeur diminue progressivement de 100 % à environ 89 % durant les premières heures en raison de la consommation nocturne et de l'absence de production photovoltaïque, avant de remonter avec le début de l'ensoleillement pour se stabiliser autour de 95 %, puis de redescendre en soirée lorsque la production s'annule. La courbe du SOC demeure ainsi tout au long de la journée largement éloignée du seuil de profondeur de décharge (Seuil DOD), ce qui indique que la batterie n'est soumise à aucune décharge critique et confirme l'adéquation du dimensionnement du système de stockage ainsi que sa grande fiabilité.

IV.6.3 Profondeur de décharge (DOD) et durée de vie

Ce code vise à déterminer la valeur optimale de la profondeur de décharge de la batterie, à travers deux étapes successives. Dans la première étape, il s'appuie sur un modèle mathématique reliant la profondeur de décharge au nombre de cycles de charge et de décharge, puis convertit ce nombre en durée de vie exprimée en années, pour retenir finalement la valeur garantissant la durée de vie la plus longue possible pour la batterie.

Dans la deuxième étape, le code recalcule le coût des batteries et le coût total du système pour chaque valeur de DOD étudiée, en maintenant constants les coûts des autres éléments (panneaux, onduleur, câbles...). À l'issue de la boucle, un ensemble de résultats correspondant au DOD optimal est extrait, comprenant la capacité requise, le nombre de batteries et le coût total, puis l'ensemble est affiché de manière structurée.

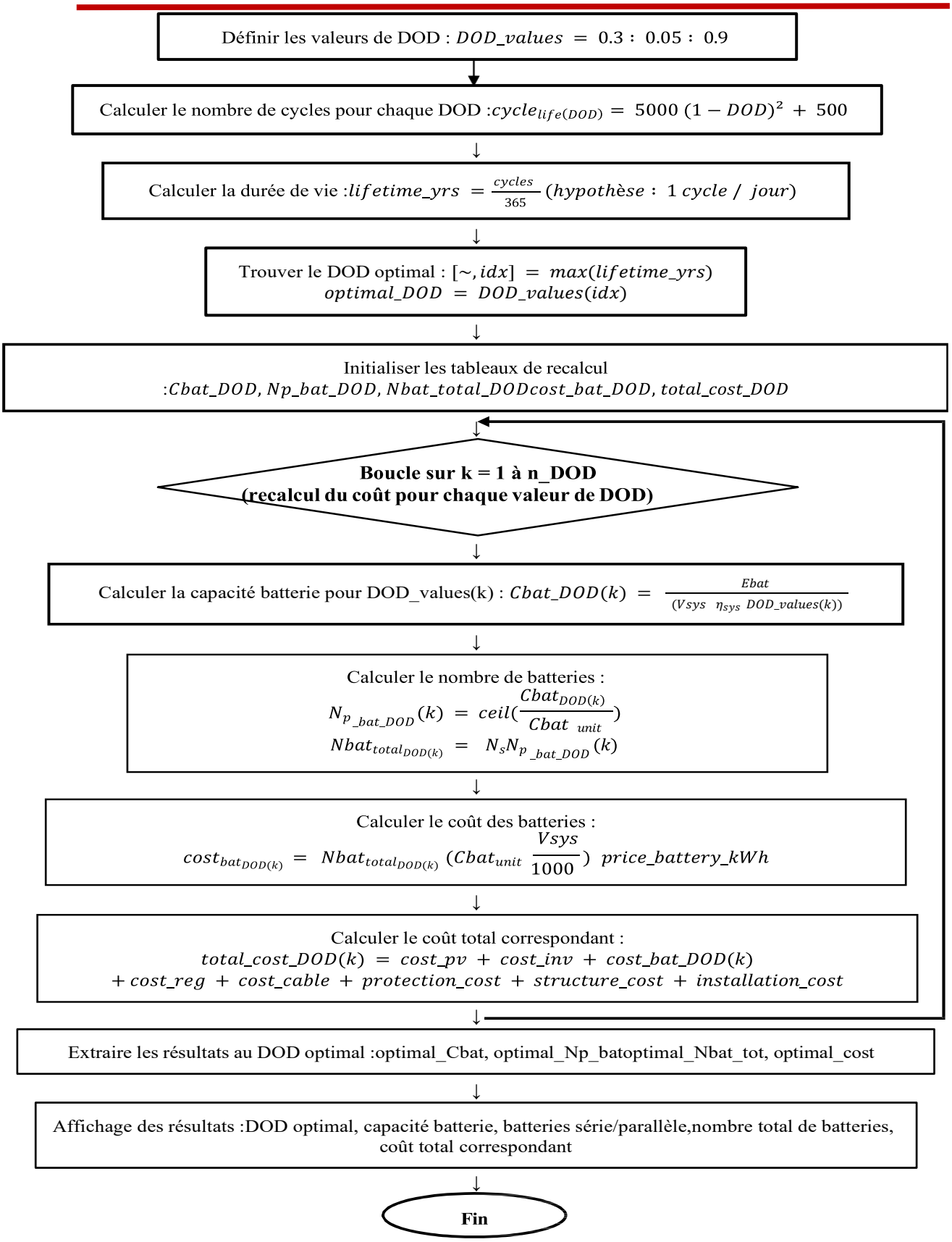


Figure IV.16 : Organigramme de Optimisation du DOD et durée de vie

➢ **La relation entre Profondeur de décharge et cycles et durée de vie**

Le code aborde une problématique fondamentale dans la conception des systèmes de stockage, à savoir la relation inverse entre la profondeur de décharge et la durée de vie de la batterie, en présentant simultanément deux courbes complémentaires sur deux axes verticaux indépendants. La première courbe traduit le nombre de cycles de charge-décharge que la batterie peut supporter avant de perdre son efficacité, tandis que la seconde convertit ce nombre en années de durée de vie effective, en supposant un cycle journalier unique. Ces deux courbes partagent la même tendance : plus la décharge s'approfondit, plus le nombre de cycles s'effondre et plus la durée de vie se contracte de manière significative, révélant ainsi qu'augmenter l'énergie soutirée de la batterie procure un gain énergétique immédiat au détriment d'une perte économique différée, se manifestant par un remplacement prématuré des batteries. Cette figure permet au concepteur de sélectionner le point d'équilibre optimal qui maximise la durée de vie sans compromettre les besoins énergétiques du système.

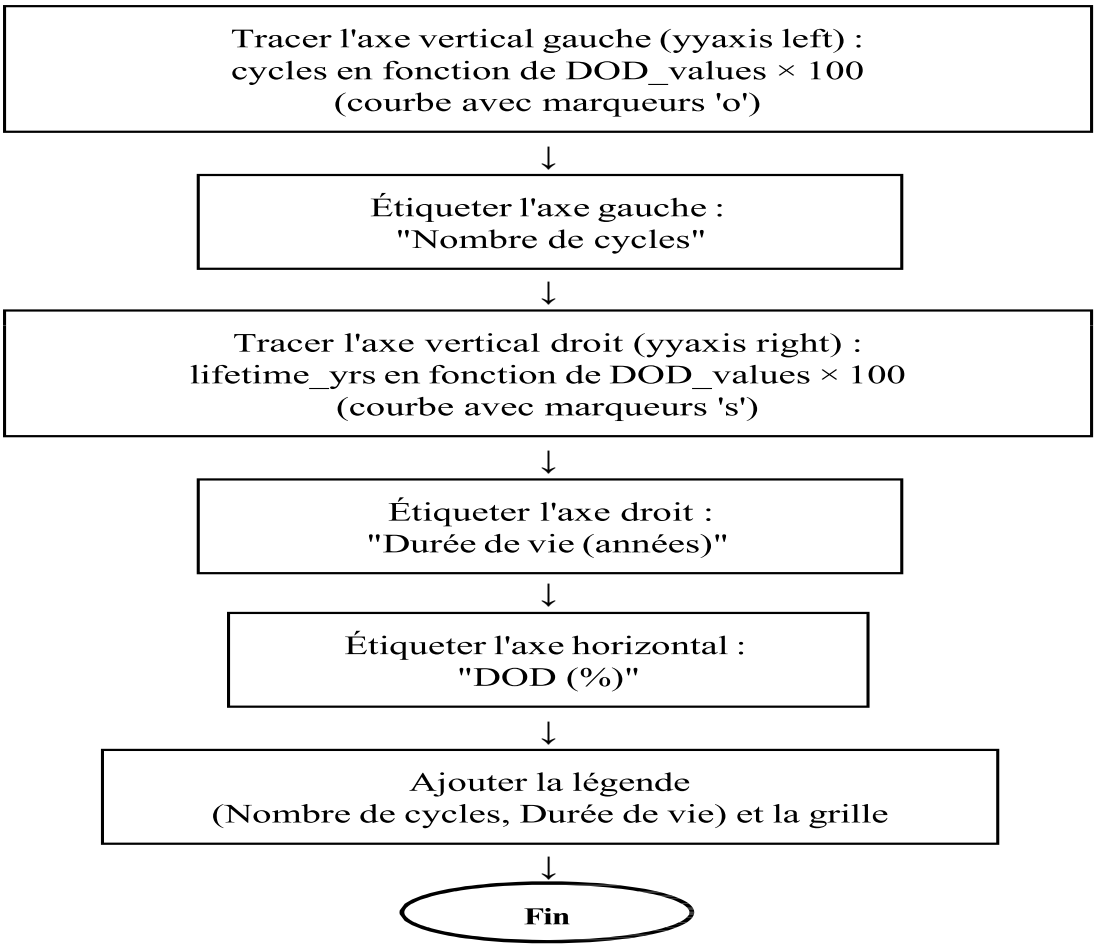


Figure IV.17 : Organigramme de nombre de cycles et durée de vie en fonction de Profondeur de décharge

