

Dédicace

À Mes chers parents et ma fille

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Vous représentez pour moi toujours le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et tout l'exemple du dévouement.

Ce travail représente le fruit de vos sacrifices, l'expression de ma gratitude et mon profond amour.

À mon mari, ma sœur, mon frère

Vous m'avez toujours soutenu durant toutes mes études, votre affection et votre soutien m'ont été un grand secours au long de ma vie professionnelle et personnelle. Je vous souhaite beaucoup de bonheur et de réussite

À toute ma chère famille,

À mes chères amies,

À tous ceux qui m'aiment,

À tous ceux que j'aime, je dédie ce travail ...

Zahira

Remerciement

Avant tout développement sur cette expérience professionnelle, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet humble travail.

Je remercie tout d'abord Monsieur **Hicham AISSAOUI**, mon directeur de thèse à la Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal, pour son encadrement, son soutien perpétuel et son dévouement qui m'a toujours motivé et poussé à le considérer mon idole.

Ma reconnaissance va également à Monsieur **Mohammed DIANY**, mon co-encadrant, pour son encadrement et la confiance qu'il m'a accordé dès le début de ma formation. Son encadrement fut vraiment une expérience gratifiante pour moi.

Bien plus, j'adresse avec tout le respect et l'estime, mes remerciements au Monsieur **Moustapha ARIF**, Leur conseils m'ont aidé à surmonter beaucoup de difficultés. Je les remercie chaleureusement pour sa disponibilité et son dévouement.

Enfin je remercie également l'ensemble du personnel de la Faculté des Sciences et Techniques de Béni Mellal pour avoir fait preuve de disponibilité et d'attention à mon égard tout au long de ma formation.

Résumé

Aujourd'hui et à l'avenir, l'augmentation des prix du carburant, la déréglementation et les contraintes de l'environnementales imposent l'utilisation des sources d'énergie renouvelables (SER) dans les réseaux électriques. Un concept de micro réseau est nécessaire afin d'intégrer les sources d'énergie renouvelables dans le réseau électrique. Ce micro réseau se compose d'un réseau de basse tension avec des systèmes d'énergies renouvelables ainsi que des moyens de stockage d'énergie et des charges flexibles. La contribution de cette thèse se focalise sur l'optimisation de la production des systèmes d'énergie hybride pour maximiser leur production tout en minimisant le coût du système. Notre premier objectif dans ce travail de thèse est de faire une optimisation du dimensionnement d'un système hybride composé des panneaux solaires, des éoliennes, des batteries et connecté avec le réseau public. Pour cela, nous avons utilisé la méthode d'optimisation MILP (programmation linéaire mixte en nombres entiers). Cet algorithme nous permet d'obtenir le nombre optimal de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et des batteries, de minimiser la quantité d'énergie fournie par le réseau public et le coût total du système, tout en garantissant la disponibilité permanente de l'électricité pour couvrir les besoins énergétiques des charges. Dans le but de maximiser la puissance de sortie des panneaux solaires, de lutter contre le sur dimensionnement du câblage entre le panneau et l'équipement pour baisser les coûts et augmenter la durée de vie des batteries, une nouvelle méthodologie a été présentée et simulée. La méthode proposée combine les avantages des trois méthodes : perturbation et observation, algorithme génétique et optimisation par essaims de particule. Dans cette thèse de doctorat, nous avons aussi fait une étude dynamique, optimale et multi-objective du système hybride. Cette étude est basée sur la répartition des charges en trois grandes catégories : charges à priorité élevés, charges à priorité moyennes et charges à priorité faibles, et le pilotage entre les différentes sources d'énergies. Pour augmenter le degré de fiabilité, de maximiser la production d'énergie tout en minimisant le coût environnemental et le coût du SEH.

Mots Clés : Réseau intelligent, System hybride, Optimisation dynamique, Contrôle optimal, Priorité des charges, Contrôle dynamique, Algorithme génétique, Optimisation par essaim de particule, MPPT, Contrôleur PID

Abstract

Nowadays and in the future, rising fuel prices, deregulation and environmental constraints are forcing the use of renewable energy sources (RES) in power grids. A micro grid concept is needed to integrate renewable energy sources into the electricity grid. This micro grid consists of a low-voltage grid with renewable energy systems as well as energy storage means and flexible loads. The contribution of this thesis focuses on the optimization of the hybrid energy systems production to maximize their production and minimize the system cost. Our first objective in this thesis work is to optimize the size of a hybrid system composed of solar panels, wind turbines, batteries and connected with the public sector. For this, we used the MILP o method (mixed integer linear programming). This algorithm allows us to obtain the optimal number of photovoltaic panels, wind turbines and batteries, to minimize the amount of energy supplied by the public sector and the total cost of the system, while ensuring the permanent availability of the electricity to cover the energy needs of the loads. To maximize the output power of the solar panels, minimize the section of the connector between the panel and the other components of the hybrid system, to reduce costs and increase the life of the batteries, a new methodology was presented and simulated. The proposed method combines the advantages of the three methods: perturbation and observation, genetic algorithm and particle swarm of optimization. In this doctoral thesis, we also simulate a dynamic, optimal and multi-objective study of the hybrid system. This study is based on the division of loads into three main categories: high priority loads, medium priority loads and low priority loads, and piloting between the different energy sources. To increase the degree of reliability, maximize the power production while minimizing the environmental cost and the cost of the SEH.

Keywords: Smart grid, Hybrid system, Dynamic optimization, Optimal control, Load priority, Dynamic control, Genetic algorithm, Particle swarm optimization, MPPT, PID controller.

Table des matières

Dédicace	III
Remerciement	IV
Résumé	V
Abstract	VI
Table des figures	XI
Liste des tableaux	XIV
Publications	XVI
Articles journal :	XVI
Communications orales:	XVI
Introduction Générale	XVII
CHAPITRE 1: Sources d'énergies renouvelables et systèmes de production d'origine renouvelable	
3	
I. Introduction	4
II. Contexte énergétique dans le monde	4
1. Impact du COVID-19 sur le mix énergétique mondial	4
2. Les systèmes d'énergies les plus utilisés.....	6
2. Réchauffement climatique et besoin de sources énergétiques vertes	7
3. Enjeux énergétiques, économiques et environnementaux.....	8
4. L'injection d'électricité autorisée au Maroc.....	8
III. Énergies renouvelables, définition, ressources et exploitation	10
1. Les centrales hydrauliques	11
2. Les panneaux photovoltaïques	11
3. Les éoliennes	12
4. La Géothermie.....	12
IV. Transformation de l'énergie solaire en électricité	13
1. Système de production d'énergie solaire.....	13
2. Recherche du point de puissance maximale.....	14

3.	Chaîne de conversion solaire.....	16
V.	Transformation de l'énergie éolienne en électricité.....	17
1.	Système de production d'énergie éolienne.....	17
2.	Chaîne de conversion éolienne.....	20
3.	Régulation mécanique de la puissance de l'éolienne.....	24
VI.	Moyens de stockage de l'énergie électrique.....	25
1.	Batteries.....	25
2.	Super-condensateurs.....	25
3.	Différences entre batteries et super-condensateurs.....	26
4.	Super-condensateur vs batteries : avantages et inconvénients.....	26
VI.	Conclusion.....	27
CHAPITRE 2: Dimensionnement d'un système d'énergie hybride en utilisant le modèle MILP		30
.....		
I.	Introduction.....	31
II.	Description des données météorologiques du site.....	32
1.	Traitement des données météorologiques disponibles.....	33
1.1.	Irradiation solaire globale.....	33
1.2.	Correction de la vitesse du vent avec l'altitude.....	35
2.	Modélisation d'une cellule PV.....	36
2.1.	Modèle à une diode.....	37
III.	L'optimisation linéaire en nombres entiers.....	38
1.	Application de la méthode MILP.....	38
1.1.	La fonction objective.....	39
1.2.	Les contraintes.....	39
III.	Coût actualisé de l'énergie (LCOE).....	42
IV.	Résultats et discussion.....	42
V.	Conclusion.....	47
CHAPITRE 3: Nouvel optimiseur du point de puissance maximal		50
.....		
I.	INTRODUCTION.....	51
II.	MODÉLISATION DU PANNEAU PV.....	53
1.	Le module photovoltaïque.....	53

2. Influence de la température et de l'irradiation.....	55
III. LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE.....	57
1. Les essaims de particules	57
1.1. Présentation	57
1.2. Essaim	57
1.3. Le voisinage	58
1.4. Version standard de l'algorithme de l'optimisation par essaim de Particules.....	58
2. Algorithme génétique.....	61
2.1. Présentation des algorithmes génétiques (AGs).....	61
2.2. Opérateurs d'algorithmes génétiques	62
3. La nouvelle méthodologie PSOAG	65
IV. Résultats et discussion.....	68
V. Conclusion.....	72

CHAPITRE 4: Contrôle dynamique optimal multi-objectif d'un système d'énergie hybride 75

I. Introduction	76
II. Gestion optimale des systèmes multi sources	77
III. La méthodologie proposée	78
1. Algorithme de contrôle.....	79
1.1. Mode de charge de la batterie.....	79
1.2. Alimentation de charge à priorité faible	80
1.3. La charge factice.....	80
1.4. Mode de décharge de la batterie.....	80
1.5. Fonctionnement du secteur.....	81
1.6. Perte de probabilité de charge	81
2. Algorithme d'optimisation du système d'énergie hybride	83
IV. Résultats et discussion.....	85
V. Conclusion.....	88
Conclusion générale.....	89
Bibliographies	91

Table des figures

Figure 1: Consommation mondiale d'énergie durant l'année 2019	5
Figure 2: Consommation mondiale d'énergie durant l'année 2020	5
Figure 3: Evolution de la production d'électricité par source d'énergie	6
Figure 4: Les systèmes d'énergies les plus utilisés ¹	7
Figure 5: Evolution des enveloppes d'injection d'électricité dans le réseau MT.....	9
Figure 6: Evolution des puissances PV assurant l'enveloppe d'injection d'électricité dans le réseau MT.....	10
Figure 7: Cellule, module et panneau solaire	13
Figure 8: Caractéristiques résultantes d'un générateur associant N_p cellules en parallèles et N_s	14
Figure 9: caractéristiques de la puissance en fonction de la tension pour différents valeurs d'éclairéments	15
Figure 10: caractéristiques de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de températures	15
Figure 11: Installation photovoltaïque autonome.....	16
Figure 12: Installation photovoltaïque couplé au réseau.....	17
Figure 13: Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	18
Figure 14: Turbines éoliennes à axe horizontal et à axe vertical	19
Figure 15: Turbines éoliennes monopale, bipales, tripales	19
Figure 16: Chaîne de conversion éolienne à génératrice synchrone à rotor bobiné (ou à aimants) et convertisseur de fréquence.	20
Figure 17: Chaînes de conversion à génératrice asynchrone à rotor bobiné	22
Figure 18: Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage et convertisseur de fréquence	22
Figure 19: Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage	23
Figure 20: Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu	24
Figure 21: Diagramme de la puissance utile de la turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	24

Figure 22: Irradiation solaire globale sur une surface inclinée	33
Figure 23: Principe de fonctionnement de la méthode MILP	41
Figure 24: Principe de fonctionnement de la méthode MILP	41
Figure 25: Vitesse horaire du vent	43
Figure 26: Irradiation solaire du site	43
Figure 27: Résultats de simulation du mois Février.....	45
Figure 28: Résultats de simulation du mois Mai.....	45
Figure 29: Résultats de simulation du mois Août	46
Figure 30: Résultats de simulation du mois Décembre.....	46
Figure 31: Modèle d'une cellule photovoltaïque à une seule diode.	53
Figure 32: Caractéristique I –V pour différente valeur température.....	55
Figure 33: Caractéristique P –V pour différente valeur température.....	55
Figure 34: Caractéristique de I –V pour différentes valeurs d’irradiation.....	56
Figure 35: Caractéristique de P –V pour différentes valeurs d’irradiation	56
Figure 36: Déplacement d'une particule par l'utilisation de la méthode PSO	59
Figure 37: représentation simple du croisement en 1 point	63
Figure 38: représentation schématique du croisement en 2 points.....	63
Figure 39: représentation schématique d’une mutation dans un chromosome	64
Figure 40: L'organigramme de la méthodologie proposée.....	67
Figure 41: Modèle d’un système PV avec le convertisseur Buck-boost et le contrôleur MPPT	68
Figure 42: Profil d'irradiation solaire	69
Figure 43: Puissance PV avec différentes méthodes de MPPT	69
Figure 44: La réponse du MPPT au point "a"	70
Figure 45. La réponse du MPPT au point "b"	70
Figure 46. La réponse du MPPT au point "c"	71
Figure 47. La réponse du MPPT au point "d"	71
Figure 48: Configuration d’un système hybride connecté au réseau	77
Figure 49: Schéma de principe du système d’énergie hybride PV / éolien / secteur / batterie.	79
Figure 50: L'organigramme de la logique utilisée dans le programme	82
Figure 51: Irradiation solaire horaire	84
Figure 52: Vitesse horaire du vent	84
Figure 53: Température horaire du site	84
Figure 54: Profil consommation des charges résidentielle.....	85

Figure 55: Puissance des charges à priorités élevée.....	85
Figure 56: Le surplus d'énergie du système d'énergies hybrides	86
Figure 57: Puissance demandé au réseau public	86
Figure 58: Puissance fournie par les panneaux solaires	86
Figure 59: Puissance fournie par les éoliennes	86
Figure 60: Puissance générée par le système hybride	87
Figure 61: Puissance des batteries.....	87
Figure 62: Puissance des charges à priorité moyenne non asservies	87
Figure 63: Puissance des charges à priorité faible non asservies	87
Figure 64: Comparaison des puissances de la batterie et du secteur.....	88

Liste des tableaux

Tableau 1: Valeurs habituelles du coefficient de correction	35
Tableau 2: Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque.....	37
Tableau 3: Localisation et données caractéristiques du site.....	40
Tableau 4: Coefficients de la fonction objective.....	41
Tableau 5: Caractéristique du panneau solaire.....	43
Tableau 6: Caractéristique de la batterie	44
Tableau 7: Caractéristique de l'éolienne.....	44
Tableau 8: Résultats d'optimisation des mois Janvier, Mai, Juillet et Décembre	47
Tableau 9: Caractéristiques du panneau solaire utilisé	54
Tableau 10: Paramètres de la méthode PSOAG.....	66
Tableau 11: comparaison des performances des trois méthodes.....	72

Publications

Certaines parties des résultats présentés dans ce manuscrit et des études connexes ont été publiés pendant la période de réalisation de cette thèse par l'auteur. La liste de ces publications se présente comme suit :

Articles journal :

- Zahira El Hariz, Hicham Aissaoui, et Mohammed Diany, “Multi-objective optimal control of hybrid energy system,” International Journal of Renewable Energy Research, 2019.
- Zahira El Hariz, Hicham Aissaoui, et Mohammed Diany, “A novel optimiser of MPPT by using PSO-AG and PID controller,” International Journal of Ambient Energy, 2021, doi: 10.1080/01430750.2021.1934116.
- Zahira El Hariz, Hicham Aissaoui, et Mohammed Diany, “Optimization of hybrid energy system by using the MILP model,” no. x.

Communications orales:

- Zahira El Hariz, Hicham Aissaoui, et Mohammed Diany, “Optimal Unit Sizing of PV / Wind / Battery / Sector Generating System,” International Conference on Optimization and Applications, 2018.
- Zahira El Hariz, Hicham Aissaoui, et Mohammed Diany, “A Novel PID Using A Genetic Algorithm to Track The Maximum Power Point of The PV System,” International Conference on Efficient Engineering Systems, 2021.

Introduction Générale

Contexte général

Depuis plusieurs années, le monde a confronté des enjeux climatiques et énergétiques sans précédent pour lesquels de fortes alternatives sont attendues. La protection de la planète est aujourd'hui un enjeu majeur, **limiter les gaz à effet de serre**, à l'origine du réchauffement climatique, est absolument nécessaire. A la recherche d'alternatives qui garantissent des solutions plus efficaces et respectueuses de l'environnement pour l'approvisionnement énergétique est l'un des problèmes les plus discutés de notre quotidien et il génère inquiétudes massives. Plusieurs chercheurs, gouvernements, politiciens, écologistes... ont concentré leurs efforts dans cette direction. En ce sens, de plus en plus les énergies renouvelables sont utilisées pour produire de l'électricité. Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle est disponible en illimité et que sa régénération est rapide. Il s'agit, entre autres, de l'énergie solaire et éolienne. Toutefois, il serait bon de se questionner quant à l'impact environnemental de ces deux énergies écologiques. De nos jours, de nombreux pays ont réorienté leurs politiques concernant la production d'énergie et ont adopté la production d'énergie verte. L'utilisation de panneaux photovoltaïques et d'éoliennes est devenue très populaire. Cette étude s'inscrit dans la tendance internationale d'accroître la décentralisation et l'utilisation des sources d'énergies renouvelables pour produire de l'électricité, provoquant un faible impact dans la nature. Il ne s'agit que d'une partie d'un ensemble d'innovations proposé à travers le monde, mais la participation de ce type de génération est encore négligeable.

En ce qui concerne les défis techniques, l'un d'eux est d'avoir des systèmes chaque fois plus efficace, bon marché et polyvalent pour convertir l'énergie électrique des différentes sources.

Problématique

Le développement de la société peut être exprimé en termes de son aptitude croissante à rencontrer un certain nombre de besoins : la santé, la nourriture, le logement, la culture, les facilités de déplacement, l'information, l'exercice de droits civils, la qualité de l'environnement naturel, les sports et loisirs, etc.

La majorité des activités, mentionnées ci-dessus, à une relation directe avec l'énergie mais à des degrés divers. Cette énergie est soit consommée directement par les utilisateurs ou est nécessaire pour la production des biens et services associés à ces activités. Ainsi, la disponibilité d'énergie est une pré-obligation pour le développement socioéconomique et industriel d'un pays.

Aujourd'hui, il est évident que les besoins mondiaux en énergie sont comblés en grande partie par des énergies fossiles. Or, il a été prouvé que la consommation massive de ces types d'énergies a un effet néfaste sur la planète et la santé. Cette désertification est augmentée dans certaines régions en raison de l'utilisation du bois comme source primaire d'énergie. Une des meilleures solutions pour remédier à ce problème est l'utilisation de sources d'énergies renouvelables (SER) pour satisfaire les besoins énergétiques.

Motivation et objectifs

Selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS)¹, 4,2 millions de personnes meurent prématurément chaque année à cause de l'air polluant, causée par l'utilisation des sources d'énergies fossiles. Des études faites ont montré que ce chiffre peut même atteindre 6 millions de personnes d'ici 2050 si rien n'est fait pour diminuer la pollution de l'atmosphère.

Plusieurs chercheurs ont démontré les effets positifs de la transition énergétique sur la santé. « *La transition vers les énergies renouvelables pourrait réduire d'ici 2050 jusqu'à 80% les impacts de la pollution de l'air sur la santé* ». Si les énergies renouvelables deviennent majoritaires dans les trois prochaines décennies, le bilan de la mortalité liée à la pollution pourrait ainsi descendre à un million de personnes, estiment les chercheurs.

L'étude a évalué trois scénarios de décarbonations du secteur énergétique d'ici 2050 : le premier s'appuie principalement sur le solaire et l'éolien, le second sur la capture et le stockage du carbone combiné à la biomasse et aux énergies fossiles, le troisième sur un mix de ces technologies. Cette question a guidé l'étude rapportée dans cette thèse et se configure comme la motivation principale pour ce travail. Afin de proposer des solutions pour maximiser la production des sources d'énergies renouvelables solaire et éolienne

¹ www.who.int. (Visiter le 30 Octobre 2021)

C'est dans cette démarche que s'inscrit ce travail de thèse. Il porte dans un premier lieu sur l'optimisation en temps réel des puissances fournies par un système d'énergies renouvelables multi-sources et multi charges. L'objectif principal de cette étude consiste à répondre à toutes les sollicitations dynamiques et à satisfaire le besoin énergétique de la demande sur un profil journalier en prenant en compte les variations aléatoires des données météorologiques du site.

Par ce travail nous avons élaboré et validé la conception d'un module de gestion optimale en temps réel d'un micro-réseau hybride basé sur la production d'énergie électrique avec un pack de batterie et connecté avec le réseau public. La stratégie de gestion développée est dynamique, optimal et capable de s'adapter en cas de changements imprévisibles (données météorologiques ou de la demande énergétique), afin d'offrir davantage de rentabilité, fiabilité et de stabilité au système électrique.

Plan de thèse

Le contenu principal de la présente thèse est divisé en quatre chapitres et une conclusion générale.

Dans *le premier chapitre*, nous présentons une étude des sources d'énergies hybrides exploitables, afin de permettre aux lecteurs de mieux se positionner et comprendre les différentes contributions réalisées dans le cadre de ce travail, nous nous concentrons sur les systèmes de production solaire et éolienne. Nous présentons par la suite les chaînes de conversion solaire et éolienne. Et nous finirons, ce chapitre, par présenter la problématique traitée dans cette thèse.

Le deuxième chapitre consiste à faire un dimensionnement du système d'énergie hybride afin de choisir le nombre optimal des panneaux, des éoliennes, des batteries et la quantité d'énergie fournie par le réseau. Afin de sélectionner la meilleure combinaison du système d'énergie hybride, maximiser la puissance et minimiser le coût du système.

Le troisième chapitre présente une nouvelle méthode de la recherche du point de puissance maximal du panneau, la méthodologie proposée combine trois méthodes d'optimisation : P&O, algorithme génétique et la méthode PSO pour gérer les paramètres du contrôleur PID afin de commander le convertisseur de puissance. L'efficacité et la rentabilité de cette méthode ont été étudiées avec succès. En faisant une étude comparative des résultats de la méthode proposée PSOAG, PSO et AG.

Quant au *quatrième chapitre*, nous présentons une nouvelle méthodologie d'optimisation des sources d'énergie renouvelables, en utilisant une technique intelligente permettant de sélectionner les meilleurs systèmes d'énergie hybrides, en divisant les charges en priorités hautes, moyennes et basses, afin de maximiser la puissance, réduire le nombre de panneaux photovoltaïques (PV), éoliennes (WT) et des batteries, ainsi pour réduire le coût total du système.

A la fin de ce rapport, nous présentons en complément les différentes annexes pour mieux appréhender son contenu.

CHAPITRE 1

Sources d'énergies renouvelables et systèmes de production d'origine renouvelable

CHAPITRE 1

Sources d'énergies renouvelables et systèmes de production d'origine renouvelable

I. Introduction	4
II. Contexte énergétique dans le monde	4
1. Impact du COVID-19 sur le mix énergétique mondial.....	4
2. Les systèmes d'énergies les plus utilisés.....	6
2. Réchauffement climatique et besoin de sources énergétiques vertes.....	7
3. Enjeux énergétiques, économiques et environnementaux	8
4. L'injection d'électricité autorisée au Maroc.....	8
III. Énergies renouvelables, définition, ressources et exploitation	10
1. Les centrales hydrauliques.....	11
2. Les panneaux photovoltaïques.....	11
3. Les éoliennes	12
4. La Géothermie.....	12
IV. Transformation de l'énergie solaire en électricité	13
1. Système de production d'énergie solaire	13
2. Recherche du point de puissance maximale	14
3. Chaîne de conversion solaire.....	16
V. Transformation de l'énergie éolienne en électricité	17
1. Système de production d'énergie éolienne	17
2. Chaîne de conversion éolienne	20
3. Régulation mécanique de la puissance de l'éolienne.....	24
VI. Moyens de stockage de l'énergie électrique	25
1. Batteries.....	25
2. Super-condensateurs.....	25
3. Différences entre batteries et super-condensateurs.....	26
4. Super-condensateur vs batteries : avantages et inconvénients	26
VI. Conclusion.....	27

I. Introduction

La limitation des ressources d'énergies centralisées et l'augmentation de leurs coûts, ouvre une grande opportunité aux énergies renouvelables qui deviennent de plus en plus une solution énergétique prometteuse. D'ici 10-20 ans, tous les systèmes énergétiques durables seront basés sur l'utilisation des énergies renouvelables. Les systèmes de productions d'énergies renouvelables offrent plusieurs avantages en permettant aux sites et aux entreprises de s'engager dans la lutte contre le changement climatique, de choisir la provenance de leur énergie ou encore de diminuer leur facture d'électricité. Les systèmes de production d'énergies renouvelables assurent également une meilleure autonomie du réseau. Cependant la variation aléatoire de ces sources d'énergies impose l'élaboration des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Après une brève description des sources d'énergies hybrides exploitables, nous nous concentrons dans ce chapitre sur les systèmes de production d'énergies renouvelables, en particulier les sources d'énergie solaires et éoliennes. Nous décrirons ensuite les chaînes de conversion solaire et éolienne. Et nous finirons par illustrer la problématique traitée dans cette thèse.

I. Contexte énergétique dans le monde

1. Impact du COVID-19 sur le mix énergétique mondial¹

L'année 2020 a connu un trouble des habitudes de la plupart des terriens et les chiffres de l'énergie peuvent en témoigner. La consommation énergétique globale de cette année si a connu une dégradation importante de 4,27%. Le pétrole est la source d'énergie la plus impactée par cette pandémie (-9,4%).

Le Gaz naturel et le charbon n'ont pas été trop impactés par le COVID-19 dans la mesure où ce qui a été perdu dans la consommation professionnelle a été compensé par le fait que tout le monde consommait à domicile.

L'énergie nucléaire, l'hydraulique ont varié très peu entre 2019 et 2020. Les figures 1 et 2 illustrent respectivement la consommation mondiale d'énergie durant l'année 2019 et 2020.

¹ <https://www.gazprom-energy.fr> (Visiter en septembre 2021)

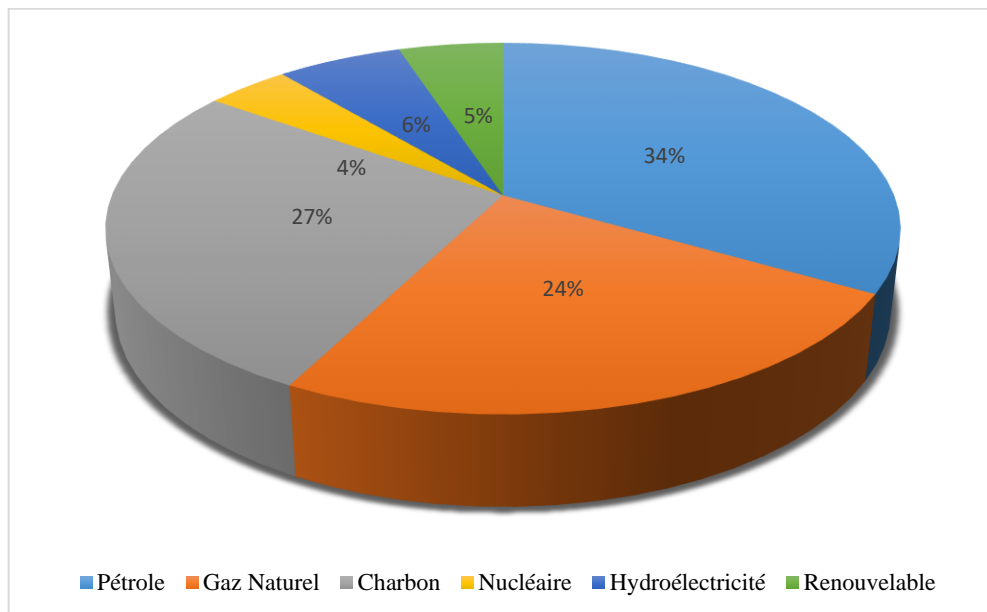


Figure 1: Consommation mondiale d'énergie durant l'année 2019

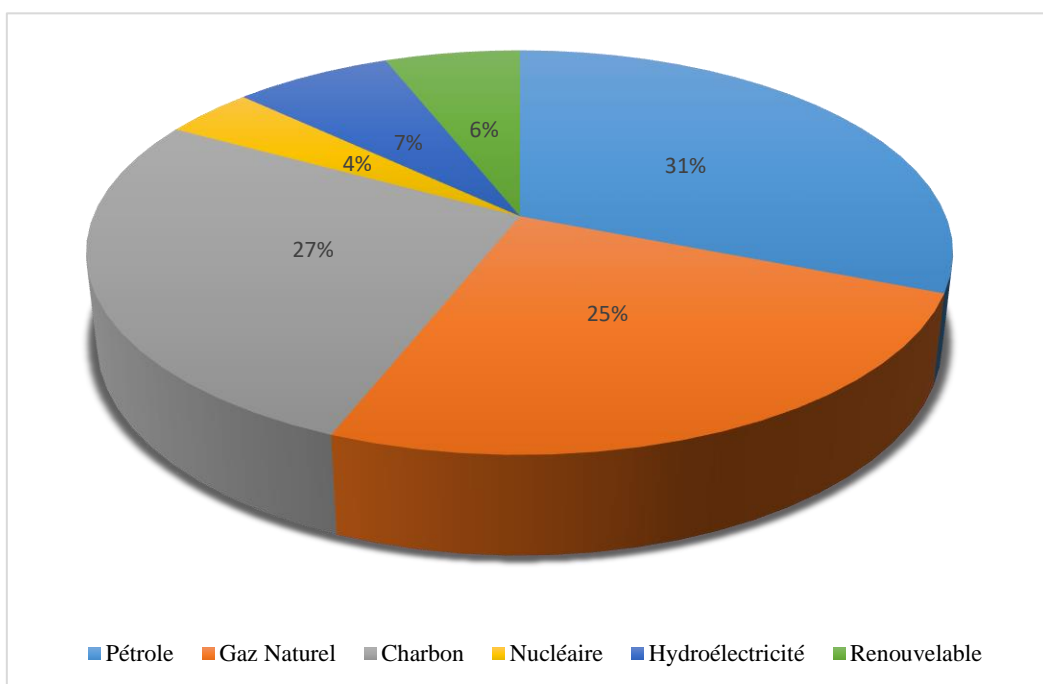


Figure 2: Consommation mondiale d'énergie durant l'année 2020

Les énergies renouvelables ont poursuivi leur hausse en 2020 et 2021, avec une baisse marquée de la consommation du charbon en 2020, la figure ci-dessous présente l'évolution de la production d'électricité par source d'énergie.

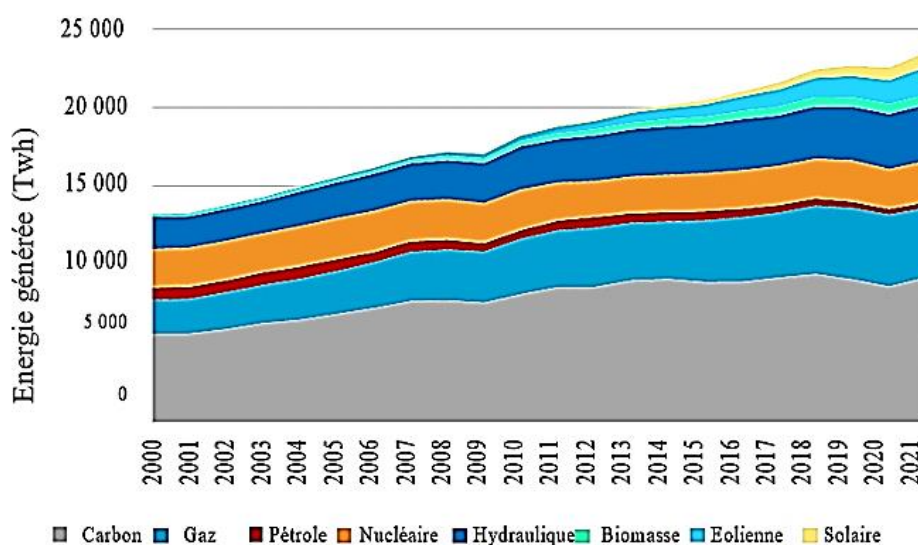


Figure 3: Evolution de la production d'électricité par source d'énergie

2. Les systèmes de production d'énergies les plus utilisés

Il existe d'importantes différences de mix énergétiques entre les continents, chaque zone profite de ses propres atouts territoriaux¹.

L'Europe et l'Amérique du nord ont la particularité de disposer d'une quantité non négligeable de nucléaire dans leur mix énergétique. L'Europe en tête (grâce à la France) avec 10% de son énergie produite grâce à fission atomique.

En matière d'énergie renouvelable, l'Amérique centrale passe devant l'Europe (22% contre 12%). Mais si on ne parle que d'énergies ne rejetant pas de CO2 la zone Amérique du sud dispose encore d'une avance confortable.

