

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Ref : D012119006D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم: الهندسة الميكانيكية

المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en électromécanique

Option :
Systemes énergétiques

**Optimisation et Commande d'un système énergétique multi
source**

Présentée par :
GABOUR AMINA

Soutenue publiquement le 23 /06 / 2019

Devant le jury composé de :

Président	: Salim Haddad	Professeur	Université de Skikda
Encadreur	: Abderezak Metatla	Professeur	Université de Skikda
Examineurs :	Lilia Zighed	Professeur	Université de Skikda
	Khaled Touafek	Directeur de recherche	UREAR Ghardaïa
	Youcef Soufi	Maître de conférences A	Université de Tébessa

DEDICACE

A ma mère

A mon père

A mon mari Ahmed

A mes fleurs Ala et Aya

A mes Sœurs : Halima et Fatima Zohra

A mes frères : Boubaker, Abderrahim, Soulimane et Djaber

A mes beaux parents, ma grande famille et mes proches

A tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir

REMERCIEMENTS

Je remercie le Bon Dieu de m'avoir donné le courage, la force, la volonté et surtout la patience qui m'a permis d'accomplir ce travail.

*J'adresse mes plus sincères remerciements à Monsieur **METATLA Abderrezak**, Professeur à l'université 20 août 1955 Skikda, de m'avoir encadré et encouragé durant cette période.*

*Je remercie Monsieur **HADDAD Salim**, Professeur à l'université 20 août 1955 Skikda, de l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de cette Thèse de doctorat.*

*Je tiens à témoigner à Madame **ZIGHED Lilia** Professeur à l'université 20 août 1955 Skikda, Monsieur **TOUAFEK Khaled** Directeur du centre de recherche UREAR Ghardaia, ainsi que Monsieur **SOUFI Youcef**, maîtres de conférences à l'université de Tébessa, pour avoir accepté de participer au jury de cette Thèse de doctorat.*

Je tiens également à remercier tous les autres enseignants, collègues, personnel du département de génie mécanique pour leurs compétences, leur disponibilité et leur gentillesse pendant toutes ces années.

Enfin, je remercie toute personne de près ou de loin qui m'a appuyé et encouragé à effectuer ce travail

ملخص

تخضع الطاقة التي تنتجها أنظمة الطاقات المتجددة لتأثيرات الظروف الجوية؛ و بذلك، فإن دمج المصادر المتجددة، مع المصادر التقليدية، يوفر حلاً أكثر وثوقاً وقابل للتحقيق من أجل إنتاج الطاقة الكهربائية، و هو ما يطلق عليه تسمية الأنظمة المتعددة المصادر الهجينة.

يعد اختيار الهيكل المناسب بمثابة الخطوة الأساسية في الأنظمة المتعددة المصادر بغية التحكم بشكل أفضل في تدفق الطاقة بين هذه المصادر.

في هذا السياق، نقدم منهجية تهدف إلى تحسين أنظمة الطاقة ذات النمط المتعدد المصادر و التحكم فيها، من أجل ضمان تسيير جيد للطاقة لتلبية الطلب في موقع معزول.

يتكون النظام من مصادر متجددة (تعمل بالطاقة الشمسية و الرياح) و كذا عناصر تخزين الطاقة الكهربائية، مثل البطاريات؛ بحيث يعتبر هذا النظام مرتبطاً بمولد طاقة يعمل بالديزل.

يكن الهدف المسطر في حل مشكلة التحسين عن طريق استخدام طريقة محددة بشكل جيد، و هي التحسين من خلال خوارزمية جينية (GA). من أجل تقليص التكلفة الإجمالية لاستثمار (STC) حسب عامل الطاقات المتجددة (RF) من أجل تلبية الطلب. تتم دراسة مختلف السيناريوهات و التشكيلات و كذا مقارنتها من أجل تحليل فعالية و قوة كل حالة، بالإضافة إلى دراسة جدوى كل نظام و كل تشكيلة.

تُظهر النتائج النظرية، المتحصل عليها من خلال الطريقة التي تم تطويرها، تأثير عامل الطاقات المتجددة (RF) على التكلفة الإجمالية للاستثمار (STC) و على اختيار أفضل تشكيلة و أكثرها ملائمة.

الكلمات المفتاحية: التحسين، التحكم، الكهروضوئية، طاقة الرياح، البطارية، الديزل، النظام المتعدد المصادر.

Résumé

La puissance produite par les systèmes d'énergies renouvelables est influée par les conditions météorologiques; par conséquent, la combinaison des sources renouvelables, avec des sources conventionnelles, fournit une solution plus fiable et réalisable pour produire l'énergie électrique, appelée les systèmes multi-sources ou bien les systèmes hybrides.

Le choix de l'architecture convenable est une étape indispensable dans les systèmes multi-sources pour mieux contrôler le flux d'énergie entre ces sources.

Dans ce contexte, nous présentons une méthodologie de commande et d'optimisation des systèmes énergétiques des types multi-sources en vue d'assurer la bonne gestion de la puissance afin de satisfaire la demande d'un site isolé.

Le système est composé de sources renouvelables (solaires et éoliennes) et des éléments de stockage (les batteries), lequel est associé à un Générateur Diesel.

L'objectif tracé est de résoudre le problème d'optimisation en utilisant une méthode bien déterminée, à savoir l'optimisation par algorithme génétique (GA). En vue de réduire le coût d'investissement total du système (STC) en fonction du facteur d'énergie renouvelable (RF) pour satisfaire la demande. De différents scénarios et différentes configurations sont étudiés et comparés pour analyser l'efficacité et la robustesse de chaque cas et d'étudier la faisabilité de chaque système et chaque configuration.

Les résultats théoriques obtenus par l'approche développée montrent l'impact du facteur d'énergie renouvelable (RF) sur le coût d'investissement total du système (STC) et sur le choix de la meilleure configuration.

Mots clés: Optimisation, Commande, PV, Eolien, Batterie, Diesel, Système multi-sources.

Abstract

Power produced by renewable energy systems is affected by weather conditions; therefore, the combination of renewable sources, with conventional sources, provides a more reliable and attainable solution for producing electrical power, which is called hybrid multi-source systems.

The choice of appropriate architecture represents a crucial step in multi-source systems so as to better control the flow of energy between these sources.

In this context, we present a methodology for optimization and control purposes of the energy systems of multi-sources types in order to ensure the proper power management in order to meet with the demand of an isolated site.

The system is composed of renewable sources (solar and wind) and storage elements of electrical energy (such as batteries); the system of which is associated with a Diesel Generator.

The outlined objective is to solve the optimization problem by use of well-defined method, namely by Genetic Algorithm (GA). In order to reduce the System Total Investment Cost (STC) based on the Renewable Energy Factor (RF) to meet with the load. Different scenarios and configurations are studied and compared for analyzing the effectiveness and robustness of each case and studying alike the feasibility of each system and each configuration.

The theoretical results obtained by the developed approach show the impact of RF on the STC in addition to the choice of the best configuration and the most adequate one.

Keywords: Optimization, Control, PV, Wind, Battery, Diesel, Multi-sources system.

Sommaire

Introduction générale	16
------------------------------------	----

Chapitre I

I.1 Introduction.....	18
I.2 Contexte mondial et Algérien.....	18
I.2.1 Contexte énergétique mondial.....	18
I.2.2 Contexte énergétique Algérien.....	21
I.2.2.1 Consommation énergétique de l'Algérie.....	21
I.2.2.2 Production de l'électricité en Algérie.....	22
I.2.2.3 Programme des énergies renouvelables.....	22
I.2.2.3.1 Potentiels des énergies renouvelables en Algérie.....	23
I.2.2.3.2 Le programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.....	26
I.2.2.3.3 Projets et actions de la phase 2011 – 2014 du programme national des énergies renouvelables (2011-2014).....	28
I.3 Généralités sur les systèmes de production de l'énergie renouvelable.....	29
I.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque.....	30
I.3.1.1 La cellule photovoltaïque.....	30
I.3.1.2 Le module photovoltaïque.....	31
I.3.1.3 Le panneau photovoltaïque.....	32
I.3.1.4 Le champ photovoltaïque.....	32
I.3.1.5 Les caractéristiques d'un panneau PV.....	33
I.3.2 L'énergie éolienne.....	33
I.3.2.1 L'éolienne.....	34
I.3.2.2 Les différents types d'éoliennes.....	35
I.3.2.3 Principe de fonctionnement.....	37
I.3.2.4 Caractéristiques de l'éolienne.....	37
I.3.2.4.1 Puissance récupérable par une turbine.....	37
I.3.2.4.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	40
I.4 Conclusion.....	41

Chapitre II

II.1 Introduction.....	42
II.2 Electrification des sites.....	42
II.2.1 Electrification centralisée.....	42
II.2.2 Electrification décentralisée.....	42
II.2.2.1 Technologie de groupes électrogènes diesel.....	42
II.2.2.2 Technologies des énergies renouvelables.....	43
II.2.2.3 Système hybride ou bien système multi-sources.....	43
II.3 Le système multi-sources.....	43
II.3.1 Système de stockage.....	44
II.3.1.1 Principe de fonctionnement.....	45
II.3.1.2 Caractéristique de la batterie.....	46
II.3.2 Générateur diesel.....	47
II.3.3 Convertisseurs de puissance.....	47
II.3.4 Classification des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable.....	48

II.3.5 Différentes configurations des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable	48
II.3.5.1 Architecture à bus à Courant Continu	49
II.3.5.2 Architecture à bus à Courant Alternatif	50
II.3.5.3 Architecture mixte à bus à CC/CA	51
II.3.6 Etudes des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable à base de PV et éolien	52
II.3.6.1 Systèmes multi-sources avec source d'énergie conventionnelle	53
II.3.6.2 Systèmes multi-sources sans source conventionnelle	55
II.4 Conclusion	57

Chapitre III

III.1 Introduction.....	58
III.2 Stratégies de commande des systèmes multi-sources.....	58
III.3 Etat de l'art sur les logiciels et les outils de dimensionnement et d'optimisation des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable.....	60
III.3.1 SOMES.....	61
III.3.2 HOMER.....	62
III.3.3 HYBRID2.....	62
III.3.4 HOGA.....	63
III.3.5 SOLSIM	63
III.3.6 RAPSIM	63
III.3.7 ARES	64
III.4 Les algorithmes d'optimisation utilisée pour résoudre les problèmes de conception, planification et contrôle des systèmes multi-sources	64
III.4.1 L'optimisation	64
III.4.2 Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation ?.....	65
III.4.2.1 Problème mono-objective	66
III.4.2 Problème multi-objective	66
III.4.3 Les méthodes récentes utilisées pour l'optimisation du système multi-sources	68
III.4.3.1 L'algorithme DIRECT	68
III.4.3.2 Algorithmes Génétiques	70
III.4.3.3 Optimisation par essais particuliers	77
III.4.3.4 Colonie Artificielle d'Abeilles	83
III.4.3.5 Recherche d'Harmonie	84
III.4.3.6 Algorithme de Colonies de Fourmis	86
III.4.3.7 Algorithme de Recherche de Coucou.....	88
III.4.3.8 Autres algorithmes	89
III.4.3.9 Méthodes Hybrides	93
III.4.3.10 Critères pour le dimensionnement optimal et l'optimisation des coûts.....	94
III. 5 Conclusion	98

Chapitre IV

IV.1 Introduction	99
IV.2 Modélisation des systèmes photovoltaïques, éoliennes et élément de stockage	99
IV.2.1 Modélisation des systèmes.....	99