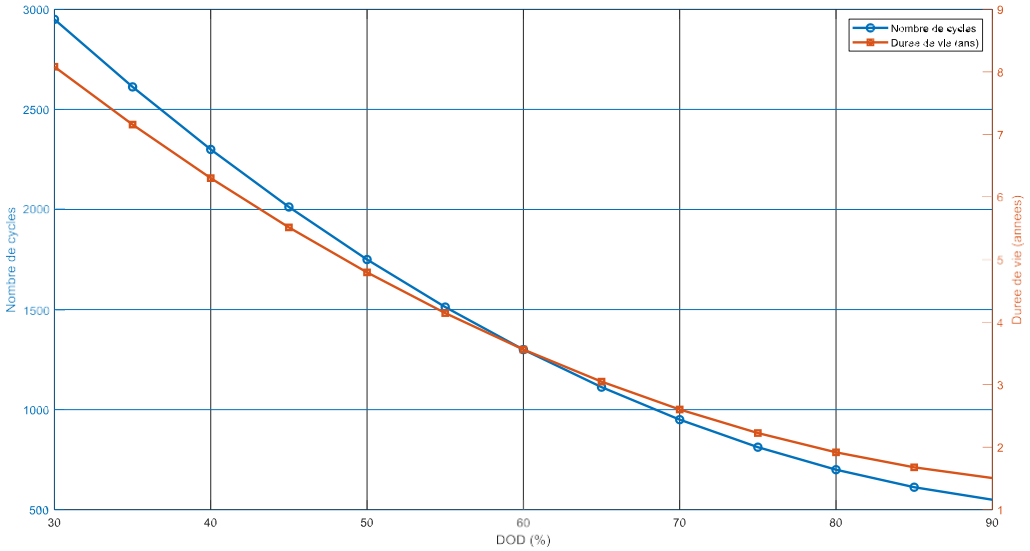


Figure IV.18 : nombre de cycles et durée de vie en fonction de Profondeur de décharge

La figure IV.18 illustre la relation inverse entre la profondeur de décharge (DOD) et le nombre de cycles de charge/décharge ainsi que la durée de vie de la batterie (en années), où ces deux grandeurs diminuent fortement à mesure que la valeur du DOD augmente, passant d'environ 2900 cycles et 8,7 ans pour un DOD de 30 %, à moins de 600 cycles et seulement une année pour un DOD de 90 %. On observe que les deux courbes convergent à des valeurs intermédiaires (autour de DOD = 60 %) avant de diverger à nouveau, ce qui confirme qu'adopter une profondeur de décharge plus faible, bien qu'elle nécessite une capacité de stockage plus importante, permet de préserver significativement la durée de vie de la batterie et de réduire la fréquence de son remplacement**.**

IV.64 Autonomie du système

Le code illustre la relation proportionnelle entre la capacité de la batterie et le nombre de jours d'autonomie que le système peut garantir en l'absence de rayonnement solaire, révélant ainsi comment l'augmentation de la capacité de stockage se répercute directement sur l'aptitude du système à tenir durant les périodes nuageuses et les conditions météorologiques défavorables. Cette courbe se distingue par la localisation précise du système dimensionné à travers un point saillant à l'intersection de la capacité retenue et du nombre de jours d'autonomie visé, permettant au concepteur de lire le compromis fondamental entre la taille du stockage et son coût d'une part, et le niveau de fiabilité et de sécurité énergétique d'autre part, afin de prendre la décision la plus appropriée selon les exigences du projet et ses contraintes budgétaires.

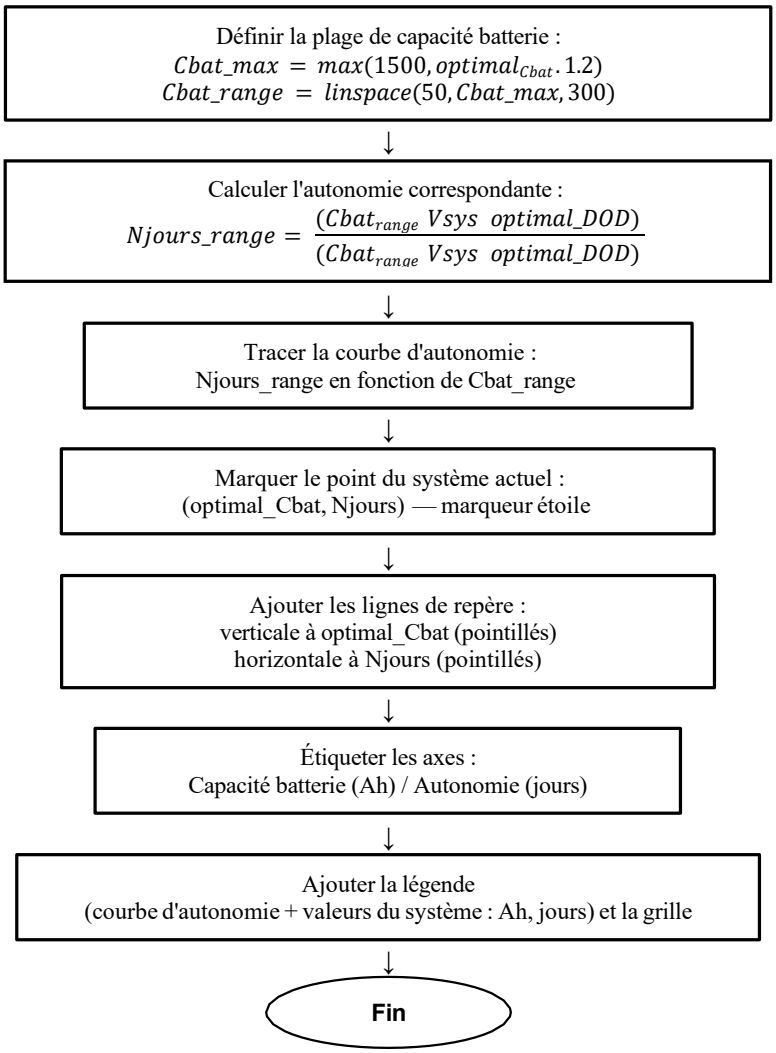


Figure IV.19 : Organigramme de l'autonomie de batterie

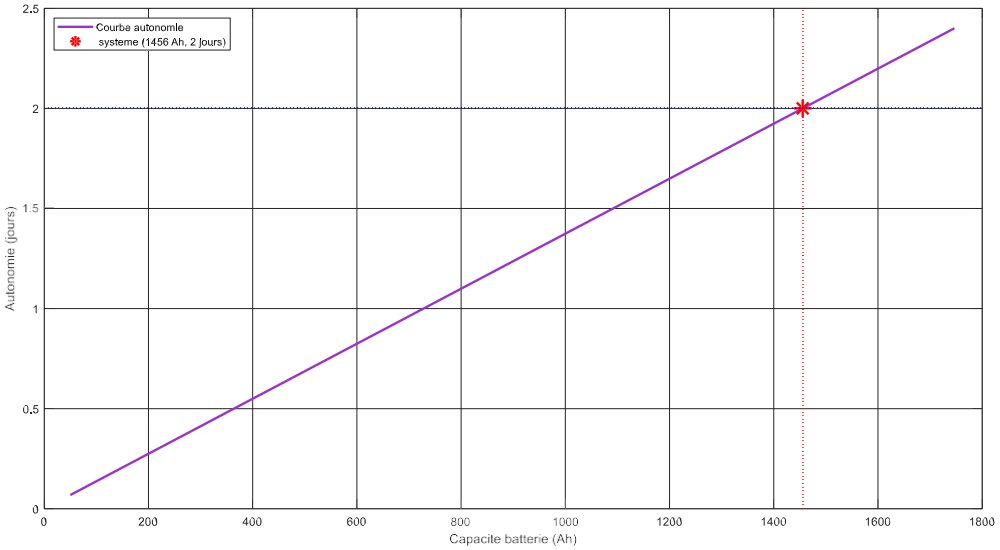


Figure IV.20 : L'autonomie de batterie

La figure IV.20 illustre une relation linéaire proportionnelle entre la capacité de la batterie (Ah) et l'autonomie du système (en jours), où l'autonomie augmente de manière régulière avec l'accroissement de la capacité de stockage, partant quasiment de zéro pour les faibles capacités, jusqu'à atteindre environ 2,3 jours pour la capacité maximale étudiée. Le point correspondant au système dimensionné est identifié à une capacité de 1456 Ah, correspondant à une autonomie de deux jours, valeur retenue dans cette étude afin de garantir l'alimentation de la charge durant les périodes d'absence d'ensoleillement.