L'Afrique en revanche a clairement fait reposer sa croissance économique sur le pétrole (figure 4). Elle est la zone qui en consomme le plus ; 41% contre 7% seulement pour l'hydroélectricité et 2% des énergies renouvelables.

Le secteur d'énergie au Maroc est dominé par les énergies fossiles, presque entièrement importées, qui couvrent 81 % de la consommation d'énergie primaire du pays en 2020 (pétrole 2 %, charbon 67 %, gaz 12 %) ; les énergies renouvelables contribuent pour 16 % et 3% pour l'hydroélectricité.

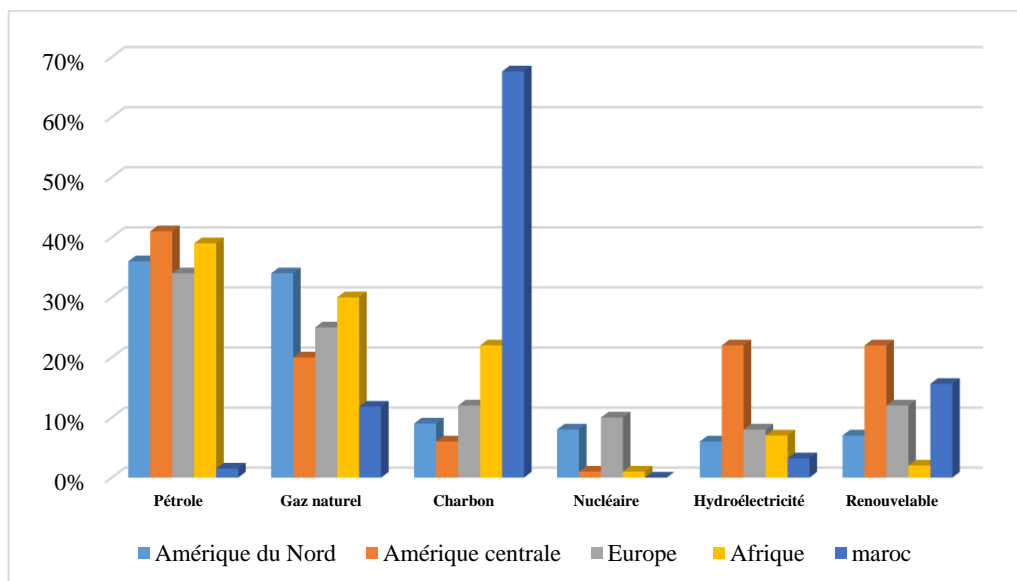


Figure 4: Les systèmes d'énergies les plus utilisés¹

2. Réchauffement climatique et besoin de sources énergétiques vertes [10]

La demande mondiale d'énergie est satisfaite en utilisant une quantité très importante des énergies fossiles, par conséquent, une quantité énorme des gaz à effet de serre se rejette dans l'atmosphère, ce qui cause principalement le réchauffement climatique. Par l'augmentation importante du taux de natalité et le développement économique, le problème du réchauffement climatique sera intensifié, alors que la situation risque de devenir très vite insoutenable si les pays en voie de développement adoptent le mode de vie énergivore actuel des pays développés.

La nécessité de protéger l'environnement contre le réchauffement climatique impose une amélioration des stratégies énergétiques. L'avenir nécessite alors l'utilisation des sources d'énergies propres (énergies renouvelables). Cependant, ces énergies présentent un rendement de conversion faible avec un coût trop élevés. Donc pour lutter efficacement contre le réchauffement climatique, réduire l'effet des gaz à effet de serre, et la raréfaction des ressources fossiles, le modèle énergétique actuel évolue vers l'intégration des énergies renouvelables telles que le solaire, l'hydroélectricité et le vent qui sont présents avec une quantité énorme dans la nature. En effet, la connexion de sources d'énergies avec des batteries d'accumulateurs dit hybrides est un palliatif excellent à l'intermittence des sources à énergie renouvelable telles que le solaire et l'éolien.

¹ <https://www.gazprom-energy.fr> (Visiter en septembre 2021)

Le système hybride multi-source à énergie renouvelable [2], présente une option très importante pour la construction des réseaux électriques modernes **qui comporte plusieurs sources d'énergies parmi lesquelles au moins une source est renouvelable**. Ce type de systèmes présente des avantages à la fois environnementaux, économiques et sociétaux. L'amélioration de la fiabilité et des performances de ces systèmes, présente aujourd'hui le cœur des recherches scientifiques.

3. Enjeux énergétiques, économiques et environnementaux

La gestion d'énergie est liée principalement à trois points majeurs : l'état de l'environnement, la sécurité énergétique et le développement économique. Le système hybride à énergie renouvelable répond favorablement à la demande sociétale, en réduisant les coûts environnementaux, économiques et sociaux du mode énergétique actuel. Cependant, pour diminuer la consommation des énergies fossiles, une intégration massive des micro-réseaux à énergie renouvelable dans le mix énergétique est nécessaire. D'où la nécessité d'un contrôle robuste est importante, pour répondre aux implications des développements entre la croissance démographique, la consommation d'énergie et le développement économique. En vue d'augmenter l'efficacité, les performances et la production énergétique des systèmes hybrides à énergies renouvelables, plusieurs recherches scientifiques [3,4] ont été faites pour étudier la gestion efficace de la production énergétique, l'accroissement de capacités de stockage énergétique et le développement des systèmes de production à énergie renouvelable. Les systèmes hybrides présentent un moyen efficace pour apporter un outil économique et social dans les zones rurales et l'électrification des zones éloignées difficilement accessibles au réseau électrique. Favoriser le développement des systèmes électriques à base d'énergie renouvelables et proposer une meilleure gestion des ressources énergétiques est donc un pas important pour la sécurité énergétique et l'équité territoriale.

4. L'injection d'électricité autorisée au Maroc²

Le bulletin officiel N°7054 du 06janvier 2022 a publié l'Arrêté N°3851-21 qui fixe, à chacun des distributeurs d'électricité au Maroc, des enveloppes pour l'injection, dans le réseau électrique de moyenne tension (MT), d'énergie électrique produite à partir de sources d'énergie renouvelables.

En plus du ministre de la transition énergétique et du développement durable, ledit Arrêté N° 3851-21 a nécessité la signature conjointe du ministère de l'intérieur en tant que tutelle des

collectivités locales, elles même déléguant des services de collecte et gestion des déchets solides et liquides ainsi que des services de distribution d'eau et d'électricité. Ledit Arrêté fixe les quantités d'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables qui peuvent être injectées dans le réseau de moyenne tension par l'ONEE mais aussi par les 11 autres distributeurs (4 entreprises privées et 7 Régies Communales). L'évolution de ces enveloppes est montrée dans la figure suivante : elles commencent à 490 Gwh/an en 2022 et atteindraient 1301 Gwh/an en 2030.

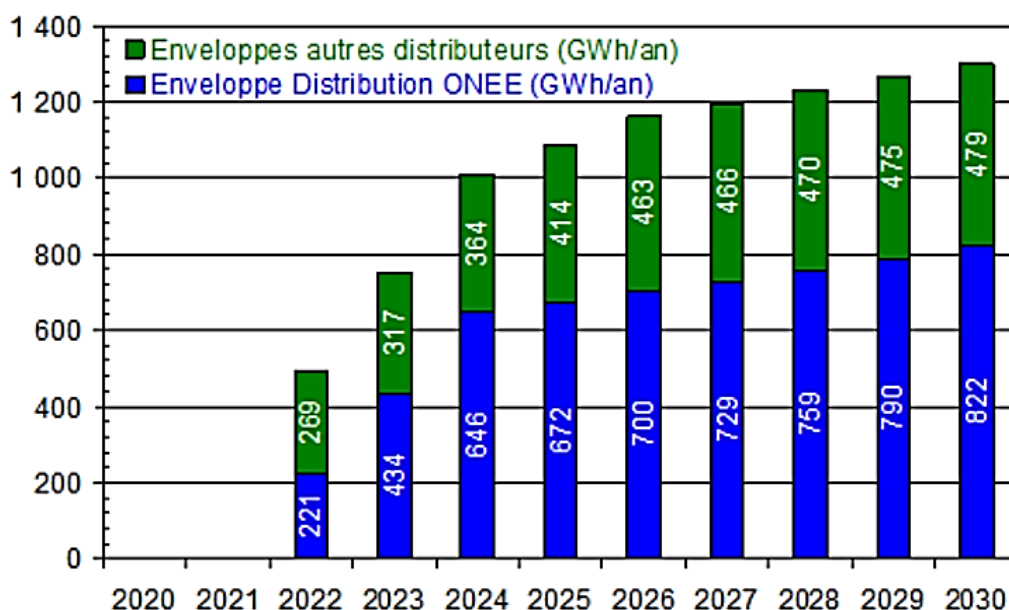


Figure 5: Evolution des enveloppes d'injection d'électricité dans le réseau MT

Si la totalité de ces enveloppes d'énergie devraient être satisfaites par du solaire photovoltaïque, les données représentées sur la figure 5 permettent d'estimer les puissances PV nécessaire en tenant compte des spécialités régionales moyennes de la zone géographique de chacun des 12 distributeurs. Les puissances solaires PV à cumuler s'étalent entre 286 MWc en 2022 et 747 MWc en 2030 et sont représentées sur la figure 6 :

² : <https://www.gazprom-energy.fr/gazmagazine/2021/08/le-mix-energetique-mondial-en-2021/> (Visiter le 01 Mars 2022)

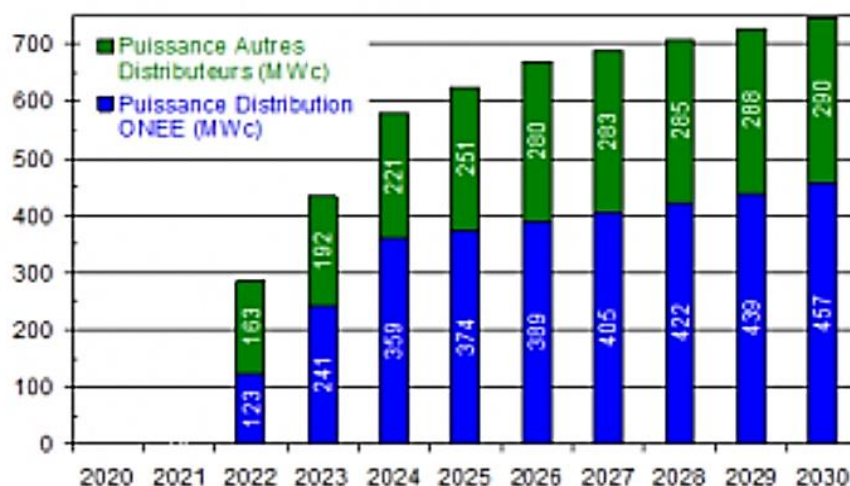


Figure 6: Evolution des puissances PV assurant l'enveloppe d'injection d'électricité dans le réseau MT

III. Énergies renouvelables, définition, ressources et exploitation [5]

Les sources d'énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est plus rapide. C'est le cas de l'énergie du vent, du soleil, de la terre, des cours d'eau et de la biomasse humide ou sèche. Les sources d'énergies renouvelables sont considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Pendant la plus grande partie de son histoire, les énergies renouvelables sont exploitées par l'humanité depuis la nuit des temps. Autrefois, les moulins à eau, à vent et de bois de feu, traction animale, voilier ont participé au développement du monde. Au XIXème siècle, la plupart des pays industrialisés ont fait marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie plus prometteuses. En ce moment, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique ont pris conscience que le développement de l'industrie doit être en parallèle avec le respect de l'environnement.

Les impacts pétroliers consécutifs, depuis les années 70, ont montré les risques d'utilisation des sources d'énergies centralisés, dont les réserves épuisables. De plus, la majorité des sites isolés ne seront jamais raccordée aux réseaux dont l'extension est très coûteuse.

Les énergies renouvelables représentent alors une solution primordiale aux systèmes de production centralisés :

- Elles assurent une stabilité climatique, économique, environnementale et sociale en réduisant considérablement l'émission des gaz à effet de serre.
- Elles sont inépuisables à l'échelle de l'humanité, gratuite et propre.
- Elles présentent une indépendance énergétique importante.

Systèmes d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables. Elles proviennent des phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres. Les sources d'énergie disponible et qui permettent de produire l'énergie électrique sont : le soleil, le vent et l'eau. Les systèmes d'énergies renouvelables sont très compétitifs pour les sites isolés dont le coût de raccordement au réseau est très élevé.

Confronté à l'augmentation de la demande d'électricité au Maroc et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, le Maroc cherche toujours à développer les capacités de production des énergies renouvelables pour atteindre 42%, de son mix énergétique, à l'horizon 2030. Le Royaume, disposant d'un fort potentiel hydraulique, compte pour cela sur la filière hydroélectrique afin de renforcer sa production d'énergies vertes et d'augmenter ses capacités de stockage.

1. Les centrales hydrauliques

L'**hydroélectricité**, est une énergie électrique renouvelable issue de la conversion de l'énergie hydraulique en électricité, a débuté dans le dernier quart du XIX^e siècle avec les premières centrales hydroélectriques dans les Alpes et s'est développé grâce au progrès des technologies d'interconnexion électrique et de la conduite forcée.

Au Maroc [6], La production hydroélectrique a atteint 1770 MW en 2018, soit 4,9 % du total africain ; 26 % de cette puissance est constituée de centrales de pompage-turbinage : 464 MW. La plupart des centrales hydroélectriques marocaines font partie de l'aménagement du fleuve Oum Errabiâ et de ses affluents. Le Maroc s'est donné l'objectif d'atteindre 2 000 MW en 2031.

2. Les panneaux photovoltaïques

L'énergie solaire est une énergie inépuisable, elle se produit à base des panneaux photovoltaïques, qui converties l'énergie lumineuse provenant des rayonnements solaires en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur. Il existe généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes **autonomes** qui s'utilisent généralement dans les régions éloignées et isolées du réseau électrique pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Le deuxième type des systèmes photovoltaïques est le système **hybride** qui associe au moins deux ou trois sources d'énergie avec une ou plusieurs

sources classiques. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes et souvent utilisés dans les sites isolés. Le troisième type est les systèmes de production photovoltaïque **connectés** au réseau dont la production est plus près des lieux de la consommation. L'avantage principale de ce type des systèmes c'est qu'il réduit la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de distribution et de transmission. Ils produisent l'énergie nécessaire à l'alimentation et acheminent le surplus d'énergie vers le réseau électrique.

La puissance installée des installations solaires du Maroc atteint [6] 2 000 MW solaires en 2020 et il se compose de NOOR Ouarzazate (510 MW en CSP et 70 MW PV), NOOR Tafilalt et Atlas (300 MW en PV), NOOR Midelt (300 MW en CSP et 300 MW en PV), NOOR Laâyoune et Boujdour (100 MW en PV), NOOR Tata (300 MW en CSP et 300 MW en PV) et des centrales solaires dans des zones économiques (150 MW en PV).

3. Les éoliennes

Parmi toutes les énergies renouvelables assurant la production d'électricité, l'énergie éolienne, est une source d'énergie propre qui permet de transformer l'énergie cinétique du vent en électricité, elle occupe une capacité de 900 MW. Elle est l'une des énergies les plus prometteuses, en termes de compétitivité, de champ d'application, d'écologie, de richesses et de création d'emplois.

4. La Géothermie

La géothermie est une énergie renouvelable, locale et respectueuse de l'environnement, associant une performance énergétique et économique. Il existe deux types principaux de l'énergie géothermique : terrestre et marine. Le premier type rassemble l'ensemble des applications permettant de récupérer la chaleur contenue dans le sous-sol ou dans les nappes d'eau souterraines. La température de l'eau souterraine augmente avec la profondeur, de 3°C tous les 100 mètres. Lorsque le réservoir géothermique est à une température modérée, cette ressource est exploitée pour la production de chaleur ensuite distribuée par un réseau de chaleur. La géothermie marine exploite la différence de température entre l'eau chaude de surface et l'eau froide des fonds marins, pompées grâce à des canalisations longues de 1 km, pompée dans la mer et sur la côte, des échangeurs et des pompes à chaleurs permettent de produire selon les besoins du froid ou du chaud. L'eau est ensuite acheminée vers les bâtiments à chauffer ou climatiser.

IV. Transformation de l'énergie solaire en électricité

Dans cette partie nous allons présenter les dispositifs de conversion de l'énergie solaire en électricité. Dans un premier temps nous présenterons les caractéristiques et les différents types des générateurs photovoltaïques existants, puis nous aborderons les chaînes de conversion électrique associées aux systèmes solaires.

1. Système de production d'énergie solaire

L'effet photovoltaïque [7] est un effet photo-électrique qui permet de transformer l'énergie lumineuse envoyée par le soleil vers la Terre, en courant électrique continu par le biais d'un matériau semi-conducteur qui comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons (dopée de type N) et l'autre un déficit en électrons (dopé de type P). La mise en contact des deux parties du semi-conducteur, produit le déplacement de l'excès des électrons dans le matériau N vers le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et l'autre chargée négativement. Les matériaux les plus utilisés dans la fabrication des panneaux solaire sont à base du silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 12 à 18 % pour les panneaux photovoltaïques à base de silicium monocristallin, 11 à 15 % avec du silicium polycristallin et enfin 5 à 8% pour le silicium amorphe.

Le panneau solaire est une association de plusieurs cellules photovoltaïques montées en série et/ou en parallèle. Typiquement une cellule photovoltaïque produit, sous approximativement 0,5 Volt, moins de 2 watts.

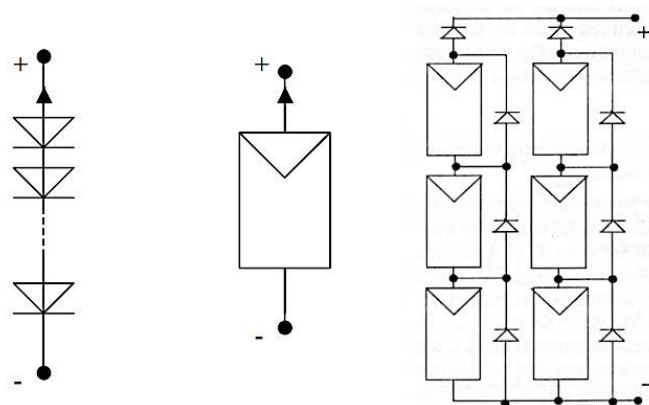


Figure 7: Cellule, module et panneau solaire

Le passage du module photovoltaïque au panneau solaire se fait par le branchement des diodes de protection, en série afin d'éviter les courants inverses et en parallèle, aux bornes d'un

groupement élémentaire de 30 à 40 cellules au silicium au maximum, dite diode by-pass qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble des cellules photovoltaïques, afin de minimiser la perte de production et limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble. La figure suivante montre la courbe tension courant de l'association de N_p cellules en parallèles et de N_s cellules en séries.

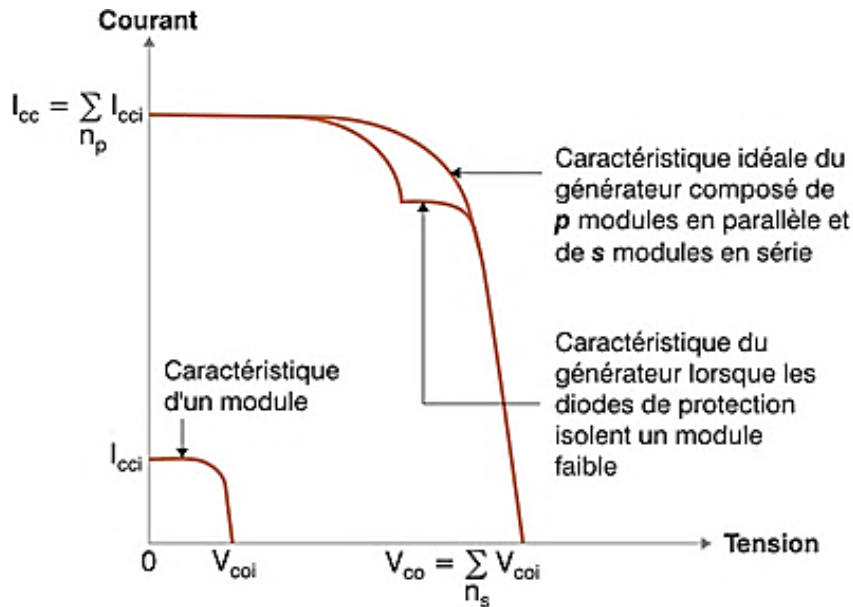


Figure 8: Caractéristiques résultantes d'un générateur associant N_p cellules en parallèles et N_s

La caractéristique du module photovoltaïque dépend fortement de l'irradiation solaire et de la température.

2. Recherche du point de puissance maximale

Par définition, la commande MPPT [8], associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de fonctionner le panneau photovoltaïque de façon à produire en permanence sa puissance maximale. Et cela, quelles que soient les conditions météorologiques d'irradiation solaire et de la température.

Les figures suivantes montrent l'allure générale des caractéristiques de la puissance en fonction de la tension pour différents éclairagements (figure 9) et pour différentes températures (figure 10).

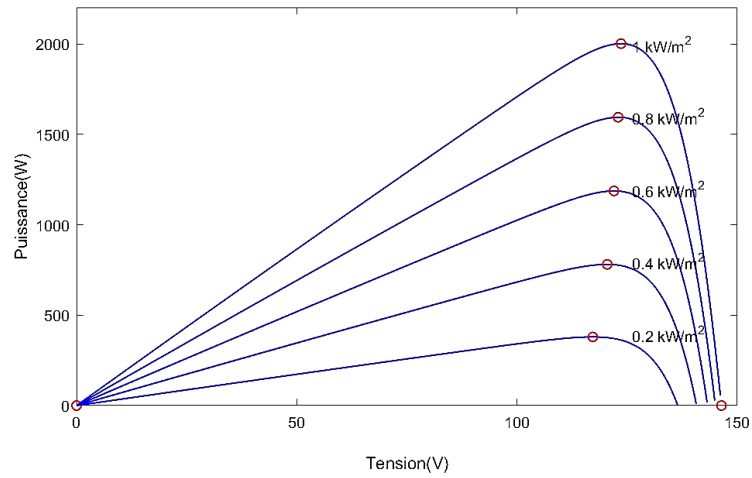


Figure 9: caractéristiques de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclaircements

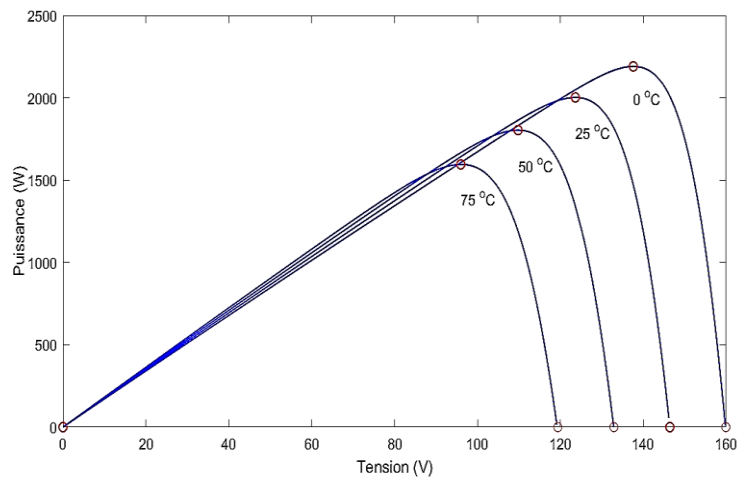


Figure 10: caractéristiques de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de températures

Sur chaque courbe, le point rouge représente le point de puissance maximale qui peut être fournie par le panneau photovoltaïque. Nous voyons qu'il existe une tension qui maximise la puissance produite par le panneau solaire et cela pour une température et un éclairciment donné. Donc, il est nécessaire d'intégrer un convertisseur de puissance entre le générateur photovoltaïque et sa charge pour assurer le fonctionnement du panneau à sa puissance maximale quelles que soient les conditions météorologiques du site. Ce convertisseur est un dispositif d'asservissement de la puissance couramment appelé à pilotage MPPT (Maximum Power Point Tracker).

3. Chaîne de conversion solaire

Dans le cas des systèmes autonomes, des régions éloignées et isolées du réseau électrique, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques s'utilise complètement ou se stocke dans les batteries d'accumulateur afin d'assurer la continuité de service. L'énergie électrique produite par les panneaux solaires alimente directement les charges prévues à cet effet ou est transformée par un convertisseur en alternatif. La figure 11 ci-dessous montre les différents types de couplage des systèmes autonomes.

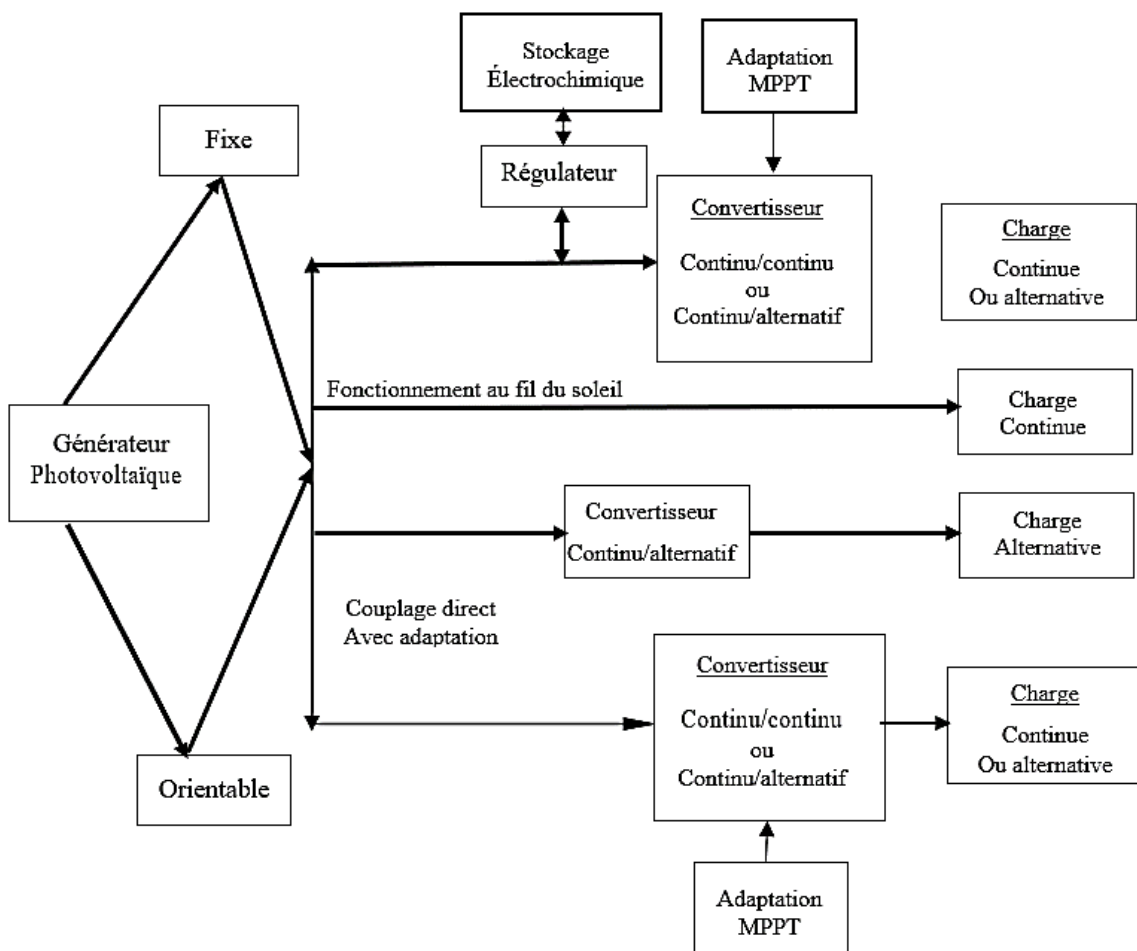


Figure 11: Installation photovoltaïque autonome

Le système d'énergie solaire peut être également connecté au réseau électrique. Le raccordement au réseau permet de réduire la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de distribution et de transmission. Le système solaire produit l'énergie nécessaire à l'alimentation des appareils prévus et achemine le surplus d'énergie vers le réseau électrique. Les versions les

plus économiques du système d'énergie photovoltaïque, l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend le système de production incapable de fournir l'énergie. S'il y'a une charge à courant continu, Un onduleur réversible sera nécessaire pour transformer l'énergie en continue. Si la demande locale est supérieure à l'énergie produite par le système solaire, l'appoint sera fourni par le réseau électrique. Dans le cas contraire, le surplus d'énergie sera fourni au réseau public pour alimenter les consommateurs voisins.

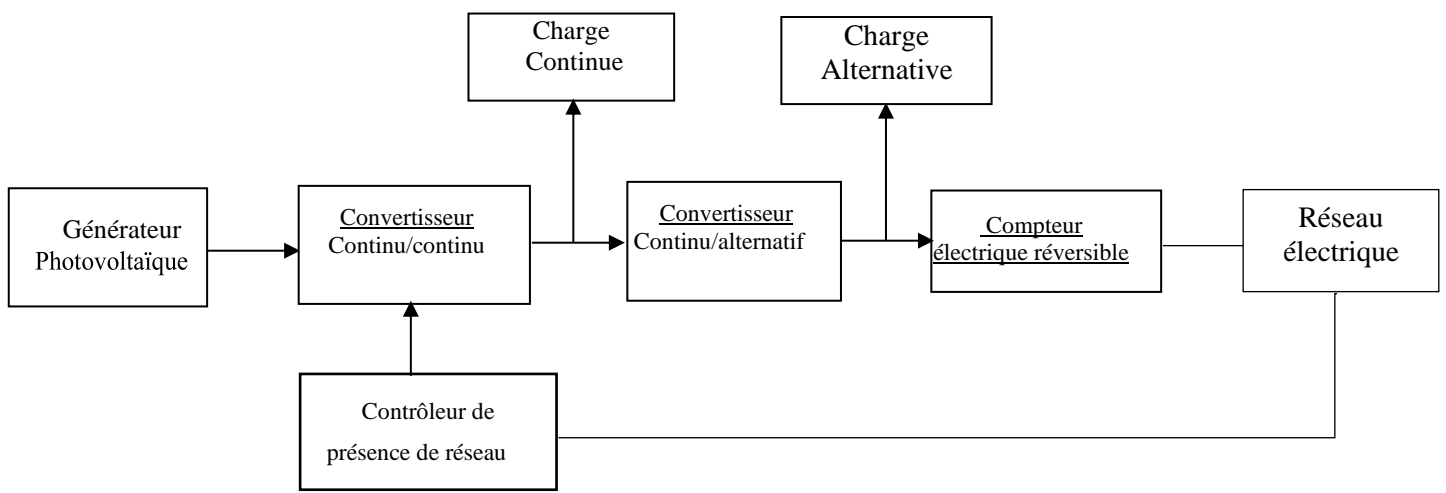


Figure 12: Installation photovoltaïque couplé au réseau

V. Transformation de l'énergie éolienne en électricité

Nous allons présenter dans cette partie les dispositifs de conversion de l'énergie éolienne en électricité. Dans un premier temps nous présenterons les différents types et les caractéristiques des aérogénérateurs existants, puis nous allons présenter les chaînes de conversion électrique associées aux éoliennes.