IV.2 1.1 Modélisation du système photovoltaïque.....	99
IV.2 1.2 Modélisation de la turbine éolienne.....	102
IV.2 1.3 Modélisation du système de stockage.....	103
IV.3 Architecture des systèmes proposés.....	105
IV.4 Modèle du système PV.....	105
IV.5 Modèle de l'éolienne.....	106
IV.6 Modèle de batterie utilisé pour le dimensionnement du system multi-sources.	106
IV.7 Modèle du générateur Diesel.....	108
IV.8 Stratégies de fonctionnement.....	109
IV.9 Formulation du problème d'optimisation Etablissement des fonctions objectives et prise en compte les contraintes.....	112
IV.9.1 Critère économiques Le Coût d'investissement total du système STC.....	112
IV.9. 2 Les critères techniques du facteur d'énergies renouvelables (RF)	114
IV.9. 3 Les fonctions objectives et les constraints.....	114
IV.10 Méthodes d'optimisation choisies.....	115
IV.10.1 L'optimisation par GA.....	115
IV. 11 Conclusion.....	117
 Chapitre V	
V.1 Introduction.....	118
V.2 Application au site choisi.....	118
V.2.2 Evaluation des ressources et de la demande.....	119
V.2.2.1 Ressource éolienne.....	119
V.2.2.2 Ressource solaire.....	119
V.2.2.3 La température.....	120
V.2.2.4 Courbe de charge.....	121
V.3 Les paramètres économiques et techniques utilisées.....	121
V.4 Méthode utilisée pour l'optimisation.....	123
V.5 Formulation du problème d'optimisation.....	125
V.5.1 Etude de l'influence de variation du facteur d'énergie renouvelable (RF) sur la configuration optimale	125
V.5.2 Influence du potentiel disponible sur la configuration optimal	127
V.5.3 Influence de l'élément de stockage sur la configuration optimal	129
V.5.3.1 La quantité de CO ₂	129
V.6 Conclusion.....	136
 Conclusion générale	 137
 Référence	 139
 Liste des travaux scientifiques	 154

Listes des figures

Figure I.1	L'évolution de la production mondiale de l'énergie	19
Figure I.2	L'évolution de la production mondiale de l'électricité	19
Figure I.3	L'évolution d'utilisation d'énergie renouvelable pour la production de l'électricité	20
Figure I.4	Répartition de la production d'électricité en 2012	20
Figure I.5	La production électrique d'origine renouvelable en 2012	20
Figure I.6	Evolution des capacités de production d'énergie renouvelable installées	21
Figure I.7	Carte de l'irradiation directe annuelle moyenne (Période 2002-2011)	23
Figure I.8	Carte du vent annuel moyen à 50m (Période 2001-2010)	25
Figure I.9	Structure du parc de la production nationale en MW	27
Figure I.10	Structure d'une cellule photovoltaïque	31
Figure I.11	Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour un éclairage et une température donnés	31
Figure I.12	Composantes d'un champ photovoltaïques	32
Figure I.13	Les composantes de l'aérogénérateur	34
Figure I.14	Eoliennes à axe horizontal	35
Figure I.15	Eoliennes à axe vertical	36
Figure I.16	Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse spécifique	38
Figure I.17	Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée pour différents types de turbines	39
Figure I.18	Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent	40
Figure II.1	L'architecture générale d'un système multi-sources	44
Figure II.2	Cellule électrochimique de base	45
Figure II.3	Générateur diesel	47

Figure II.4	Configurations et classification des systèmes multi sources d'énergie renouvelable	48
Figure II.5	Configuration du système multi-sources d'énergie renouvelable à bus CC	49
Figure II.6	Architecture à bus à courant alternatif	50
Figure II.7	Configuration du système multi-sources a bus à CC et à CA	51
Figure II.8	Système multi-sources installé au village de Baouth (Sénégal)	53
Figure II.9	Configuration du système multi-sources PV-diesel	54
Figure II.10	Configuration de la micro centrale multi-sources	54
Figure II.11	Configuration du système multi-sources PV-éolien connecté au réseau	55
Figure II.12	Système multi-sources autonome PV-éolien	55
Figure II.13	Architecture du système multi-sources éolien photovoltaïque avec batteries.....	56
Figure II.14	Schéma de principe du système multi-sources centralisé	56
Figure IV.1	Configuration du système multi sources PV-Eolien-Diesel-Batterie	105
Figure IV.2	Stratégies de fonctionnement de système multi sources PV-éolien-Diesel-batterie	111
Figure V.1	Evolution annuelle du vent	119
Figure V.2	L'irradiation solaire annuelle	120
Figure V.3	Evolution annuelle de la température ambiante	120
Figure V.4	Profil de consommation pendant une année	121
Figure V.5	Performance de l'algorithme génétique pour les deux taux de RF	126
Figure V.6	Répartition du STC pour la configuration optimale	126
Figure V.7	Répartition des coûts des composants en % sur le STC	127
Figure V.8	Puissances maximales photovoltaïque et éolienne pendant une année	128
Figure V.9	STC pour différentes configurations optimales	131
Figure V.10	Récapitulatifs des STC pour chaque composant pour	131

Figure V.11	Représentation graphiques de différentes répartitions des coûts pour toutes les configurations optimales	132
Figure V.12	Pourcentage de différentes puissances pendant une année de la configuration optimale	133
Figure V.13	Evolution des puissances $P_{RE}(t)$, $P_L(t)$, $P_B(t)$, $P_{DG}(t)$ de l'état décharge de batteries en % (SOC) pendant une année	134
Figure V.14	Puissances produite par les ressources renouvelables $P_{RE}(t)$, demandée par le consommateur $P_L(t)$, d'entrée/sortie du banc de batteries $P_B(t)$, et la puissance produite par le générateur diesel $P_{DG}(t)$	135

Liste des tableaux

Tableau I.1	Production de l'électricité en Algérie	22
Tableau I.2	Répartition du potentiel solaire en Algérie	24
Tableau I.3	Capacité cumulée du programme énergie renouvelable	28
Tableau II.1	Classification des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable par gamme de puissance	48
Tableau II.2	Avantages et inconvénients du couplage DC	50
Tableau II.3	Avantages et inconvénients du couplage AC	51
Tableau II.4	Avantages et inconvénients du couplage DC/AC	52
Tableau III.1	Comparaison de quelques algorithmes appliqués pour les systèmes multi sources à base de PV-Eolien	97
Tableau V.1	Caractéristiques des panneaux PV	122
Tableau V.2	Caractéristiques des turbines éoliennes	122
Tableau V.3	Caractéristiques des batteries	122
Tableau V.4	Configurations optimales obtenues	125
Tableau V.5	Configurations optimales obtenues en utilisant trois valeurs de $RF_{désiré}$: 0,1, 0,5 % et 0,8 % et trois différents systèmes	127
Tableau V.6	Configurations optimales obtenues pour les différents systèmes	129
Tableau V.7	L'énergie produite, la contribution des différents générateurs et le surplus d'énergie calculés	132

Nomenclatures et principales abréviations

A	Surface du panneau
ABC	Colonie Artificielle d'Abeilles
ABSO	Optimisation artificielle des essaims d'abeilles
ACC	Couplage en Courant Alternatif
ACS	Coût annualisé du système
ACO	Optimisation des Colonies de Fourmis
ARES	Autonomus Renewable Energy Systems
BA	Algorithme d'Abeille
Batt	Batterie
B&B	Branchement et de Liaison
BESS	Systèmes de stockage d'énergie par batterie
BMS	Système de Gestion de Batterie
CAES	Stockage d'énergie avec l'air comprimé
C_{av}	Coût de Production Moyen d'Energie
CC	Courant alternatif
CC	Coefficient de corrélation
CC	Courant continu
CRF	Facteur de Récupération du Capital
CS	Recherche de Coucou
COE	Coût d'Energie
$C_A(x)$	Coût d'acquisition
$C_M(x)$	Coût de la maintenance
$C_I(x)$	Coût de l'installation.
$C_{T,D}$	Coût total du générateur diesel
C_p	Coefficient de puissance de la turbine
C_N	Capacité nominale
$C_{bat\ max}$	Capacité maximale du batteries
$C_{bat\ min}$	Capacité minimale du batteries
DCHSSA	Discret de Recuit Simulé Basé sur la Recherche de l'Harmonie Chaotique
DIRECT	Division des rectangles
DHS	Recherche d'Harmonie Discrète
DHSSA	Recuit Simulé Discret Basé sur la Recherche de l'Harmonie Discrète
DRE	Ressources d'Energie Distribuées
DSA	Recuit Simulé Discret
DSS	Couplage en Courant Continu
DOD	Profondeur de décharge
DG	Generateur Diesel
EDLC	Condensateurs électriques à double couche
EE	Energie Intrinsèque
EENS	Energie Prévue Non-fournie
ELF	Facteur de Perte Équivalent
EMR	Taux de Correspondance Electrique
ENS	Energie non fournie
FESS	Système de stockage d'énergie par volant d'inertie
FC	Pile à Combustible
FF	Facteur de forme.
FR	Facteur d'énergie renouvelable
GA	Algorithme génétique
GC	Coût de la production d'énergie
GES	Gaz à effet de serre
GPAP	La Probabilité d'Absorption de la Puissance du Réseau
GRG	Gradient Généralisé Réduit

GWO	Optimisateur de Loup Gris
$G(t)$	Irradiation solaire
HAWT	Eoliennes à axe horizontal
HES	Systèmes énergétiques hybride
HESS	Système de stockage d'énergie à base d'hydrogène
HMGS	Système de micro-réseaux hybrides
HOGA	Hybrid Optimization by Genetic Algorithms
HOMER	Optimization Model for Electric Renewable
HUS	Algorithme de Recherche de Chasse
HS	Recherche d'Harmonie
IC	Coefficient d'inégalité
ICA	Algorithme de concurrence impérialiste
OPSO	Optimisation par Essais Particulaires Améliorée
I_{sct}	Courant de court-circuit;
I_{OPT}	Courant optimale
K_v	Le coefficient de la température pour un circuit ouvert
K_i	Le coefficient de la température pour un pour un court-circuit
LA	Niveau d'autonomie
LOEE	Perte d'Energie Prévue
LOLE	Perte de Charge Prévue
LOLH	Perte d'Heures de Charge
LOLP	La probabilité d'une perte de charge
LOLR	Risque de perte de charge
LPSP	La probabilité de perte de l'alimentation
LCC	Coût du Cycle de Vie
LCE	Coût moyen actualisé de l'énergie
LCOE	Energie de Coût Nivelé de l'Energie
ALO	Optimisation de Lion des Fourmis
MCC	Couplage Mixte
MHP	Micro-hydro-électricité
MG	Mini-réseau
MPPT	Suivi du point de puissance maximale
MOABC	Algorithme ABC multi-objectif
NOCT	Température de fonctionnement normale de la cellule
NPC	Coût net actualisé total
NPV	Valeur Actuelle Nette
$N_{PV,s}$	Nombre des panneaux connectés en série
$N_{PV,p}$	Nombre de branches de panneaux photovoltaïques connectées en parallèle
$N_{BAT,s}$	Nombre des batteries connectés en série
$N_{BAT,p}$	Nombre de branches de batteries connectées en parallèle
N_W	Nombre d'éolienne
PWGS	Batterie de la de Génération d'Energie
PUC	Coût Par Unité minimum
PSO	Optimisation par Essais Particulaires
PV	Photovoltaïque
PHS	Stockage hydraulique par pompage
PWGS	Batterie de la de Génération d'Energie
PPM	Point de puissance maximal
$P_{DG}(t)$	Puissance produite du générateur
P_{in}	Puissance incidente
P_R	Puissance nominale du générateur
$P_{RE}(t)$	Energie renouvelable totale.
P_{load}	Puissance de la charge.