IV.6.5 Rendement et Performance Ratio (PR)

Cette section est consacrée à l'évaluation de l'efficacité réelle du système photovoltaïque, en confrontant l'énergie produite à l'énergie effectivement consommée, afin de déterminer le ratio de performance global qui traduit le degré d'exploitation du rayonnement solaire disponible. Elle procède également à un diagnostic des pertes énergétiques en suivant leur évolution à chaque étape de la chaîne de conversion : depuis les panneaux solaires qui ne restituent qu'une fraction de l'énergie reçue, en passant par les batteries qui dissipent une partie de l'énergie lors des cycles de charge et de décharge, jusqu'à l'onduleur qui en consomme une portion lors de la conversion du courant continu en courant alternatif. L'agrégation de ces pertes permet de mettre en évidence l'écart réel entre l'énergie générée par le système et celle qui parvient effectivement à l'utilisateur final.

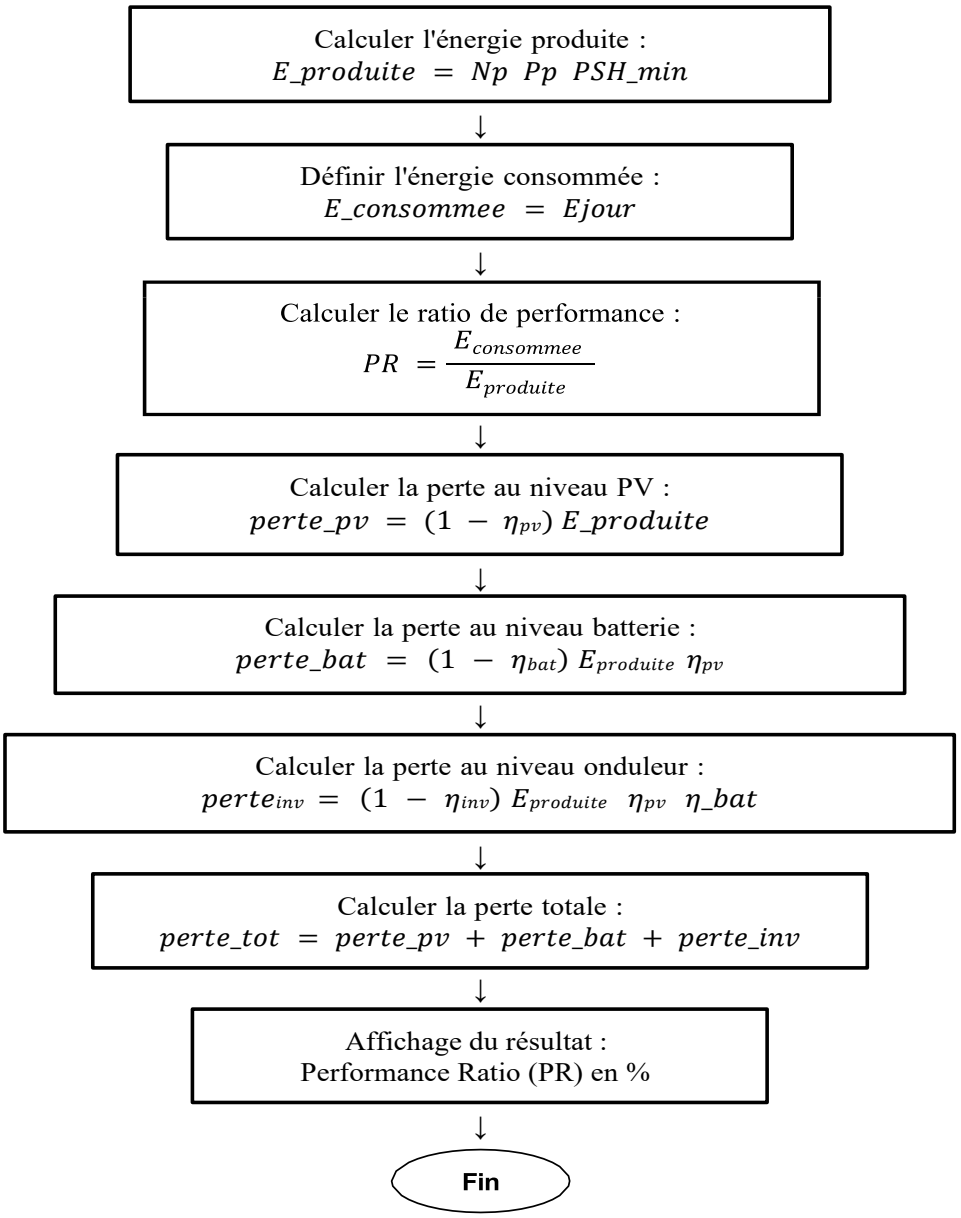


Figure IV.21 : Organigramme de Performance et pertes

La figure IV.22 illustre comment le ratio de performance global du système évolue en fonction de la variation de son rendement total, en traçant la relation entre l'efficacité globale de la chaîne de conversion énergétique et le rapport de l'énergie effectivement consommée à l'énergie théoriquement productible. Il en ressort clairement que l'amélioration du rendement des composants élève le ratio de performance jusqu'à atteindre son plafond maximal, lorsque le système absorbe intégralement sa production sans aucune perte. Le point saillant sur la courbe localise le système dimensionné avec ses deux valeurs réelles de rendement et de ratio de performance, permettant ainsi de diagnostiquer le niveau de maturité du dimensionnement et d'évaluer la marge d'amélioration disponible par rapport à la limite optimale théorique.

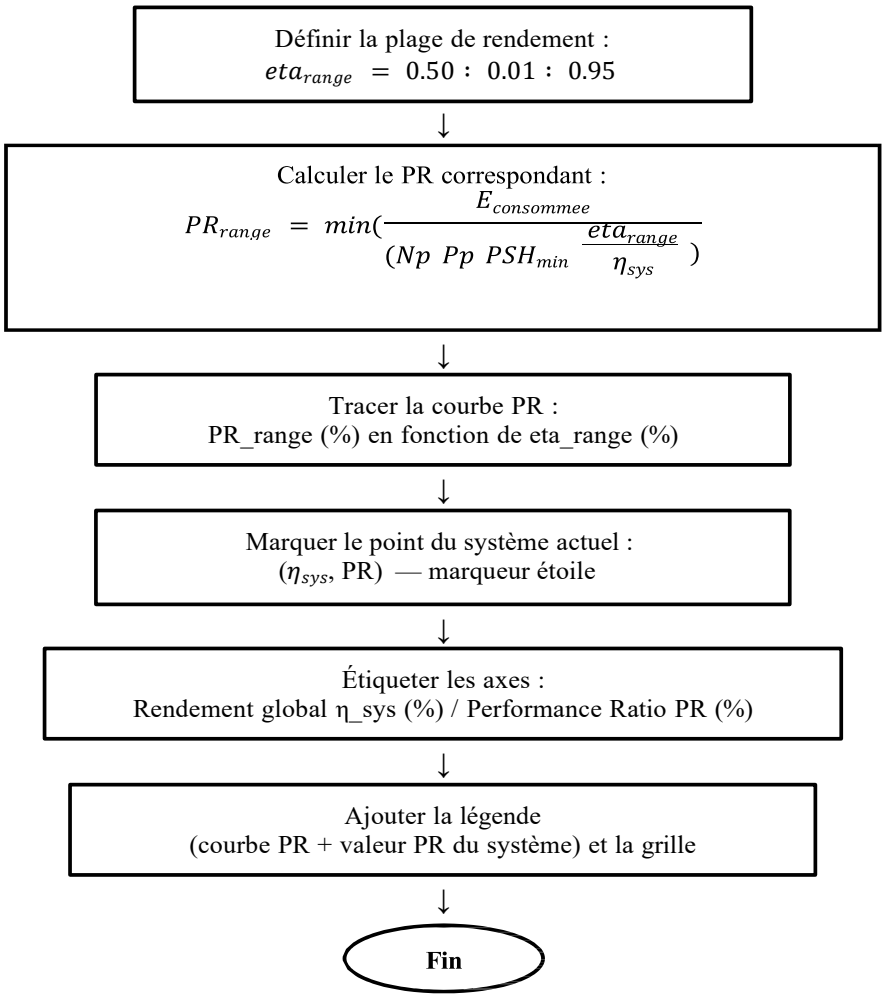


Figure IV.22 : Organigramme de le Performance Ratio (PR) du système en fonction du rendement global