1. Système de production d'énergie éolienne

Le système de production éolienne permet de convertir l'énergie cinétique du vent en électricité. La procédure de conversion se fait en deux étapes principales :

- la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique au niveau de la turbine.
- la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique au niveau du générateur. La figure 13 suivante illustre le principe de fonctionnement des éoliennes :

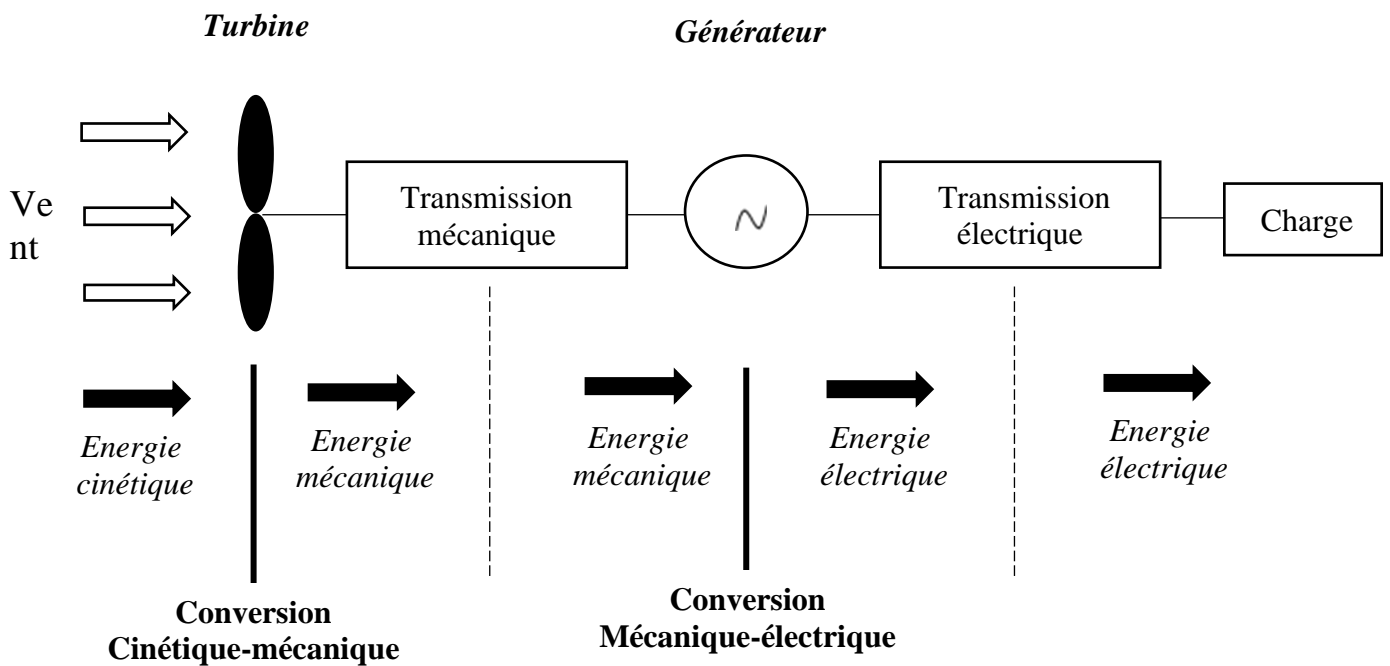


Figure 13: Principe de fonctionnement d'une éolienne

- **Conversion cinétique - mécanique**

Le principe de conversion cinétique-mécanique est relativement simple, elle permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, en exploitant la différence de pression qui créent une force de portance pour mettre en rotation la turbine et ainsi extraire une partie de l'énergie cinétique du vent.

Généralement, les turbines éoliennes peuvent se classer en deux groupes selon la position de leurs axe de rotation : des éoliennes axe horizontal et autres à axe vertical [10]. Pour les éoliennes à axe horizontal, les turbines sont fixées avec le sommet par une tour qui permet de capter une quantité très importante du vent. A la différence des éoliennes à axe horizontales, l'éolien à axe vertical est pourvu d'un rotor dont l'axe de rotation est globalement perpendiculaire au flux du fluide, et donc bien souvent vertical. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal, à cause de sa faible vitesse d'amorçage et de son coefficient de puissance qui est relativement élevé.



Figure 14: Turbines éoliennes à axe horizontal et à axe vertical

La majorité des éoliennes modernes sont de type tripale, elles sont caractérisées par la conception danoise dont le rotor est maintenu dans une position face au vent par un mécanisme d'orientation et actionné par des moteurs électriques. Les éoliennes bipales contiennent deux pales, l'avantage principal de ces éoliennes par rapport à celles tripales est le fait qu'elles présentent une économisation du coût d'une pale de rotor, ainsi que le poids de celle-ci bien évidemment, elles nécessitent une vitesse du vent plus élevée qu'une éolienne tripale pour produire la même quantité d'énergie. Il existe également des éoliennes monopales, elles permettent d'économiser le coût d'une pale de plus, mais elles sont assez rares, pour les mêmes raisons que celles citées ci-dessus. Outre une vitesse de rotation plus élevée et des problèmes de bruit, l'inconvénient principal de ce type d'éolienne est que, pour équilibrer le rotor, il faudra munir l'éolienne d'un balancier du côté du moyeu opposé à la pale. Cette disposition annule évidemment les économies de poids que l'on peut faire en dotant l'éolienne d'une seule pale au lieu de deux ou de trois pales.



Figure 15: Turbines éoliennes monopale, bipales, tripales

- **Conversion mécanique - électrique**

La conversion mécanique électrique peut être assurée par plusieurs types des machines électriques qui peuvent jouer le rôle de la génératrice de l'éolienne. Le choix de la génératrice se fait en fonction du type et des dimensions géométriques de la voilure. Pour les petites puissances ($< 20\text{kW}$), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents expliquent leur prédominance. Pour les puissances grandes, jusqu'à 2MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique [11].

2. Chaîne de conversion éolienne

Plusieurs chaînes éoliennes coexistent pour la production d'électricité par les aérogénérateurs. Elles peuvent être très différentes selon la vitesse du vent du site ; fixe (peu variable) ou variable. Dans cette partie, nous avons classé les chaînes éoliennes par leur fonctionnement couplé ou non au réseau.

- **Système couplé au réseau électrique**

- Génératrice synchrone

La génératrice synchrone, très connue par le nom d'alternateur, est constituée d'un rotor qui joue le rôle de l'inducteur et d'un stator qui joue le rôle de l'induit. Le stator est constitué des enroulements qui se traversent par un courant alternatif, ce courant est induit par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport au stator.

La génératrice synchrone s'utilise particulièrement lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, entraînement direct, sans utiliser de multiplicateur mécanique. La génératrice à aimants permanents peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure. Cependant, la fréquence de la génératrice synchrone est incompatible avec celle du réseau électrique alors, elle doit être raccordée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence.

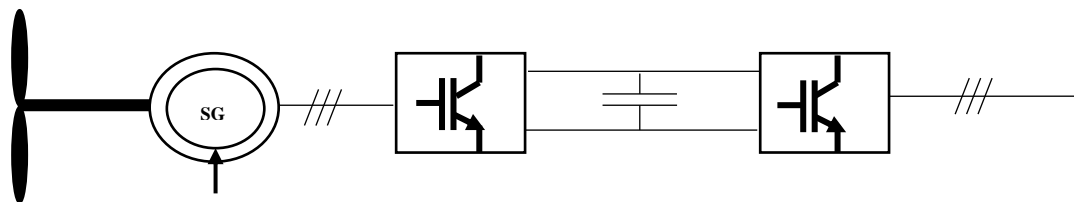


Figure 16: Chaîne de conversion éolienne à génératrice synchrone à rotor bobiné (ou à aimants) et convertisseur de fréquence [10]

Dans la pratique, les génératrices synchrones à aimants permanents sont très peu utilisées. A cause de plusieurs raisons ; d'abord, les aimants permanents tendent à se démagnétiser à l'intérieur de la machine lorsqu'ils travaillent dans un champ magnétique puissant. En plus, les aimants forts coûtent assez chers, malgré la baisse des prix qui a eu lieu dernièrement.

- Génératrice asynchrone

En raison de sa simplicité sa robustesse, et son coût réduit, la machine asynchrone est largement utilisée dans les éoliennes de grandes et moyennes puissances. Elle peut supporter de légères variations de vitesse, ces variations engendrent des sollicitations mécaniques importantes sur le système qui se trouvent plus réduites avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone qui fonctionne à vitesse fixe. Dans les éoliennes de grande puissance, la génératrice asynchrone nécessite une vitesse de vent très élevée, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor et la génératrice. Cette chaîne cinétique implique des forces de frottements qui empêchent la rotation du rotor par une vitesse de vent faible, donc il faut vaincre ces forces d'inertie au démarrage grâce à un coup de vent plus important.

Les génératrices asynchrones peuvent être :

- A **rotor bobiné ou à bagues** où les enroulements rotoriques sont couplés en étoile et reliés à un système de bagues/balais permettant l'accès à leurs bornes pour la connexion d'un convertisseur statique dans le cas d'un pilotage de la machine par le rotor. Son principe est issu de celui de la cascade hypo-synchrone : l'induit (ou le rotor) est connecté au réseau avec une fréquence fixe alors que le l'inducteur (ou le stator) est relié avec le réseau électrique à travers un convertisseur de fréquence. Si les variations de la vitesse restent réduites autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) sera réduit à son tour.

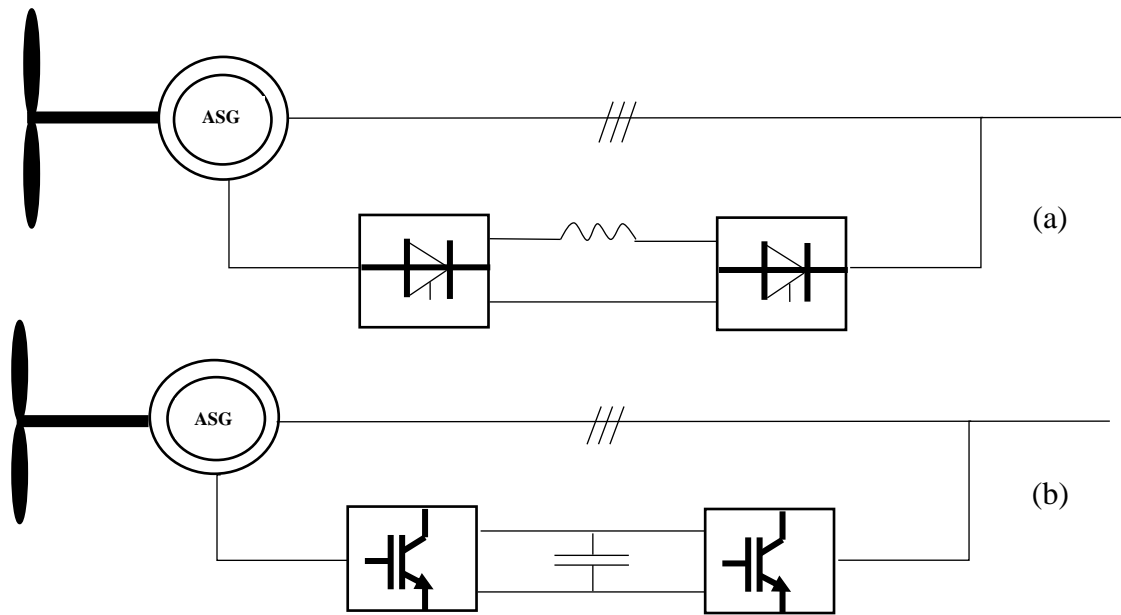


Figure 17: Chaînes de conversion à génératrice asynchrone à rotor bobiné [10]

La figure 17 montre deux systèmes à double alimentation. Le premier est à convertisseurs à thyristors. Il n'est plus utilisé car il présente trop d'inconvénients en termes de facteur de puissance et de formes d'ondes (côté machine et côté réseau). Actuellement, ce sont les systèmes à deux convertisseurs triphasés à modulation de largeur d'impulsion qui sont utilisés (second système), généralement à IGB. Les machines à rotor bobiné (double alimentation) nécessitent un rotor sensiblement plus complexe ainsi qu'un système triphasé de bagues et balais pour connecter les enroulements rotoriques au convertisseur.

Les problèmes d'usure et de maintenance associée pourraient conduire à préférer une solution à vitesse variable constituée d'une génératrice asynchrone à cage associée à un convertisseur de fréquence (figure 18), mais il ne semble pas qu'elle ait encore trouvé un débouché, sans doute pour des raisons économiques.

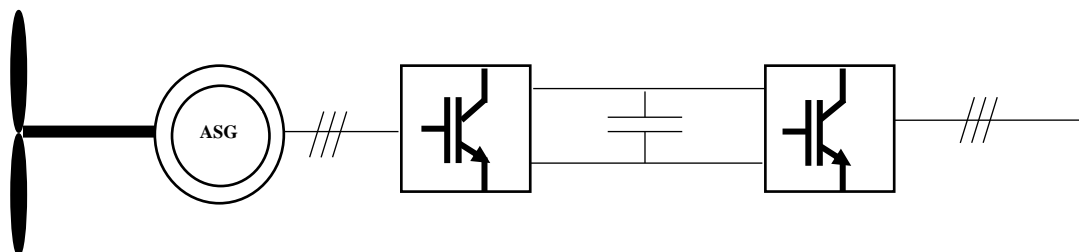


Figure 18: Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage et convertisseur de fréquence

- A **cage d'écureuil**. Le rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Alors les enroulements rotoriques ne sont pas accessibles. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à des condensateurs de compensation de la puissance réactive (Figure 19) et à un démarreur automatique à résistance ou à gradateur pour limiter l'appel de courant dans le régime transitoire au moment de la connexion avec le réseau électrique.

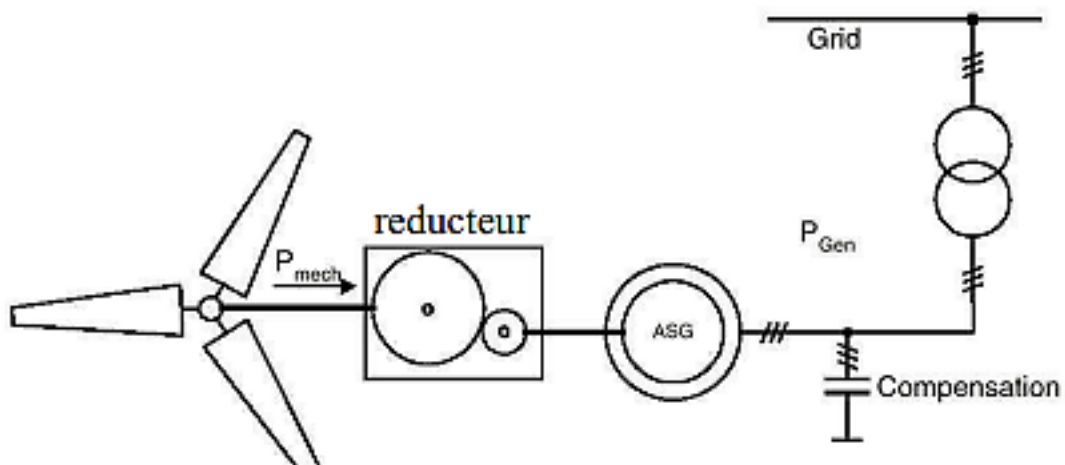


Figure 19: Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage [12]

- **Système en site isolé**

Certains sites, habitations ou autres, ne sont pas ou ne peuvent pas être reliés au réseau public de distribution d'électricité, car il est techniquement trop complexe d'étendre le réseau jusqu'à eux (en zone montagneuse, dans un village reculé ou parfois sur une île par exemple) ou parce que le coût d'une telle opération n'est pas financièrement supportable comparé à d'autres solutions existantes. Ces sites sont appelés « sites isolés ».

Ils peuvent alors être électrifiés par différents moyens autonomes. Parmi ces moyens, l'utilisation des aérogénérateurs avec un ou plusieurs groupes diesels. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice utilisée était de type asynchrone à cage d'écureuil, auto-amorcée par condensateurs. La solution la plus moderne consiste à utiliser, avant de transformer l'énergie en courant alternatif, un bus continu intermédiaire, ce dernier présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes d'énergies renouvelables et les batteries d'accumulateurs qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus.

La figure 20 ci-dessous montre la solution la plus utilisée pour associer l'aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents débitant à travers un pont de diodes triphasé sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique.

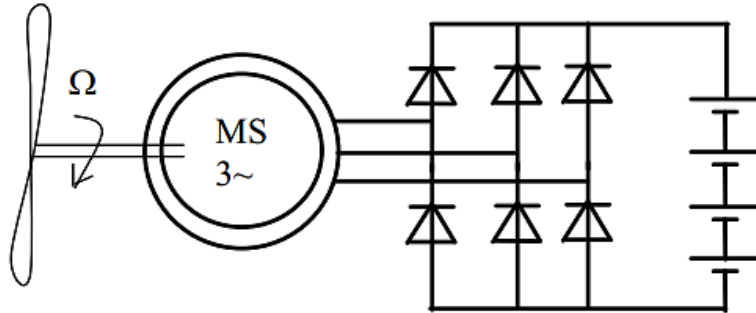


Figure 20: Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu [13]

3. Régulation mécanique de la puissance de l'éolienne

La turbine éolienne est dimensionnée pour produire, à partir d'une vitesse nominale de vent V_n , une puissance électrique nominale P_n . Pour des vitesses de vents supérieures à la vitesse nominale V_n , l'éolienne s'occupe de modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques, pour récupérer une puissance inférieure ou égale à la puissance nominale. Il existe d'autres grandeurs qui peuvent dimensionner la turbine éolienne :

- La vitesse du vent V_D à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie électrique.
- La vitesse maximale de vent V_M au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

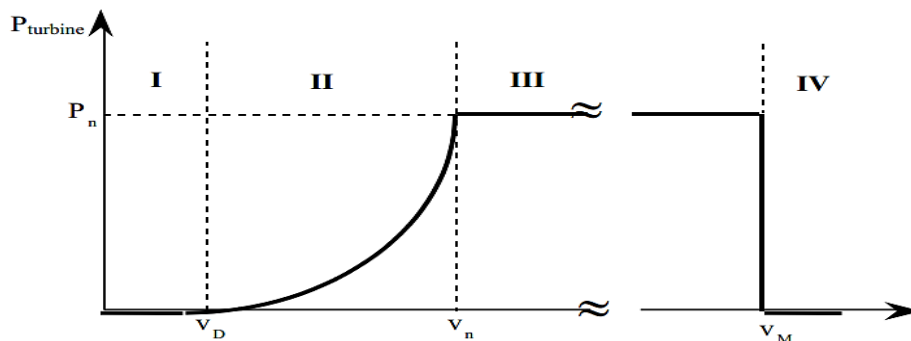


Figure 21: Diagramme de la puissance utile de la turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent.

La caractéristique de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent contient quatre zones [14] :

- la zone **I** : la vitesse du vent est nulle, donc la turbine ne produit aucune puissance ;
- la zone **II** : la vitesse du vent varie de V_D à la vitesse nominale V_n , alors la puissance produite par l'éolienne augmente jusqu'à atteindre sa puissance nominale P_n ;
- la zone **III**, grâce à un dispositif de régulation, la vitesse de rotation se maintient constante et égale à V_n , alors la puissance de sortie de la turbine éolienne reste égale à la puissance nominale P_n ;
- la zone **IV** : la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale V_M , alors le système arrête le fonctionnement et le transfert d'énergie.

VI. Moyens de stockage de l'énergie électrique

1. Batteries

Les batteries d'accumulateurs s'utilisent pour le stockage électrochimique d'énergie. Elles assurent une oxydoréduction pour fournir à la charge l'énergie électrique nécessaire. Les batteries d'accumulateurs sont caractérisées par deux points clés : la tension nominale en charge et la capacité C_{batt} (Ah). La durée de vie en nombre de cycle de charge et de décharge profonde et leurs énergies spécifiques permettent de juger efficacement si les batteries choisies sont adaptées à l'application recherchée. A ce jour, il existe trois familles de batterie : les accumulateurs *plomb-acide*, à base de *nickel* ou à base de *lithium* [15]. Les batteries peuvent s'adapter à des applications diverses, absorber les pics de puissance sur une courte durée et combler très rapidement un déséquilibre inattendu du réseau.

2. Super-condensateurs

Les super-condensateurs sont des condensateurs de très grande capacité, ils présentent une alternative efficace aux batteries [16]. Un super-condensateur est principalement constitué de collecteurs de courant (généralement en aluminium), d'électrodes (une anode et une cathode) généralement en charbon actif imprégnées d'un électrolyte organique ou aqueux, et d'un séparateur qui isole les deux électrodes l'une de l'autre. Les deux électrodes sont connectées à un collecteur d'électrons qui se charge dans le circuit électrique. Selon les

composantes chimiques employées dans sa conception, un super condensateur peut présenter une capacité de quelques farads à quelques milliers de farads.

3. Différences entre batteries et super-condensateurs

Comme une batterie, un super-condensateur transfère et stocke des ions. Sa base est également constituée d'un électrolyte, mélange d'ions positifs et négatifs. Dans le cas de la batterie, la charge et la décharge provoquent des réactions chimiques qui déplacent les ions de l'électrolyte vers l'intérieur ou l'extérieur de la structure atomique, entraînant un changement d'oxydation du matériau.

Dans un super-condensateur, c'est un champ électrique qui amène les ions à se déplacer vers ou depuis la surface des électrodes. Les ions se stockent et se déstockent sans aucune réaction chimique, rendant l'opération quasi immédiate. Un super-condensateur peut ainsi être chargé et déchargé infiniment plus rapidement qu'une batterie. Par comparaison, un véhicule électrique équipé d'un super-condensateur se charge, intégralement, en quelques secondes.

4. Super-condensateur vs batteries : avantages et inconvénients

Les avantages des super-condensateurs sur les batteries Lithium-Ion tiennent également à leur efficacité (98% contre entre 75 et 90%, grâce à une perte par chaleur minime), leur cyclabilité (nombre de cycle charge-décharge, compris entre 500 000 et 20 millions, contre environ 1 000 pour une batterie Lithium-Ion), une plus grande amplitude de température pour la charge et la décharge (de -40°C à +65°C), et leur sûreté. Avec un super-condensateur, aucun problème de décharge profonde, de risque de surcharge, d'emballement thermique ou d'explosion – contrairement à une batterie Lithium-Ion.

Mais les super-condensateurs ne sont pas encore la panacée du stockage. D'une part à cause de leur coût : même s'il a été divisé par 15 en 10 ans, le coût de stockage du kWh est environ 10 fois plus élevé que celui d'une batterie Lithium-Ion.

Mais leur principal défaut est leur faible capacité : à volume et masse égales, une batterie stocke 25 fois plus d'électricité qu'un super-condensateur classique. Pour autant, la recherche progresse, et la densité énergétique des derniers super-condensateurs commercialisés a été multipliée par 3, réduisant l'écart avec les batteries Lithium-Ion.

VI. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des sources d'énergies et les systèmes de production d'origine renouvelable. A travers le contexte énergétique dans le monde, nous avons présenté l'impact du COVID-19 sur le mix énergétique mondial, les systèmes d'énergies les plus utilisés, les causes du réchauffement climatique et les raisons d'avoir recours aux sources énergétiques vertes. Une présentation détaillée du système de production d'énergies renouvelables existantes, leurs exploitations et par la suite les moyens de stockage de l'énergie électrique. Puis nous avons étudié les chaînes de transformation des énergies solaires et éoliennes en électricité, et nous avons terminé notre chapitre par une petite conclusion. Le chapitre suivant aura pour objectif l'étude du problème de dimensionnement des systèmes d'énergies hybrides composés de panneau PV, éolienne, batterie et connecté avec le réseau électrique sous une demande de charge dynamique.

CHAPITRE 2

Dimensionnement d'un système d'énergie hybride en utilisant le modèle MILP

CHAPITRE 2

Dimensionnement d'un système d'énergie hybride en utilisant le modèle MILP

I.	Introduction.....	31
II.	Description des données météorologiques du site	32
1.	Traitement des données météorologiques disponibles	33
1.1.	Irradiation solaire globale	33
1.2.	Correction de la vitesse du vent avec l'altitude.....	35
2.	Modélisation d'une cellule PV	36
2.1.	Modèle à une diode.....	37
III.	L'optimisation linéaire en nombres entiers	38
2.2.	Application de la méthode MILP.....	38
1.1.	La fonction objective.....	39
1.2.	Les contraintes	39
III.	Coût actualisé de l'énergie (LCOE).....	42
IV.	Résultats et discussion	42
V.	Conclusion.....	47

I. Introduction

Au cours des dernières années, la demande mondiale d'énergie électrique a augmenté, plusieurs études ont porté sur la gestion rationnelle de la demande de charge afin de réduire la consommation d'énergie du réseau. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables est une caractéristique très importante, en plus de la raison économique, chaque structure doit prendre en compte la réduction des gaz à effet de serre et les problèmes environnementaux. À ce jour, plus de 1,5 milliard de personnes n'ont pas accès à l'électricité [17]. Les systèmes autonomes, qui utilisent des sources d'énergie renouvelables, sont une alternative fournissant de l'électricité aux sites isolés [18], [19], le principal avantage de ces systèmes c'est qu'ils sont moins chers que l'extension du réseau électrique. Le système d'énergie hybride offre de nombreux avantages, notamment le respect de l'environnement et le potentiel de croissance. En revanche, il pose de sérieux problèmes, en termes de coûts et de continuité de service. La combinaison de deux sources d'énergie hybrides ou plus apporte une solution optimale à ces problèmes en fournissant une électricité économique et fiable tout en répondant aux exigences écologiques. Ces dernières années, le système photovoltaïque a été largement utilisé pour électrifier les sites ruraux. Plusieurs travaux de recherche sur l'énergie renouvelable ont reçu une attention accrue, [20] et [21] ont présenté des techniques de simulation et d'optimisation des systèmes hybrides autonomes pour la production d'électricité. Les systèmes hybrides utilisant le système d'énergie renouvelable photovoltaïque et éolien sont de plus en plus utilisés [22], l'analyse et la comparaison des sources d'énergie ont attiré l'attention de plusieurs chercheurs au cours des dernières années [23]–[25]. Différentes méthodes d'optimisation des sources d'énergie renouvelables ont été utilisées [26], [27].

Dans [28], Diaf et al. Présentent une nouvelle méthodologie basée sur la simulation, pour dimensionner le système hybride en obtenant le nombre optimal d'équipements comportant des panneaux solaires et des éoliennes. Dans [29], les auteurs ont modélisé le système d'énergie hybride panneaux solaires - éoliennes à l'aide d'un programme linéaire mixte en nombres entiers (MILP). Dans [30], les auteurs ont utilisé la programmation linéaire en nombres entiers pour l'optimisation d'un réseau d'éoliennes, sans prendre en considération l'incertitude sur les données. Dans [31], l'objectif est de déterminer les types et le nombre d'éolienne et son emplacement, afin d'optimiser le coût d'installation et de fonctionnement et l'énergie produite. Dans [32], un système d'énergie hybride constitué par des panneaux solaires, des éoliennes et des batteries est étudié par une méthode heuristique afin de trouver le nombre optimal d'équipements à installer.

Dans ce chapitre, nous cherchons à optimiser un système d'énergie hybride composé de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes, de batteries et connecté au réseau électrique. Il s'agit de déterminer le nombre optimal des composants à installer afin de répondre à la demande avec un coût minimum. Le résultat final est calculé en se basant sur un certain nombre de contraintes exprimées sous forme d'égalités et d'inégalité. Le coût actuel net est calculé en fonction des coûts du système et de la valeur des revenus pendant la durée de vie du projet.

L'utilisation du réseau électrique assure la continuité de service en alimentant les charges électriques en cas d'insuffisance du système solaire-éolien, toutefois son utilisation est très onéreuse. L'étude porte sur les conditions météorologiques d'irradiation solaire et de la vitesse du vent d'une année. Afin de prendre en compte l'influence des variations saisonnières d'ensoleillement, la vitesse du vent et la demande sur la production du système hybride.

La contribution principale de la méthodologie proposée porte sur deux points : le premier nous présentons un problème d'actualité. Le deuxième, nous proposons une formulation mathématique qui combine le nombre de panneaux, l'éolienne, la batterie et l'achat d'énergie du réseau.

Le reste de ce chapitre est présenté comme suit : une présentation générale de la méthode MILP est donnée dans la section 2. Dans la section 3, nous présentons une analyse économique, qui prend en compte le coût actuel net et le coût nivelé de l'énergie. Les résultats et la discussion sont présentés dans la section 4. La conclusion tirée de ce chapitre est donnée dans la section 5.

II. Description des données météorologiques du site

Pour faire une étude réaliste du système hybride solaire-éolien, il est nécessaire d'utiliser des données météorologiques mesurées sur une longue durée avec un pas de temps suffisamment fin, afin de prendre en compte les déphasages entre les différentes sources d'énergies hybrides et aussi entre la production et la consommation.

Les données météorologiques utilisées dans cette étude concernent :

- L'ensoleillement horaire global sur un plan incliné (G , Wh/m²) ;
- La vitesse de vent mesurée à une hauteur de 10 m (m/s) ;
- La température ambiante (°C) ;

Les données météorologiques annuelles utilisées dans cette étude ont été téléchargées à partir du logiciel Météonorm.

1. Traitement des données météorologiques disponibles

Les données météorologiques mesurées se convertissent en données utiles afin de prendre en considération l'inclinaison des panneaux solaires par rapport à l'horizontale et la hauteur du mat des éoliennes.

1.1. Irradiation solaire globale

La majorité des modules solaires photovoltaïques sont inclinés afin d'augmenter la quantité d'irradiation reçue. Le rayonnement total reçu sur une surface, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairement énergétique global), est défini par l'équation (2.1) :

$$G_G = G_{dir} + G_{dif} + G_{réf} \quad (2.1)$$

- G_{dir} est l'irradiation directe, provenant directement du soleil. Cette composante s'annule si le soleil est caché par des nuages ou par un obstacle.
- G_{dif} est l'irradiation diffuse qui correspond au rayonnement reçu de la voûte céleste, hors rayonnement direct. Cette énergie diffusée par l'atmosphère et dirigée vers la surface de la Terre, peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, et 100 % pour un ciel entièrement couvert.
- $G_{réf}$ est l'irradiation réfléchie qui correspond au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé "albedo".

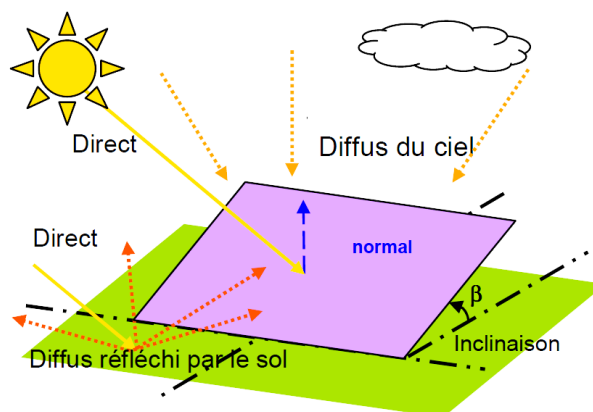


Figure 22: Irradiation solaire globale sur une surface inclinée

La méthodologie la plus utilisée pour la mesure du rayonnement solaire est celle du rayonnement global sur une surface horizontale. Cette méthodologie consiste principalement à déterminer l'irradiation diffuse horizontale à partir d'irradiation globale horizontale, ensuite de les combiner afin d'obtenir l'irradiation solaire globale horaire sur un plan incliné.

Etape I : calcul d'irradiation solaire diffuse :

L'irradiation solaire diffuse est donnée par l'équation (2.2) suivante :

$$\begin{cases} f = 0.995 - 0.081M_T & \text{si } M_T \leq 0.21 \\ f = 0.724 + 2.738M_T - 8.32M_T^2 + 4.967M_T^3 & \text{si } 0.21 \leq M_T \leq 0.76 \\ f = 0.180 & \text{si } M_T > 0.76 \end{cases} \quad (2.2)$$

Avec M_T est le rapport d'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal et l'irradiation hors atmosphère.

Etape II : calcul d'irradiation globale inclinée à partir d'irradiation globale et diffuse horizontales [33]:

L'irradiation globale inclinée est exprimée par l'équation (2.3) et (2.4) :

$$G_b = G - G_{dif} \quad (2.3)$$

Avec, G_b : l'irradiation globale inclinée.

G : l'irradiation globale.

$$G_{b,\beta} = G_b \times \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (2.4)$$

Avec, θ et θ_z représentent respectivement l'angle d'incidence et zénithal.

L'irradiation solaire $G_{réf,\beta}$ se calcul en utilisant l'équation (2.5) suivante :

$$G_{réf,\beta} = \frac{1}{2} \rho G (1 - \cos\beta) \quad (2.5)$$

Où, ρ , représente le coefficient de réflexion de la lumière diffuse du sol et β , l'inclinaison du champ PV, $\rho = 0.2$ et $\beta = 27^\circ$.

L'estimation d'irradiation diffuse sur un plan incliné est obtenue en utilisant le modèle de Klucher, l'équation (2.6) présente sa formule [34]:

$$G_{dif,\beta} = G_{dif} \left[0.5 \left(1 + \cos \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \right] \left[1 + F \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \left[1 + F \cos^2(\theta) \sin 3(\theta_z) \right] \quad (2.6)$$

$$\text{Avec, } F = 1 - f^2 \quad (2.7)$$

1.2. Correction de la vitesse du vent avec l'altitude

La vitesse du vent augmente avec l'altitude [35]. La formule de conversion de la vitesse du vent à 10 m (V_{10}) en vitesses à la hauteur de moyeu h (V_h) est exprimée par l'équation (2.8) suivante :

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^{\alpha_j} \quad (2.8)$$

Avec, α_j est le coefficient de correction qui dépend de la nature du site (égale à 0.15 dans cette étude). Le tableau 1 présente les valeurs habituelles du coefficient de correction.