$P_L(t)$	Puissance à l'entrée de l'onduleur.
$P_B(t)$	Puissance entré ou sortie de la batterie
$P_{PV}(t)$	Puissance photovoltaïque
$P_W(t)$	Puissance éolienne
P_f	Prix du carburant
P_n	Puissance nominale de l'éolienne
R	Rayon de la turbine ou longueur des pales
REF	Fraction d'Energie Renouvelable
RES	Sources d'Energie Renouvelables
RPS	Fiabilité de l'Alimentation Electrique
SMG	Micro-Réseaux Intelligents
SOMES	Simulation and Optimisation Model for renewable Energy Systems
STC	Coût total du système
SOC	Etat de charge
SOC_{max}	Etat de charge maximal
SOC_{min}	Etat de charge minimal
TAC	Coût Annuel Total
TCD	Base de données des coûts transparents
TLBO	Optimisation basée sur l'enseignement-apprentissage
TS	Recherche Taboue
T_a	Température ambiante;
U	Vitesse de l'extrémité des pales
T_c	Température de la jonction de la cellule PV
VSI	Indice de Stabilité de la Tension
VAWT	Eoliennes à axe vertical
V_N	Tension nominale
V_d	La vitesse initiale de démarrage de la turbine éolienne
V_n	Vitesse du vent nominale de fonctionnement de l'éolienne
V_c	Vitesse du vent maximale admissible par l'éolienne
V_{bus}	Tension du bus continue
$V_{PV,nom}$	Puissance nominale du panneau
$V(t)$	Vitesse du vent
V_{cost}	Tension de circuit ouvert
V_{OPT}	Tension optimale
η_{cha}	Rendement de chargement
η_{dech}	Rendement de déchargement
λ	Vitesse normalisée
ρ	Masse volumique de l'air
ω	Vitesse angulaire de rotation de la turbine
f	Fréquence de rotation du rotor

Introduction générale

Introduction générale

La croissance de la population et le développement de la technologie ont entraîné une augmentation de la consommation d'énergie, en particulier dans le secteur d'électricité, surtout au cours de ces dernières années. Toutefois, il y existe plusieurs régions rurales et éloignées notamment dans les pays en développement qui n'ont pas accès à l'électricité. De ce fait, et afin de résoudre ces problèmes, la production d'électricité devrait être augmentée. En outre, un grand pourcentage de l'électricité mondiale est alimenté par les ressources en combustibles fossiles. Cependant, ces ressources ne peuvent pas satisfaire aux besoins futurs de l'électricité en raison de leurs problèmes économiques et environnementaux. Aussi, en vue de minimiser l'exploitation des combustibles fossiles polluants (pétrole, gaz,...), plusieurs pays ont accordé une attention capitale à l'énergie renouvelable, à savoir : Les biocarburants, l'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque, les concentrateurs solaires, hydro, géothermique, marémotrice et l'énergie des vagues. De même, les ressources énergétiques renouvelables sont devenues des alternatives efficaces pour les ressources en combustibles fossiles. Néanmoins, de nombreux problèmes sont créés, tels que les coûts d'investissement élevés et la faible sécurité de l'approvisionnement en raison de la nature intermittente et incertaine d'entre eux. Pour résoudre ces problèmes, une nouvelle solution est atteinte, à savoir les systèmes multi-sources. De surcroît, le système multi-sources représente une combinaison des ressources renouvelables et les ressources énergétiques traditionnelles, ainsi que le stockage d'énergie pour répondre à la charge localement dans les deux modes tant connectés au réseau qu'autonomes.

Dans ce travail nous nous intéressons à contrôler les flux d'énergie entre la charge, les sources et les dispositifs de stockage, et surtout dimensionner les constituants et choisir l'architecture convenable de système multi-sources. Ce système est composé de sources renouvelables (solaires et éoliennes) et des éléments de stockage de l'énergie électrique, tels que les batteries ; lequel système est associé à un générateur Diesel. Le système énergétique conçu doit être énergétiquement efficace, et fournir une énergie électrique avec coût minimal ainsi qu'une disponibilité maximale.

Le travail présenté dans cette thèse a pour objectif optimiser le dimensionnement des systèmes en utilisant une méthode bien déterminé selon les critères :

- ✓ Le critère économique, le coût d'investissement total du système (STC) ;
- ✓ Le critère technique, le facteur d'énergie renouvelable (RF).

Ces deux critères sont analysés par la détermination des variables d'optimisation, telles que les nombres de panneaux photovoltaïques, des batteries et d'éoliennes.

Par ailleurs, en ce qui concerne la technique d'optimisation pour notre problématique, nous avons déterminé : l'optimisation par l'algorithme génétique(GA).

En outre, la méthodologie proposée dans cette thèse est appliquée pour l'optimisation d'un système multi-sources utilisées pour satisfaire les besoins. On se basant sur des données d'entrées (température, vent et irradiation solaire) mesurées, dont la consommation dure pendant une année.

Pour se faire, nous avons scindé notre travail en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente les besoins énergétiques ainsi que le contexte énergétique mondial et en particulier l'algérien, différents systèmes de conversion à base de sources renouvelables (PV, éolien).

Le deuxième chapitre décrit les principaux composants d'un système multi-sources d'énergies renouvelables, les différentes configurations des systèmes multi-sources et quelques études réalisées sur les systèmes multi-sources.

Le troisième chapitre rappelle un état de l'art sur les stratégies de commande, les logiciels d'optimisation, ainsi que les méthodes d'optimisation récentes des systèmes multi-sources.

Le quatrième chapitre présente la modélisation des systèmes multi-sources ainsi que la formulation du problème d'optimisation. L'étude est basée sur deux critères à savoir : Le Coût d'Investissement Total (STC) et le Facteur des Energies Renouvelables (RF). Le critère économique STC est analysé en fonction du critère technique RF.

Dans le cinquième chapitre, l'ensemble des résultats théoriques obtenus pendant cette étude seront présentés.

Finalement, nous tirons les conclusions générales et dégagerons des perspectives dans le cadre de l'optimisation des systèmes multi-sources.

Chapitre I

Contexte Energétique

(Energie & Energie Renouvelables)

I.1 Introduction

Le domaine de la recherche des énergies renouvelables dans le monde a été préoccupé par plus d'attention en raison de l'impact important de la croissance de la population sur les besoins énergétiques et les problèmes environnementaux, tels que le réchauffement climatique, ce qui provoque l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile, à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables, parce qu'elles présentent beaucoup d'avantages par rapport aux sources de conversion classique, surtout du point de vue environnemental.

Ce chapitre rappelle les enjeux et le contexte énergétique mondial et algérien, les types d'énergies renouvelables peuvent être trouvés en Algérie ainsi que les systèmes de production de l'énergie renouvelable photovoltaïque et éolienne, objet de cette thèse.

I.2 Contexte énergétique mondial et Algérien

I.2.1 Contexte énergétique mondial

La forte demande d'énergie mondiale augmente fortement au cours de ces dernières décennies, ce qui influe considérablement sur la production mondiale d'énergie afin de satisfaire aux besoins énergétiques.

Les sources fossiles assurent une grande partie de la production mondiale d'énergie. Ce qui provoque des émissions de gaz à effet de serre et, de manière conséquente, une augmentation de la pollution. L'exploitation des ressources d'énergies renouvelables est devenue une solution indispensable et prometteuse pour respecter l'environnement. Donc, les systèmes énergétiques durables dans le futur seront basés sur l'utilisation de ces sources [1].

La **Figure I.1** représente l'évolution de la production mondiale de l'énergie et la **Figure I.2** représente l'évolution de la production mondiale de l'électricité.

Selon **Enerdata**, les grands pays exportateurs de pétrole et de gaz (Russie, Arabie Saoudite, Iran) ainsi que les pays en développement rapide (Inde et Turquie) ont été les principaux contributeurs à l'augmentation de la production d'énergie en 2016.

La Chine est responsable de la moitié de l'augmentation mondiale dans la production d'électricité résultant d'une demande élevée combinée à un développement rapide des capacités de production. De plus, l'Inde était le deuxième pays contributeur principal à l'augmentation en 2016, suivi par la Russie et le Canada.

Les pays les plus riches du monde (G7) ont enregistré une réduction de leur production d'électricité, résultant de gains d'efficacité énergétique combinés à une transition vers une combinaison de la production d'énergie moins intensive en carbone.

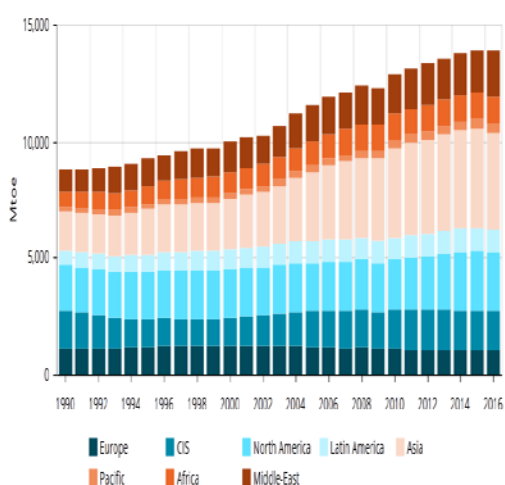


Figure I.1 : L'évolution de la production mondiale de l'énergie [2].

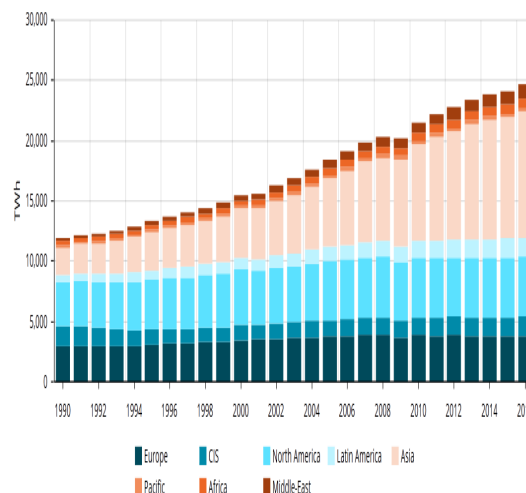


Figure I.2 : L'évolution de la production mondiale de l'électricité [2].

La participation des Sources d'Énergie Renouvelables (RES) dans la production d'énergie mondiale augmente rapidement depuis la fin des années 2000. Les pays en développement (Asie du Sud, Amérique latine et Afrique du Sud) ont pris des mesures pour développer leurs sources d'énergie renouvelables. Les énergies renouvelables progressent rapidement avec la baisse des coûts surtout pour la production de l'électricité comme indiqué sur la **Figure I.3**.

Par exemple, en 2012 (**Figure I.4**), la production d'électricité mondiale provenant des sources d'énergies renouvelables a atteint 20,8% de la production totale. Cette partie est nettement inférieure à la production issue des combustibles fossiles (68,1%) mais reste néanmoins supérieure à la part de la production d'origine nucléaire (10,9%) ; les 0,02% restants sont apportées par la combustion des déchets qualifiés de non renouvelable [3].

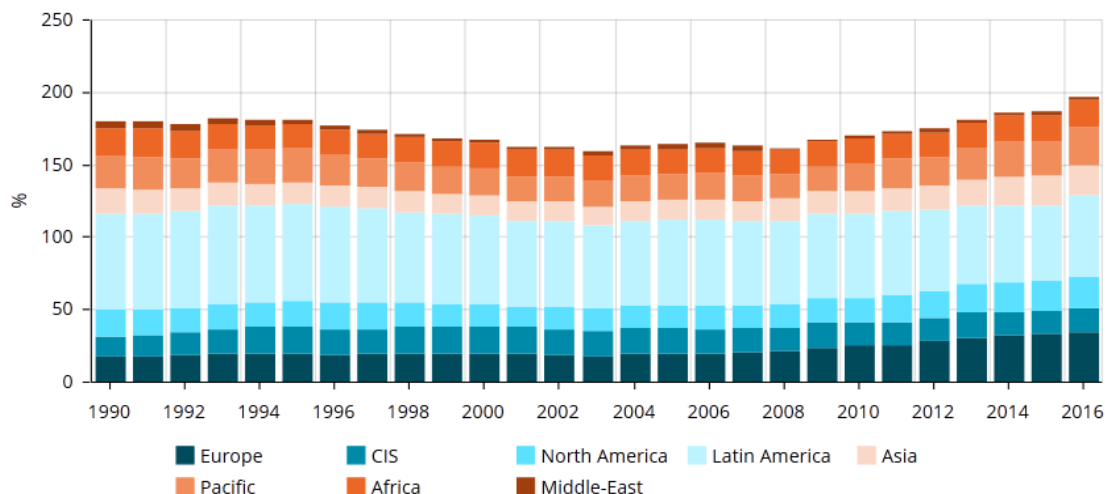


Figure I.3 : L'évolution d'utilisation d'énergie renouvelable pour la production de l'électricité [2].