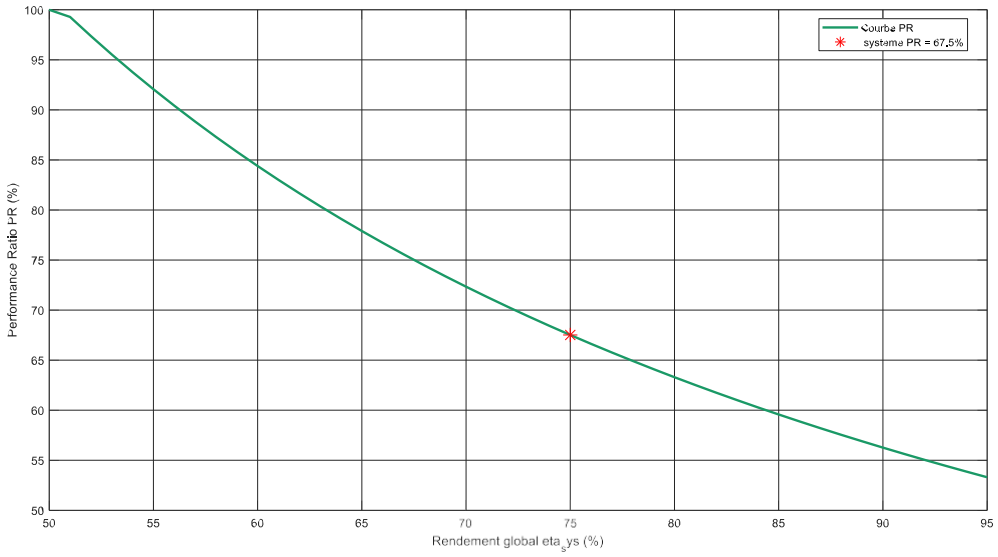


Figure IV.23 : le Performance Ratio (PR) du système en fonction du rendement global η_sys

La figure IV.23 illustre la relation inverse entre le rendement global du système (η_sys) et le Performance Ratio (PR), où la valeur du PR diminue progressivement d'environ 100 % pour un rendement faible à moins de 55 % pour un rendement élevé (95 %), ce qui traduit l'effet cumulatif des différentes sources de pertes sur la performance globale de l'installation photovoltaïque. Le point correspondant au système étudié se situe à un rendement de 75 % pour un Performance Ratio (PR) de 67,5 %, une valeur se trouvant dans la plage intermédiaire de la courbe, reflétant ainsi un niveau de performance acceptable du système tenant compte des différentes pertes techniques de l'installation.

IV.6.6 Analyse des pertes du système

Ce diagramme circulaire offre une vision claire de la distribution des pertes énergétiques entre les trois composants principaux du système photovoltaïque, en décomposant le total des pertes en parts proportionnelles qui révèlent lequel des éléments est le plus consommateur d'énergie, qu'il s'agisse des panneaux solaires au stade de la conversion photovoltaïque, des batteries au stade du stockage et de la restitution, ou de l'onduleur au stade de la conversion du courant. La valeur de cette représentation réside dans sa capacité à transformer des chiffres abstraits en significations visuelles immédiates, permettant au concepteur d'identifier le maillon le plus faible de la chaîne de conversion énergétique et de concentrer en priorité ses efforts d'amélioration sur celui-ci, dans le but d'élever l'efficacité globale du système.

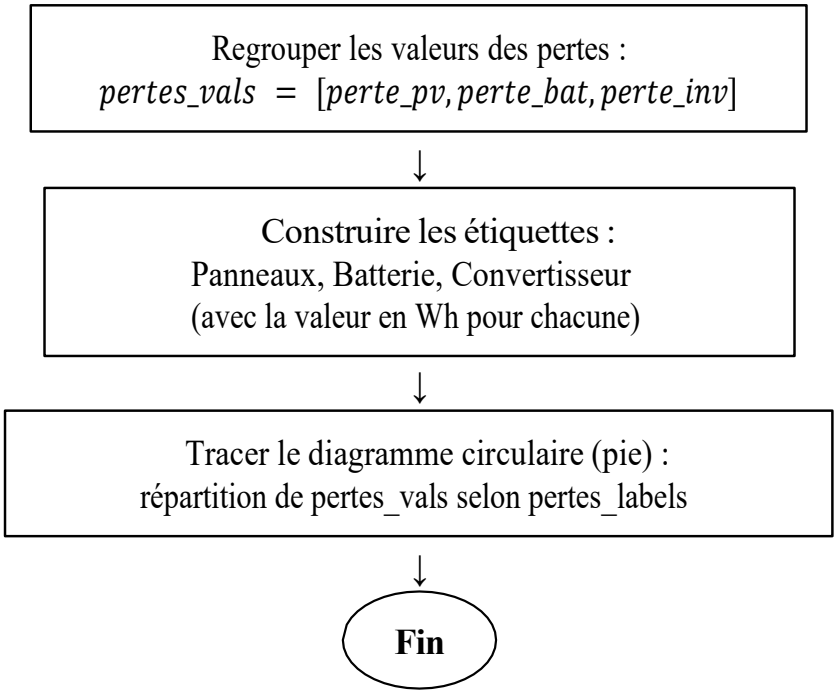


Figure IV.24 : Organigramme des pertes du système

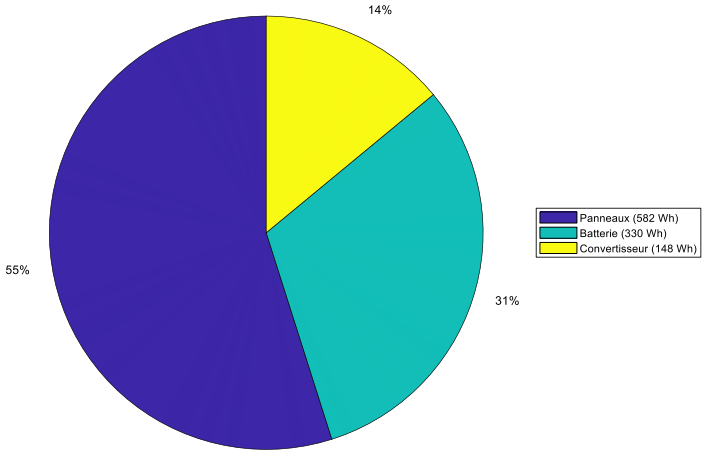


Figure IV.25: les pertes du système

Ce diagramme circulaire illustre la répartition des pertes totales du système photovoltaïque (1060 Wh) entre ses principaux composants, où les pertes au niveau des panneaux photovoltaïques représentent la part la plus importante, avec 582 Wh, suivies des pertes de la batterie avec 330 Wh, puis des pertes de l'onduleur avec 148 Wh. Cette répartition permet de conclure que les panneaux photovoltaïques constituent la principale source de pertes au sein de l'installation, ce qui en fait l'élément prioritaire à optimiser pour améliorer le rendement global du système.

IV.7 Étude économique

L'étude économique vise à évaluer la faisabilité financière du système photovoltaïque autonome dimensionné, à travers la détermination de son coût total et l'analyse de sa relation avec le niveau de consommation à alimenter. Cette étude porte également sur l'analyse de sensibilité des résultats à la variation de certains paramètres essentiels, notamment la profondeur de décharge (DOD), afin de mettre en évidence son influence sur le coût global et sur la durabilité d'exploitation du système.

IV.7.1 Coût total du système

Cette section est consacrée à l'estimation du coût global du système photovoltaïque, en évaluant le coût de chaque composant à partir de ses caractéristiques techniques propres, en tenant compte des panneaux solaires, de l'onduleur, du régulateur de charge, des batteries, des câbles et des dispositifs de protection électrique, sans omettre les frais liés aux structures de support et à l'installation. L'ensemble de ces valeurs est ensuite agrégé en un coût total exprimé en dinars algériens, constituant ainsi l'indicateur financier de référence pour l'évaluation de la viabilité économique du projet.