Tableau 1: Valeurs habituelles du coefficient de correction

Nature du terrain	α_j
Surface de l'eau	0.1
Plaine herbeuse	0.15
Cultures agricoles	0.2
Végétation avec peu d'arbres	0.2
Bois	0.25
Plusieurs bâtiments	0.25
Terrain accidenté, montagneux	0.25

1.2.1. Distribution de Weibull de la vitesse du vent

Les distributions de densité de probabilité de la vitesse du vent quotidiennes, mensuelles, saisonnières et annuelles sont modélisées à l'aide de la loi de Weibull.

Le modèle de Weibull peut être utilisé avec une précision acceptable pour la prédiction de la production d'énergie éolienne requise pour conception préliminaire et évaluation de centrales éoliennes [36].

La variation de la vitesse du vent est le plus souvent décrite par le modèle de Weibull avec deux paramètres, le paramètre de forme de Weibull, sans dimension, et le paramètre d'échelle. La fonction de Weibull est donnée par la formule suivante [37] :

$$f(V) = \left(\frac{k}{c} \right) \cdot \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{c} \right)^k} \quad (2.9)$$

Avec,

$f(V)$: Probabilité d'observer la vitesse du vent V ;

V : Vitesse du vent en (m/s) ;

C : Paramètre d'échelle de Weibull (m/s) ;

k : Paramètre de forme de Weibull ;

La fonction de distribution cumulée correspondante est donnée par [37], [38] :

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (2.10)$$

La vitesse moyenne du vent \bar{V} est déterminée à l'aide de l'équation suivante [39], [41], [37] :

$$\bar{V} = C\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.11)$$

\bar{V} : est la vitesse du vent en (m/s)

Où la fonction gamma standard est donnée par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (2.12)$$

La fonction gamma utilisée par J.F. Manwell et al. [40] citant Jamil [39] est donné par :

$$\Gamma(x) = (\sqrt{2\pi x})(x^{x-1})e^{-x}\left(1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{139}{51840x^3} + \dots\right) \quad (2.13)$$

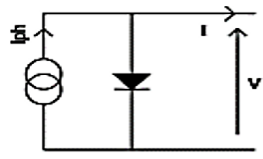
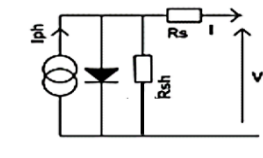
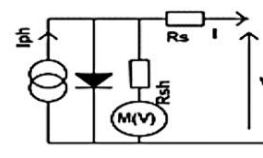
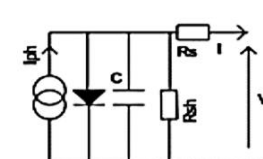
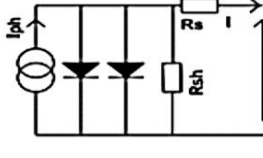
2. Modélisation d'une cellule PV

La modélisation mathématique des phénomènes physique est une étape très importante dans le dimensionnement du système d'énergie hybride, elle permet de caractériser le comportement du système solaire et éolien, depuis les organes de captation jusqu'à la restitution d'énergie.

La conception du système d'énergie et l'évaluation de fonctionnement du module photovoltaïque sont basées sur la caractéristique électrique courant-tension des modules photovoltaïques sous différentes températures et différents niveaux de rayonnement. La modélisation des cellules et des modules photovoltaïques s'effectue à l'aide des équations qui produisent différents degrés d'approximation du dispositif réel.

Plusieurs modèles des cellules photovoltaïques ont été étudiés dans la littérature. Chaque modèle présente principalement une amélioration du modèle idéal qui se compose d'un générateur de courant représentant la puissance solaire incidente et une diode représentant la jonction PN. Les modèles les plus courants sont présentés et comparés dans le tableau 2.

Tableau 2: Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque

Modèle	Schéma	Nombre de paramètres	Précision
Idéal		3	Faible
Une diode		5	Bonne
Bishop		8	Bonne
Dynamique à Une diode		6	Bonne
Deux diodes		7	Très Bonne

Le modèle à diode unique est le modèle le plus utilisé, en raison de sa précision et de sa simplicité. L'évolution du modèle à une seule diode a conduit à des modèles plus précis tels que le modèle de Bishop. Le modèle à deux diodes prend en considération les mécanismes de recombinaison dans les différents composants électriques du circuit [42] et les pertes résistives, ce qui permet d'améliorer les performances du modèle à une diode

2.1.Modèle à une diode

La formulation mathématique d'un modèle à diode unique est donnée par l'équation (2.14) [42]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{A.K.T}(V + R_s \cdot I)\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.14)$$

I_{ph} : est le courant fournie par le panneau solaire. Il est généré par les photons et varie linéairement avec l'ensoleillement et la température.

I_0 : est le courant de saturation inverse de la diode, il dépend principalement de la température de la cellule photovoltaïque, des caractéristiques du semi-conducteurs et du nombre de cellules PV mise en série.

R_S : est la résistance série des cellules photovoltaïques.

R_{Sh} : est la résistance shunt, elle est associée à une perte d'un petit courant de fuite à travers un chemin résistif en parallèle avec le dispositif intrinsèque.

A : facteur d'idéalité de la diode (1 à 2).

K : Constante de Boltzman ($K=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$).

T : est la température de cellule en Kelvin (K)

q : charge d'un électron ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

III. L'optimisation linéaire en nombres entiers

La programmation linéaire mixte en nombres entiers (en anglais Mixed-Integer Linear Programming ; MILP) est construite sur la base de la méthode du Simplex de Dantzig. Il existe deux types de variables dans le modèle mathématique, continues et discrètes. Les variables continues peuvent prendre n'importe quelle valeur réelle numérique, tandis que les variables discrètes ne prennent que des valeurs entières. MILP (également connu sous le nom de MIP) ajoute essentiellement des variables qui prennent seulement 0 ou 1. Ces variables sont également appelées variables binaires.

1. Application de la méthode MILP

Le modèle MILP utilise le modèle mathématique de la fonction objective et des contraintes présentées sous formes d'égalités ou d'inégalités linéaires pour optimiser le dimensionnement du système d'énergie hybride. Dans ce travail, les solutions du modèle MILP seront le nombre des éoliennes L_1 , des panneaux solaires L_2 , des batteries L_3 et la puissance fournie par le réseau électrique L_i . Les données d'entrée du modèle MILP sont stockées dans un vecteur, leurs valeurs sont définies dans l'un des N intervalles.

NB : Il y'a 1440 min dans une journée, en choisissant 288 intervalles, alors nous aurons 5 min dans chaque intervalle de discrétisation.

1.1. La fonction objective

La fonction objective est exprimée en fonction des coûts d'exploitation et de maintenance de l'éolienne, du panneau photovoltaïque, de la batterie et de la quantité d'énergie fournie par le réseau publique, elle est représentée par une fonction linéaire qui dépend de $L_1, L_2, L_3, \dots, L_{n+3}$ variables, la fonction objective est définie par l'équation (2.15) :

$$\text{Fonction objective} = C_{wtO\&M} \times L_1 + C_{pvO\&M} \times L_2 + C_{BO\&M} \times L_3 + \sum_{i=4}^{n+3} C_{Net} \times L_i \quad (2.15)$$

Avec,

$C_{wtO\&M}$: est le coût unitaire d'exploitation et de maintenance d'une éolienne ;

$C_{pvO\&M}$: est le coût unitaire d'exploitation et de maintenance d'un panneau photovoltaïque ;

$C_{BO\&M}$: est le coût unitaire d'exploitation et de maintenance d'une batterie ;

C_{Net} : est l'énergie achetée du réseau électrique.

1.2. Les contraintes

Les variables de décision et les données doivent satisfaire certaines contraintes technologiques, économiques et géométriques. Mathématiquement, ces contraintes sont exprimées par des égalités et inégalités linéaires.

2. Absorption d'énergie

Avec l'hypothèse que l'énergie ne peut être achetée que par le réseau public, alors la valeur d'énergie doit être toujours positive (comme présenté dans l'équation (2.16)).

$$L_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, n + 3 \quad (2.16)$$

3. Équilibre entre la production et la consommation

Dans le $i^{\text{ème}}$ intervalle du temps, la quantité d'énergie produite et demandée doivent respecter l'équation (2.17) suivante :

$$(P_{wt}(i) \times L_1 + P_{pv}(i) \times L_2 + P_B(i) \times L_3) \times \frac{m}{N} + L_{i+3} = P_L(i) \times \frac{m}{N} \quad (2.17)$$

Avec,

m : le nombre de minutes dans une journée (1440);

N : le nombre de discrétisation de l'intervalle de temps m (96);

$P_{wt}(i)$ et $P_{pv}(i)$ sont respectivement la puissance produite par la turbine éolienne et le panneau solaire ;

$P_B(i)$: puissance des batteries d'accumulateurs ;

$P_L(i)$: puissance demandée par les charges résidentielles.

4. Contraintes économiques

Les coûts des éoliennes, des panneaux solaires et des batteries ne doivent pas dépasser une certaine limite (comme présenté dans l'équation (2.18)). L'expression mathématique est une inégalité linéaire qui fait intervenir L_1 , L_2 , L_3 et L_{i+3} la contrainte économique a pour objectif de garantir que le coût d'installation ne dépasse pas un budget fixe :

$$C_{wt} \times L_1 + C_{PV} \times L_2 + C_B \times L_3 + L_{i+3} \leq Budget \quad (2.18)$$

Avec,

C_{wt} , C_{PV} et C_b sont respectivement, le coût de l'éolienne, du panneau photovoltaïque et de la batterie.

5. Contraintes géométriques

Ces contraintes se réfèrent à certains détails géométriques. En ce qui concerne la turbine éolienne et le panneau solaire, une contrainte se pose en raison de la surface du sol disponible pour l'installation de l'éolienne et du panneau. Les équations (2.19) et (2.20) présentent respectivement la contrainte de l'éolienne et du panneau solaire :

$$L_1 \cdot A_{wt} \leq A_{wt_m} \quad (2.19)$$

$$L_2 \cdot A_{PV} \leq A_{PV_m} \quad (2.20)$$

A_{wt} et A_{PV} sont respectivement la surface de l'éolienne et du panneau PV, A_{wt_m} , A_{PV_m} sont respectivement la surface maximale disponible pour l'installation de l'éolienne et du panneau solaire. La figure 24 résume le principe de fonctionnement de la méthode proposée.

Le tableau suivant présent les paramètres de la méthodologie proposée :

Tableau 3: "SITE" localisation et données caractéristiques.

Latitude [°]	35,46
Longitude [°]	5,47
L'altitude par rapport au niveau de la mer [m]	20
Vitesse moyenne du vent [m/s]	13,8
Surface disponible pour la centrale éolienne [m ²]	15
Surface disponible pour la centrale PV [m ²]	8000
Angle d'inclinaison des panneaux solaires [β]	16
Coefficient de réflexion	0.13

Tableau 4: Coefficients de la fonction objective

	Système PV	Système éolien
Coûts quotidiens d'exploitation et de maintenance [DH/kW]	0,532	1,064

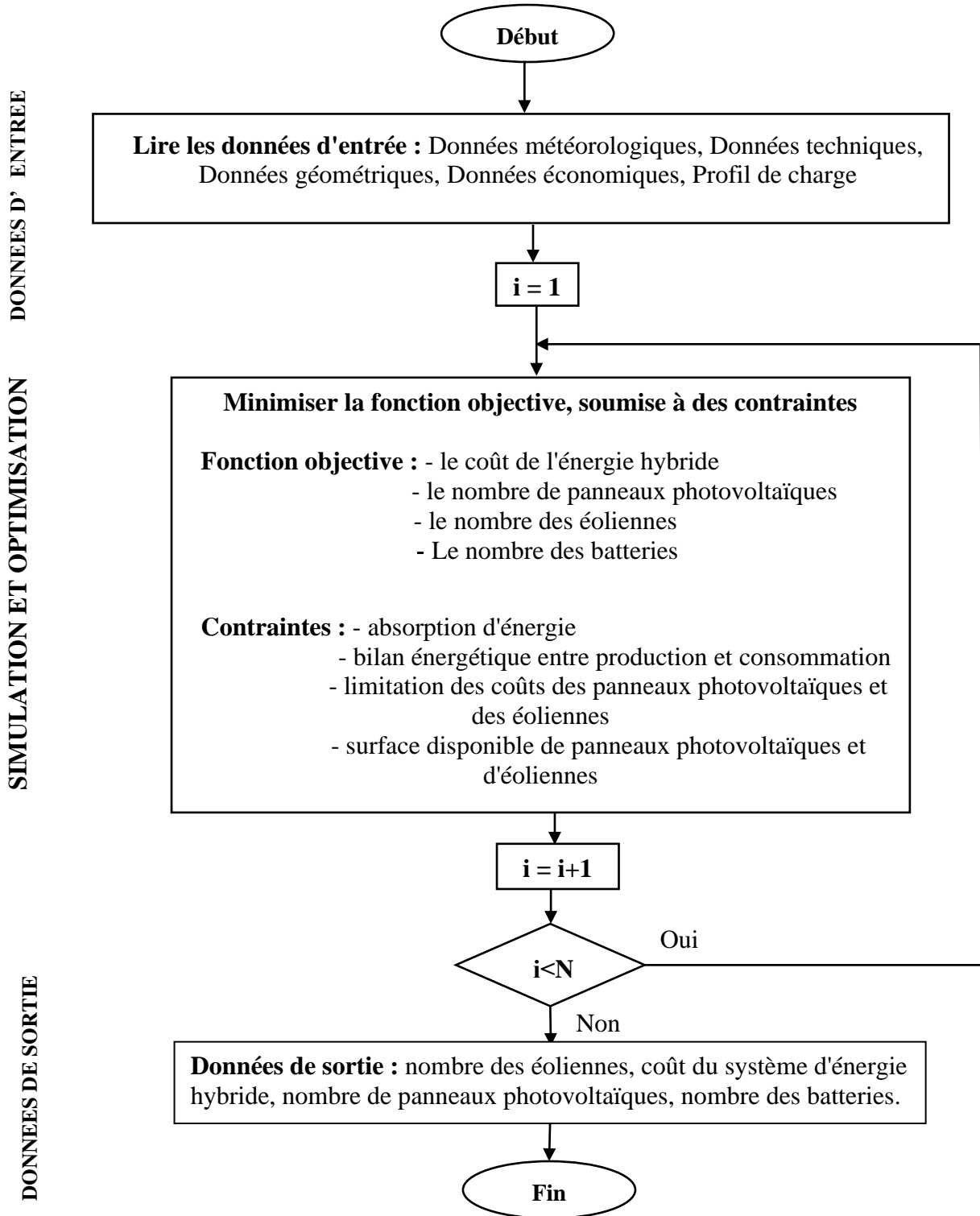


Figure 24: Principe de fonctionnement de la méthode MILP

III. Coût actualisé de l'énergie (LCOE)

Le LCOE ou PMA (Prix Moyen Actualisé) correspond au coût de production moyen de l'électricité sur la durée de vie du projet. Son calcul tient compte de l'investissement initial, du taux d'actualisation, ainsi que des coûts d'exploitation et de maintenance [43]. L'équation (2.21) présente son expression.

$$LCOE = \left(\frac{\text{Coût du projet}}{\text{Energie produite}} \right) = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n E_t} \quad (2.21)$$

Avec ;

I_t : Coût d'investissement

M_t : Coûts Exploitation et Maintenance

E_t : Energie annuelle produite

n: Durée de vie du projet

r: Taux d'actualisation

IV. Résultats et discussion

Cette section est consacrée aux discussions des résultats de la méthodologie proposée, elle a été appliquée pour dimensionner et optimiser un système d'énergie hybride connecté au réseau afin de terminer le nombre optimal des panneaux photovoltaïque PV, des éoliennes et des batteries. Les tableaux 5, 6 et 7, montrent les performances économiques et techniques des composants du SEH. Les simulations ont été exécutées en utilisant les données horaires, de chaque saison, de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et de la température ambiante du site.

La puissance moyenne des charges résidentielles égale à 21.5 KW.

La durée de vie du système est 25 ans. Le site choisi est situé à l'environ de 15 km à l'EST de Tanger, c'est un important site dans la région de Tanger-Tétouan-Al Hoceima, les figures 22 et 23 montrent la vitesse horaire du vent et le rayonnement solaire incliné du site.

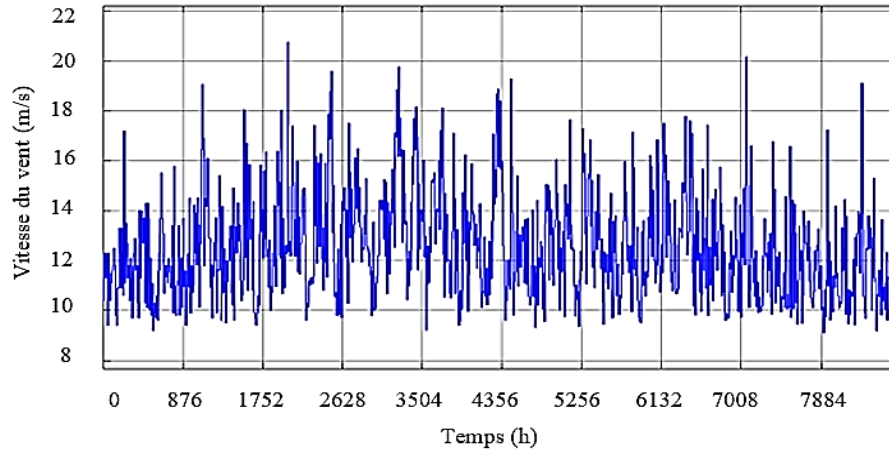


Figure 25: Vitesse horaire du vent

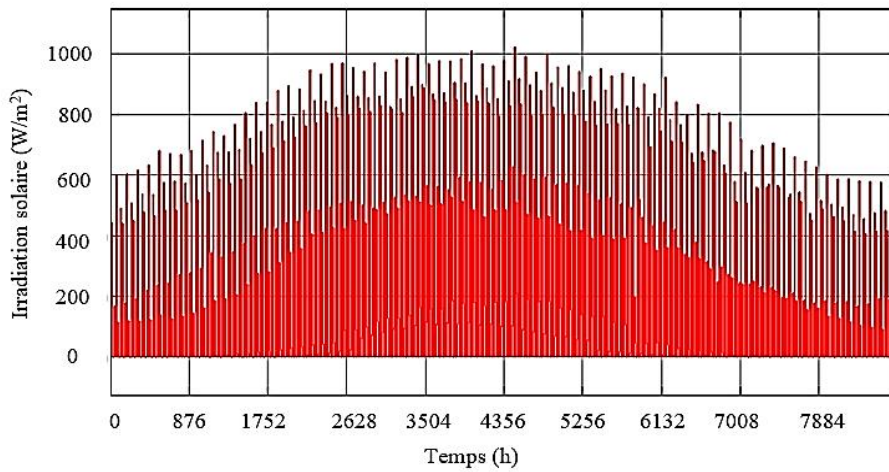


Figure 26: Irradiation solaire du site

Tableau 5: Caractéristique du panneau solaire

Caractéristiques	Valeurs
Puissance maximale (W)	249.86
Tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	37.6
Tension au Point de puissance maximale V_{mp} (V)	31
Coefficient de température de V_{oc} (%/°C)	-0.35
Nombre des cellules par module	60
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	8.55
Courant au point de puissance maximal I_{mp} (A)	8.06
Coefficient de température de I_{sc} (%/°C)	0.06
R_{sh} (Ω)	301.8
R_s (Ω)	0.247
Coût (DH)	2318

Tableau 6: Caractéristique de la batterie

Capacité nominale (Ah)	Tension nominale (V)	Coût (DH)
200	12	2819

Tableau 7: Caractéristique de l'éolienne

V_{ci} (m/s)	V_r (m/s)	V_{co} (m/s)	P_r (w)	Tension de sortie (V)	Coût (DH)
2.5	14	25	5000	48	61 881

Le nombre d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques, de batteries et la quantité d'énergie fournie par le réseau électrique sont les paramètres essentiels de ce problème. Le programme a été codé en utilisant Cplex et Matlab. Le premier objectif de cette méthode est la minimisation du coût actuel total, du coût d'exploitation et de maintenance, du coût de remplacement et de la quantité d'énergie donnée par réseau électrique, Le deuxième objectif est l'optimisation du nombre de composants du système hybride.

Les résultats d'optimisation des quatre saisons de l'année sont rapportés dans les figures 24 à 27, chaque série de chiffres étant pertinente pour les quatre saisons.

La figure 27 montre que pendant la saison hivernale, l'éolienne produit une quantité importante d'énergie nécessaire au system d'énergie hybride. En effet, pendant la saison d'hiver, une faible production PV est attendue. Sur la base de l'optimisation, l'utilisation de quatre éoliennes et vingt panneaux solaires est la solution proposée.

La figure 28 montre le profil énergétique de la saison du printemps. L'énergie produite par la centrale photovoltaïque augmente par rapport à l'hiver, ce qui justifie la diminution de l'énergie demandé par le secteur. Dans ce cas l'utilisation de quatre turbines éoliennes et 16 panneaux solaires est nécessaire. Au cours de cette saison, la vitesse moyenne du vent a été augmenté de 12.6 m/s à 14.9 m/s.

Les conditions météorologiques les plus favorables sont présentées dans la saison d'été (Figure 29), ce qui implique une réduction dans le nombre des panneaux solaires (14 panneaux) et de la quantité moyenne d'énergie fournie par le réseau publique. La quantité moyenne d'énergie fournie par le réseau est diminuée à 0.12 KWh

Dans la saison d'automne, comme présenté dans la figure 30, la production des panneaux photovoltaïques est très faible par rapport aux turbines éoliennes, ce qui implique l'augmentation du nombre de panneaux solaires à installer (20 panneaux). La vitesse moyenne du vent enregistrée est de 13,5 m/s.

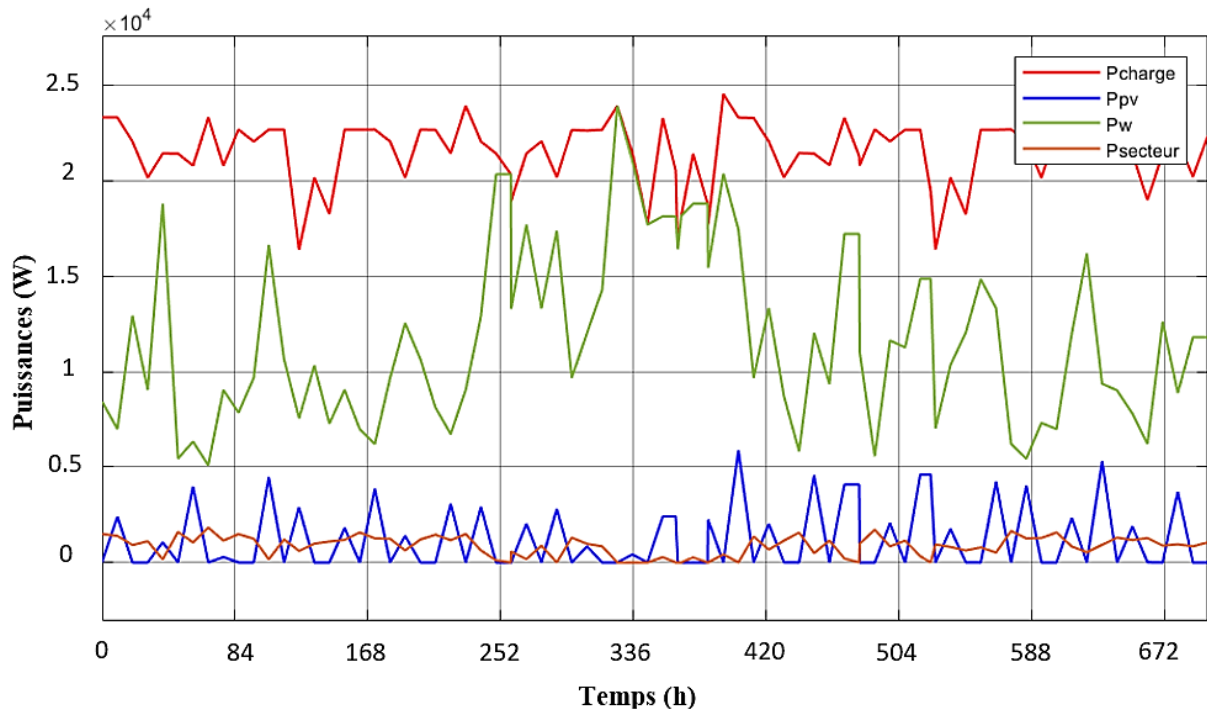


Figure 27: Résultats de simulation du mois Janvier

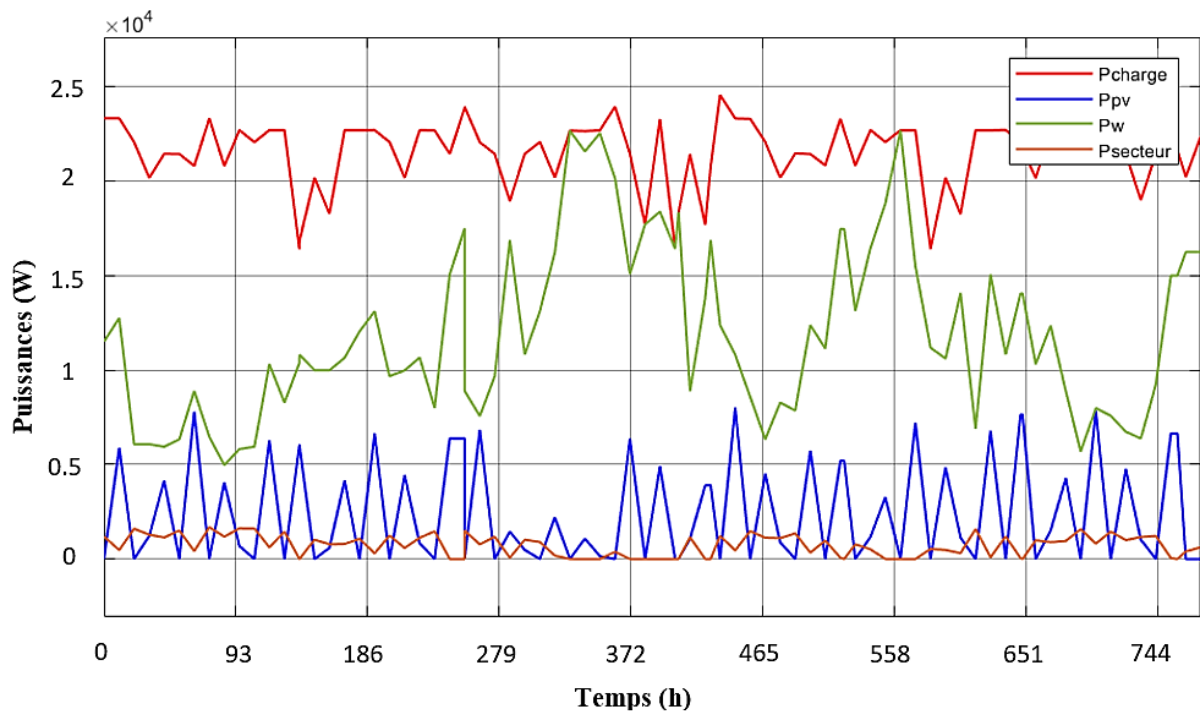


Figure 28: Résultats de simulation du mois Mai

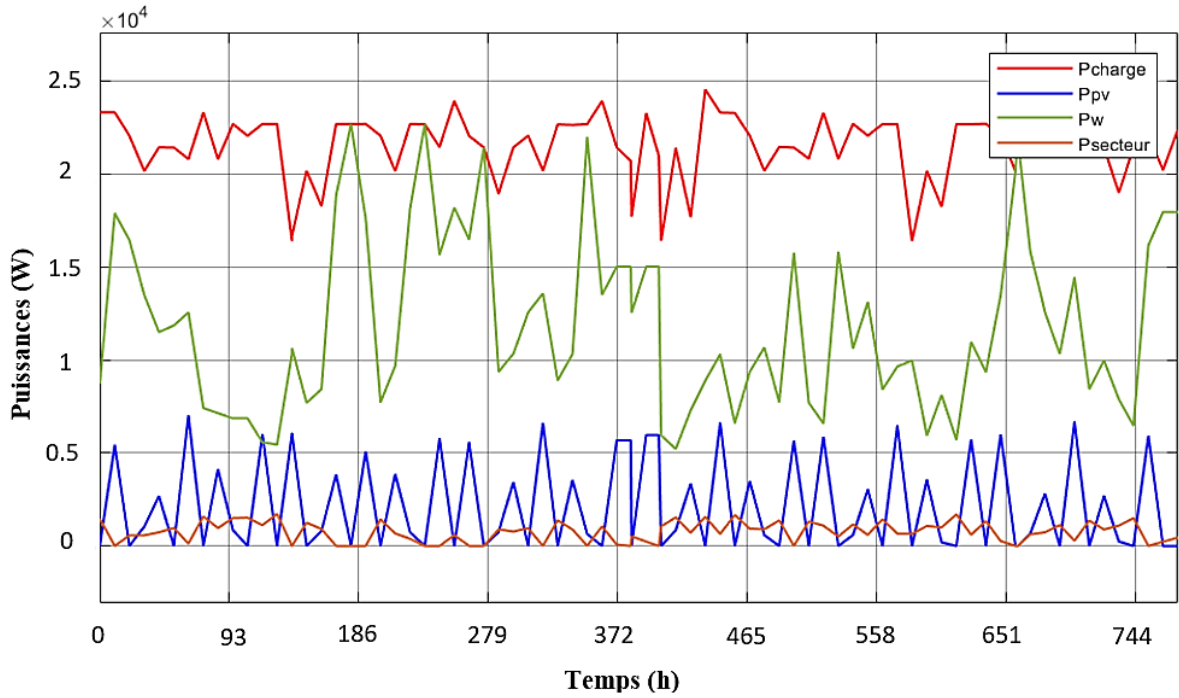


Figure 29: Résultats de simulation du mois Juillet

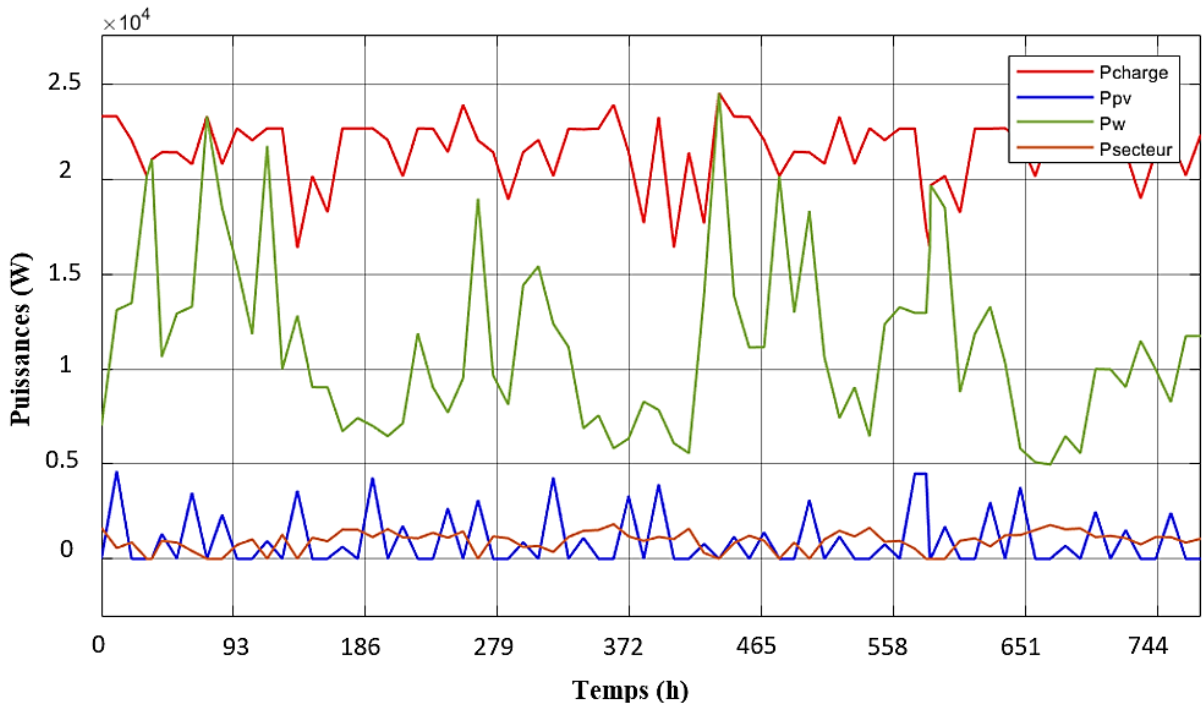


Figure 30: Résultats de simulation du mois Décembre

Le tableau 8 rapporte les principaux résultats obtenus pour chaque saison : Janvier pour l'hiver, Mai pour le printemps, Juillet pour l'été et Décembre pour l'automne. Les coûts associés aux SER sont également présenté.