Au niveau mondial, l'énergie renouvelable provient de six sources distinctes (**Figure I.5**) : L'hydro électricité est la principale source avec une contribution de 78%. L'éolienne est la seconde source avec 11,4%. Puis, viennent ensuite la filière biomasse (6,9%), la géothermie (1,5%), le solaire qui regroupe les centrales photovoltaïques et thermiques (2,2%), et enfin les énergies marines (0,01%) qui restent une filière en phase de démonstration [3].

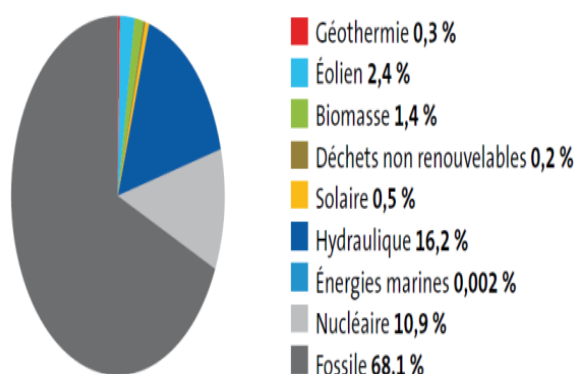


Figure I.4 : La répartition de la production d'électricité en 2012 [3].

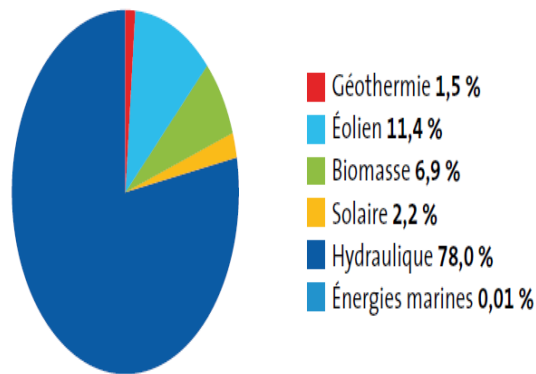


Figure I.5 : La production électrique d'origine renouvelable en 2012 [3].

La **Figure I.6**, retraçant l'évolution et la répartition mondiale et des capacités de production d'énergie renouvelables installées (2013-2017), montre une part grandissante des énergies renouvelables dans la production totale qui est passée. Et surtout pour le solaire.

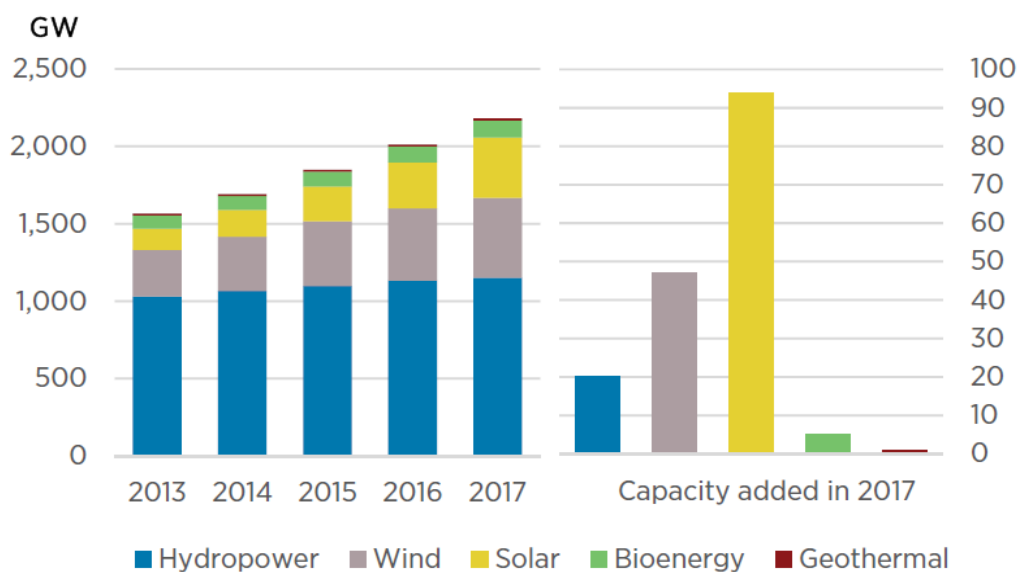


Figure I.6 : L'évolution des capacités de production d'énergie renouvelable installées [4].

I.2.2 Contexte énergétique Algérien

I.2.2.1 Consommation énergétique de l'Algérie

La couverture du réseau électrique algérien atteint aujourd'hui 97% des sites habités. Elle reflète un potentiel de production d'électricité important et en constante évolution face à une demande en hausse se situant à près de 07% par an durant la période allant de 1963 à 2007. La réalisation de nouvelles capacités de production, de transport et de distribution d'électricité est l'un des plus grands défis du secteur. Le développement de l'électrification en Algérie représente un des piliers des programmes d'équipement public depuis plus de 40 ans. Il repose sur le principe du service public garantissant la continuité et la qualité de la fourniture.

La production nationale d'électricité a connu une forte augmentation. Le taux d'électrification nationale est passé de 63% en 1980 à 97% en 2007. Les principaux indicateurs et leur évolution sur les périodes 1962-1999 et 2000-2007 mettent en évidence l'énorme effort consenti par l'Etat dans ce domaine. En effet, durant la période 2000-2007, la production d'électricité a connu une forte croissance. Elle est passée de 25 TWh en 2000 à 37 TWh en 2007, ce qui correspond à une hausse annuelle moyenne de 06%. Cette production était seulement de 02 TWh dans les années 60 [5].

I.2.2.2 Production de l'électricité en Algérie

La capacité supplémentaire nationale de production d'électricité au cours de la période 2017-2027 sera de 21307 MW, dont 20994 MW ont déjà été décidés et 313 MW sont en projet [6].

Tableau I.1 : Production de l'électricité en Algérie [6].

	Réalisations 2015	Réalisations 2016	Evolution
Puissance installée [MW]	11258	12784	13.44%
Energie produite [GWh]	31.36	30.35	-3.22%
Effectif global	5480	5514	0.62%
Capacité des nouveaux moyens de production mise en service [MW]	1139	1575	38.28%

I.2.2.3 Programme des énergies renouvelables

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011 et révisé en mai 2015, puis placé au rang de priorité nationale en février 2016 lors du Conseil Restreint du Gouvernement. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [7].

A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique. D'ici 2030, 37% de la capacité installée et 27% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable [7].

I.2.2.3.1 Potentiels des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel des énergies renouvelables important, notamment le solaire, mais très peu développé. Dans la section suivante, les principales ressources renouvelables existantes en Algérie sont présentées.

a) Potentiel Solaire :

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 01 m² est de l'ordre de 05 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays [8]. Aussi, l'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 01 m² soit près de 03 KWh/m² au Nord et dépasse 05,6 KWh/m² au Grand Sud (TAMENRASSET). La **figure I.7** représente l'irradiation directe annuelle moyenne (Période 2002-2011).

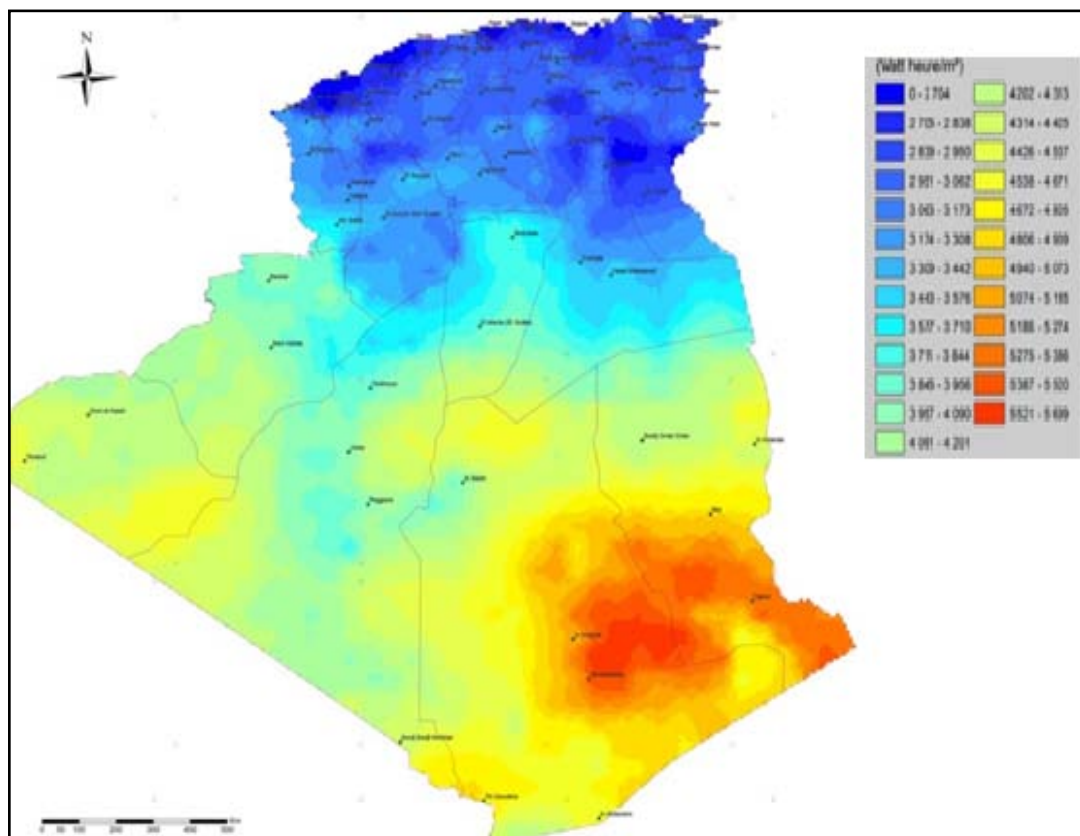


Figure I.7 : Carte de l'irradiation directe annuelle moyenne (Période 2002-2011) [7]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le **Tableau I.2** selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Tableau I.2 : La répartition du potentiel solaire en Algérie [9].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Irradiation moyenne reçue (kWh/m²/an)	1700	1900	2263

b) Potentiel éolien :

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous (**Figure I.8**) montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-est, avec des vitesses supérieures à 07 m/s et qui dépassent la valeur de 08 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel). Concernant le Nord, la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tebessa, Biskra, M'sila et Elbayadh (06 à 07m/s), et le Grand Sud (>8m/s) [7].