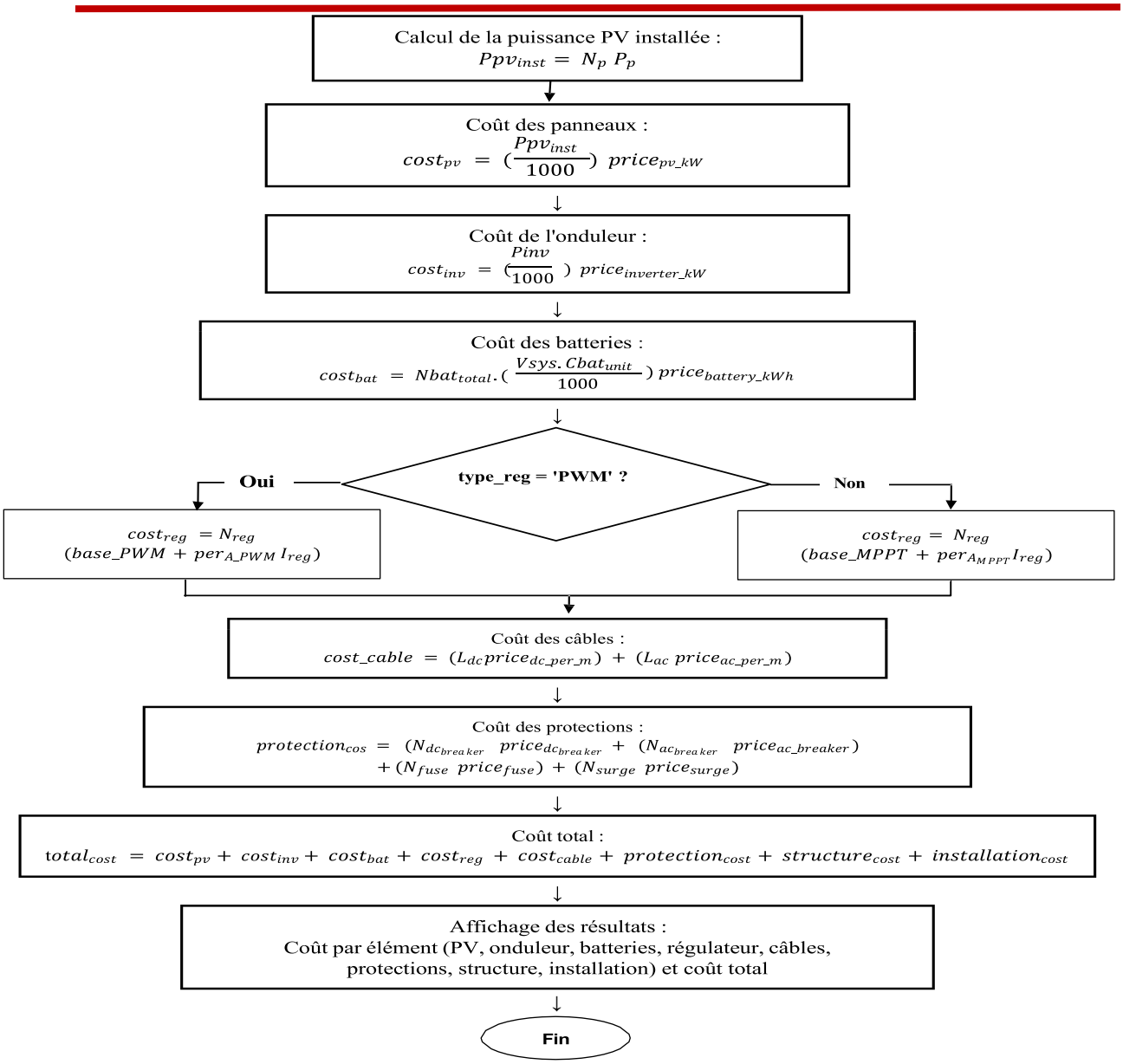
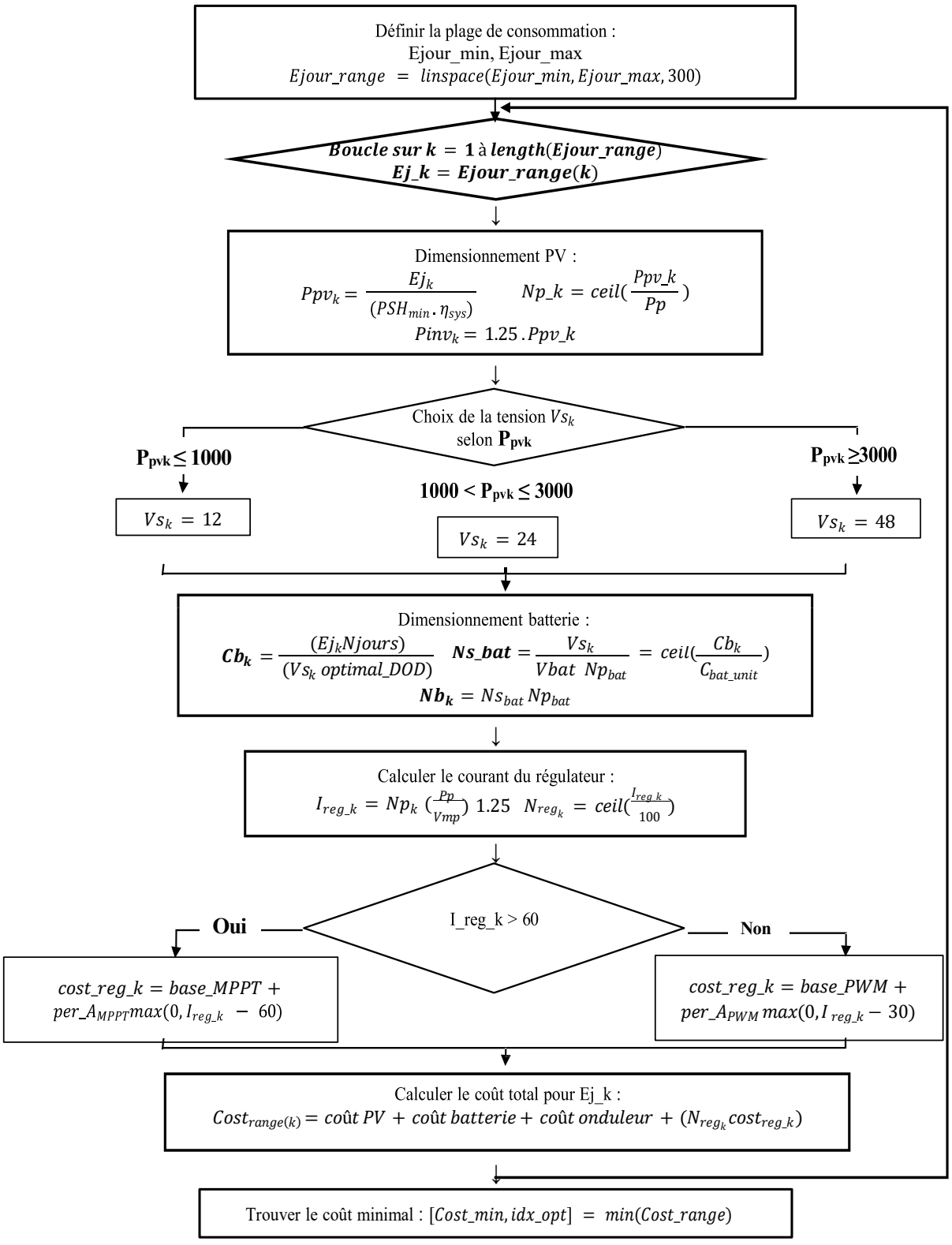


Figure IV.26 : Organigramme Coût du système

IV.7.2 Coût en fonction de la consommation

La figure IV.27 présente la relation entre la consommation énergétique journalière et le coût global du système photovoltaïque, à travers une simulation exhaustive qui redimensionne l'intégralité du système pour chaque valeur de consommation sur une plage étendue, allant des petits systèmes à faible consommation jusqu'aux installations de grande envergure à forte demande énergétique. Pour chaque scénario, la taille des panneaux solaires, des batteries, de l'onduleur et du régulateur de charge est déterminée selon les spécifications techniques appropriées, puis leurs coûts respectifs sont agrégés en une valeur totale reportée sur la courbe. Ce qui distingue cette analyse est l'identification du point de consommation optimal correspondant au coût minimal, lequel représente le point d'équilibre économique entre la taille

du système et son coût de réalisation, permettant ainsi au concepteur de situer son projet sur cette courbe et de prendre des décisions éclairées quant à l'ajustement de la consommation ou à la rationalisation du dimensionnement.