Tableau 8: Résultats d'optimisation des mois Janvier, Mai, Juillet et Décembre

	Janvier	Mai	Juillet	Décembre
Nombre de turbine de 5 KW	4	4	4	4
Nombre de panneau de 250 W	20	16	14	20
Dépense journalière de l'achat d'énergie sans système d'énergie hybride [DH]	505,68	505,68	505,68	505,68
Dépense journalière optimisée pour l'achat d'énergie [DH]	47,04	45,3	46,02	50,15
Dépense journalière totale optimisée [DH]	458,64	460,38	459,66	455,53
Revenus mensuels [DH]	14 217,84	14 271,78	14 249,46	14 121,43
Coûts quotidiens d'exploitation et de maintenance du système éolien [DH]	10.53	10.53	10.53	10.53
Coûts quotidiens d'exploitation et de maintenance du système solaire [DH]	0	52.67	52.67	73.74

V. Conclusion

Une procédure basée sur une formulation de la méthode MILP a été proposée pour déterminer le nombre optimal des panneaux solaires, des éoliennes et des batteries en se basant sur la connaissance de la puissance demandée par les charges et les conditions météorologiques du site. Une optimisation mensuelle et saisonnière de la production renouvelable a été réalisée, la méthode proposée a été appliquée à des charges résidentielles. Les résultats d'optimisation ont montré l'utilité et les avantages de la méthodologie testée que ce soit pour la disponibilité du SER ou pour les objectifs économiques. A travers les résultats trouvés, nous remarquons que les panneaux solaires produisent une quantité d'énergie faible par rapport aux éoliennes, pour cela nous avons consacré le chapitre 3 à la maximisation de la puissance produite par les panneaux solaires.

CHAPITRE 3

Nouvel optimiseur du point de puissance maximal

CHAPITRE 3 :

Nouvel optimiseur du point de puissance maximal

I. INTRODUCTION	51
II. MODÉLISATION DU PANNEAU PV	53
1. Le module photovoltaïque	53
2. Influence de la température et de l'irradiation	55
III. LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE	57
1. Les essaims de particules	57
1.1. Présentation	57
1.2. Essaim	57
1.3. Le voisinage	58
1.4. Version standard de l'algorithme de l'optimisation par essaim de Particules	58
2. Algorithme génétique	61
2.1. Présentation des algorithmes génétiques (AGs)	61
2.2. Opérateurs d'algorithmes génétiques	62
3. La nouvelle méthodologie PSOAG	65
IV. RESULTATS ET DISCUSSION	68
V. Conclusion	72

I. INTRODUCTION

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes ; elle se produit à base de panneaux photovoltaïques, qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur. Il existe généralement trois types de systèmes photovoltaïques, des systèmes autonomes qui sont généralement utilisés dans des zones éloignées et isolées du réseau électrique, ils fonctionnent d'une façon autonome sans avoir besoin d'autres sources d'énergie. Le deuxième type est le système hybride, qui combine au moins deux ou trois sources d'énergie avec une ou plusieurs sources conventionnelles. Les systèmes d'énergie hybride sont généralement autonomes et souvent utilisés dans des endroits éloignés. Le troisième type concerne les systèmes de production connectés au réseau, dont la production est plus proche des lieux de consommation. L'avantage principal de ce type de système c'est qu'il réduit la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de distribution et de transport. Ils produisent l'énergie nécessaire à la demande de charge et acheminent le surplus d'énergie vers le réseau électrique.

Depuis toujours, les utilisateurs des panneaux photovoltaïques cherchent à maximiser leurs productions, qui sont disponibles en richesse sur toute la surface terrestre, malgré le pourcentage de perte au niveau de l'atmosphère, une quantité importante atteint la surface du sol. Les rayonnements solaires reçus au niveau du sol terrestre dépendent de plusieurs paramètres :

- latitude, la hauteur et l'altitude de la surface terrestre,
- la nature, l'orientation et l'inclinaison de la surface du sol,
- la période de l'année et l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

Pour optimiser le fonctionnement des panneaux solaires, le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) s'utilise en conjonction avec le convertisseur de puissance. L'objectif principal du MPPT est de maximiser la puissance fournie par les panneaux solaires. Cependant, du fait de l'instabilité des conditions météorologiques, la courbe caractéristique $P - V$ présente un point où la puissance fournie par les panneaux solaires est maximale (MPP), ce qui nécessite un algorithme de suivi de la puissance fournie par le panneau solaire. À ce jour, différentes techniques de recherche du MPP ont été proposées [44]–[50]. Chaque technique peut être classée selon sa variable de contrôle : courant, tension ou rapport cyclique. Deux méthodes sont basées sur le courant et la tension. La première est la méthode de perturbation et d'observation (P&O) qui consiste à perturber la tension du panneau solaire et observer l'impact de ce

changement sur sa puissance de sortie. La méthode P&O [51] se rapproche d'un rapport cyclique constant, ce qui influence sa précision et par conséquent, la puissance trouvée serait inférieure au MPP réel.

Une autre technique de MPPT est la conductance incrémentale (CI), qui est basée sur la mesure des changements incrémentiels du courant et de la tension du générateur photovoltaïque pour prédire l'effet du changement de tension suivi du point de puissance maximum [52], [53]. Cette méthode présente les mêmes problèmes de la méthode P&O. Plusieurs améliorations de cette dernière méthode ont été proposées, les auteurs de [54] ont amélioré le problème des oscillations au niveau du point de puissance maximale mais, la vitesse de suivi diminue considérablement, au moment des fluctuations rapides des conditions météorologiques du site.

La troisième technique MPPT est la méthode Hill Climbing (HC) ou méthode de contrôle direct qui est basée sur le contrôle de l'élévation de la courbe de puissance par rapport à la tension inférieure au point de puissance maximum et de la chute au-dessus de ce point. Cette méthode fonctionne sur le même principe que la méthode P&O, mais au lieu de perturber le courant ou la tension, elle perturbe le cycle de service du convertisseur de puissance. Cependant, la méthodologie HC présente également les mêmes inconvénients que la méthode P&O et HC.

Afin de surmonter les inconvénients des méthodes ci-dessus, une approche d'intelligence artificielle a été utilisée pour suivre le point de puissance maximale du panneau solaire comme le contrôleur à logique floue (CLF) [54] et le réseau neuronal (RN) [51] qui sont très efficaces pour piéger le MPPT, mais ils nécessitent un calcul approfondi. Par exemple, CLF doit gérer le mécanisme d'inférence, la fuzzification, le stockage de la base de règles et les opérations de défuzzification. Pour RN, le nombre de paramètres nécessaires à la formation est une contrainte majeure.

Une nouvelle méthodologie de la recherche du MPPT sera présentée dans ce chapitre, elle combine les trois méthodes d'optimisation : P&O, algorithme génétique et la méthode PSO afin de gérer les paramètres du contrôleur PID. La rentabilité et l'efficacité de cette méthodologie ont été étudiées avec succès. En faisant une étude des résultats de la méthode PSOAG, PSO et AG.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord la modélisation des panneaux solaires photovoltaïques et l'influence de la température et d'irradiation solaire sur leurs fonctionnements. Par la suite, quelques méthodes de recherche du point de puissance maximale sont exposées, un nouvel algorithme MPPT basé sur la combinaison des trois méthodes PSO, AG et P&O a été proposé, afin de minimiser les oscillations en régime permanent du point de

fonctionnement d'un générateur photovoltaïque en stabilisant la tension de sortie de ce générateur, et en améliorant les performances de la méthode P&O surtout durant les variations rapides des conditions climatiques. L'évaluation des performances de la méthode PSOAG proposée est très nécessaire, dans la dernière partie, les comparaisons des performances du PSOAG, du PSO et de l'AG sont réalisées pour différentes valeurs d'irradiation solaire et de température. Enfin, sur la base des résultats présentés, les conclusions sont tirées.

II. MODÉLISATION DU PANNEAU PV

Le système photovoltaïque comporte deux parties principales le module photovoltaïque et le convertisseur DC- AC (l'onduleur) [55]. Nous présentons, dans cette partie, le modèle utilisé pour maximiser la puissance produite par le panneau solaire.

1. Le module photovoltaïque

L'étude du fonctionnement des modules photovoltaïques nécessite des modèles pour calculer la puissance fournie par le système photovoltaïque. Il existe deux types de modèles : soit nous modélisons le rendement ou bien la puissance électrique du générateur photovoltaïque. Les modèles photovoltaïques doivent tenir compte de l'influence de l'irradiation solaire et de la température ambiante. Le modèle à une seule diode est un modèle efficace et simple [56-57], qui se considère comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. Il est généralement utilisé pour la modélisation et le contrôle de la mise en œuvre (figure 31).

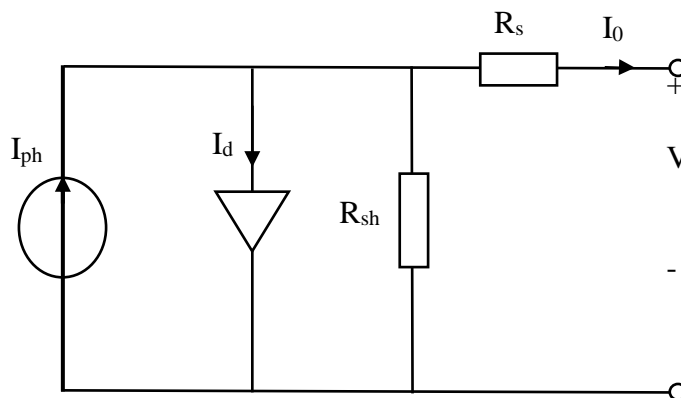


Figure 31 : Modèle d'une cellule photovoltaïque à une seule diode.

Il se compose d'une source de courant proportionnelle à l'irradiation solaire incidente et en parallèle avec une diode, la résistance shunt R_{sh} représente le courant de fuite à la terre. Les pertes internes dues au flux de courant et interconnexion entre les cellules sont représentés par la résistance série R_s . Le courant de sortie de la cellule I_0 peut être exprimé par :

$$I_0 = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[e^{\left(\frac{q(v + R_s I_0)}{A \cdot k \cdot T \cdot N_s} \right)} - 1 \right] - N_p \left(\frac{q(v + R_s I_0)}{N_s \cdot R_{sh}} \right) \quad (3.1)$$

Où I_{ph} est le courant photovoltaïque généré, I_d est le courant qui traverse la diode ; R_s et R_{sh} sont, respectivement, la résistance série et shunt de la cellule photovoltaïque, I_{rs} est le courant de saturation inverse de la cellule, q est la charge électronique, v est la tension de sortie de la cellule, T est la température, N_s est le nombre de cellules PV connectées en série, N_p est le nombre de cellules PV connectées en parallèle, k est la constante de Boltzmann et A est la constante d'idéalité de la diode. Le photocourant cellulaire I_{ph} est exprimé par l'expression suivante [58]:

$$I_{ph} = [I_{rr} [T - T_r]^3 \exp \left(S \frac{\frac{q}{E_G}}{K \cdot A \left[\left(\frac{1}{T_r} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \right]} \right) + K_i (T - T_r)] \left(\frac{R}{1000} \right) \quad (3.2)$$

Où K_i est le coefficient de température du courant de court-circuit ; T_r est la température de référence de la cellule ; R est l'irradiation solaire en W/m^2 . I_{rr} est le courant de saturation inverse ; E_G est l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur utilisé dans la cellule.

Les caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque utilisé, Soltech 1STH250-WH, sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Caractéristiques du panneau solaire utilisé

Caractéristiques	Valeurs
Puissance maximale (W)	249.86
Tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	37.6
Tension au Point de puissance maximale V_{mp} (V)	31
Coefficient de température de V_{oc} (%/°C)	-0.35
Nombre des cellules par module	60
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	8.55
Courant au point de puissance maximal I_{mp} (A)	8.06
Coefficient de température de I_{sc} (%/°C)	0.06
R_{sh} (Ω)	301.8
R_s (Ω)	0.247

2. Influence de la température et de l'irradiation

La caractéristique du générateur photovoltaïque dépend principalement de l'irradiation solaire et de la température [59-60].

Les caractéristiques du courant et de la puissance, en fonction de la tension, en maintenant une irradiation constante (1000W/m^2) sont illustrées respectivement dans la figure 32 et 33. Pour différentes valeurs de température à éclairage constant les courbes de puissance présentent un Point où la puissance fournie par le panneau est maximale P_{max} [61-62].

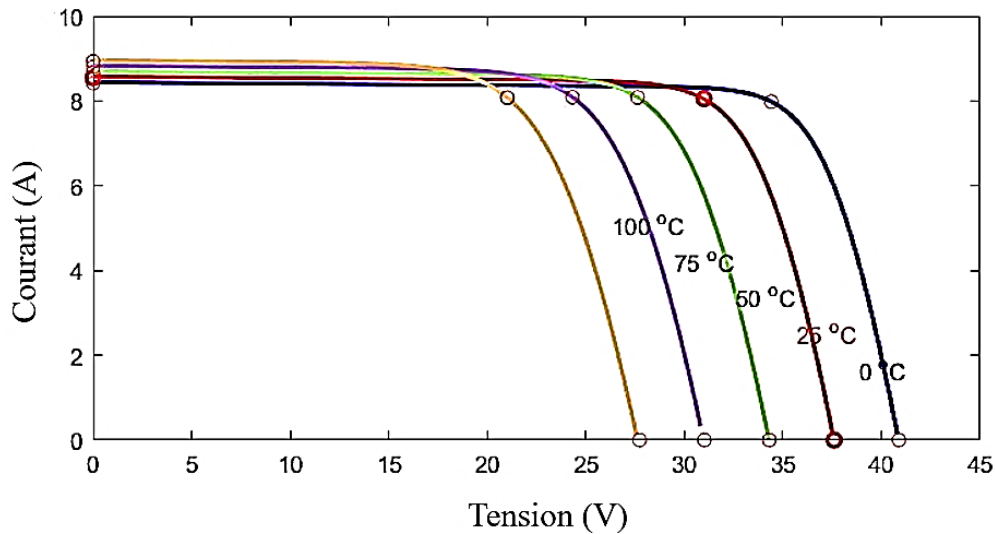


Figure 32: Caractéristique I –V pour différentes valeurs de température

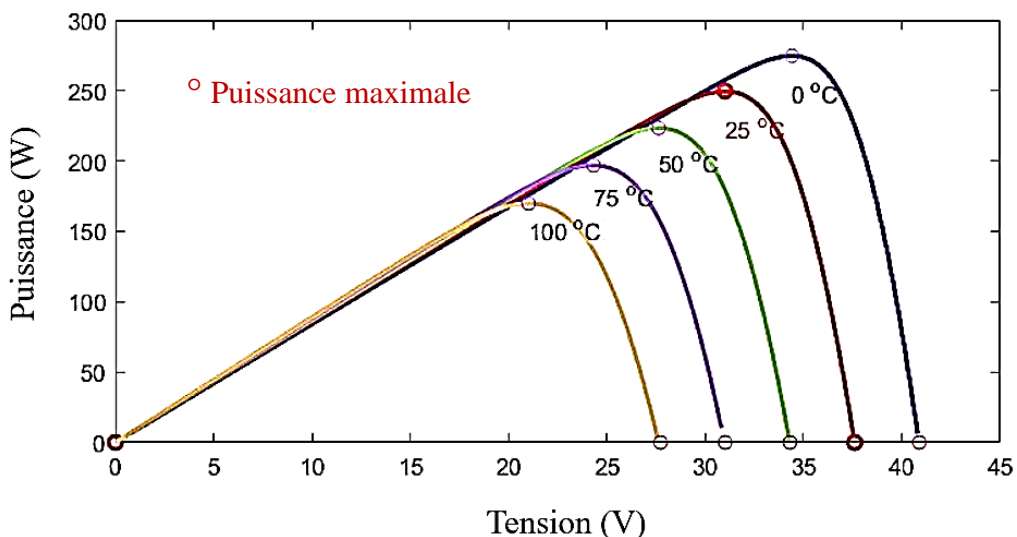


Figure 33: Caractéristique P –V pour différentes valeurs de température

Lorsque la température augmente (à irradiation constante), la tension à vide V_{co} diminue. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente. Cette augmentation est nettement moins importante que la baisse de tension.

L'irradiation solaire est un paramètre très important dans l'étude du comportement des panneaux photovoltaïques. Elle présente également une influence sur la caractéristique du panneau PV. Les figures 34 et 35 illustrent la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction d'irradiation solaire à une température fixée à 25°C.

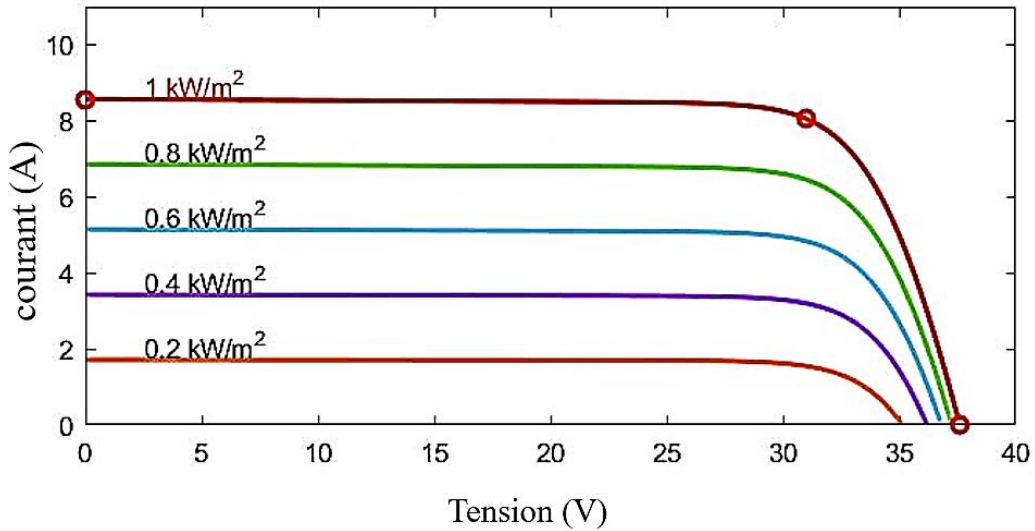


Figure 34: Caractéristique de I –V pour différentes valeurs d'irradiation

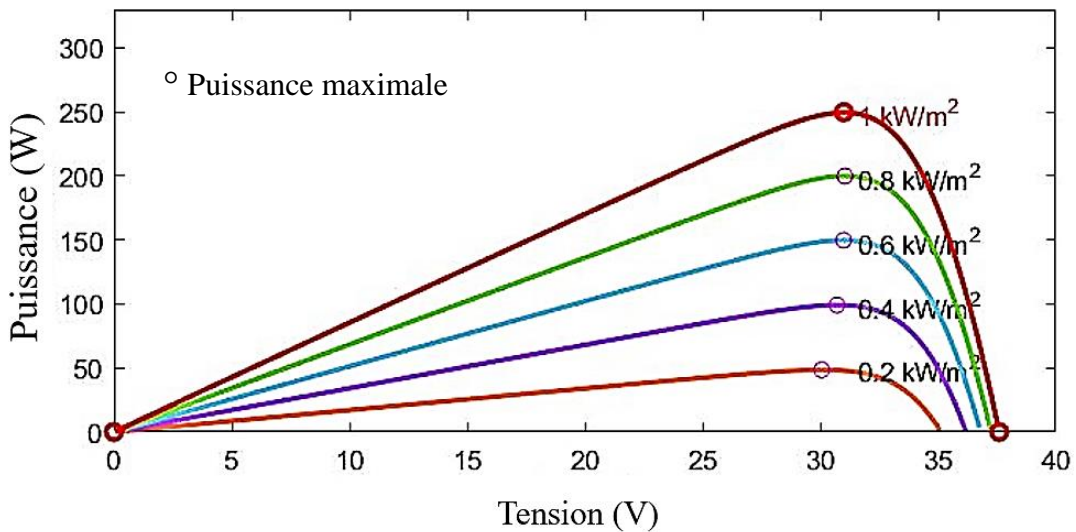


Figure 35: Caractéristique de P –V pour différentes valeurs d'irradiation

Pour un générateur photovoltaïque, la puissance de sortie varie fortement en fonction de la température et de l'éclairement solaire. Ces variables influencent le comportement du système et présente des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau solaire ne peut produire la puissance maximale que pour un courant particulier et une tension bien déterminée ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes, que ce soit de nature continue, ou bien alternative.

Pour que le panneau photovoltaïque fournisse sa puissance maximale, la solution communément adoptée est d'introduire un convertisseur qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge. Pour des conditions météorologiques données, la puissance crête installée exploite au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension.

III. La méthodologie proposée

La puissance produite par le panneau solaire varie en fonction d'irradiation solaire et de la température du site. En se basant sur les caractéristiques aléatoires des données météorologiques et pour optimiser le transfert de l'énergie photovoltaïque, il est nécessaire de forcer le panneau solaire à produire sa puissance maximale pour chaque variation de données météorologique. Dans ce travail, un nouveau contrôleur proportionnel-intégral-dérivé basé sur l'algorithme génétique, la méthode PSO et perturbation & observation est proposé. La méthode PSO a pour rôle de générer la première population de l'algorithme génétique afin de minimiser l'intervalle de recherche de l'algorithme génétique. Pour optimiser le transfert de puissance, l'algorithme génétique fournit les différents paramètres du régulateur PID K_p , K_i et K_d .

1. Les essais de particules

1.1. Présentation

Les essais de particules est une métaheuristique qui répondent aux problèmes d'optimisation [63-64]. L'idée principale de cette approche est de simuler le déplacement d'un groupe d'oiseaux à l'intérieur d'une nuée : leur capacité à voler de façon synchrone et leur aptitude à changer brusquement de direction, tout en restant en une formation optimale [65].

1.2. Essaim

Le terme essaim *est basé sur cinq points principaux.*

- *La proximité* : la population doit être capable d'effectuer de simples calculs d'espace et de temps.
- *La qualité* : la population doit répondre aux facteurs de qualité dans l'environnement.
- *Réponse diverse* : la population doit présenter, en suivant les mêmes chemins, des réponses divers et variées.
- *La stabilité* : la population doit garder son comportement pour chaque changement d'environnement.
- *L'adaptabilité* : la population doit être capable de changer son mode de comportement quand cela en vaut la peine.

1.3. Le voisinage

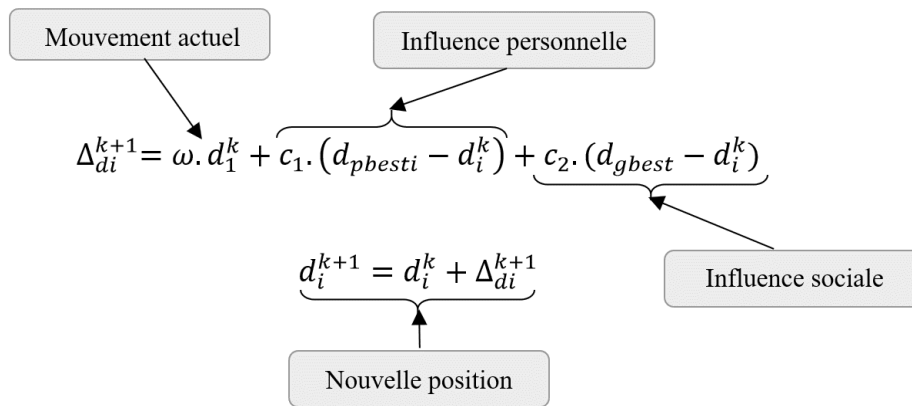
Le voisinage d'une particule contient un ouvert comprenant la particule lui-même. Les particules à l'intérieur d'un voisinage communiquent entre elles. Il existe trois topologies principales pour étudier les voisinages :

- **Topologie en étoile** : c'est un réseau social complet, où la panne d'un nœud ne perturbe pas le fonctionnement global du réseau car chaque particule est attirée vers la meilleure particule notée p_g et communique avec les autres.
- **Topologie en anneau** : Toutes les particules sont reliées entre elles dans une boucle fermée chaque particule communique avec n voisines immédiates, et tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local notée p_l .
- **Topologie en rayon** : une particule centrale est connectée à toutes les autres. Cette particule est la seule qui ajuste sa position, si cela provoque une amélioration, l'information se transforme aux autres.

1.4. Version standard de l'algorithme de l'optimisation par essaim de Particules

L'algorithme d'optimisation par essaim particulaire, ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais [66], a été proposé par Russel Eberhart (Ingénieur en Electricité) et James Kennedy (Socio-Psychologue) en 1995. Il s'inspire du comportement social des animaux évoluant en essaim, comme les vols groupés d'oiseaux et les bancs de poissons. En effet, le déplacement dynamique de ces animaux est relativement complexe. Chaque individu a une « intelligence » limitée, il dispose seulement d'une connaissance locale de sa situation dans l'essaim. L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. La cohésion des individus est maintenue par des règles simples, comme « rester proche des autres individus », « aller à la même vitesse », ou « aller dans une même direction », et permettent aussi le maintien d'un comportement collectif, complexe et adaptatif.

Dans la méthode d'optimisation par essaim de particule, chaque particule est dotée d'une position, d'une vitesse, d'une mémoire personnelle retenant la meilleure position visitée et d'une mémoire collective retenant la meilleure position visitée par le voisinage. Les équations suivantes formalisent le comportement de déplacement des particules [67] :



Sachant que ω est le facteur d'inertie, il est utilisé pour contrôler l'influence de la direction du déplacement ; c_1 et c_2 sont, respectivement, le facteur cognitif et le facteur social ; d_i^k est le rapport cyclique actuel ; d_{pbesti} est le meilleur rapport cyclique personnel de la particule i ; d_{gbest} est le rapport cyclique qui est responsable du fonctionnement du convertisseur DC / DC au MPPT.

Chaque particule représente une solution potentielle du problème d'optimisation. C'est le vecteur de la vitesse qui dirige le processus de recherche et reflète la sociabilité des particules. Ce processus se répète tant que le critère de convergence n'est pas atteint. Ce processus peut être :

- Le nombre d'itérations défini à l'avance ;
- La fonction objective ;
- Lorsque la variation de vitesse est proche de 0.

Le déplacement d'une particule dans la méthode d'optimisation par l'essaim peut être décrit par le schéma de la figure suivante :

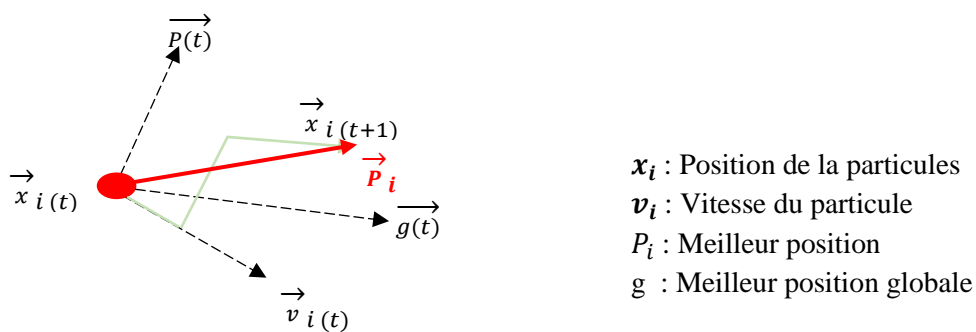


Figure 36: Déplacement d'une particule par l'utilisation de la méthode PSO

L'algorithme ci-dessous présente une version classique de l'algorithme de l'OEP. Les paramètres qui interviennent dans cet algorithme sont :

- La dimension du problème,
- Le nombre N de particules,
- La taille du voisinage,
- La vitesse.

Algorithme 3 : OEP classique [68]

N le nombre de particules

F la fonction objective

[Initialisations]

//Initialiser aléatoirement la population

Init_population(P)

// Evaluer la performance de chaque particule dans la population

Evaluer(P)

[Traitements]

Répéter

Pour i de 1 à N

// trouver le voisinage de i

V ← obtenir-voisinage(i)

// sélectionner les sources d'influence du voisinage

Source ← selection-source(i,V)

// Générer une nouvelle position en se basant sur les sources d'influence

x ← Générer-nouvelle-pos(Source)

Evaluer(x)

// Tester si la nouvelle position est meilleure que l'ancienne meilleure position déjà visitée

Si F(pi) est meilleur que F(x)

pi ← x

Fin si

Fin Pour

Jusqu'à ce que le processus converge

2. Algorithme génétique

2.1. Présentation des algorithmes génétiques (AGs)

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des algorithmes d'optimisation stochastique basés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Le principe de fonctionnement des AGs est relativement simple [69], [70], ils commencent avec une population initiale arbitrairement choisie appelée chromosome, puis ils évaluent leur performance, en utilisant la fonction *fitness*. En suite une nouvelle population de solutions potentielles se crée en utilisant des opérateurs simples : la sélection, le croisement et la mutation. Ce cycle se recommence jusqu'à ce que l'on trouve une solution satisfaisante.

Nous distinguons 4 points principaux qui font la différence entre les algorithmes génétiques et les autres méthodes [71] :

1. *Les algorithmes génétiques utilisent un codage des paramètres, et non les paramètres eux-mêmes.*
2. *Les algorithmes génétiques travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique.*
3. *Les algorithmes génétiques n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.*
4. *Les algorithmes génétiques utilisent des règles de transition probabilistes, et non déterministes.*

L'algorithme génétique est défini par [69], [70] :

- *Individu/séquence/chromosome* : une solution potentielle du problème ;
- *Population* : un groupe d'individu de l'espace de recherche ;
- *Environnement* : l'espace de recherche ;
- *Fonction de fitness* : la fonction objective à optimiser.

Les AG_s sont basés sur les phases suivantes [72], [73] :

1. **Initialisation.** *Génération aléatoire de quelques séquences de bits dans laquelle une population initiale de N chromosomes est tirée aléatoirement.*
2. **Évaluation.** *Chaque chromosome se décode, et s'évalue, en utilisant la fonction objective, pour calculer l'adaptation d'une séquence de bits.*
3. **Sélection.** *Création d'une nouvelle population de N chromosomes par l'utilisation d'une méthode de sélection appropriée.*
4. **Reproduction.** *Génération d'une nouvelle population en utilisant l'opération de croisement et mutation.*

L'opération de croisement se fait en remplaçant :

- Une séquence de la 1^{ère} partie de la 1^{ère} séquence par la 2nd partie de la 2nd séquence.
- Et une séquence de la 2nd partie de la 1^{ère} séquence par la 1^{ère} partie de la 2nd séquence.

Pour la mutation

La mutation d'un bit choisi aléatoirement dans une ou plusieurs séquences s'applique.

5. **Retour** à la phase d'évaluation, pour mesurer l'adaptation à nouveau, jusqu'à l'arrêt de l'algorithme.

2.2. Opérateurs d'algorithmes génétiques

2.2.1. Codage des variables

La procédure normale pour coder les AG_s [74] est de coder chaque paramètre comme une séquence de bits. Puis les séquences seront tronquées l'une après l'autre pour construire le chromosome. Chaque séquence du vecteur total représente un gène, et la valeur de chaque gène est un allèle.

Exemple : Soit un vecteur X composé de trois paramètres X₁, X₂, et X₃, codés sur 4 bits

$$X_1 = 0011$$

$$X_2 = 1010$$

$$X_3 = 0100$$

Alors la séquence totale sur 4 bits sera :

$$\bar{X} = \langle X_1 \mid X_2 \mid X_3 \rangle$$

2.2.2. Sélection

a. **Roulette de casino**

La sélection naturelle [75] est la plus employée pour les algorithmes génétiques binaire. Chaque chromosome occupe un secteur de roulette dont l'angle est proportionnel à son indice de qualité. Le bon chromosome possède un indice de qualité élevé et un large secteur de roulette, alors il aura la chance d'être sélectionné.

b. **" N/2 –élitisme "**

L'outil d'élitisme possède une pression de sélection trop forte [76], seule la moitié supérieure des individus qui correspond aux meilleurs composants qui se sélectionne, il est important de maintenir une diversité de gènes pour les utilisés dans la population suivante.

c. "Par tournoi "

Le principe de cet outil est de choisir aléatoirement deux individus et ensuite comparer leur fonction d'adaptation pour accepter la plus adaptée afin d'accéder à la génération intermédiaire [77]. Cette opération se répète jusqu'à remplir la génération intermédiaire (N/2 composants). Les individus qui gagnent à chaque fois, on peut les copier plusieurs fois ce qui favorisera la pérennité de leurs gènes.