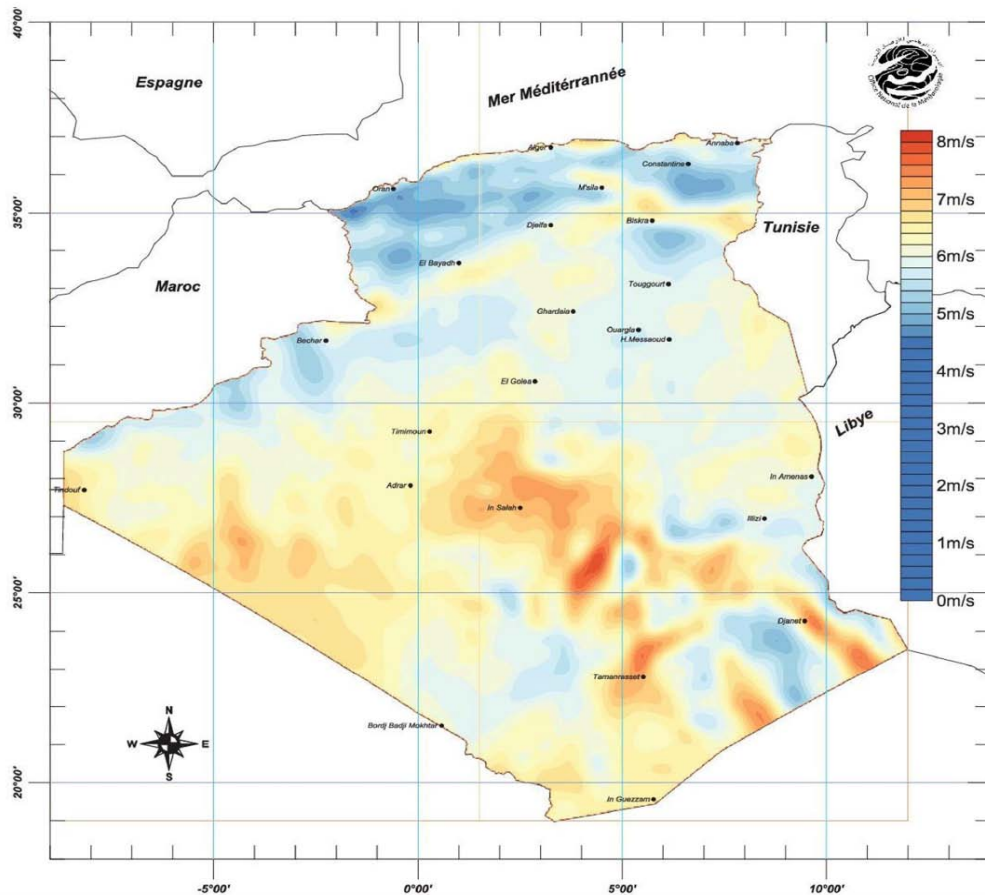


Figure I.8 : La carte du vent annuel moyen à 50m (Période 2001-2010) [7].

c) Potentiel géothermique

Plus de deux cent (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45 °C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5 °C/100 m [8] :

- ✓ Les zones de Relizane et Mascara ;
- ✓ Les zones d'Aïn Boucif et Sidi Aïssa ;
- ✓ Les zones de Guelma et Djebel El Onk.

d) Potentiel hydroélectrique

Les quantités globales de chutes pluies tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays en raison du nombre réduit de jours de précipitation, des concentrations sur des espaces limités, de la forte évaporation et de l'évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation [8].

d) Potentiel de la biomasse**✓ Potentiel forestier**

Le potentiel forestier actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre de 03,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10% [8].

✓ Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles

05 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 01.33 millions de Tep/an [8].

I.2.2.3.2 Le programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique

Le programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, adopté est apparu dans sa phase expérimentale et de veille technologique, des éléments nouveaux et pertinents sur la scène énergétique, aussi bien nationale qu'internationale, nécessitant la révision du programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique [7].

Parmi ces éléments, il convient de citer :

- ✓ Une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables à travers les études engagées.
- ✓ La baisse des coûts des filières photovoltaïque et éolienne qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer (maturité technologique, coûts compétitifs...);
- ✓ Les coûts de la filière CSP (Solaire thermique) qui restent élevés associés à une technologie non encore mature notamment en termes de stockage avec une croissance très lente du développement de son marché.

La **Figure I.9** représente la production nationale en MW d'origine renouvelable et d'origine non renouvelable.

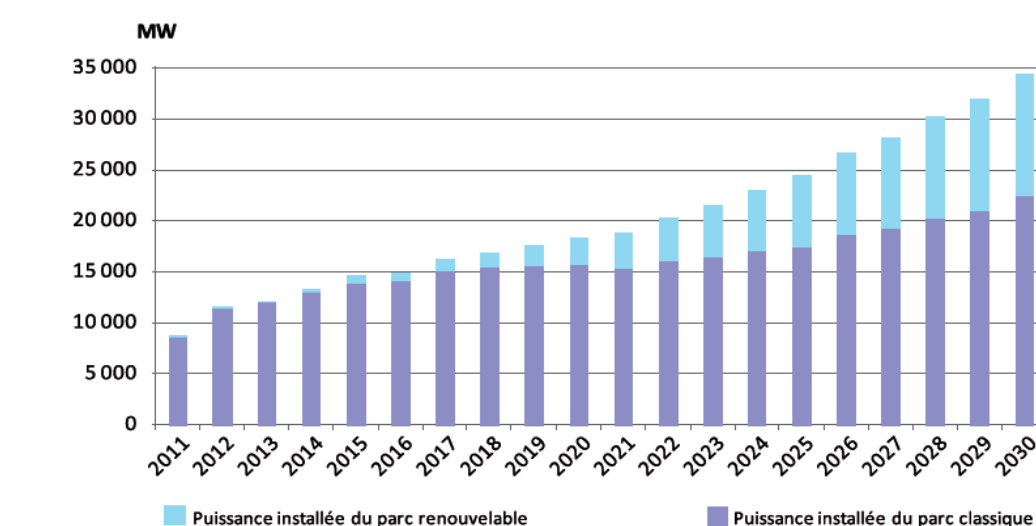


Figure I.9 : La structure du parc de la production nationale en MW [10].

Les projets d'énergie renouvelable de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes :

- ✓ Première phase 2015-2020 : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4000 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 500 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.
- ✓ Deuxième phase 2021-2030 : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Béchar et leur intégration dans le système énergétique national.

Le tableau suivant donne les capacités cumulées du programme d'énergie renouvelable, par type et phase sur la période 2015-2030.

Tableau I.3 : La capacité cumulée du programme énergie renouvelable [7].

	01^{ère} phase 2015 – 2020	02^{ème} phase 2021 – 2030	Total
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolienne	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
Totale	4525	17475	22000

I.2.2.3.3 Projets et actions de la phase 2011 – 2014 du programme national des énergies renouvelables (2011-2014)

La phase d'expérimentation du programme (2011 – 2014) a connu la réalisation de plusieurs projets et actions [7] :

a) Centrales : Parmi les centrales, il convient de citer :

- ✓ La Centrale électrique hybride (gaz – solaire) de Solar Power Plant (SPP1) à Hassi R'Mel de 150 MW dont 25 MW en solaire thermique (CSP), mise en service en juillet 2011 ;
- ✓ La ferme éolienne de 10 MW de la Société Algérienne de Production de l'Electricité dénommée SPE dans la région d'Adrar, mise en service en juin 2014 ;
- ✓ La centrale pilote photovoltaïque de 1,1 MWc à Ghardaïa, mise en service en juin 2014 ;
- ✓ La Centrale photovoltaïque 03 MW de Djanet (Illizi), mise en service en février 2015 ;
- ✓ La Centrale photovoltaïque 20 MW de Adrar (Adrar), mise en service en octobre 2015 ;
- ✓ La Centrale photovoltaïque 03 MW de Kabertene (Adrar), mise en service en octobre 2015 ;

- ✓ La Centrale photovoltaïque 13 MW de Tamanrasset (Tamanrasset), mise en service en novembre 2015 ;
- ✓ La Centrale photovoltaïque de 09 MW Tindouf (Tindouf), mise en service en décembre 2015 ;
- ✓ La Centrale photovoltaïque de 06 MW Z. Kounta (Adrar), mise en service en janvier 2016 ;
- ✓ La Centrale photovoltaïque 09 MW de Timimoune (Adrar), mise en service en février 2016 ;
- ✓ La Centrale photovoltaïque 05 MW de Reggane (Adrar), mise en service en janvier 2016 ;
- ✓ La Centrale photovoltaïque 05 MW d'In-Salah (Tamanrasset), mise en service en février 2016 ;

b) Etudes :

- ✓ Actualisation de l'atlas éolien national par l'Office National de Météorologie (ONM) ;
- ✓ Identification des sites éligibles à l'implantation de fermes éoliennes dans la zone de Touggourt, Hassi Messaoud et Ghardaïa, par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) ;
- ✓ Elaboration de l'Atlas Solaire de l'Algérie par l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL).

c) Cadre juridique

Le parachèvement d'un ensemble de textes réglementaires permettant le fonctionnement d'un mécanisme de soutien basé sur des tarifs d'achat garantis.

Après un bref bilan des ressources énergétiques exploitables en Algérie, on se concentrera ensuite sur les systèmes de production éolienne et photovoltaïque.

I.3 Généralités sur les systèmes de production de l'énergie renouvelable

Au niveau mondial, l'énergie renouvelable provient de différentes sources distinctes telles que la source hydraulique, la source éolienne, la source marine et la source photovoltaïque [1]. Actuellement, les systèmes éoliens et solaires représentent les sources les plus populaires, elles sont disponibles librement et largement dans le monde. De plus, elles peuvent être facilement installées, et elles sont des technologies écologiques, et nécessitent de faibles coûts d'entretien.

I.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques [11].

I.3.1.1 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque » [12].

L'effet photovoltaïque est découvert en 1839 par Antoine Becquerel dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Plus généralement, on qualifie de photoélectriques tous les phénomènes électriques provoqués par l'action de la lumière sur la matière qui provoquent une éjection d'électrons du matériau [13] :

- l'émission photoélectrique ;
- la photoconductivité ;
- l'effet photovoltaïque.

Le but de la structure photovoltaïque est de créer un champ électrique interne [12]. Sur la **Figure I.10** est représentée une configuration schématique de la cellule photovoltaïque.

Dans une cellule PV, deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) [15]. Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique E_r qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule, communément nommée tension de circuit ouvert V_{oc} fortement dépendante de la température. Le courant maximal PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit (I_{CC}) dépendant fortement du niveau d'éclairement (E).

La **Figure I.11** illustre la caractéristique non linéaire $I(V)$ d'une cellule PV à base de silicium pour un éclairement et une température donnée, avec la présence d'un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par sa tension et son courant optimaux (V_{OPT} et I_{OPT}). D'autres matériaux peuvent être utilisés pour réaliser les capteurs PV [14].

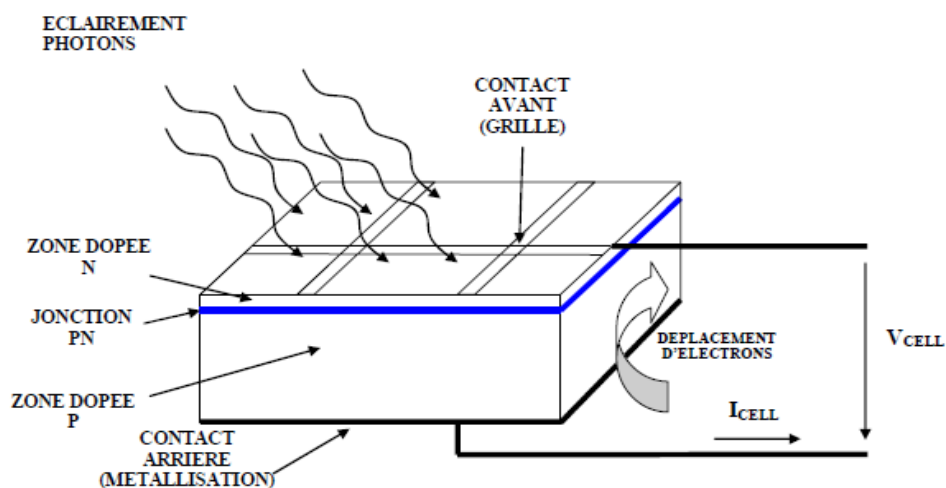


Figure I.10 : La structure d'une cellule photovoltaïque [14].

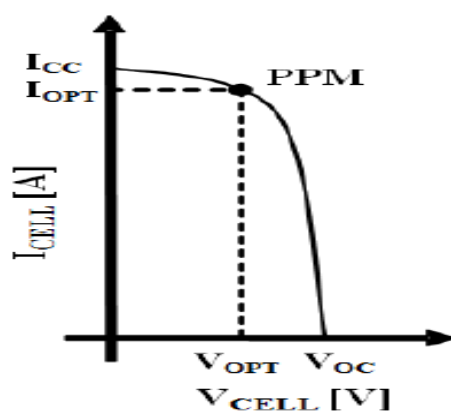


Figure I.11 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque pour un éclairement et une température donnés [16].

I.3.1.2 Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (**Figure I.12**). Ainsi, les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension [12].

I.3.1.3 Le panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise (**Figure I.12**). Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [12].

I.3.1.4 Le champ photovoltaïque

Un champ photovoltaïque (**Figure I.12**) est considéré comme une association de plusieurs panneaux PV connectés en série et/ou en parallèle, combinés pour donner la tension et le courant nécessaires. Le nombre nécessaire de panneaux PV connectés en série est déterminé en divisant la tension du bus continu du système par la tension nominale du panneau PV, alors que le nombre de branches de panneaux PV connectées en parallèle est considéré, dans le cadre de ce travail, comme une variable d'optimisation [16].