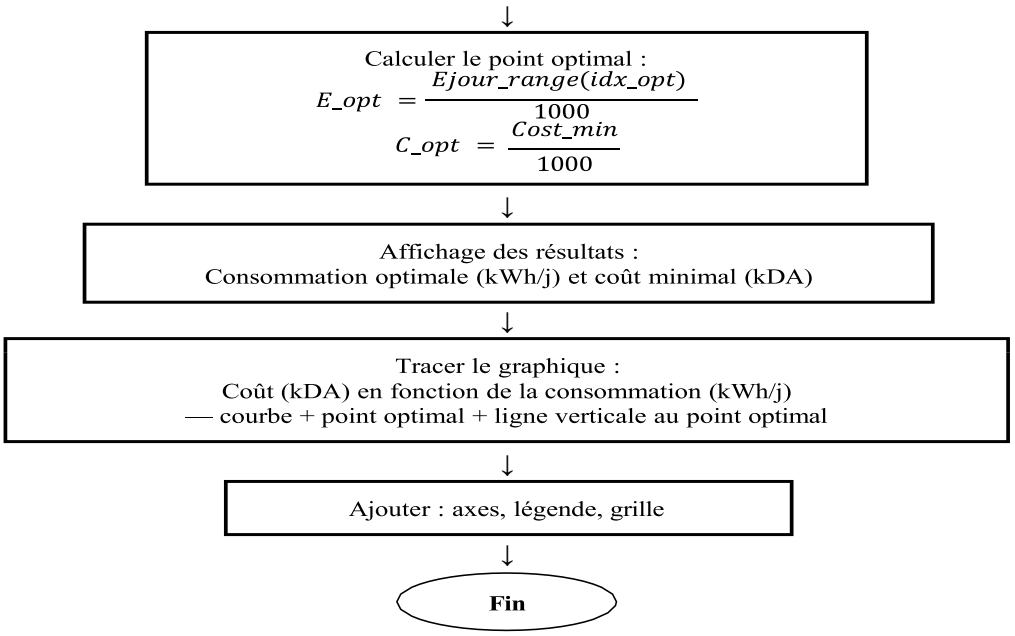


Figure IV.27 : Organigramme de Coût en fonction de la consommation

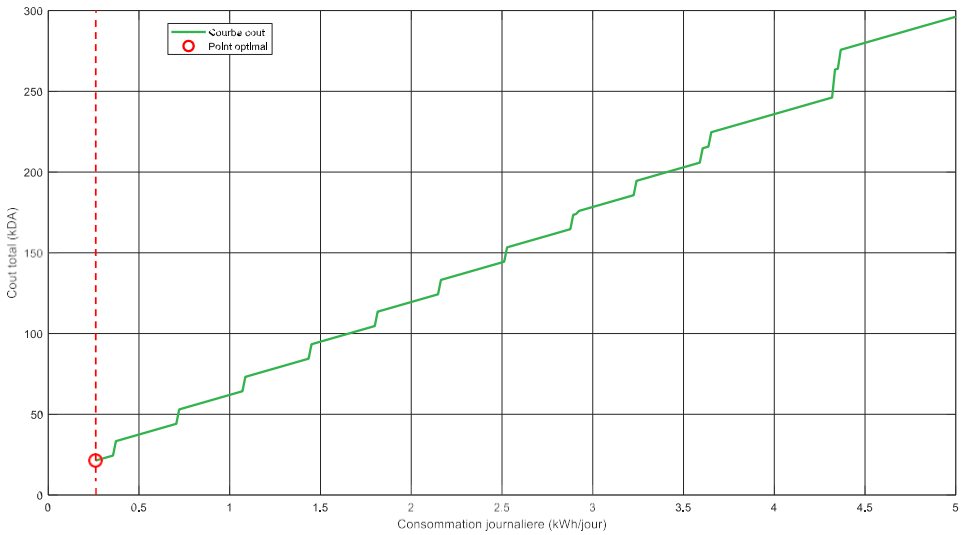


Figure IV.28 : Coût en fonction de la consommation

La figure IV.28 illustre l'évolution du coût total de l'installation photovoltaïque (en dinars algériens) en fonction de la consommation journalière de la charge, selon une courbe croissante par paliers reflétant la nature discrète du dimensionnement des composants, où des sauts brusques du coût apparaissent à chaque seuil de consommation nécessitant l'ajout d'un panneau ou d'une batterie supplémentaire. Un point optimal est identifié sur la courbe au niveau de consommation le plus faible étudié, représentant le coût total minimal possible du système, ce qui confirme que le coût augmente de manière cumulative et relativement accélérée avec l'accroissement de la charge électrique à alimenter.

IV.7.3 Influence du DOD sur le coût et la durée de vie

La figure IV.29 présente les résultats de l'optimisation de la profondeur de décharge sous deux angles différents, à travers deux graphiques côte à côte. Le premier illustre comment le coût total du système évolue en fonction de la valeur de la profondeur de décharge, en mettant en évidence le point optimal qui réalise le meilleur équilibre entre le coût des batteries et leurs performances. Le second graphique présente la même information en fonction de la durée de vie de la batterie en années, ce qui permet une lecture directe de la relation entre la longévité de la batterie et le coût total du système. Dans les deux graphiques, une étoile rouge indique la position de la solution optimale retenue.

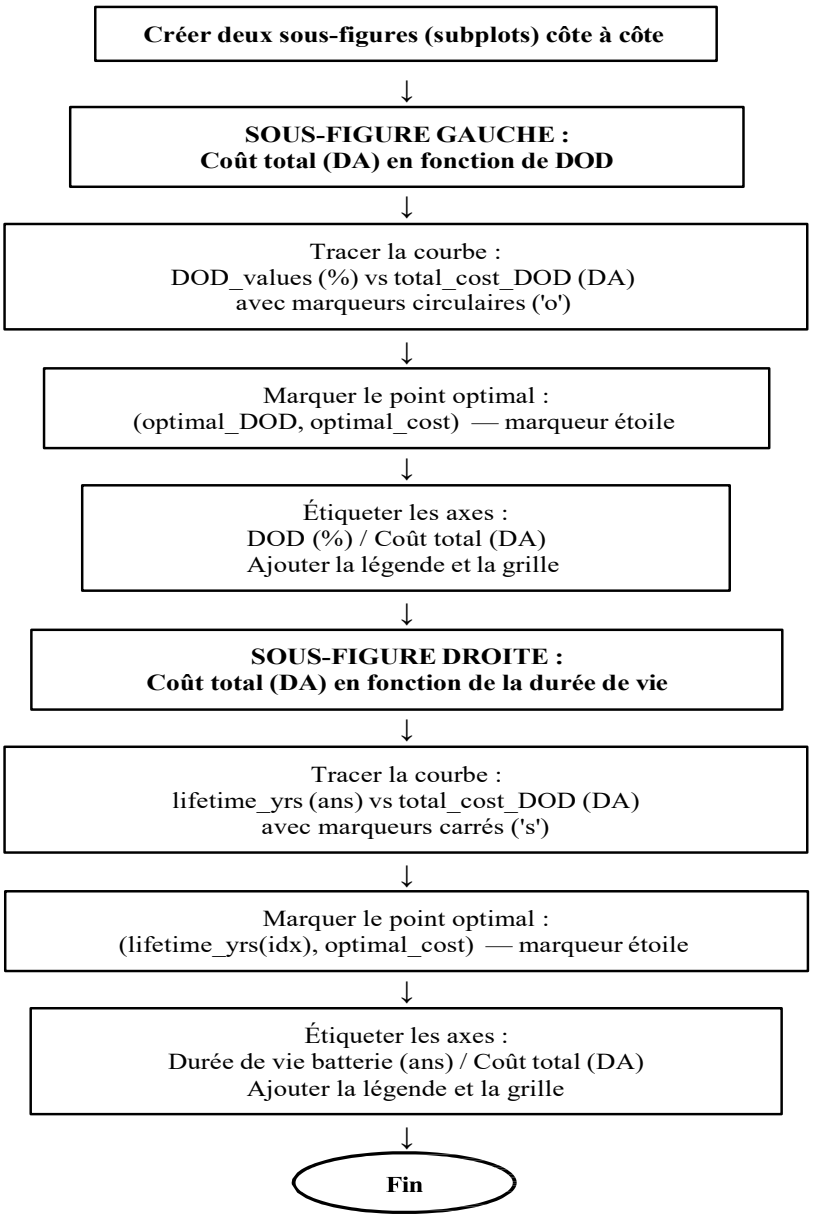


Figure IV.29 : Organigramme la relation entre la profondeur et la durée de vie de décharge (DOD) et le coût

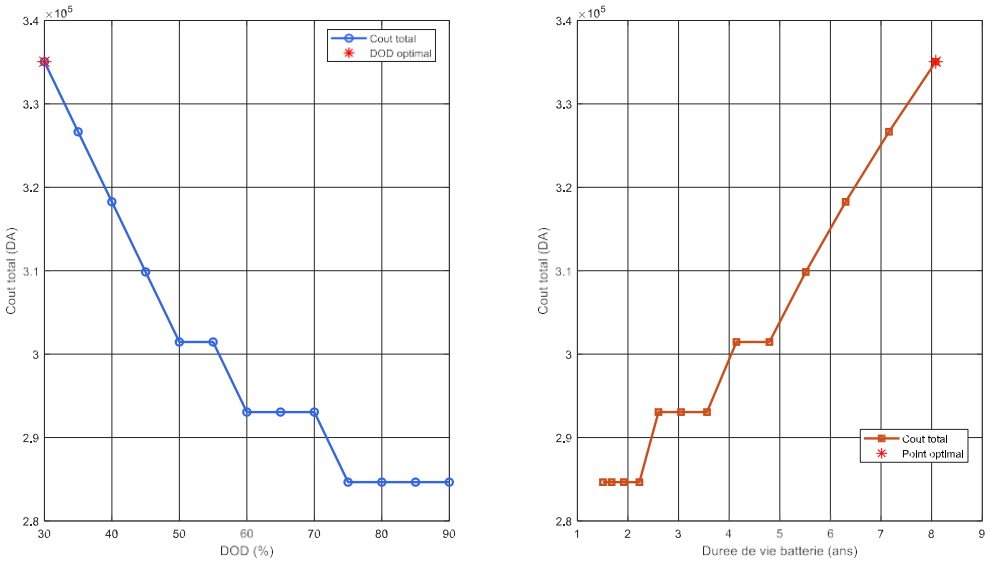


Figure IV.30 : la relation entre la profondeur et la durée de vie de décharge (DOD) et le coût

Ces deux figures illustrent une relation inverse entre la profondeur de décharge (DOD) et le coût total du système, où le coût diminue d'environ $3{,}35\times10^5$ à $2{,}85\times10^5$ DA avec l'augmentation du DOD de 30 % à 90 %, en raison de la réduction du nombre de batteries nécessaires lors de l'exploitation d'une capacité plus importante de celles-ci. Parallèlement, la seconde figure montre que le coût augmente avec l'accroissement de la durée de vie de la batterie, étant donné qu'une durée de vie plus longue exige l'adoption d'une profondeur de décharge plus faible, et donc un nombre plus élevé de batteries ainsi qu'un coût plus important. Le point optimal est identifié à la valeur de DOD la plus faible et à la durée de vie la plus longue, ce qui traduit un choix de conception privilégiant l'allongement de la durée de vie du système de stockage au détriment d'un coût initial plus élevé.