2.2.3. *Croisement* [78]

Le croisement a pour objectif d'enrichir la diversité de la population en manipulant la construction des chromosomes. Il est envisagé avec deux parents et produit deux enfants.

a. *Croisement binaire*

a.1. **Croisement en un point**

Nous tirons aléatoirement une position dans chacun des parents (figure 37). Le croisement s'effectue directement au niveau binaire, et non pas au niveau des gènes. On échange ensuite les deux sous-chaînes de chacun des deux chromosomes des parents, ce qui produit les deux enfants présentés dans la figure 37.

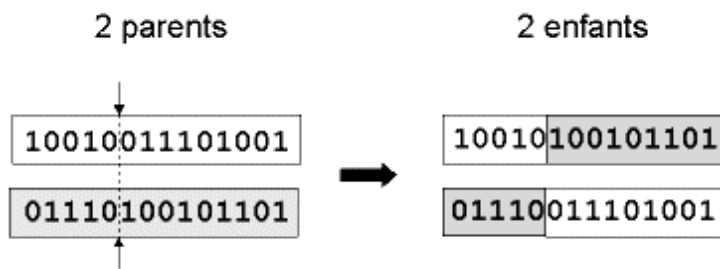


Figure 37: représentation simple du croisement en 1 point

a.2. **Croisement en deux points**

Cet opérateur est plus efficace que le précédent [79], dans lequel nous choisissons aléatoirement deux points de croisement (Figure 38). Néanmoins nous n'avons pas constaté de différence notable dans la convergence de l'algorithme.

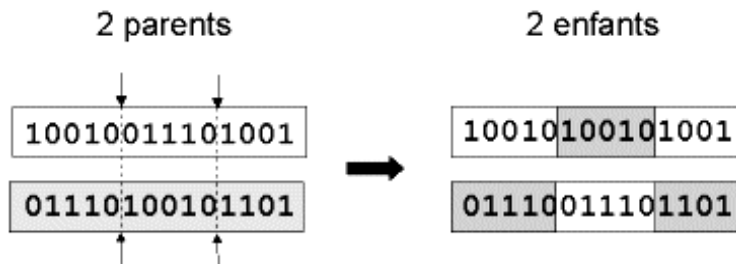


Figure 38: représentation schématique du croisement en 2 points

b. Croisement réel

Le croisement réel ne se différencie du croisement binaire que par la nature des éléments qu'il altère : ce ne sont plus des bits qui sont échangés à droite du point de croisement, mais des variables réelles.

2.2.4. Mutation

L'opérateur de mutation apporte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité de parcours d'espace [80]. Les mutations jouent le rôle de bruit et empêchent l'évolution de se figer. La mutation est définie comme étant l'inversion d'un bit dans un chromosome (Figure 39). Elles permettent d'assurer une recherche aussi bien globale que locale, selon le poids et le nombre des bits mutés.

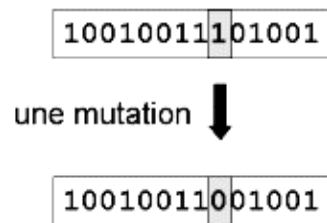


Figure 39: représentation schématique d'une mutation dans un chromosome

a. Mutation binaire

Dans la mutation binaire nous changeons le bit d'un seul chromosome tiré au hasard, puis on l'inverse. Il existe une variante où plusieurs bits peuvent muter au sein d'un même chromosome.

b. Mutation réelle

La mutation réelle ne se différencie de la mutation binaire que par la nature de l'élément qu'elle altère : ce n'est plus un bit qui est inversé, mais une variable réelle qui est de nouveau tirée au hasard sur son intervalle de définition.

c. Mutation non uniforme

La mutation non uniforme possède la particularité de retirer les éléments qu'elle altère dans un intervalle de définition variable et de plus en plus petit. Plus nous avançons dans les générations, moins la mutation n'écarte les éléments de la zone de convergence. Cette mutation adaptative offre un bon équilibre entre l'exploration du domaine de recherche et un affinement des individus.

3. La nouvelle méthodologie PSOAG

La méthode d'optimisation proposée -PSOAG- est basée sur la méthode des essais de particules (PSO) et les algorithmes génétiques (AG), elle fonctionne selon les étapes suivantes (figure 40) :

- *Étape d'optimisation par l'essai de particules*

Étape 1 : Initialisation aléatoire du rapport cyclique avec une valeur fixe entre $[d_{\min}, d_{\max}]$, des positions et vitesses de chaque particule.

Étape 2 : Evaluation des particules à l'aide d'une fonction objective f mesurant l'adéquation de cette solution potentielle avec le problème. Et mise à jour de la position de la meilleure particule au sens de la fonction objective.

$$d_{pbesti} = d_i \quad (3.3)$$

$$P_{pbesti} = P_i \quad (3.4)$$

Étape 3 : Détermination de la meilleure particule parmi la population courante.

$$d_{gbesti} = d_i \quad (3.5)$$

$$P_{gbesti} = P_i \quad (3.6)$$

Étape 4 : Mise à jour de la vitesse et la position de chaque particule.

$$\Delta_{di}^{k+1} = \omega \cdot d_i^k + c_1 \cdot (d_{pbesti} - d_i^k) + c_2 \cdot (d_{gbest} - d_i^k) \quad (3.7)$$

$$d_i^{k+1} = d_i^k + \Delta_{di}^{k+1} \quad (3.8)$$

Où ω est le facteur d'inertie, il est utilisé pour contrôler l'influence de la direction de déplacement ; c_1 et c_2 sont respectivement le facteur cognitif et social ; d_i^k est le rapport cyclique actuel ; d_{pbesti} est le meilleur rapport cyclique personnel de la particule i ; d_{gbest} est le rapport cyclique responsable du fonctionnement du convertisseur DC/DC au niveau du MPPT.

Étape 5 : Critères d'arrêt : l'algorithme de la méthode PSO se termine lorsque la différence entre la position des particules est inférieure à 1%, puis l'algorithme génétique commence son cycle avec la valeur optimale du rapport cyclique = d_{gb} .

$$d_i^{k+1} - d_i^k \leq 0.01 \quad (3.9)$$

• **GA_P&O adapté**

Étape 1 : Codage binaire : Les paramètres de contrôle du régulateur proportionnel intégral dérivé K_p , K_i et K_d (appelés chromosomes) se code en binaire.

Étape 2 : Codage réel et évaluation : Chaque chromosome s'évalue en convertissant sa chaîne binaire en une valeur réelle (cette valeur correspond aux gains du contrôleur PID afin de calculer une réponse complète du système). La valeur de la fonction fitness initiale se calcule en utilisant la fonction objective exprimée dans l'équation ci-dessous :

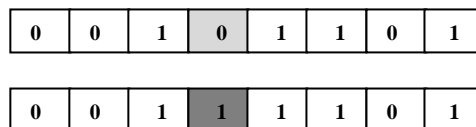
$$F = 0.5[P_{out_max} - P_{ref}] + 0.5 \int_0^T [P_{ref} - P_{out}]^2 dT \quad (3.10)$$

Où P_{out} est la puissance de sortie de la chaîne complète (puissance fournie à la charge), P_{ref} est la puissance de sortie du panneau PV et P_{out_max} est la valeur maximale de P_{out} .

Étape 3 : Sélection : la sélection s'applique à un ensemble de chromosomes pour donner plus de changements de reproduction aux meilleurs individus. Dans ce travail, nous avons utilisé la sélection parentale de la roulette.

Étape 4 : Croisement : le crossover est basé sur le principe de la méthode perturbation et observation, qui consiste à perturber la tension de sortie du panneau solaire et sa puissance de sortie correspondante, afin de la comparer avec la valeur précédente de la puissance P_{out} . Si la puissance augmente, la tension doit être augmentée également, sinon la valeur de la tension doit être décrétementée.

Étape 5 : Mutation : l'opérateur de mutation est utilisé pour maintenir la diversité génétique de la population, il est analogue à la mutation biologique.



Les différents paramètres utilisés dans la méthode proposée sont définis dans le tableau 10 :

Tableau 10: Paramètres de la méthode PSOAG

Methods	Description	Parameters
AG	Taille de la population	20
	Nombre maximal des iterations	50
	Probabilité de croisement	0.5
	Probabilité de mutation	0.01
	Nombre de bits par chromosome	16
PSO	Nombre de particules	50
	ω	1
	c_1	1.5
	c_2	2.0

CHAPITRE 3 : Nouvel optimiseur du point de puissance maximal

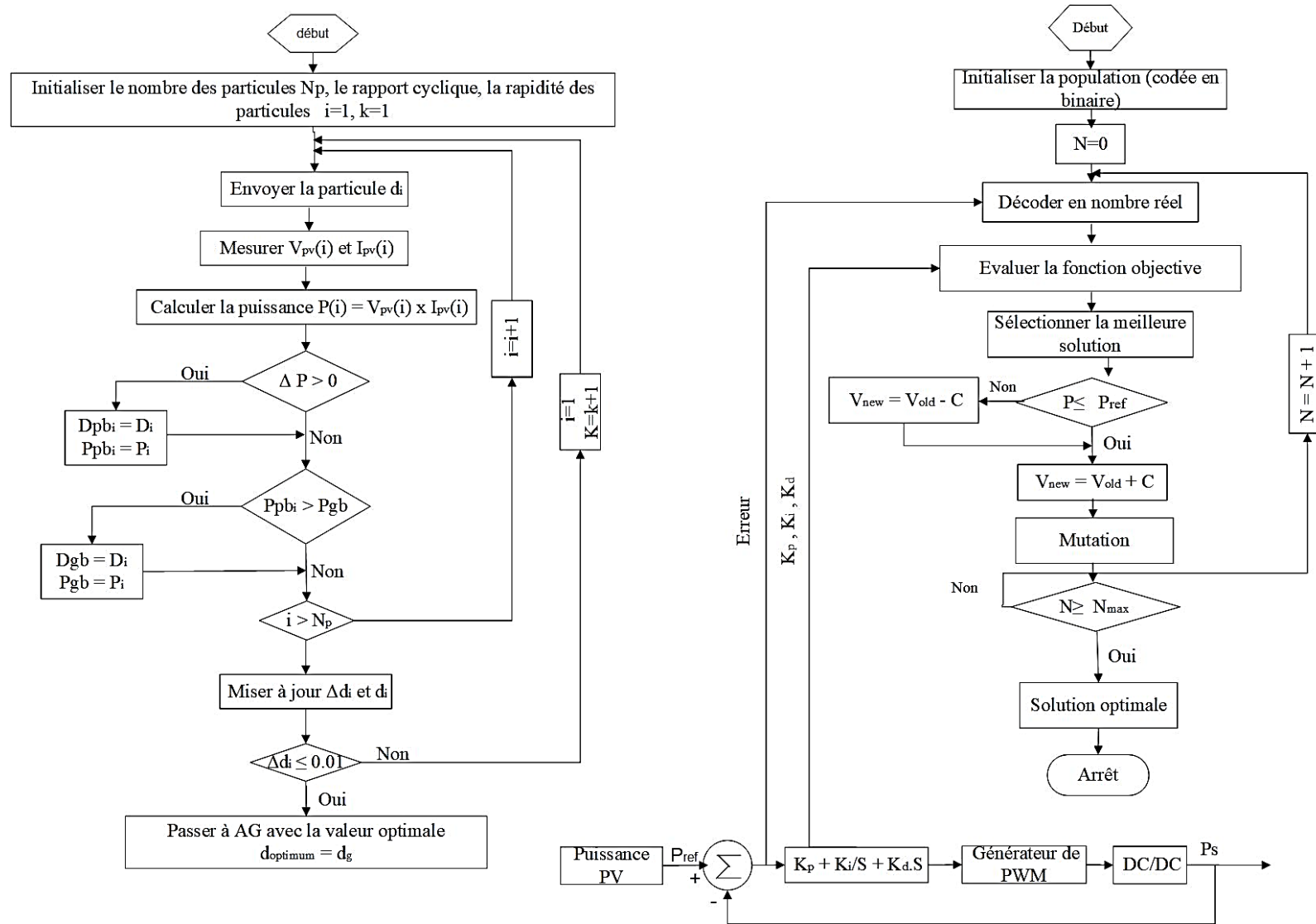


Figure 40: L'organigramme de la méthodologie proposé

IV. Résultats et discussion

La figure 41 montre le modèle du convertisseur DC/DC utilisé dans cette étude [81], il permet de fournir la puissance maximale du panneau photovoltaïque, indépendamment de l'irradiation solaire, de la température et de la charge. Les caractéristiques électriques des convertisseurs DC/DC utilisés sont : $C1 = 470 \mu\text{F}$, $C2 = 220 \mu\text{F}$, $L = 1 \text{ mH}$ et fréquence de découpage de 50 kHz.

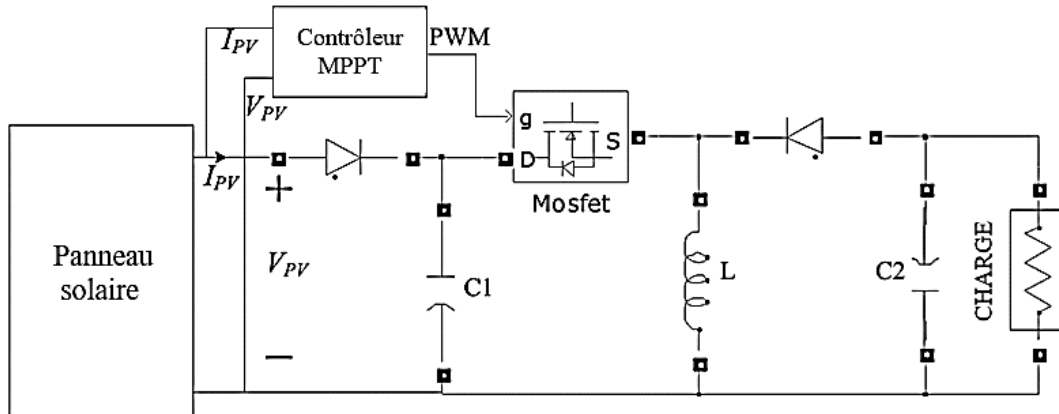


Figure 41: Modèle d'un système PV avec le convertisseur Buck-boost et le contrôleur MPPT

Cette section présente un résultat comparatif de la méthodologie proposée PSOAG avec la méthode PSO. Afin d'évaluer de manière critique les performances de la méthodologie proposée, la simulation a été effectuée pour surveiller le point de puissance maximale avec différentes valeurs d'irradiation et de température. Sachant que l'irradiation peut être changée rapidement en raison des conditions météorologiques et afin d'évaluer les performances de la méthodologie proposée, douze signaux d'irradiation solaire ont été simulés à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink. L'ensoleillement varie d'un niveau faible tel que 100 w/m^2 à l'irradiation la plus élevée possible telle que 1000 w/m^2 . De plus, la température est maintenue fixe à $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est souhaitable qu'un contrôleur prenne rapidement des mesures de contrôle pour compenser les variations d'irradiation et de température. Le profil de variation de l'ensoleillement du site est illustré à la figure suivante :

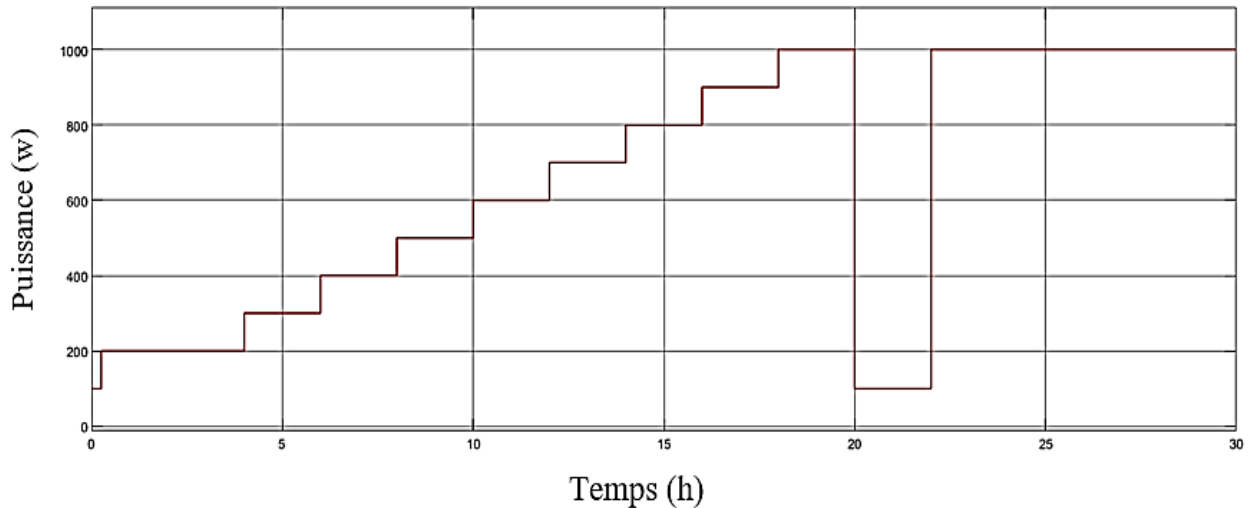


Figure 42: Profil d'irradiation solaire

La puissance de sortie du panneau solaire a été analysée en utilisant la méthode PSOAG qui combine les avantages des trois méthodes P&O, GA et PSO et le contrôleur PID. Les performances MPPT sont analysées sur la base de trois indices de performances qui sont le sous-dépassement, le temps de stabilisation et les ondulations. Le temps de stabilisation de puissance en utilisant la méthode proposée est très court par rapport à celui des autres méthodes. Quatre points sont marqués sur la figure 43 "a", "b", "c" et "d".

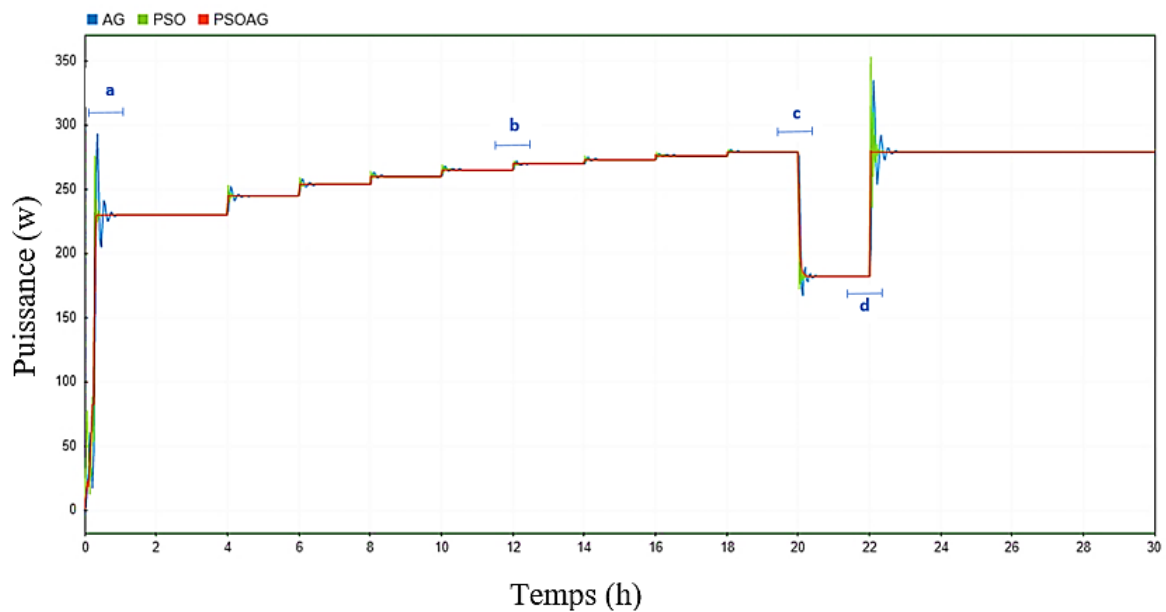


Figure 43: Puissance PV avec différentes méthodes de MPPT

Les vues agrandies de ces points sont montrées sur les figures 44-47.

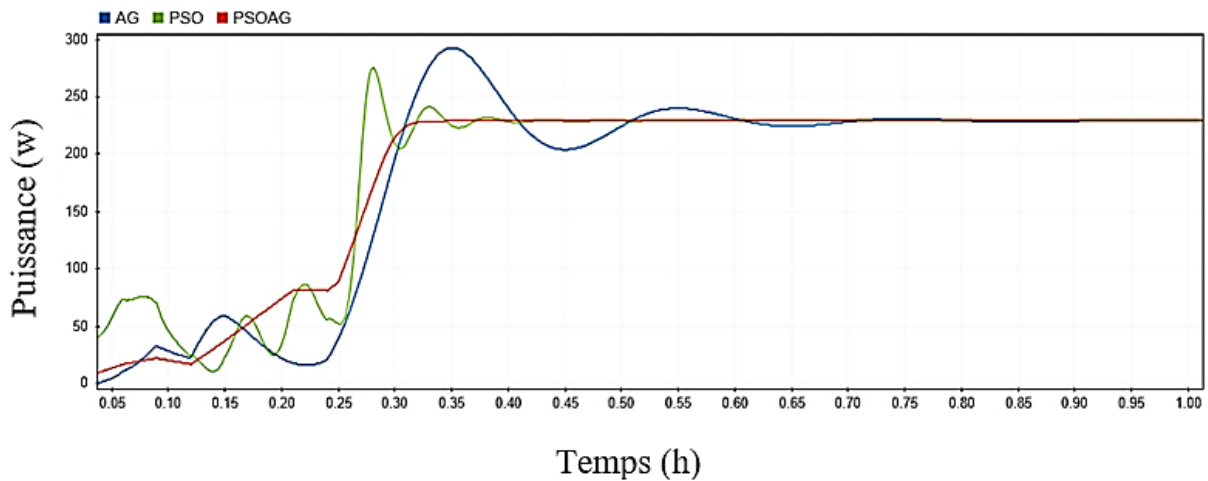


Figure 44: La réponse du MPPT au point "a"

Le segment « a » présente le régime transitoire des méthodes MPPT dont les niveaux de puissance augmentent. Cette augmentation est produite par une transition d'irradiation solaire d'un niveau bas à un niveau plus élevée. Comme le montre la figure 45, segment "b", les deux méthodes GA et PSO ne suivent pas efficacement MPPT. Cependant, la méthodologie proposée PSOAG ne perd pas de vue la puissance souhaitée qui est attribuée au gain intégral variable qui oblige la réponse à suivre la consigne de la puissance souhaitée.

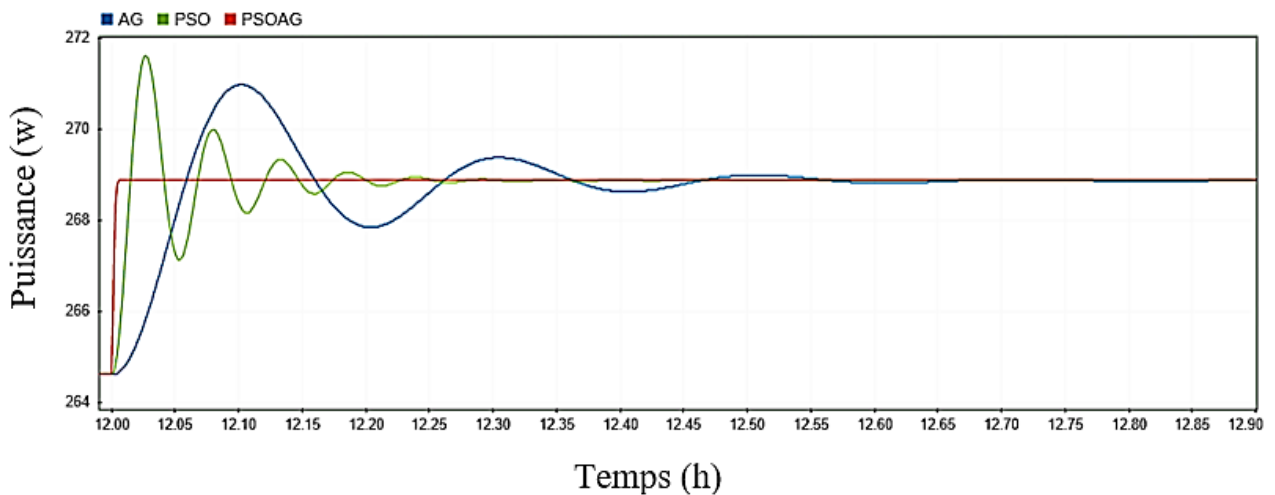


Figure 45. La réponse du MPPT au point "b"

Le segment "c" correspond à une chute de puissance, comme le montre la figure 46 la méthode PSOAG suit effectivement le MPPT.

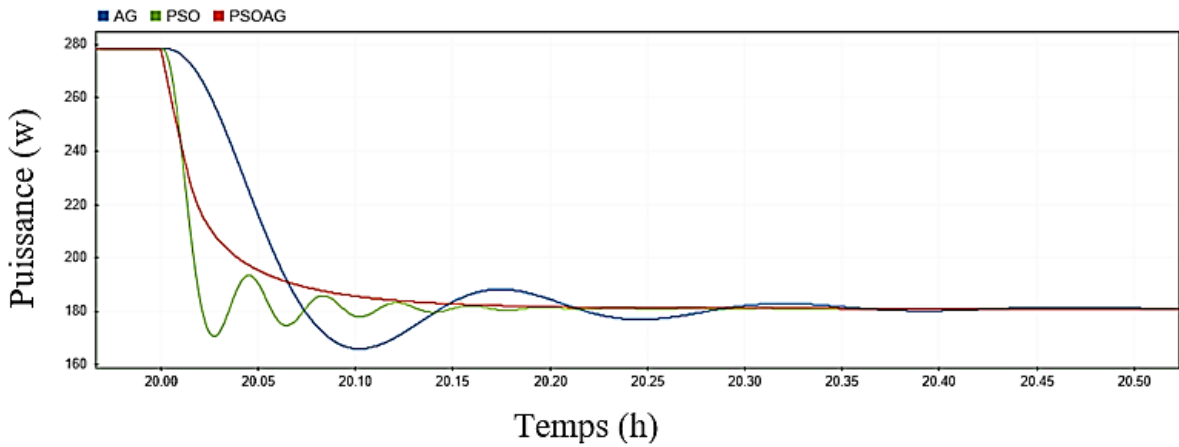


Figure 46. La réponse du MPPT au point "c"

Pour le dernier segment "d", l'irradiation solaire a été augmentée de 100 w/m^2 à 1000 w/m^2 , comme le montre la figure 47, la méthodologie proposée suit rapidement le point de la puissance maximale avec un temps de réponse très court.

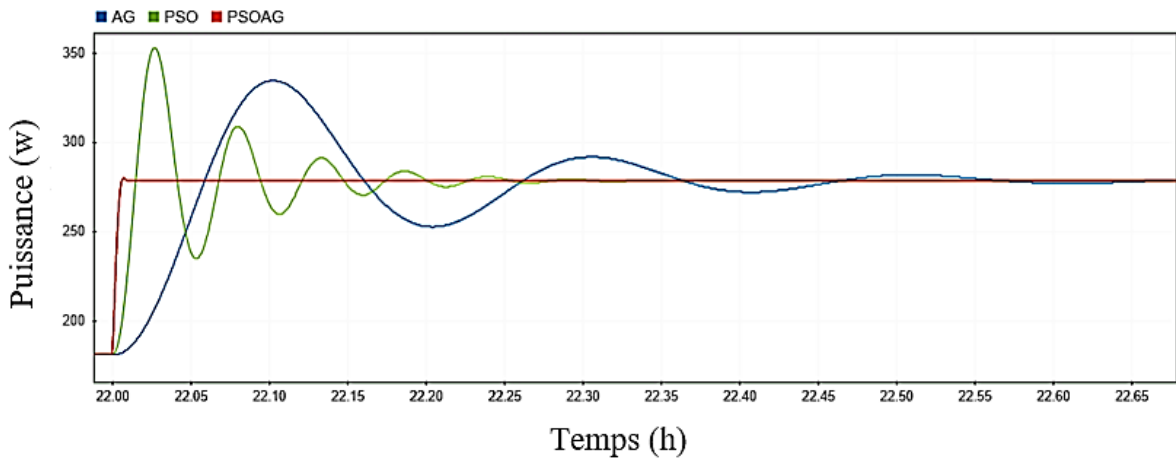


Figure 47. La réponse du MPPT au point "d"

Nous observons que la méthode PSOAG prend un temps de stabilisation court par rapport aux autres méthodes. L'ondulation fait essentiellement référence aux performances du contrôleur MPPT dans des conditions d'état stables. De plus, la méthodologie proposée a confirmé que le MPPT basé sur la méthode PSOAG réduit efficacement les ondulations et le sous-dépassement de la puissance du panneau solaire par rapport aux autres contrôleurs du MPPT. Le tableau 11 résume les résultats obtenus en termes de temps de réponse :

Tableau 11: comparaison des performances des trois méthodes

		PSOAG	AG_P&O	PSO
Temps de réponse (s)	<i>a</i>	0.96	0.75	0.35
	<i>b</i>	7.5×10^{-4}	0.66	0.25
	<i>d</i>	9×10^{-5}	0.65	0.08

V. Conclusion

Une combinaison de trois méthodes PSO, AG et P&O a été appliquée et analysée pour la surveillance et le suivi du point de puissance maximale du panneau solaire. La méthode PSO a été appliquée pour diminuer l'espace de recherche de l'algorithme génétique, puis le GA s'utilise pour fournir les paramètres optimaux du contrôleur PID. De plus, cette méthodologie a été comparée aux méthodes PSO et AG.

Après avoir appliqué les algorithmes GA, PSO et PSOAG, on observe que la méthodologie PSOAG proposée offre de bonnes performances par rapport aux algorithmes GA et PSO. De plus, les contrôleurs optimisés PSOAG offrent moins de temps de stabilisation, d'ondulation et de sous-dépassement par rapport aux contrôleurs optimisés GA et PSO. Parmi les trois techniques MPPT, la méthodologie PSOAG offre la réponse la plus efficace dans des conditions météorologiques variables en évolution rapide pour la surveillance du MPPT.

CHAPITRE 4

Contrôle dynamique optimal multi-objectif d'un système d'énergie hybride

CHAPITRE 4

Contrôle dynamique optimal multi-objectif d'un système d'énergie hybride

I. Introduction	76
II. Gestion optimale des systèmes multi sources	77
III. La méthodologie proposée	78
1. Algorithme de contrôle	79
1.1. Mode de charge de la batterie	79
1.2. Alimentation de charge à priorité faible	80
1.3. La charge factice	80
1.4. Mode de décharge de la batterie	80
1.5. Fonctionnement du secteur	81
1.6. Perte de probabilité de charge	81
2. Algorithme d'optimisation du système d'énergie hybride	83
IV. Résultats et discussion	85
V. Conclusion	88

I. Introduction

Le besoin énergétique est toujours croissant ce qui impose l'utilisation des sources d'énergies hybrides (SER). Les systèmes d'énergies hybrides PV/WT est un type très important des systèmes d'énergies renouvelable [82]. L'intégration des sources d'énergie renouvelables avec d'autres sources d'énergie et / ou batteries présente une solution primordiale pour satisfaire le besoin énergétique des charges. Les sources d'énergie solaire et éolienne dépendent du climat, par conséquent, l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable individuelle dans un site isolé n'est pas fiable [83], [84]. De plus, le système éolien seul n'est pas rentable pour certaines applications [85]–[88].