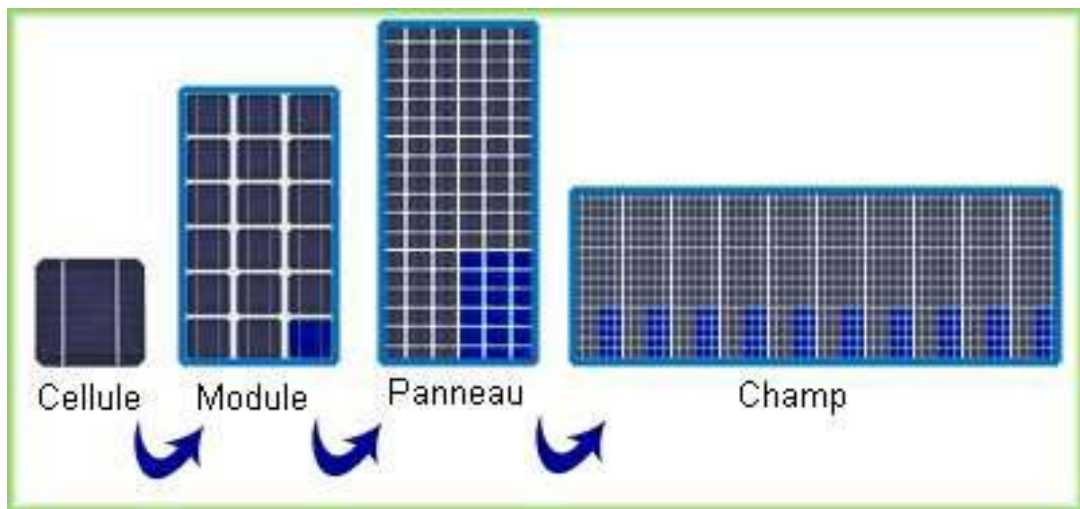


Figure I.12 : Les composantes d'un champ photovoltaïques [17]

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend de [12]:

- ✓ les besoins en électricité ;
- ✓ la taille du panneau ;
- ✓ l'ensoleillement du lieu d'utilisation ;
- ✓ la saison d'utilisation.

I.3.1.5 Les caractéristiques d'un panneau PV

Les principales caractéristiques techniques d'un panneau PV sont [16]:

- ✓ Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui représente le courant maximal généré par le panneau PV, il est proportionnel à l'irradiation solaire.
- ✓ La tension à vide (V_{oc}) qui représente la tension maximale fournie par le panneau PV. V_{oc} est toujours inférieure à 21V pour un panneau PV d'une tension nominale égale à 12V.
- ✓ La tension nominale (V_{nom_pv}).
- ✓ Le point de puissance maximale (I_{ppm}, V_{ppm}) est le point dans lequel la puissance fournie par le panneau PV est maximale ($P_{ppm} = I_{ppm} \cdot V_{ppm}$). Lorsque le panneau PV fonctionne en ce point, son rendement est maximal.
- ✓ Le facteur de forme (FF) est le rapport entre la puissance maximale que le panneau PV peut générer et le produit $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Il est écrit comme suit :

$$FF = \frac{P_{ppm}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{I_{ppm} \cdot V_{ppm}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.1)$$

- ✓ Le rendement (η) est le rapport entre la puissance maximale et la puissance d'irradiation solaire incidente sur la surface du panneau :

$$\eta = \frac{P_{ppm}}{P_{in}} = \frac{I_{ppm} \cdot V_{ppm}}{G \cdot A} \quad (I.2)$$

Avec P_{in} est la puissance incidente (W), G est l'irradiation solaire (W/m^2) et A est la surface du panneau PV (m^2).

I.3.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, qui provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre, une différence de pression est créée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne [18].

I.3.2.1 L'éolienne

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ou mécanique [19]. La configuration d'une éolienne à axe horizontal, face au vent, est représentée sur la **Figure I.13**.

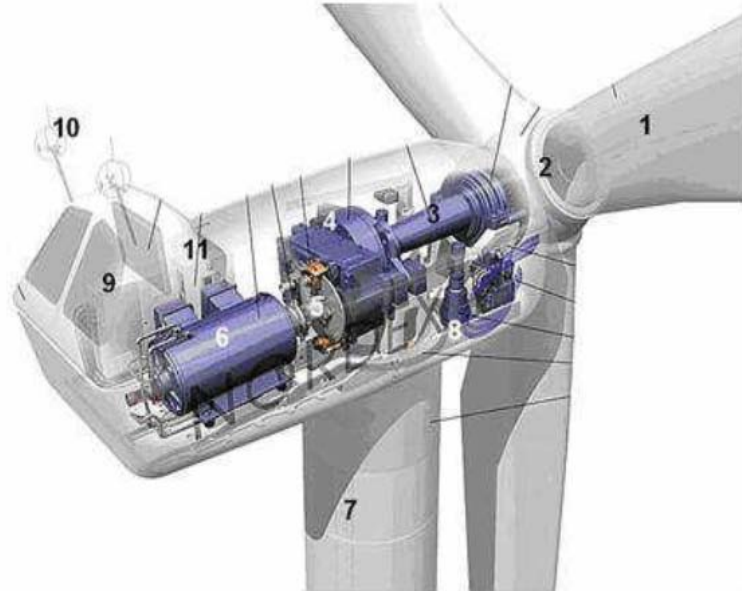


Figure I.13 : Les composantes de l'aérogénérateur.

Les composantes de l'aérogénérateur sont les suivantes [12] :

1. Les pales : Sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
2. Le moyeu : Il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. L'arbre primaire (ou arbre lent) : Relie les pales au multiplicateur.
4. Le multiplicateur : Il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. L'arbre secondaire : Il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. Le générateur électrique : Il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 05 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement. Amirat et al. [20] ont rapporté un état de l'art sur les différents types des générateurs qui peuvent être trouvés dans les éoliennes.

7. Le mât : C'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante. Plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
8. Le système d'orientation de la nacelle : C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. Le système de refroidissement : Il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. Les outils de mesure du vent : Girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
11. Le système de contrôle électronique : Il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
12. Au pied du mât se trouve un transformateur.

I.3.2.2 Les différents types d'éoliennes :

Il existe deux grandes familles d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [21] :

- **Les éoliennes à axe horizontal** Nommées HAWT pour Horizontal Axis Wind Turbine, les éoliennes à axes horizontales sont les plus connues et communes **Figure I.14** [22] .



a) Tripale

b) Multi-pale

Figure I.14 : Eoliennes à axe horizontale.

- **Les éoliennes à axe vertical** : Il existe aussi des architectures d'éoliennes à axe vertical **Figure I.15**, ou VAWT pour Vertical Axis Wind Turbine [22].

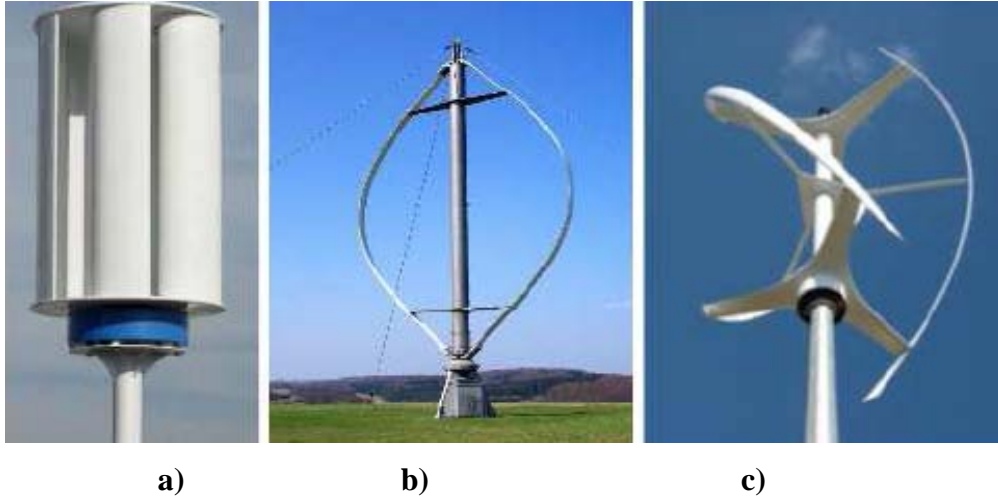


Figure I.15 : Eoliennes à axe vertical a) avec turbine de Savonius, b) avec turbine de Darrieus, c) avec turbine de Darrieus hélicoïdale.

Une classification des différentes éoliennes en deux familles, selon le type de fonctionnement [23].

- ✓ Fonctionnement à vitesse fixe ;
- ✓ Fonctionnement à vitesse variable.

Les principaux avantages des deux types de fonctionnement sont les suivants [24] :

Fonctionnement à vitesse fixe :

- ✓ Système électrique plus simple.
- ✓ Plus grande fiabilité.
- ✓ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ✓ Pas besoin de système électronique de commande.
- ✓ Moins cher.

Fonctionnement à vitesse variable :

- ✓ Augmentation du rendement énergétique.
- ✓ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- ✓ Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

I.3.2.3 Principe de fonctionnement :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [25] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [26].

I.3.2.4 Caractéristiques de l'éolienne

I.3.2.4.1 Puissance récupérable par une turbine

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne dépend de la vitesse et la direction du vent, la surface balayée par les pales et le mécanisme de conversion mécanique-électrique. Elle peut s'exprimer sous la forme suivante [12] :

$$P_{\text{turbine}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi R^3 \cdot v^3 \quad (\text{I.3})$$

Où

v : La vitesse du vent (en m/s) ;

R : Le rayon de la turbine ou longueur des pales (en m) ;

ρ : La masse volumique de l'air (1,225 kg/m³ au niveau de la mer à 15 °C) ;

C_p : Le coefficient de puissance de la turbine (Le coefficient C_p dépend de la vitesse spécifique de l'éolienne λ ($C_p(\lambda)$)).

La vitesse spécifique ou normalisée λ (sans unité) représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = U/v = R\omega/v \quad (\text{I.4})$$

U : La vitesse de l'extrémité des pales $U = R\omega$ (en m/s) ;

ω : La vitesse angulaire de rotation de la turbine $\omega = 2\pi f$ (en rad/s) ;

f : La fréquence de rotation du rotor (en s⁻¹ ou Hz).

La **Figure I.16** montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pales [27]. On remarque que pour chaque type d'éolienne correspond une vitesse normalisée, λ_{opt} , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi, un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique $C_p(\lambda)$ sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale [28].

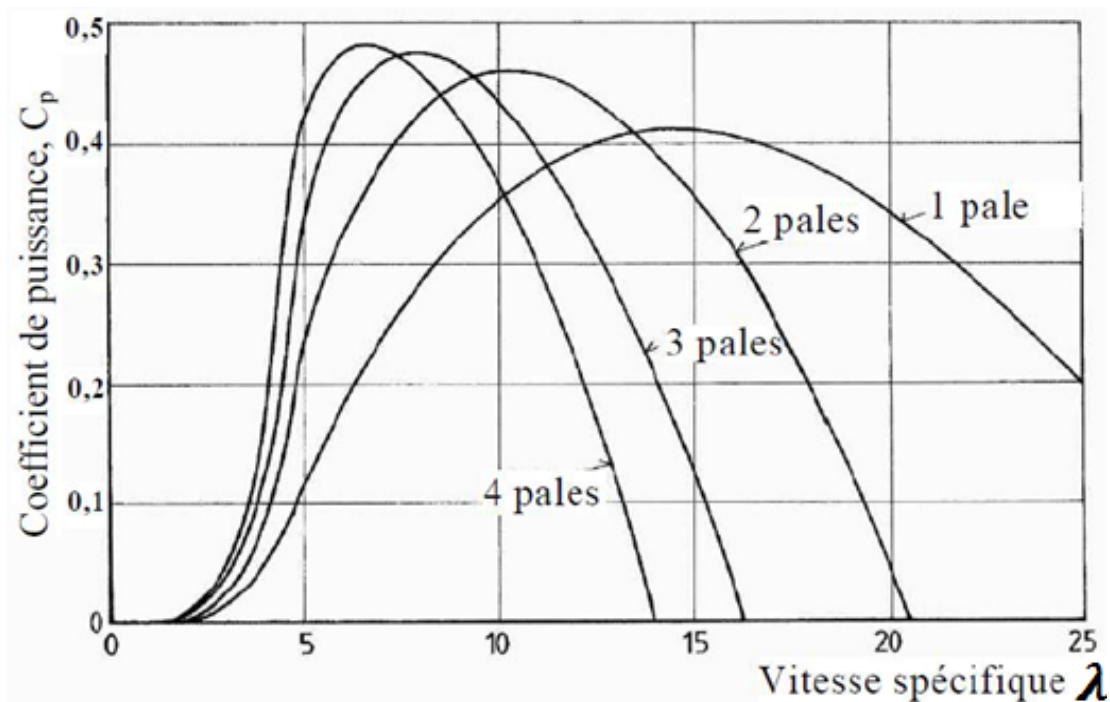


Figure I.16 : Le coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse spécifique [28].