IV.8 Discussion des résultats

- **Analyse du site et ressources solaires**

Tout dimensionnement d'un système photovoltaïque repose sur une compréhension précise des ressources solaires disponibles sur le site, en particulier durant la période la plus difficile de l'année (le jour critique ou solstice d'hiver). Cela détermine la taille minimale du système requis pour assurer l'autonomie énergétique en toutes saisons.

Tableau IV. 4 : site et ressources solaires

Catégorie	Paramètre	Valeur
Données du site	Latitude	36.07°
Données du site	Type de site	Maison individuelle
Jour critique	Numéro du jour (1-365)	355 (solstice d'hiver)
Durée	Durée totale du jour	9.70 heures
Irradiation solaire	PSH (heures de rayonnement standard)	4.85 heures
Orientation optimale	Inclinaison des panneaux	31.07°
Production énergétique	Énergie disponible quotidienne	2620.00 Wh

- **Calcul et dimensionnement des panneaux**

En fonction de l'énergie requise et de l'irradiation disponible, on détermine la puissance crête du champ PV. Le nombre et l'arrangement des panneaux (en série et en parallèle) sont choisis pour adapter la tension du système et la puissance disponible.

Tableau IV.5 : dimensionnement des panneaux

Catégorie	Paramètre	Valeur
Dimensionnement	Puissance crête requise	720.17 Wp
Dimensionnement	Tension du système	12 V
Sélection des panneaux	Modèle choisi	Condor 400 Wc
Coût des panneaux	Prix unitaire	38 000 DA
Configuration	Nombre total de panneaux	2
Configuration	Panneaux en série	1
Configuration	Panneaux en parallèle	2

- **Onduleur et appareils électroniques**

L'onduleur (convertisseur DC/AC) transforme le courant continu de la batterie en courant alternatif pour alimenter les appareils domestiques. Il doit être dimensionné pour supporter la puissance maximale demandée par les charges du système.

Tableau IV.6 : Onduleur et appareils électroniques

Catégorie	Paramètre	Valeur
Onduleur	Puissance requise	900.21 W
Onduleur	Modèle sélectionné	1000 W
Installation	Nombre d'onduleurs	1
Installation	Puissance totale installée	1000.00 W

- **Régulateur de charge**

Le régulateur de charge assure l'interface entre les panneaux solaires et la batterie. Il protège la batterie contre les surcharges et optimise le transfert d'énergie. Son calibrage (ampérage) dépend du courant maximal produit par le champ PV.

Tableau IV.7: Régulateur de charge

Catégorie	Paramètre	Valeur
Type	Régulateur sélectionné	PWM
Dimensionnement	Courant maximal requis	30.30 A
Dimensionnement	Calibre choisi	40 A
Installation	Nombre de régulateurs	1

➢ Câblage et sections des conducteurs

Le dimensionnement des câbles est déterminant pour minimiser les pertes d'énergie (effet Joule) et assurer la sécurité du système. Chaque section du circuit (panneaux-régulateur, régulateur-batterie, batterie-onduleur) a des exigences différentes en fonction du courant qu'elle doit transporter.

Tableau IV.8 : Câblage et sections des conducteurs

Tronçon du circuit	Courant maximal	Section de câble
Panneaux → Régulateur	33.33 A	50.0 mm²
Régulateur → Batteries	83.35 A	95.0 mm²
Batteries → Onduleur	75.02 A	150.0 mm²

➢ Dimensionnement des batteries et stockage

Les batteries constituent l'élément crucial d'un système autonome : elles fournissent l'énergie lors des périodes sans ensoleillement. La capacité requise dépend de l'énergie quotidienne et de la profondeur de décharge (DOD) admissible. Un DOD faible prolonge la durée de vie des batteries mais augmente leur coût.

Tableau IV.9 : Dimensionnement des batteries et stockage

Catégorie	Paramètre	Valeur
Profondeur de décharge	DOD optimal recommandé	0.30 (30%)
Stockage énergétique	Capacité totale requise	1455.56 Ah
Configuration	Batteries en série	1
Configuration	Batteries en parallèle	6
Parc batterie	Nombre total de batteries	6

➢ Performance et efficacité du système

Le ratio de performance (Performance Ratio ou PR) exprime le rendement global du système, c'est-à-dire la fraction de l'énergie théoriquement disponible du rayonnement solaire qui est effectivement convertie et utilisable. Il tient compte de toutes les pertes : conversion thermique, pertes dans les câbles, rendement des régulateurs, etc.

Tableau IV.10 : Performance et efficacité du système

Indicateur	Description	Valeur
Efficacité	Performance Ratio (PR)	67.5%

➢ Analyse économique et coûts détaillés

Le coût total du système comprend tous les éléments de la chaîne de conversion énergétique (panneaux, onduleur, batterie, régulateur) ainsi que les éléments de soutien (câbles, protections, structure) et les frais de main d'œuvre. Cette décomposition permet d'identifier les postes budgétaires majeurs et d'optimiser le rapport coût/performance.

Tableau IV.11 : Analyse économique et coûts détaillés

Composant du système	Élément	Coût (DA)
Génération d'énergie	Panneaux solaires	76 000.00
Conversion DC/AC	Onduleur 1000 W	16 203.73
Stockage d'énergie	Batteries (parc complet)	50 400.00
Régulation & protection	Régulateur de charge	8 100.00
Infrastructure	Câbles et connecteurs	5 750.00
Infrastructure	Appareils de protection	40 000.00
Infrastructure	Structure et supports	45 000.00
Main d'œuvre	Installation complete	60 000.00
Synthèse	COÛT TOTAL PROJET	301 453.73

Les résultats obtenus révèlent une cohérence logique entre les différentes composantes du système photovoltaïque autonome. Le choix du solstice d'hiver comme pire cas d'ensoleillement (4,85 heures) garantit l'autonomie énergétique dans les conditions climatiques les plus défavorables, ce qui explique la puissance crête relativement modeste requise (720,17 Wp) pour couvrir un besoin énergétique journalier estimé à 2620 Wh. On observe par ailleurs que le choix d'un régulateur de charge de type PWM, bien qu'économiquement plus simple, demeure moins performant que la technologie MPPT, ce qui se traduit par un ratio de performance (PR) du système estimé à 67,5 %, valeur moyenne révélant des marges de pertes potentielles au niveau de la conversion et du câblage. De même, l'adoption d'un système en 12 V, bien qu'adaptée à une installation résidentielle de petite taille, a entraîné une augmentation de l'intensité du courant dans les différents tronçons du circuit, imposant l'utilisation de sections de câbles relativement importantes (jusqu'à 150 mm^2) afin de limiter les pertes par effet Joule. Ce constat soulève la question de la pertinence d'une migration vers un système en 24 V ou 48 V pour réduire ces coûts. Sur le plan économique, l'analyse détaillée des coûts révèle que les batteries, la main-d'œuvre et la structure de support représentent ensemble plus de la moitié du coût total du projet (301 453,73 DA), alors que la part des panneaux solaires ne dépasse pas le quart de ce coût, ce qui confirme que le stockage et l'installation constituent généralement la contrainte économique majeure dans les systèmes autonomes, comparativement aux systèmes connectés au réseau.

IV9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'application de la méthodologie adoptée pour le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome à travers une approche basée sur la simulation. Cette étude a été menée à partir de la présentation du site d'étude et de ses données d'irradiation solaire, du calcul de l'angle d'inclinaison optimal, puis de l'obtention des résultats de dimensionnement relatifs au nombre de panneaux photovoltaïques, au nombre de batteries, à la capacité de stockage ainsi qu'au choix de l'onduleur et du régulateur adaptés aux exigences du système.