Le système hybride PV-WT avec batterie est très rentable pour les îles et les régions éloignées par rapport aux configurations hybrides PV-batterie, WT-batterie et PV-WT [89], [90]. Ceci a été vérifié avec sept techniques d'optimisation [91]. D'autres études ont montré que le photovoltaïque, l'éolien et le stockage sur les batteries (PV-WT-BS) peut satisfaire la demande de charge dans les applications résidentielles des zones rurales et éloignées [91], [92]. Dans cette association, les systèmes photovoltaïques et éoliens sont connectés à d'autres sources d'énergie conventionnelles et la batterie. L'utilisation de la batterie est plus rentable que de compter totalement sur le générateur diesel (DG) [93]. Par conséquent, le générateur photovoltaïque, éolien, diesel et la batterie sont plus utilisés dans les applications autonomes. Certaines études ont proposé d'autres combinaisons telles que le photovoltaïque, l'éolienne, le générateur diesel, la pile à combustible, la biomasse et le réservoir d'hydrogène [94] [95] ; le photovoltaïque, l'éolienne, le générateur diesel- Hydro-générateur et la batterie [94], [96] ; Photovoltaïque, éolienne, générateur diesel, pile à combustible, bio-diesel et la batterie [97]. Différentes techniques d'optimisation ont été rapportées dans la littérature [98], [99]telles que la programmation dynamique [100], multi-objectifs [101], l'ingénierie graphique[102], la programmation linéaire [102][103], la métaheuristique [104] [105] [106] et approche probabiliste [107].

Nous présentons dans ce chapitre une nouvelle méthodologie d'optimisation des sources d'énergie renouvelables, en utilisant une technique intelligente permettant de sélectionner les meilleurs systèmes d'énergie hybrides, pour maximiser la puissance, réduire le nombre de panneaux photovoltaïques (PV), éoliennes (WT) et des batteries, ainsi pour réduire le coût total du système. Le profil de charge utilise la direction de charge en fonction de leur priorité. Trois types de charges ont été envisagés : charge à priorité élevée (HPL) qui doit toujours être

alimentée indépendamment des conditions météorologiques du site et du niveau de charge de la batterie, charge à priorité moyenne (CPM) s'alimente lorsque le HPL est alimenté et la batterie est chargée, et la charge à priorité faible (CPF) s'alimente après l'alimentation du CPM. L'objectif principal de cette méthodologie est de maximiser la production d'énergie, la fiabilité toute en minimisant le coût environnemental et le coût du SEH. La faisabilité de cette méthodologie a été étudiée en utilisant une étude technico-économique détaillée.

II. Gestion optimale des systèmes multi sources

La gestion énergétique des systèmes hybrides est aujourd'hui au cœur des recherches scientifiques.

L'optimisation énergétique utilisée dans cette étude consiste à contrôler les flux énergétiques du système hybride afin de minimiser la demande d'énergie du secteur électrique. La gestion énergétique permet de chercher à chaque instant la répartition d'énergie la plus efficace entre les différentes sources d'énergies hybrides. Le schéma synoptique de notre système est présenté dans la figure 48 ci-dessus.

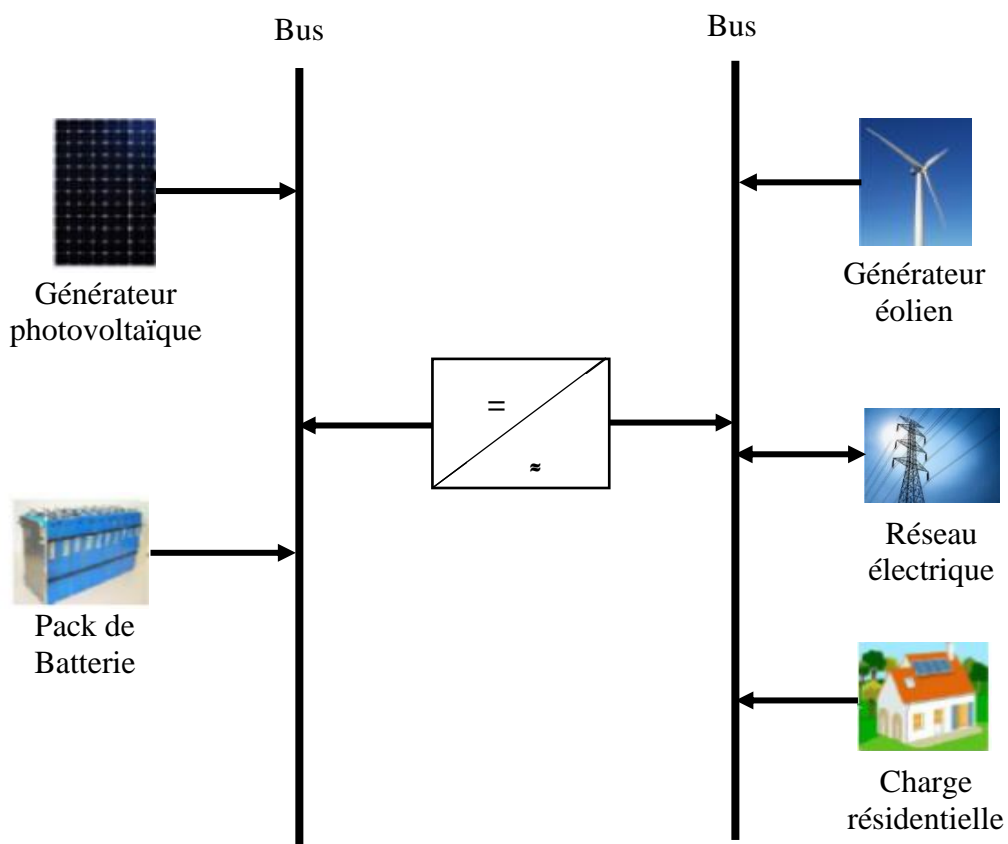


Figure 48: Configuration d'un système hybride connecté au réseau

L'objectif de la méthodologie proposée consiste à augmenter les performances du système et la fiabilité du réseau afin d'assurer la satisfaction de la demande des charges, et augmenter la durée de vie des composants du système d'énergie hybride et cela en déterminant la meilleure contribution de chaque source d'énergie pour la satisfaction de la demande.

En générale, les stratégies de gestion sont classées en deux groupes principaux ; les stratégies de gestion hors ligne qui détermine, en temps réel, la loi de commande optimale du système hybride, et la stratégie de gestion en ligne qui nécessite la connaissance du profil de charge.

En effet, l'optimisation de gestion nécessite la connaissance préalable du profil de la demande des charges. Généralement la technique la plus utilisée consiste à trouver le profil de fonctionnement optimal du système hors ligne. Et par la suite, en se basant sur les résultats obtenus, nous définissons la stratégie permettant d'optimiser le fonctionnement du système.

Deux types de pilotage peuvent être alors appliqués au système ; la supervision locale et globale.

La supervision locale prend en considération le fonctionnement individuel de chaque source d'énergie et des paramètres qui les régissent. Cette étape est très importante car elle établit le principe de répartition des flux énergétiques au sein du système, et définit les contraintes de fonctionnement de chaque source.

La supervision globale prend en considération le fonctionnement global du système, dans cette approche, les performances du système seront optimisées en tenant compte des contraintes de fonctionnement de chaque sous-système pour satisfaire la demande des charges et à minimiser la quantité d'énergie donnée par le secteur électrique.

III. La méthodologie proposée

La méthode proposée a été utilisée pour optimiser la taille des composants du système d'énergie hybride, elle est basée sur le pilotage des éoliennes, des panneaux solaires et des batteries pour répondre au besoin énergétique des charges, tout en minimisant les pertes d'énergies et le coût (figure 49).

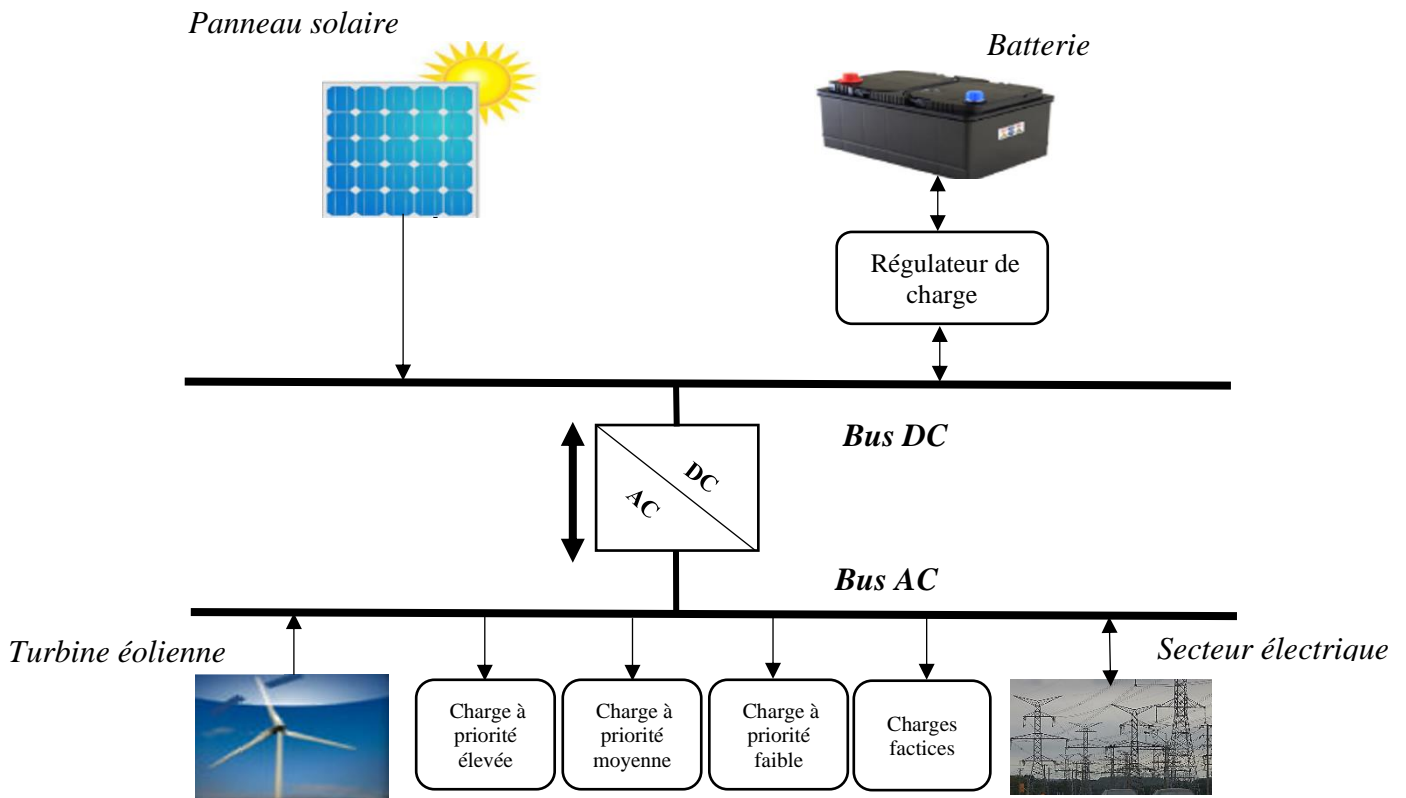


Figure 49: Schéma de principe du système d'énergie hybride PV / éolien / secteur / batterie.

Cette méthode est basée sur deux sections principales : l'algorithme de contrôle et d'optimisation du système d'énergie hybride.

L'algorithme opérationnel suivant est prescrit pour le contrôle du système d'énergie hybride :

Si l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelables dépasse la puissance des charges à priorités élevées CPE, P_{CPE} ; le surplus de la puissance sera envoyé vers les batteries jusqu'à ce qu'elles atteignent leurs niveaux maximales, $E_{B, max}$, l'excès de puissance sera utilisé pour alimenter les charges à priorités moyennes CPM. Ainsi, la puissance au-dessus des besoins de la CPM sera utilisée pour alimenter les charges à priorités faibles et puis les charges factices, P_{dummy} . La CPM et la CPF non satisfaite sera reportée au moment de l'excès de production. La logique de cette méthodologie est résumée dans les sections suivantes :

1. Algorithme de contrôle

1.1. Mode de charge de la batterie

Notons $P_g(t) = P_w(t) + P_{pv}(t) \times \eta_{inv}$

$$- \text{Si } P_w(t) > P_{CPE}(t) \text{ et } SOC < E_{B, max} \text{ Alors } P_{BC}(t) = [(P_w(t) - P_{CPE}(t))\eta_{inv} + P_{pv}(t)]\eta_{BC} \quad (4.1)$$

$$- \text{Si } P_w(t) < P_{CPE}(t), SOC < E_{B, max} \text{ et } P_g(t) > P_{CPE}(t) \text{ Alors } P_{BC}(t) = [(P_g(t) - P_{CPE}(t))]\eta_{BC} \quad (4.2)$$

Dans tous les modes de charge de la batterie, les valeurs de la P_{mlp_sum} , P_{cpf_sum} et du niveau de charge de la batterie non satisfaits peuvent être obtenu à partir des équations suivantes :

$$P_{CPM-sum} = P_{CPM-sum} + P_{CPM}(t) \quad (4.3)$$

$$P_{CPF-sum} = P_{CPF-sum} + P_{CPF}(t) \quad (4.4)$$

$$E_B(t+1) = P_B(t)(1-\sigma) + P_{BC}(t) \quad (4.5)$$

1.2. Alimentation de charge à priorité faible

$$-Si \quad P_w(t) > P_{CPE}(t) \text{ et } SOC > E_{B,max} \text{ Alors } P_{L-faible}(t) = [P_g(t) - P_{CPE}(t)] \quad (4.6)$$

$$- Si $P_w(t) < P_{CPE}(t)$, $SOC > E_{B,max}$ et $(P_g(t) > P_{CPE}(t))$ Alors $P_{C-faible}(t) = [P_g(t) - P_{CPE}(t)]$ (4.7)$$

Dans les deux cas ci-dessus, l'accumulation du non satisfaction des charges à priorités moyennes, faible et de la batterie peut être obtenue à partir des équations suivantes :

$$P_{CPM-sum} = P_{CPM-sum} + P_{CPM}(t) - P_{CPM(survie)}(t) \quad (4.8)$$

$$P_{CPF-sum} = P_{CPF-sum} + P_{CPF}(t) - P_{C-faible}(t) \quad (4.9)$$

$$E_B(t+1) = P_B(t)(1-\sigma) \quad (4.8)$$

Où $P_{C-faible}$ est la puissance disponible fournie pour alimenter le CPF.

1.3. La charge factice

$$- Si $P_{C-faible}(t) > P_{CPF-sum}(t)$ Alors $P_{dummy}(t) = P_g(t) - (P_{CPE}(t) + P_{CPF-sum})$ (4.9)$$

1.4. Mode de décharge de la batterie

Dans le cas où la puissance requise pour les charges à priorités élevées est supérieure à la l'énergie produite par les sources, les batteries seront utilisées pour assurer la demande des charges jusqu'à ce que son niveau de décharge atteint sa valeur minimale, $E_{B, min}$, les charges à priorités moyennes seront décalées au moment de surplus de production. Cette logique est prescrite dans les équations suivantes.

$$- Si $(P_g(t) < P_{CPE}(t))$ et $SOC > E_{B,min}$ Alors $B_{BD}(t) = \frac{[P_{CPE}(t) - P_w(t) - (P_{PV}(t) \times \eta_{inv})]}{\eta_{inv} \times \eta_{BD}}$ (4.10)$$

$$P_{CPM-sum} = P_{CPM-sum} + P_{CPM}(t) \quad (4.11)$$

$$P_{CPF-sum} = P_{CPF-sum} + P_{CPF}(t) \quad (4.12)$$

$$E_B(t+1) = P_B(t)(1-\sigma) - P_{BD}(t) \quad (4.13)$$

1.5. Fonctionnement du secteur

Dans le cas où la puissance produite par le système d'énergie hybride et la puissance des batteries n'est pas suffisante pour alimenter les CPE, le réseau public sera utilisé pour répondre au besoin énergétique des HPL.

$$- \text{Si } (P_g(t) < P_{CPE}(t)) \text{ et } SOC \leq E_{B,min} \text{ Alors } P_{secteur} = [(P_{CPE}(t) - P_g(t))] \quad (4.14)$$

1.6. Perte de probabilité de charge

Si le niveau de charge de la batterie atteint son minimum et la puissance fournie par le secteur augmente à un certain niveau, alors la charge à priorité élevée n'aura pas son besoin énergétique et le système va perdre sa fiabilité. Dans ce cas, le compteur DPSP augmentera :

$$DPSP = DPSP + 1 \quad (4.15)$$

La deuxième partie présente une optimisation multi-objectifs pour maximiser la fiabilité, minimiser le coût SEH et le taux de non satisfaction des charges à priorité faible. Cette méthodologie a été simulée en utilisant *MATLAB*. L'organigramme présenté sur la figure 50 illustre la logique utilisée dans la méthodologie proposée :

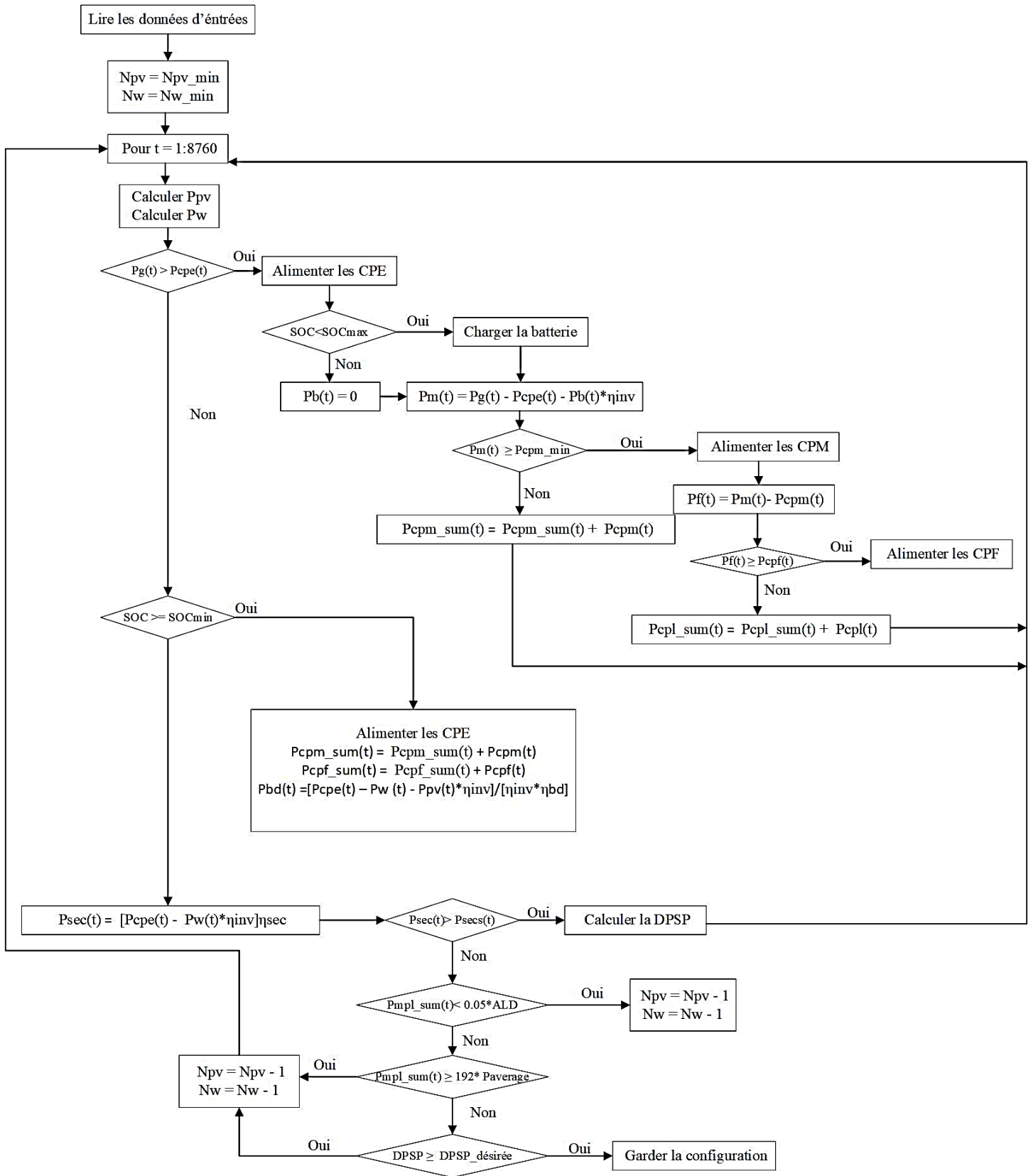


Figure 50: L'organigramme de la logique utilisée dans le programme

2. Algorithme d'optimisation du système d'énergie hybride

Cette partie présente un modèle d'optimisation pour déterminer la taille optimale des composants du système hybride en utilisant la technologie du réseau intelligent. La technique de pilotage de charge a été introduite en fonction de leurs priorités. La CPM est autorisé à alimenter au moment de la production excédentaire afin d'obtenir un profil de demande lissé, et / ou réduire demande de pointe. Ceci, va réduire le coût global d'installation, d'investissement et de l'énergie produite et augmenter la fiabilité du système. Le modèle d'optimisation proposé est un modèle d'optimisations multi-objectives qui permet, à la fois, de maximiser la fiabilité du système qui a été exprimée sur la base de la technique DPSP. L'autre objectif est de minimiser le prix de l'énergie produite.

Le pourcentage autorisé de DPSP a été considéré comme étant 4% et le pourcentage admissible de l'énergie CPF non satisfaite a été absorbé par (8 jours de moyenne CPF). Ce modèle a pour rôle d'assurer que l'énergie totale produite doit satisfaire la demande de la charge, sinon la taille du sous-système éolien et / ou le sous-système PV doit être augmenté de certaines valeurs. Dans l'autre cas, si l'énergie totale générée est supérieure aux exigences de charge, la taille du système d'énergie hybride sera diminuée d'une certaine valeur. Le cycle recommence jusqu'à ce que l'énergie produite satisfasse les exigences de charge tout au long de l'année.

Cette logique peut être résumée par les étapes suivantes :

- Si l'accumulation de non satisfaction des charges à priorités moyennes est inférieure à 0.05 multipliée fois la moyenne de la demande annuelle des charges Alors le nombre des panneaux solaires et des éoliennes sera décrémenté ;
- Si l'accumulation du non satisfaction des charges à priorités faibles est supérieure à certaine pourcentage (la moyenne de 8 jours du non satisfaction des CPF), alors le nombre des panneaux solaires et des éoliennes sera incrémenté ;
- Si la valeur de la DPSP est supérieure à certaine pourcentage (4% dans ce travail), alors le nombre des panneaux solaires et des éoliennes sera incrémenté ;
- Si $P_{cpm_sum} > 0.05.ALD$, $P_{cpf_sum} < 195.P_{average}$ et $DPSP > DPSP_{désirée}$ Alors la valeur optimale de chaque composante du système d'énergie hybride sera conservée, puis calculé le coût du système.

Cette méthode a été appliquée pour optimiser et analyser la taille d'un système composé de panneaux solaires, éoliennes, batteries et connecté avec le secteur afin d'alimenter des charges résidentielles. La charge à fournir avec le système hybride est estimée à 21.5 KW.

La simulation a été réalisée en utilisant des valeurs horaires de rayonnement solaire, de vitesse du vent et de température au cours de l'année 2017. Le rayonnement solaire varie entre 0 et 1054 W/m^2 (Figure 51), la vitesse du vent varie entre 0 et 13,2 m/s (Figure 52), et la température entre 2,3 et 48,8 °C (Figure 53).

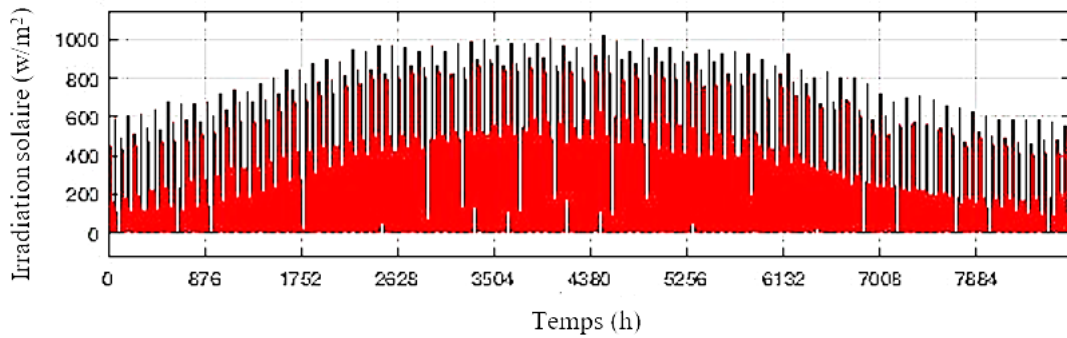


Figure 51: Irradiation solaire horaire

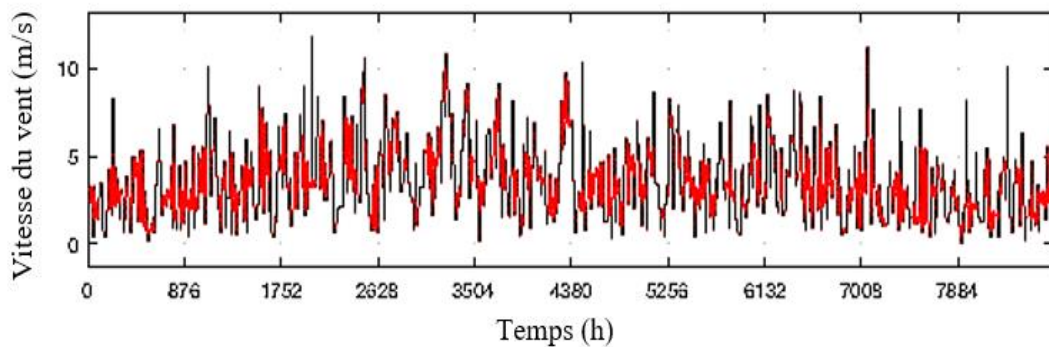


Figure 52: Vitesse horaire du vent

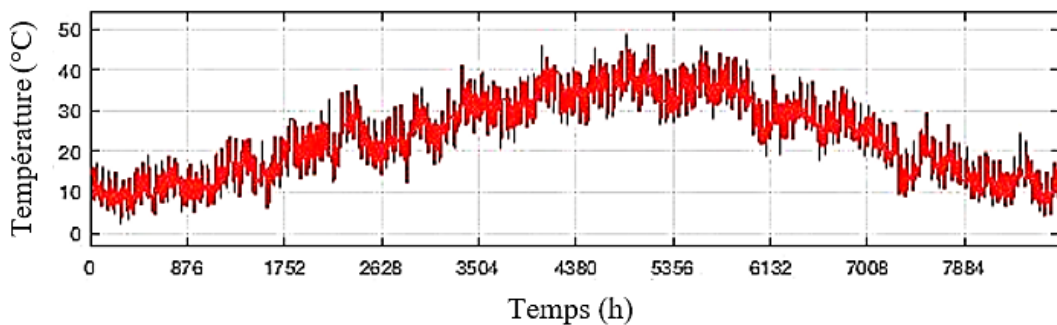


Figure 53: Température horaire du site

La consommation réelle des charges utilisées dans ce projet sont égales à 21.5 KW ; ces charges ont été divisées en trois catégories : CPE, CPM et CPF ; le premier type représente 70% de la charge totale, le deuxième 20% et le dernier correspond à 10%. La figure 54 montre le profil consommation des charges résidentielle.

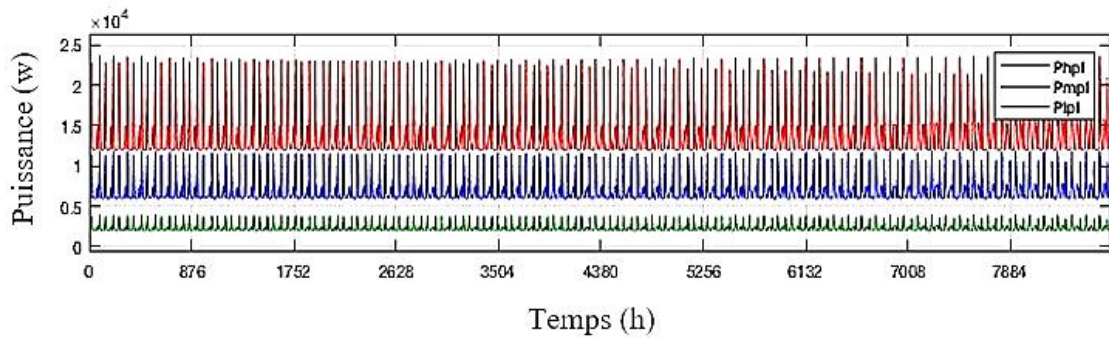


Figure 54: Profil consommation des charges résidentielle

IV. Résultats et discussion

Cette méthode détermine la taille optimale du *SEH* pour satisfaire la demande, et cela en se basant sur les valeurs cumulées des charges à priorité moyenne (P_{cpm_sum}), présentées dans la figure 62, et des charges à priorité faible (P_{cpf_sum}) non satisfaites (figure 63), de l'énergie fictive totale (E_{dummy}), du DPSP et de la valeur minimale du coût. Pour chaque heure, le programme compare le HPL avec la puissance générée par le système, puis il décide de charger ou de décharger les batteries.

Comme le montre la figure 55, le CPE est toujours alimenté au cours de l'année. L'un des objectifs importants de cette méthodologie est d'assurer l'alimentation des CPMs et CPFs tout au long de l'année, Figure 63 montre les valeurs cumulées de la CPF non satisfaite, P_{cpf_sum} , nous remarquons que la P_{cpf_sum} a été concentrée dans les 800 premières heures puis elle a été surmonté à la fin de l'année. Comme présenté dans la figure 56, le surplus d'énergie est négligeable au cours de l'année, où la puissance du panneau est négligeable par rapport à la puissance des batteries d'accumulateurs. En utilisant la méthodologie proposée, nous constatons que le coût optimal du système est 253 000 DH, alors que le coût du système sera 373 000 DH sans utilisation de cette méthodologie. Si le pourcentage de la charge à priorité faible diminue alors le coût sera diminué aussi.