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ [28], comme présentés sur la **Figure I.17**.

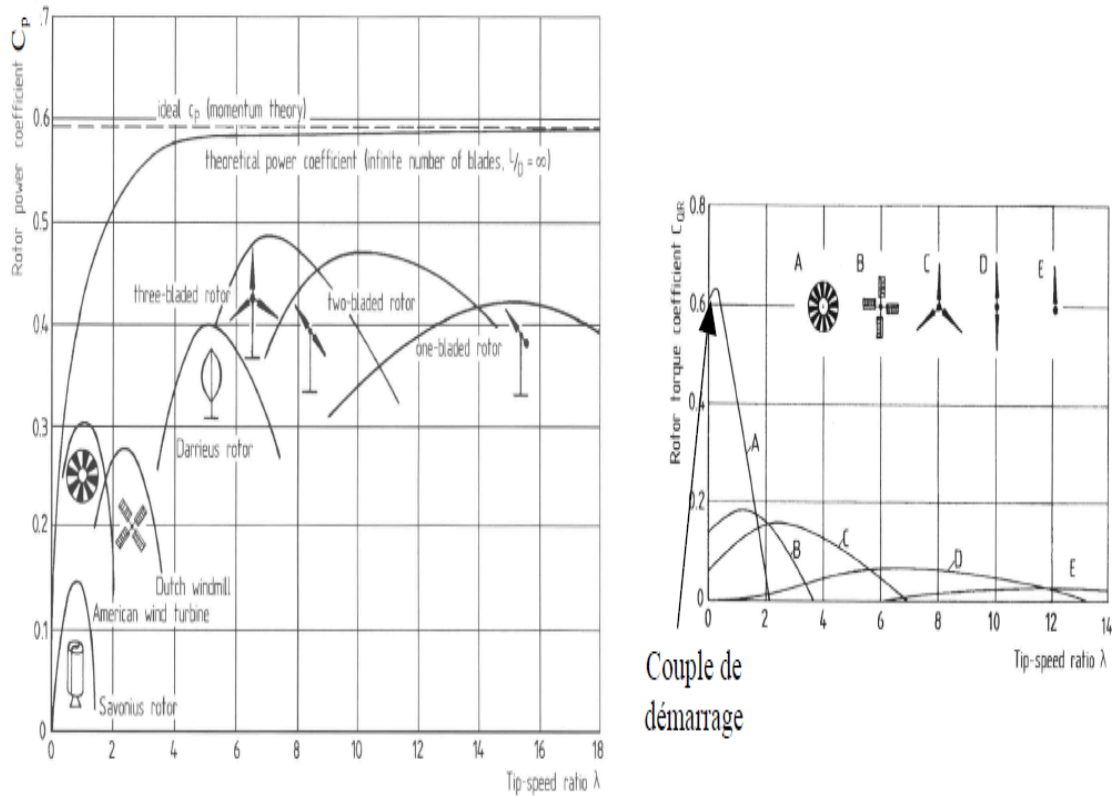


Figure I.17: Les coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée pour différents types de turbines [27].

Il est ainsi noté que [28] :

- ✓ Les courbes donnant le coefficient de couple montrent que les couples de démarrage sont favorables aux multi-pales (pompage,...). Il en est de même pour les systèmes à axe vertical ;
- ✓ Les courbes $C_p(\lambda)$ montrent l'avantage intrinsèque des turbines à axe horizontal en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...) ;
- ✓ Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les « axes horizontaux » à faible nombre de pales (3, 2, 1) par rapport aux « axes verticaux » ou aux multi-pales. Elles sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ_{opt} .

I.3.2.4.2 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale v_n . Pour des vitesses de vents supérieures à v_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnées : v_D la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et v_M la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [28].

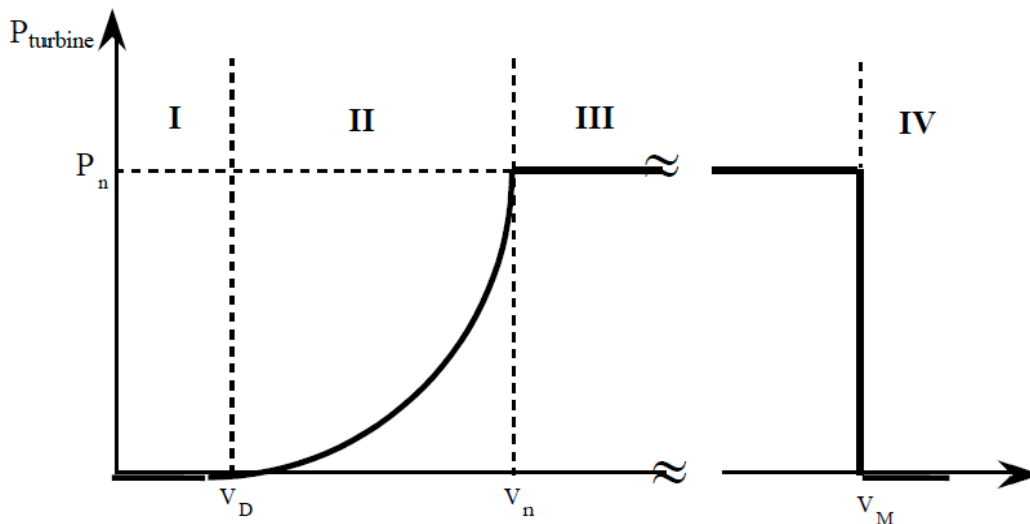


Figure I.18 : Le diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [28].

La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [29] comme indiquée sur la **Figure I.18** :

- La zone I, où $P_{\text{turbine}} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v_w ;
- La zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref bilan de la consommation d'énergie ainsi que le potentiel énergétique mondiale, et en particulier en Algérie. Ensuite, nous avons discuté les différentes ressources d'énergies renouvelables existantes en Algérie, et nous nous concentrerons sur les systèmes de la production éolienne et photovoltaïque, grâce à la disponibilité du potentiel solaire et éolien en Algérie.

Nous nous intéressons, dans le cadre de cette thèse, à l'étude des systèmes multi-sources d'énergies renouvelables à base d'éoliennes et photovoltaïques, pour diversifier les sources de production d'énergie et préparer l'Algérie à ce défi en s'engageant dans une ère énergétique durable.

Pour cette raison, il est nécessaire de proposer un modèle de gestion de l'énergie et d'optimisation de ces systèmes qui exploite les caractéristiques internes et environnementales.

Chapitre II

Systemes multi sources

II.1 Introduction

La problématique majeure des sources d'énergies renouvelables représente leur caractère aléatoire, ce qui influe la disponibilité de ces ressources d'énergie selon les périodes annuelles ou journalières, et en vue d'assurer la continuité du service même lorsque la production est nulle ceci d'une part ; et d'autre part, pour éviter la perte du surplus d'énergie causé, il est nécessaire d'ajouter un élément de stockage et/ou une source d'énergie conventionnelle.

Après avoir présenté, dans le premier chapitre, les systèmes de production de l'énergie renouvelable photovoltaïque et éolienne, nous allons présenter dans cette partie, en premier lieu, les principaux composants d'un système multi-sources d'énergie pour l'électrification ; puis, nous présenterons, en deuxième lieu, les différentes configurations des systèmes multi-sources.

Et enfin, quelques études réalisées sur les systèmes multi-sources seront de même présentées.

II.2 Electrification des sites

L'électrification des sites isolés peuvent être utilisées par 02 manières [23] :

II.2.1 Electrification centralisée

L'électrification centralisée des régions isolées consiste à effectuer l'extension du réseau électrique. Cette extension constitue la meilleure solution en termes de fiabilité et de qualité de service.

II.2.2 Electrification décentralisée

L'impossibilité d'interconnexion des sites isolés aux réseaux électriques incite à choisir une approche décentralisée qui consiste à utiliser de manière autonome une ou plusieurs sources d'énergie de nature différente pour l'électrification. Les technologies les plus utilisés sont les groupes Diesel et les énergies renouvelables avec ou sans stockage de l'énergie.

II.2.2.1 Technologie de groupes électrogènes diesel

L'installation des groupes électrogènes diesel était une manière habituelle pour couvrir le problème du manque d'électricité. Ils fournissent une solution simple pour l'électrification rurale et peuvent être conçus pour différentes capacités pour s'adapter aux besoins des consommateurs.

II.2.2.2 Technologies des énergies renouvelables

L'utilisation des technologies des énergies renouvelables est une approche très prometteuse en vue de satisfaire aux exigences environnementales et sociales ainsi que les objectifs économiques liés à l'électrification rurale. Au niveau local, deux technologies sont d'une grande importance : le photovoltaïque et l'éolien.

II.2.2.3 Système hybride ou bien système multi-sources

L'utilisation d'un seul système de production d'énergie électrique peut ne pas permettre à lui seul de subvenir aux besoins énergétiques souhaités. En effet, un des principaux problèmes de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne est la fluctuation de l'approvisionnement énergétique, d'où une production intermittente de l'énergie la rendant incompatible avec certaines exigences de la demande en énergie électrique du consommateur. Ceci peut être évité par l'utilisation des **systèmes multi-sources** qui se basent sur le couplage des technologies présentées précédemment.

II.3 Le système multi-sources

Le terme « **système multi-sources** » est généralement utilisé pour définir un système utilisant au moins deux technologies complémentaires d'approvisionnement en énergie. Le système multi-sources d'énergie renouvelable de production d'énergie électrique correspond à un couplage entre différentes sources d'énergie, comme l'éolienne, les panneaux photovoltaïques, le groupe électrogène diesel et un système de stockage (batteries et/ou le volant d'inertie). La difficulté principale de ces systèmes est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie nécessaire à la charge, c'est pourquoi ils sont souvent associés à un générateur diesel dont le but est d'assurer la continuité de service [23]. Le système multi-sources est appelé aussi le système multi-sources. La **Figure II.1** représente l'architecture générale d'un système multi-sources, laquelle combine des Systèmes d'Energie Renouvelables (RES) et des sources conventionnelles.

D'après [30], la structure du système multi-sources prend en compte trois critères, à savoir :

- ✓ Sources d'énergies renouvelables. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un générateur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique où utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources.
- ✓ La présence ou non d'un dispositif de stockage.
- ✓ La présence ou non d'une source d'énergie classique.