L'évaluation des performances réalisée par simulation a permis d'analyser le comportement énergétique du système conçu, notamment l'adéquation entre la production photovoltaïque estimée et les besoins énergétiques considérés, l'évolution de l'état de charge de la batterie ainsi que la profondeur de décharge et leur influence sur la durée de vie du stockage. Cette analyse a également permis d'estimer le niveau d'autonomie du système, son rendement global ainsi que les principales sources de pertes pouvant affecter ses performances. Par ailleurs, l'étude économique a permis d'estimer le coût global du système et d'examiner son évolution en fonction du niveau de consommation ainsi que de certains paramètres influents, en particulier la profondeur de décharge, dont l'impact sur le coût global et la durée de vie du système a été mis en évidence.

Les résultats obtenus constituent ainsi une synthèse des performances techniques et économiques du système étudié dans le cadre de cette approche de simulation, et fournissent une base d'analyse pour les perspectives et recommandations qui seront développées dans la conclusion générale de ce mémoire.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale qui résume l'ensemble de la démarche. La présente étude porte sur le dimensionnement et l'évaluation des performances d'un système photovoltaïque autonome équipé d'un système de stockage d'énergie. Elle s'inscrit dans une démarche méthodologique globale fondée sur plusieurs axes complémentaires, combinant une étude théorique approfondie et une approche de calcul appliquée.

Sur le plan théorique, ce travail a permis de présenter les fondements scientifiques des systèmes photovoltaïques, en abordant les concepts liés à l'énergie solaire et au rayonnement solaire, puis la cellule photovoltaïque à travers ses différentes technologies, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques électriques. Les principaux composants d'un système photovoltaïque autonome ont également été étudiés, notamment le générateur photovoltaïque, le système de stockage, les onduleurs et les régulateurs de charge. Cette étape a permis d'établir une base scientifique nécessaire au développement de l'étude.

Sur le plan appliqué, une méthodologie de dimensionnement et de simulation a été mise en œuvre en s'appuyant sur les données climatiques du site étudié ainsi que sur les besoins énergétiques considérés. Cette démarche a permis d'obtenir des résultats relatifs au dimensionnement du système, à l'évaluation de ses performances énergétiques ainsi qu'à l'analyse de sa viabilité technico-économique.

Les résultats obtenus ont mis en évidence que le choix de la technologie des modules photovoltaïques ainsi que de la capacité du système de stockage exerce une influence directe et significative sur le dimensionnement du système, son coût global et ses performances énergétiques. Les analyses réalisées ont également montré que l'optimisation de certains paramètres de conception, notamment l'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques et la profondeur de décharge des batteries, joue un rôle essentiel dans l'amélioration des performances du système et dans la recherche d'un compromis optimal entre efficacité technique et viabilité économique.

Par ailleurs, l'application de cette méthodologie à un site situé en Algérie, en tenant compte de ses spécificités climatiques, confère à cette étude une valeur ajoutée importante, puisqu'elle permet d'adapter les approches générales de dimensionnement aux conditions locales et d'apporter des éléments d'analyse utiles au développement des systèmes photovoltaïques autonomes dans le contexte national.

Quant aux perspectives futures, ce travail pourra être approfondi et élargi dans le cadre de recherches ultérieures, notamment par son adaptation aux spécificités du marché algérien en termes de disponibilité des composants, de contraintes d'intégration et de viabilité technico-économique à l'échelle locale.

Références bibliographiques

[1] Agence Internationale des Énergies Renouvelables (IRENA), Renewable Energy Statistics, Rapport annuel, IRENA.

[2] Agence Internationale de l'Énergie (AIE), Solar Energy Perspectives, Rapport sur les perspectives de l'énergie solaire et sa compétitivité économique.

[3] Ministère de l'Énergie et des Mines / Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), Atlas Solaire de l'Algérie, Alger.

[4] MALKI, Y. ; TABABOUCHET, A., Étude de dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation électrique du CEM Al-Eidani Ibrahim, Bordj Bou Arréridj, Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, 2022.

[5] KALOGIROU, S. A., Solar Energy Engineering: Processes and Systems, Academic Press.

[6] HENNOUS, C., Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque (Application à la F.G.E.I.), Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), 2008–2009.

[7] AMARA, K., Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1 MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), 2014–2015.

[8] CHERIFI, F. ; GRIM, N., Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.

[9] ALEM-BOUDJEMLINE, S., Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques, Thèse de Doctorat, Université d'Angers, 2004.

[10] LABOURET, A., Énergie solaire photovoltaïque, 3e édition, Paris : Dunod, 2006.

[11] GUESSOUMI, F. ; SAADI, A., Commande de panneaux solaires à l'aide d'une carte APIC, Mémoire de fin d'études, Université de Biskra, 2010.

[12] SINGO, A. T., Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy I, 2010.

[13] HANKINS, M., Installations solaires photovoltaïques autonomes : conception et installation d'unités non raccordées au réseau, Paris : Dunod, 2012.

[14] BRIUGAND, S., Installations solaires photovoltaïques : dimensionnement, installation, mise en œuvre et maintenance, Paris : Le Moniteur, 2011.

[15] Archive institutionnelle de l'Université de Biskra : http://archive.univ-biskra.dz. Consulté le : 05 juin 2026.

[16] PVGIS ; NASA POWER ; CDER Algérie ; CAPDEROU, M., Atlas Solaire de l'Algérie, 1987. Consulté le : 05 juin 2026.

[17] Geodatos, Coordonnées géographiques de Bordj Bou Arréridj (Algérie) :https://www.geodatos.net/en/coordinates/algeria/bordjbouarreridj. Consulté le : 05 juin 2026.

Résumé

الملخص

تتناول هذه المذكرة حساب وتقييم أداء نظام كهروضوئي مستقل مزوّد بمنظومة تخزين، مُطبَّق على أحمال ذات استهلاك مختلف .انطلقت الدراسة من عرض الأسس النظرية للأنظمة الكهروضوئية، متضمنةً مفاهيم الطاقة الشمسية والإشعاع الشمسي والخلية الكهروضوئية ومكوّنات النظام المستقل، ثم تم تطبيق منهجية دقيقة لتحديد الأبعاد اعتمادًا على البيانات المناخية للموقع والاحتياجات الطاقوية للحمل .أظهرت نتائج المحاكاة كفاءة عالية في تحديد عدد الألواح الشمسية وعدد بطاريات التخزين، بالإضافة إلى حساب مختلف مكوّنات النظام الكهروضوئي المستقل. كما تم إجراء اختبار لسلوك النظام عند قيم مختلفة للأحمال وفي مناطق مختلفة لتركيب النظام الكهروضوئي .وأثبتت الدراسة الاقتصادية أن عمق التفريغ يؤثر مباشرةً في التكلفة الإجمالية والعمر التشغيلي لمنظومة التخزين، حيث تم تحديد القيمة المثلى عند أدنى عمق تفريغ، بما يضمن تحقيق أكبر عمر افتراضي للبطارية.

الكلمات المفتاحية :الطاقة الشمسية، النظام الكهروضوئي، النظام المستقل، تحديد الأبعاد، التخزين، نسبة الأداء، الدراسة الاقتصادية.

Résumé

Ce mémoire porte sur le calcul et l'évaluation des performances d'un système photovoltaïque autonome équipé d'un système de stockage, appliqué à des charges présentant différents niveaux de consommation énergétique. L'étude a débuté par une présentation des bases théoriques des systèmes photovoltaïques, incluant les concepts de l'énergie solaire, du rayonnement solaire, de la cellule photovoltaïque ainsi que des composants du système autonome. Une méthodologie rigoureuse de dimensionnement a ensuite été appliquée en s'appuyant sur les données climatiques du site et les besoins énergétiques de la charge. Les résultats de simulation ont montré une grande efficacité dans la détermination du nombre de panneaux solaires et du nombre de batteries de stockage, ainsi que dans le calcul des différents composants du système photovoltaïque autonome. Une analyse du comportement du système a également été réalisée pour différentes valeurs de charge et dans plusieurs zones d'installation du système photovoltaïque. L'étude économique a démontré que la profondeur de décharge influence directement le coût global et la durée de vie du système de stockage. La valeur optimale a été obtenue pour la plus faible profondeur de décharge, garantissant ainsi la durée de vie maximale de la batterie.

Mots-clés : énergie solaire, système photovoltaïque, système autonome, dimensionnement, stockage, ratio de performance, étude économique.

Abstract

This dissertation deals with the calculation and performance evaluation of a standalone photovoltaic system equipped with an energy storage system and applied to loads with different energy consumption levels. The study began with a presentation of the theoretical foundations of photovoltaic systems, including the concepts of solar energy, solar radiation, photovoltaic cells, and the components of a standalone system. A rigorous sizing methodology was then applied based on the site's climatic data and the energy requirements of the load. The simulation results demonstrated high efficiency in determining the number of solar panels and storage batteries, as well as in calculating the different components of the standalone photovoltaic system. An analysis of the system behavior was also carried out for different load values and across different installation locations of the photovoltaic system. The economic study demonstrated that the depth of discharge directly affects the overall cost and operational lifetime of the storage system. The optimal value was identified at the lowest depth of discharge, ensuring the maximum battery lifetime.

Keywords: solar energy, photovoltaic system, standalone system, sizing, energy storage, performance ratio, economic study.