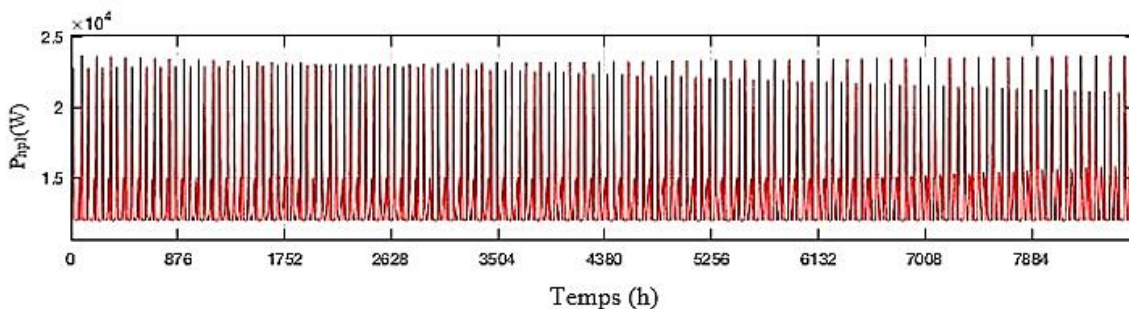


Figure 55: Puissance des charges à priorités élevée

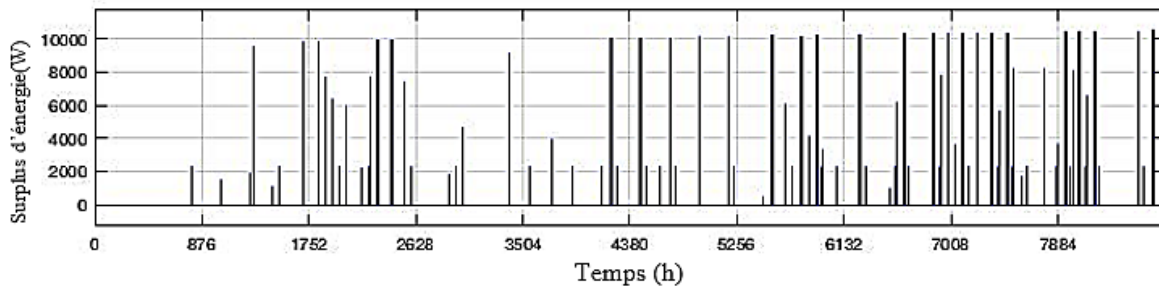


Figure 56: Le surplus d'énergie du système d'énergies hybrides

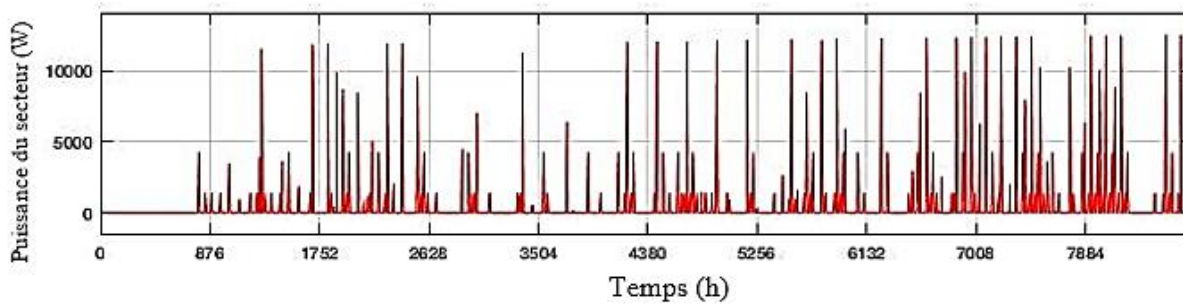


Figure 57: Puissance demandé au réseau public

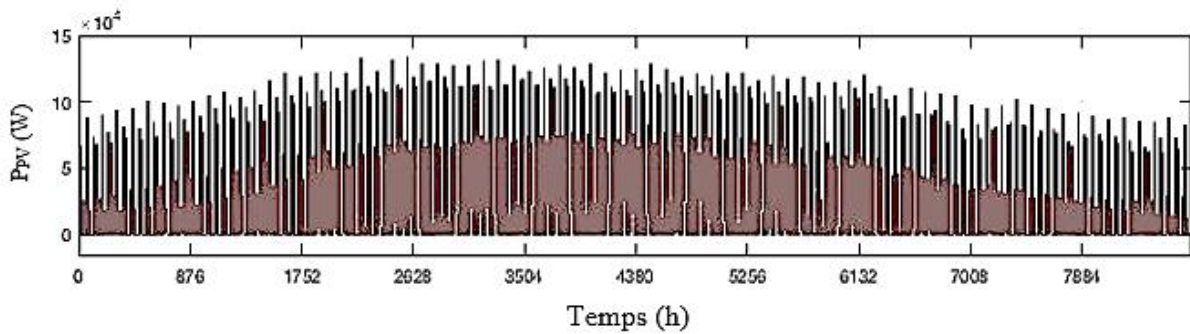


Figure 58: Puissance fournie par les panneaux solaires

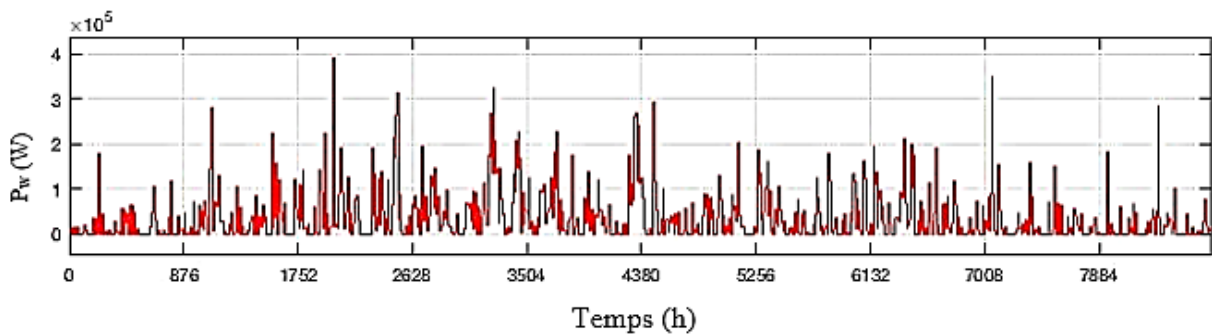


Figure 59: Puissance fournie par les éoliennes

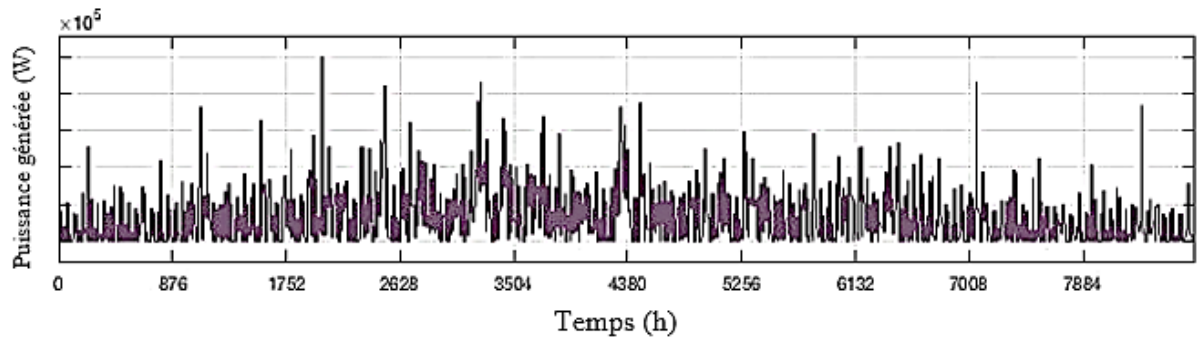


Figure 60: Puissance générée par le système hybride

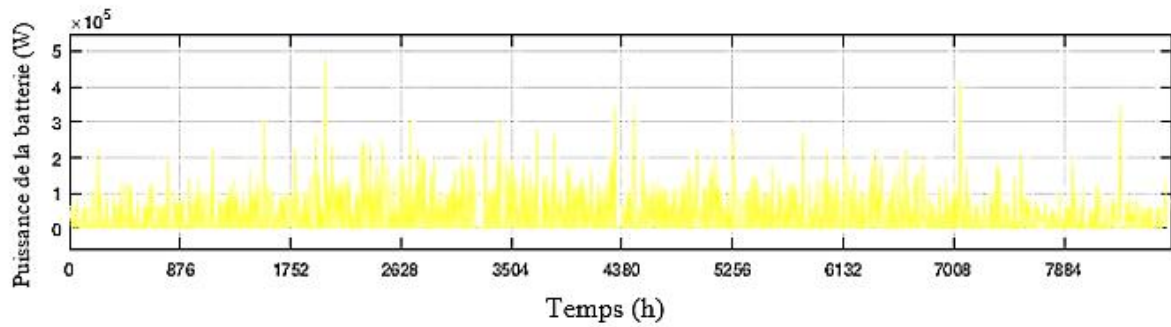


Figure 61: Puissance des batteries

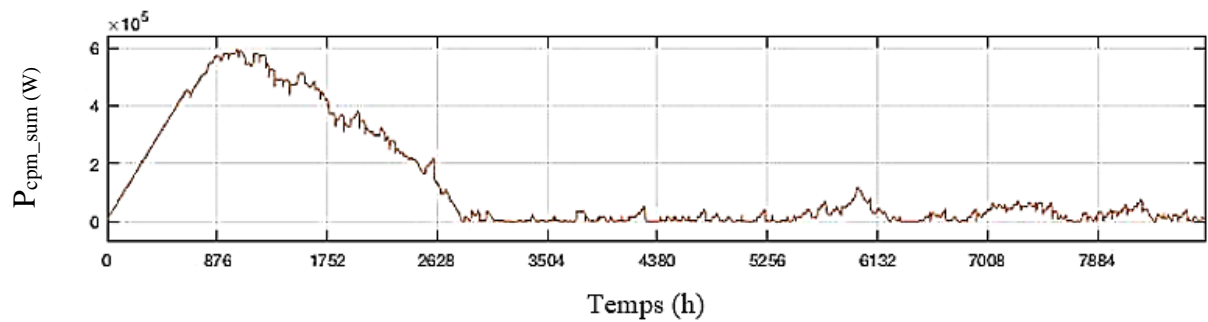


Figure 62: Puissance des charges à priorité moyenne non asservies

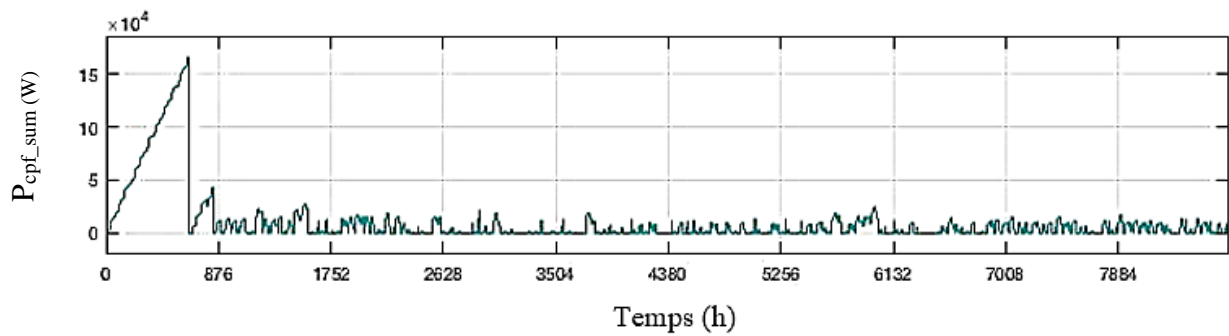


Figure 63: Puissance des charges à priorité faible non asservies

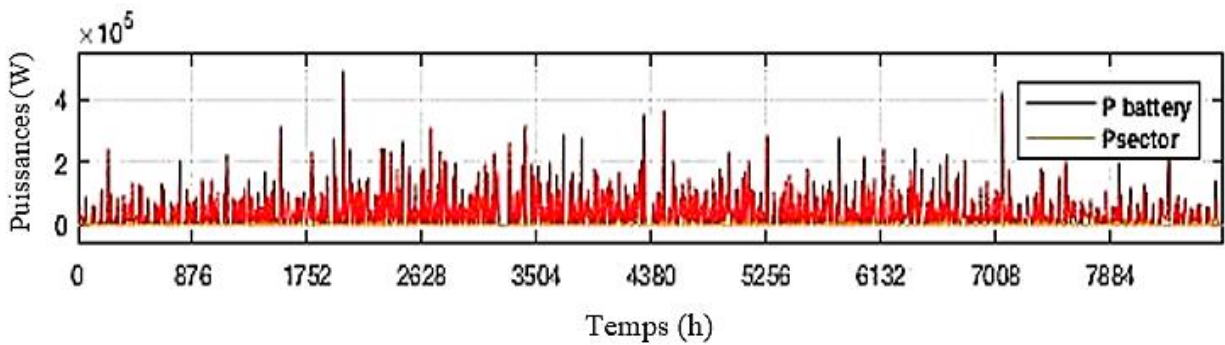


Figure 64: Comparaison des puissances de la batterie et du secteur

V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une nouvelle méthodologie pour optimiser la taille des systèmes hybrides PV / éolien / secteur / batterie en exploitant le principe des réseaux intelligents, et cela en divisant les charges selon leur en priorités : élevées, moyennes et faibles. Le HPL doit être toujours alimenté avec l'énergie produite par le SEH ou par le secteur. Le CPM ne sera alimenté que si l'énergie générée par le SEH est supérieure à la puissance du HPL et que niveau de charge de la batterie est supérieur à son maximum, et le CPF sera alimenté si la charge de priorité moyenne est alimentée. La méthodologie présentée prend la puissance du P_{cpmsum} , P_{cpfsum} , E_{dummy} , $DPSP$ et la valeur minimale du coût pour optimiser la taille du SEH. Les résultats de la simulation ont confirmé que la division des charges selon leurs priorités élevées, moyennes et faibles réduit le taille du système, le prix du kWh généré par le système et augmente la fiabilité du système.

Conclusion générale

Dans cette thèse, nous avons modélisé et analysé des nouvelles méthodes d'optimisation d'un système méthode d'optimisation d'un système d'énergie hybride. Tout d'abord, nous avons commencé par le dimensionnement du système hybride en utilisant une méthode d'optimisation afin de minimiser le nombre des panneaux solaires, des éoliennes et des batteries à installer, ainsi pour diminuer le coût du système hybride. Deuxièmement, nous avons étudié et simulé une nouvelle méthode d'optimisation qui combine les avantages de la méthode P&O, AG et PSO afin de maximiser la puissance fournie par les panneaux solaire. Troisièmement, nous avons simulé une nouvelle méthode dynamique et optimale permettant de faire le pilotage entre les charges et les composantes du système hybride afin de maximiser leurs durées de vie d'une part, ainsi que servir les charges résidentielles du site.

Nous avons commencé ce rapport par une brève présentation du contexte énergétique dans le monde, le réchauffement climatique et le besoin de sources énergétiques vertes, nous avons présenté aussi les enjeux énergétiques, économiques et environnementaux et les moyens de stockage de l'énergie électrique. Ensuite, nous avons montré les différentes sources d'énergies renouvelables ; en particulier l'énergie hydraulique, photovoltaïque, éolienne et géothermie. Nous avons également décrit le cadre général de notre thèse, nos motivations et nos contributions.

Nous avons modélisé, par la suite, le système d'énergie hybride en utilisant la méthode d'optimisation linéaire en nombres MILP, et après nous avons fait une analyse économique de la méthodologie proposée.

Ensuite, nous avons proposé une nouvelle méthodologie, pour maximiser la puissance de sortie du panneau solaire, qui combine les avantages des trois méthodes d'optimisations ; perturbation et observation, les algorithmes génétiques et la méthode PSO afin de fournir le signal de commande au convertisseur de puissance pour forcer le panneau photovoltaïque à produire sa puissance maximale.

De plus, nous avons fait une étude dynamique, optimale et multi-objective du système d'énergie hybride en utilisant une méthode nouvelle basée sur le pilotage des composants du système hybride et la division des charges résidentielles en trois grandes catégories selon leurs priorités : charges à priorité élevés, moyennes et faibles.

La durée de vie du projet est estimée à 25 ans. Les différentes méthodes étudiées dans cette thèse ont été simulées avec le logiciel MATLAB SIMULINK.

A travers les résultats de notre thèse, nous avons pu réaliser les objectifs importants du projet. Pour approfondir cette étude nous projetons d'étudier le problème de maximisation de la puissance produite par les turbines éoliennes. En faisant une étude numérique d'optimisation d'une turbine éolienne de petite puissance.

Ces travaux de thèse peuvent subir des améliorations et des nombreuses perspectives peuvent être dégagées à leur issue. Au niveau de la procédure d'optimisation et le contrôle dynamique optimale et multi objectifs d'un système d'énergie hybride, un outil automatisant la méthodologie proposée avec des interfaces conviviales pour l'utilisateur peut être développé. Ainsi, un maximisateur de la puissance fournie par les éoliennes est nécessaire pour améliorer leurs performances. Il reste aussi la mise en œuvre d'une plateforme expérimentale permettant la validation sur des équipements réels les stratégies de gestion développées.

Bibliographies

- [1] Bertrand, F., & Simonet, G. Les trames vertes urbaines et l'adaptation au changement climatique : perspectives pour l'aménagement du territoire. *La revue électronique en sciences de l'environnement*. 2012
- [2] P. Li. Formalisme pour la Supervision des Systèmes Hybrides Multi-Sources de Générateurs d'Énergie Répartie : Application à la Gestion d'un Micro Réseau. *PhD thesis, École Centrale de Lille*, 2009
- [3] Hristiyan Kanchev. Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain. *Phd thesis, Ecole Centrale de Lille*.2014.
- [4] Fontanel, J. (2020, March). Economie et réchauffement climatique L'analyse de Jeremy Rifkin en question. In *Guerres et conflits économiques*.
- [5] Kanchev, H. Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain. *Thesis Doctoral dissertation, Ecole centrale de Lille*. 2014.
- [6] Védie, H. L. Les Énergies Renouvelables au Maroc : Un Chantier de Règne/Renewable Energy in Morocco : A Reign-long Project.2020.
- [7] S. Djeriou. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone. *Thèse de doctorat*. 2018.
- [8] Zaoui, A., Lahbib, A., & Laribi, S. Contrôle MPPT basé sur une technique intelligente

- pour un système photovoltaïque. *Doctoral dissertation, universite Ahmed Draia-ADRAR*. 2021.
- [9] Dlimi, F., Djelaili, Z., & Harrouz, A. Etude et contrôle d'une turbine éolienne a axe verticale couple a un générateur éolien. *Doctoral dissertation, Universite Ahmed Draia-ADRAR*. 2020.
- [10] P. Bauer, S. W. H. de Haan, C. R. Meyl, and J. T. G. Pierik. Evaluation of electrical systems for offshore windfarms. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. 3: 1416–1423, 2000
- [11] W. Manfred Stiebler. Wind Energy-Sysyems for Electric Powe Generation. *Green Energy and Technology*. 2008.
- [12] S. Müeller, M. Deicke, and R. W. De Doncker. Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant IGBT converters linked to the rotor. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. 4: 2249–2254, 2000.
- [13] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita. Etat de l'art des aérogénérateurs : l'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables. *Club Electronique de Puissance*.97-154, 2002.
- [14] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben ahmed. Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance. *Electrotechnique du Futur 2001* nov. 2001, Nancy France, pp.17-22
- [15] M. Urbain. Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Li-Ion. Estimation en ligne de la SOC et de la SOH. *Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine*. 2009.
- [16] M. H. Kacem, S. Tounsi, and R. Neji. Utilisation des supercondensateurs et des batteries pour le stockage de l'énergie embarquée pour véhicule électrique. *International Conference on Green Energy and Environmental Engineering*, 2014.
- [17] M. Kanagawa and T. Nakata. Assessment of access to electricity and the socio-economic impacts in rural areas of developing countries. *Energy Policy*.36: 2016–2029, 2008.

- [18] Chaurey, A., Ranganathan, M., & Mohanty, P. Electricity access for geographically disadvantaged rural communities—technology and policy insights. *Energy policy*. 32:1693-1705, 2004.
- [19] N. El Bassam. Renewable energy for rural communities. *Renewable Energy*. 24: 401–408, 2001.
- [20] J. L. Bernal-Agustín and R. Dufo-López. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13: 2111–2118, 2009.
- [21] B. Y. Ekren and O. Ekren. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy*. 86: 1387–1394, 2009.
- [22] A. Gheiratmand, R. Effatnejad, and M. Hdayati. Technical and economic evaluation of hybrid wind/pv/battery systems for off-grid areas using HOMER software. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 7: 134–143, 2016.
- [23] J. A. Cherni, I. Dyner, F. Henao, P. Jaramillo, R. Smith, and R. O. Font. Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system. *Energy Policy*. 35: 1493–1504, 2007.
- [24] T. M. Khalil. Comparative analysis of energy resources. *International Journal of Production Research*. 19: 401–409, 1981.
- [25] E. Georgopoulou, D. Lalas, and L. Papagiannakis. European journal of operational research a multicriteria Decision Aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*. 103: 38–54, 1997.
- [26] S. Ashok. Optimised model for community-based hybrid energy system. *Renewable Energy*. 32: 1155–1164, 2007.
- [27] B. K. Bala and S. A. Siddique. Optimal design of a PV-diesel hybrid system for electrification of an isolated island-Sandwip in Bangladesh using genetic algorithm.

Energy for Sustainable Development. 13:137–142, 2009.

- [28] R. Hosseinalizadeh, H. Shakouri G, M. S. Amalnick, and P. Taghipour. Economic sizing of a hybrid (PV-WT-FC) renewable energy system (HRES) for stand-alone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 54:139–150, 2016.
- [29] Y. Kalinci, A. Hepbasli, and I. Dincer. Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid renewable energy system with hydrogen production and storage options. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40: 7652–7664, 2015.
- [30] M. Smaoui, A. Abdelkafi, and L. Krichen. Optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind/hydrogen hybrid system supplying a desalination unit. *Solar Energy*. 120: 263–276, 2015.
- [31] G. Bekele and G. Tadesse. Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia. *Applied Energy*. 97: 5–15, 2012.
- [32] El Khadimi, A., Bchir, L., & Zeroual, A. Dimensionnement et Optimisation Technicoéconomique d'un système d'Energie Hybride photovoltaïque-Eolien avec Système de stockage. *Energies Renouvelable*. 7:73-83, 2004.
- [33] Kerkouche, K., Cherfa, F., Arab, A. H., Bouchakour, S., Abdeladim, K., & Bergheul, K.. Evaluation deS l'irradiation solaire globale sur une surface inclinée selon différents modèles pour le site de Bouzaréah. *Journal of Renewable Energies*. 16: 269-284, 2013.
- [34] T.M.Klucher. Evaluation f Models To Predict Insolation on Tilted Surfaces. *Solar Energy*. 23: 111–114, 1979.
- [35] C. M. Hladik. Salt as a 'non-food': To what extent do gustatory perceptions determine non-food vs food choices?. *Consuming the Inedible: Neglected Dimensions of Food Choice*. 6: 121–130, 2007.
- [36] D.A. Fadare. A Statistical Analysis of Wind Energy Potential in Ibadan, Nigeria, Based on Weibull Distribution Function. *The Pacific Journal of Science and Technology* . 9: 110–9,2008.

- [37] M.J. Stevens and P.T. Smulders. The estimation of parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes. *Wind Eng.* 3: 132-145, 1979.
- [38] Ajayi, O., Fagbenle, R., Katende. Wind Profile Characteristics and Econometrics Analysis of Wind Power Generation of a Site in Sokoto State, Nigeria. *Energy science and technology.* 1: 54-66, 2011.
- [39] Jamil, M. Wind Power Statistics and Evaluation of Wind Energy Density. *Wind Engineering*, 18: 227-240, 1994.
- [40] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers. Wind energy explained: Theory, design and application. John Wiley and Sons Ltd. 2002
- [41] P. A. Costa Rocha, R. Coelho de Sousa, C. Freitas de Andrade, M. Vieira da Silva. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Applied Energy.* 89 395–400, 2012.
- [42] S. S. Mehta, G. Doumane, T. Mura, D. Nocca, and J. M. Fabre. Laparoscopic versus open distal pancreatectomy: A single-institution case-control study. *Surgical Endoscopy.* 26: 402–407, 2012.
- [43] Haeusler, L., Gié, G., Moreira, D., Badouard, T., & Crenes, M. (2020). Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France. ADEME. 2020.
- [44] J. V. Lagudu, G. Vulasala, and S. Sathy Narayana. Maximum energy harvesting in solar photovoltaic system using fuzzy logic technique. *International Journal of Ambient Energy.* 0: 1–11, 2018.
- [45] S. Necaibia, M. S. Kelaiaia, H. Labar, A. Necaibia, and E. D. Castronuovo. Enhanced auto-scaling incremental conductance MPPT method, implemented on low-cost microcontroller and SEPIC converter. *Solar Energy.* 180: 152-168, 2019.
- [46] F. F. Ahmad, C. Ghenai, A. K. Hamid, and M. Bettayeb. Application of sliding mode control for maximum power point tracking of solar photovoltaic systems: A comprehensive review. *Annual Reviews in Control.* 49:173-196, 2020.
- [47] A. Harrag and S. Messalti. IC-based variable step size neuro-fuzzy MPPT Improving PV system performances. *Energy Procedia.* 157: 362-374, 2019.

- [48] R. Alik and A. Jusoh. An enhanced P&O checking algorithm MPPT for high tracking efficiency of partially shaded PV module. *Solar Energy*. 163: 570-580, 2018.
- [49] H. Abouobaida and M. Cherkaoui. New maximum power point tracker for fast changing environmental conditions. *International Conference on Multimedia Computing and Systems -Proceedings*. 1-5, 2011.
- [50] Bouchakour, Abdelhak, Abdelhalim Borni, and Mostéfa Brahami. Comparative study of P&O-PI and fuzzy-PI MPPT controllers and their optimisation using GA and PSO for photovoltaic water pumping systems. *International Journal of Ambient Energy* 42:1746-1757, 2021.
- [51] R. Srikanth, M. Venkatesan, and M. S. Rao. Design and performance evaluation of pid, fuzzy and ann based mppts for hybrid electric vehicle applications. *International Journal of Ambient Energy*. 0: 1–29, 2020.
- [52] M. Bencherif and T. Benouaz. Parameter extraction of solar panels using the graphical method. *International Journal of Ambient Energy*. 41: 927–944, 2020.
- [53] M. Bencherif and N. Brahami. Solar cell parameter identification using the three main points of the current-voltage characteristic. *International Journal of Ambient Energy*. 0:1–26, 2020.
- [54] X. W. Zhang, H. Liu, and L. P. Tu. A modified particle swarm optimization for multimodal multi-objective optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 95: 103905, 2020.
- [55] DOUNIA, S., & BORHANE, G. Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque. 2021.
- [56] Essakhi, Hassan. Modélisation et simulation d'un module photovoltaïque. *LASIME, ESTA Université Ibn Zohr* . 2019.
- [57] Sami, Benredjem, and Djeroud Ines. Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque. 2021.

- [58] S. Kalogirou. Solar Energy Engineering. 116: 67–68, 2009.
- [59] Ayati, F., et al. Modélisation d'un système de production d'hydrogène solaire par électrolyse. *Rev. Energ.* 7: 135-150, 2004.
- [60] Abada, Sofiane. Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic. 2011.
- [61] Boussaâdia, Fouad, and Laid Bouafia. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. Diss. university of M'sila, 2022.
- [62] Bachir, Mr BENDJEDIA. Belkacem KORICH. Diss. Djelfa University, 2022.
- [63] R. Eberhart and James Kennedy. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory. *International Symposium on Micro Machine and Human Science*. 39–43, 1999.
- [64] Bachir, Mr BENDJEDIA. Belkacem KORICH. Diss. Djelfa University, 2022.
- [65] Sun, Yulong, et al. Research on building truss design based on particle swarm intelligence optimization algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 13: 38-48, 2022.
- [66] Zhang, Yudong, Shuihua Wang, and Genlin Ji. A comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications. *Mathematical problems in engineering*, 2015.
- [67] Wang, Dongshu, Dapei Tan, and Lei Liu. Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft computing*. 22: 387-408, 2018.
- [68] Ding, Shifei, Chunyang Su, and Junzhao Yu. An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm. *Artificial intelligence review*. 36: 153-162, 2011.
- [69] M. Lasheen, A. K. A. Rahman, M. Abdel-Salam, and S. Ookawara. Performance Enhancement of Constant Voltage Based MPPT for Photovoltaic Applications Using Genetic Algorithm. *Energy Procedia*. 100: 217–222, 2016.

- [70] A. A. Kulaksiz and R. Akkaya. A genetic algorithm optimized ANN-based MPPT algorithm for a stand-alone PV system with induction motor drive. *Solar Energy*. 86: 2366–2375, 2012.
- [71] Amédée, Souquet, and Radet Francois-Gérard. ALGORITHMES GENETIQUES. TE de fin d'année (2004).
- [72] Vallée, Thomas, and Murat Yildizoğlu. Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie. *Revue d'économie politique*. 711-745, 2004.
- [73] HABIBECHE, Mustapha. Une étude de la modélisation et comparative entre Réseau de neurones artificiels, Algorithmes génétiques et Box-Jenkins en prévision de série chronologique chaotique. Diss. 2020.
- [74] Aibeche, Younes. Développement d'un système intelligent de gestion des feux de circulation à Base des algorithmes génétiques. Diss. University of Jijel, 2020.
- [75] LACROIX, Jean-Sébastien, and Stéphane Terrade. Algorithmes Génétiques. MATH, 2004.
- [76] Ayadi, Ines, et al. Optimisation par algorithme génétique de la maintenance préventive dans un contexte de modélisation par modèles graphiques probabilistes. *Lambda Mu 17, 17ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement*. 2010.
- [77] ESSAYIE, Stéphane, and Moustafa NAKECHBANDI. Politiques de sélection dans les algorithmes génétiques.
- [78] Durand, Nicolas, Jean-Marc Alliot, and Joseph Noailles. Algorithmes génétiques: un croisement adapté aux fonctions partiellement séparables. *Journées Evolutions Artificielles*. 1994.
- [79] Kuri, Angel, Col Lindavista, and D. F. México. A Solution to the Prisoner's Dilemma using an Eclectic Genetic Algorithm." *Symposium Internacional de Computación. CIC*. 1997.
- [80] Fleurent, Charles, and Jacques A. Ferland. Algorithmes génétiques hybrides pour l'optimisation combinatoire. *RAIRO-Operations Research*. 30: 373-398, 1996.

- [81] T. Ma, H. Yang, and L. Lu. A feasibility study of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island. *Applied Energy*. 121: 149–158, 2014.
- [82] Z. El hariz, H. Aissaoui, M. Diany. Optimal Unit Sizing of PV / Wind / Battery / Sector Generating System. 2018.
- [83] S. Sinha and S. S. Chandel. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 50: 755–769, 2015.
- [84] L. Stoyanov. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. 2011.
- [85] Y. Kalinci, A. Hepbasli, and I. Dincer. Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid renewable energy system with hydrogen production and storage options. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40: 7652–7664, 2015.
- [86] S. Kumar and H. Ranjan. Prospect of wind e PV – battery hybrid power system as an alternative to grid extension in Bangladesh. *Energy*. 35: 3040–3047, 2010.
- [87] R. Hosseinalizadeh, H. Shakouri, G. Mohsen, S. Amalnick, P. Taghipour. Economic sizing of a hybrid (PV–WT–FC) renewable energy system (HRES) for standalone usages by an optimization-simulation model: Case study of Iran. *Renew Sustain Energy Rev*. 54:139–50, 2016.
- [88] S. Bhattacharjee and S. Acharya. PV-wind hybrid power option for a low wind topography. *Energy Conversion and Management*. 89: 942–954, 2015.
- [89] A. Askarzadeh and L. dos Santos Coelho. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran. *Solar Energy*. 112: 383–396, 2015.
- [90] S. Sanajaoba and E. Fernandez. Maiden application of Cuckoo Search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System. *Renewable Energy*. 96: 1–10, 2016.
- [91] A. Maleki and F. Pourfayaz. Optimal sizing of autonomous hybrid

- photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy*. 115: 471–483, 2015.
- [92] Ahadi A, Kang S-K, Lee J-H. A novel approach for optimal combinations of wind, PV, and energy storage system in diesel-free isolated communities. *Appl Energy*. 170:101–15, 2016.
- [93] M. Baneshi and F. Hadianfard. Techno-economic feasibility of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern Iran climate conditions. *Energy Conversion and Management*. 127: 233–244, 2016.
- [94] F. Fazelpour, N. Soltani, and M. A. Rosen. Economic analysis of standalone hybrid energy systems for application in Tehran, Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*. 41: 7732–7743, 2016.
- [95] W. Margaret Amutha and V. Rajini. Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 43: 553–561, 2015.
- [96] G. Bekele and G. Tadesse. Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia. *Applied Energy*. 97: 5–15, 2012.
- [97] Z. Chmiel and S. C. Bhattacharyya. Analysis of off-grid electricity system at isle of eigg (Scotland): Lessons for developing countries. *Renewable Energy*. 81: 578–588, 2015.
- [98] K. D. Mercado, J. Jiménez, and M. C. G. Quintero. Hybrid Renewable Energy System based on Intelligent Optimization Techniques. *International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*. 5: 661 - 666, 2016.
- [99] C. Pradip, K. Vinoth Kumar, and M. Lydia. A comprehensive overview on PV based hybrid energy systems. *International Journal of Renewable Energy Research*. 9: 1241–1248, 2019.
- [100] A.R Musgrove. The Optimization of Hybrid Energy Conversion Systems Using the Dynamic Programming Model. *INternational journal of energy research*. 12: 447-457,

1988.

- [101] R. Chedid and S. Rahman. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 12: 79–85, 1997.
- [102] R. Chedid and Y. Saliba. Optimization and control of autonomous renewable energy systems. *International Journal of Energy Research*. 20: 609–624, 1996.
- [103] Tanaka, M., Eto, H., Mizuno, Y., Matsui, N., & Kurokawa, F. Genetic algorithm based optimization for configuration and operation of emergency generators in medical facility. In *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 919-924. 2017.
- [104] K. El Bouyahyiouy and A. Bellabdaoui. A new crossover to solve the full truckload vehicle routing problem using genetic algorithm. *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Logistics Operations Management, GOL 2016*, 2016.
- [105] K. El Bouyahyiouy and A. Bellabdaoui. An ant colony optimization algorithm for solving the full truckload vehicle routing problem with profit. *2017 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management: Competitiveness and Innovation in Automobile and Aeronautics Industries, LOGISTIQUA 2017*. 142–147, 2017.
- [106] Y. Mizuno, N. Matsui, Y. Tanaka, and F. Kurokawa. A new approach of optimum energy scheduling of emergency generators using linear programming in a large hospital. *Proceedings of International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2016)*. 832-836, 2016.
- [107] S. H. Karaki, R. B. Chedid, and R. Ramadan. Probabilistic performance assessment of wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 14: 217–224, 1999.