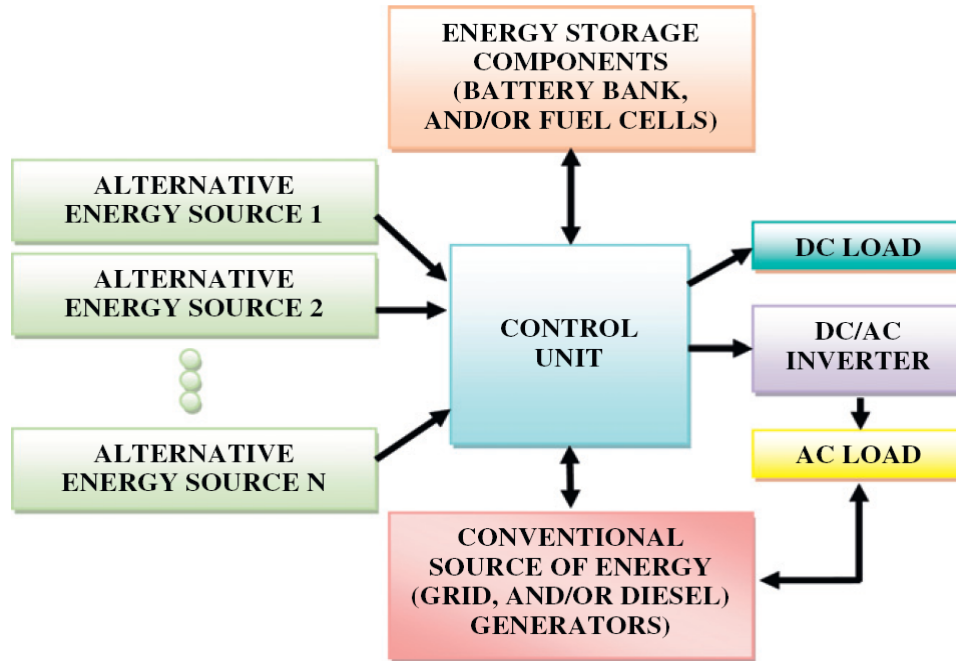


Figure II.1 : L'architecture générale d'un système multi-sources [31].

Dans notre étude, notre intérêt est concentré sur le système multi-sources à base de photovoltaïque et Eolien. Les systèmes de production de l'énergie renouvelable photovoltaïque et éolienne sont présentés dans le Chapitre I.

Dans la partie suivante, nous allons faire la description des éléments constitutifs du système multi-sources éolien – photovoltaïque – Diesel avec un stockage électrochimique (batteries).

II.3.1 Système de stockage

Le stockage de l'énergie est nécessaire dans un système multi-sources autonome, pour assurer la continuité de service même lorsque la production est nulle, et d'autre part pour éviter la perte du surplus d'énergie causé par une forte production d'énergie par rapport à la demande [16].

Il existe de nombreux moyens pour stocker de l'énergie, comme le pompage de l'eau, le volant d'inertie, le stockage d'hydrogène et les batteries, qui passent quasiment tous par la conversion de l'énergie en une autre forme plus aisée à exploiter.

Les Batteries au plomb-acide sont les plus utilisées pour les systèmes multi-source par rapport aux autres types de batteries, à cause de son faible coût.

II.3.1.1 Principe de fonctionnement

Une batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu.

Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccorde à la batterie (**Figure II.2**). La capacité énergétique de la batterie (exprimée en wattheures, Wh) dépend des quantités et de la nature des éléments chimiques compris dans la cellule.

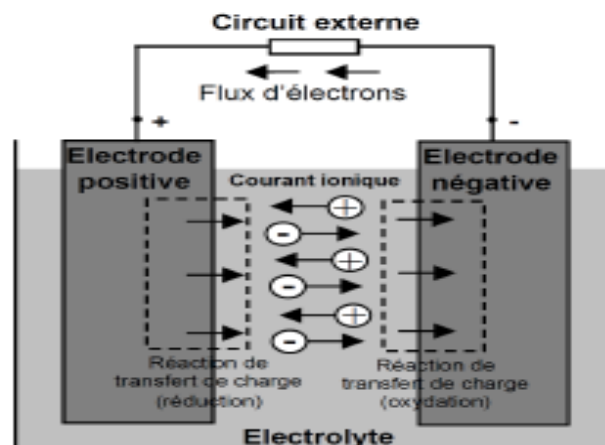


Figure II.2 : Cellule électrochimique de base [23]

L'anode est l'électrode à laquelle l'oxydation (perte d'un ou plusieurs électrons) se produit et à partir de laquelle les électrons vont alimenter le circuit extérieur (la charge). La cathode est l'électrode à laquelle se produit la réduction (gain d'un ou plusieurs électrons) ; les électrons revenant de la charge arrivent sur cette électrode. En décharge, l'anode est la borne négative de la batterie et la cathode la borne positive. Par contre, en charge, l'électrode négative est la cathode, tandis que l'électrode positive est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens.

II.3.1.2 Caractéristique de la batterie

Une batterie au plomb se caractérise essentiellement par les paramètres suivants [16], [32] :

- ✓ **Capacité nominale (C_N)** : Elle représente la quantité d'électricité obtenue après une décharge totale d'une batterie initialement chargée au maximum. La capacité est mesurée en Ampèreheure (Ah) pendant un temps déterminé de décharge. Elle dépend essentiellement de l'intensité du courant de décharge.
- ✓ **Tension nominale (V_N)** : Les batteries ont une tension nominale de 2, 6, 12 ou 24V. Un paramètre important représente la tension de charge, qui est définie comme la tension nécessaire pour vaincre la résistance qui s'oppose à la charge de l'accumulateur.
- ✓ **Résistance interne** : Elle est formée par la résistance ohmique des composants de la batterie (terminaux, électrodes, supports et électrolyte) et par une résistance virtuelle variable en fonction de l'état de charge et des différentes polarisations et concentrations. La résistance interne augmente avec l'abaissement de la température extérieure, la décharge et le vieillissement de la batterie.
- ✓ **Profondeur de décharge (*Depth of Discharge, DOD*)** : Elle représente la quantité d'énergie déchargée d'une batterie. Elle est exprimée en pourcentage de sa capacité. Par exemple, une décharge de 20 Ah d'une batterie de 100 Ah, correspond à une profondeur de décharge de 20%. Une batterie ne doit pas subir de décharges profondes car sa durée de vie diminue rapidement avec sa durée de décharge. La profondeur de décharge maximum (DOD_{max}) est la quantité d'énergie qui peut être déchargée sans endommager la batterie. La capacité utile de la batterie, C_u (Ah), est : $C_u = C_N \cdot DOD_{max}$
- ✓ **Etat de charge (*State of Charge, SOC*)** : Il représente la quantité, en pourcentage, de l'énergie accumulée dans la batterie à un moment donné. Lorsque la batterie est complètement chargée, le SOC est égal à l'état de charge maximal (SOC_{max}), il est de 100%. Les batteries ne peuvent pas être complètement déchargées, raison pour laquelle les fabricants recommandent de ne pas décharger les batteries en dessous d'une certaine limite déterminée appelée état de charge minimal SOC_{min} qui est toujours entre 30% et 40%. SOC_{min} est calculé en fonction de SOC_{max} , et de la profondeur de décharge, DOD :

$$SOC_{min} = (1 - DOD) \cdot SOC_{max} \quad (II.1)$$

- ✓ **Durée de vie** : Elle est égale au nombre de cycles charge / décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale. Pour une batterie fonctionnant dans des conditions optimales, sa durée de vie est estimée entre 03 à 06 ans.

II.3.2 Générateur diesel

La problématique principale des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. Le moyen le plus simple pour éviter une discontinuité de service est d'associer un générateur diesel aux sources renouvelables et de les faire fonctionner en parallèle, de façon continue [23].

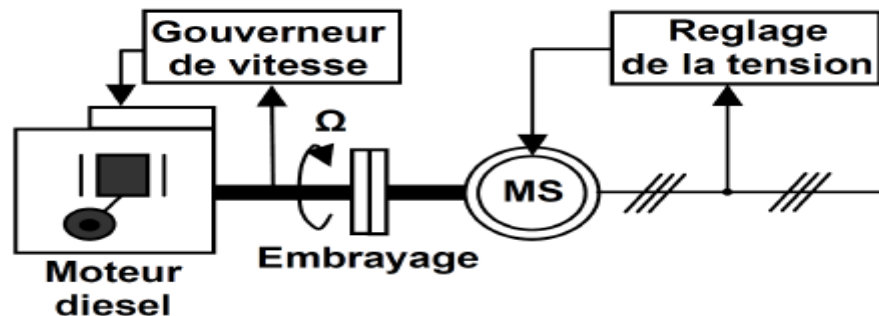


Figure II.3 : Générateur diesel [23]

Un groupe électrogène peut être utilisé de manière individuelle, ou être couplé à un réseau électrique existant, ou à un autre groupe électrogène. Dans ces deux derniers cas, les conditions de couplage suivantes doivent être respectées, à savoir :

- ✓ Egalité des tensions ;
- ✓ Egalité des fréquences ;
- ✓ Concordance des phases.

II.3.3 Convertisseurs de puissance

On distingue trois types de convertisseurs qui sont principalement dans les systèmes multi-sources : Les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à courant alternatif ou pour alimenter des charges à courant continu.

Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.

Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA.

Les hacheurs permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre une source et une charge à courant continu.

II.3.4 Classification des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable

Les systèmes multi-sources d'énergie renouvelable : Ils peuvent être divisés en deux catégories : autonomes (site isolé) et connectés au réseau [33].

La Classification des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable par gamme de puissance est représentée dans le Tableau II.1 ci-après :

Tableau II.1 : Classification des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable par gamme de puissance [23].

Puissance de la centrale multi-sources [kw]	Application
Faible : <5	Systèmes autonomes : Stations de télécommunications, Pompage d'eau. Autres applications isolées.
Moyenne : 10 – 250	Micro réseaux isolés : Alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
Grande : >500	Grands réseaux isolés (par exemple : réseaux insulaires)

II.3.5 Différentes configurations des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable

La configuration de bus dans les systèmes multi-sources décrit la modalité de connexion entre les sources et la charge, les différentes configurations des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable sont représentées sur la **Figure II.4** ci-après :

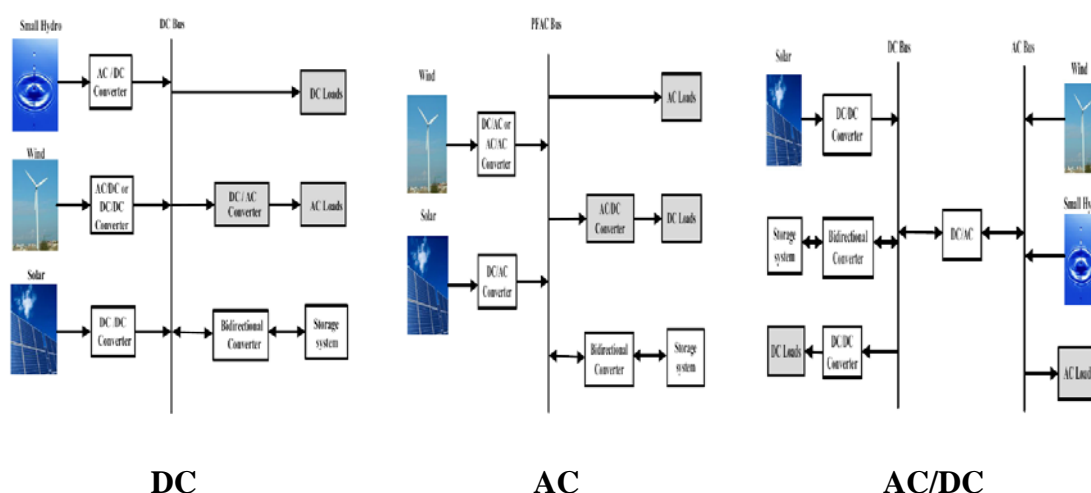


Figure II.4 : Configurations et classification des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable [34].

Phrakonkham et al. [35] ont discuté largement sur les différences entre l'utilisation de différents couplages (couplage CC, couplage AC et le couplage AC/CC).

Le choix de la configuration du bus des systèmes multi-sources dépend de l'utilisateur. Il n'existe pas en effet de méthode parfaite. Chaque couplage présente des avantages et des inconvénients liés à son utilisation. Le choix de l'architecture du couplage dépendra [36] de :

- ✓ De l'éloignement du site ;
- ✓ De la taille de l'installation ;
- ✓ Du nombre de points de génération (sources) ;
- ✓ Etc.

Aussi, dans les travaux [22, 23] [36], les architectures des Systems multi-sources sont bien discutées.

Les différentes configurations des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable sont présentés ci-dessous : Architecture à bus CC et architecture à bus CA, architecture mixte à bus CC-CA [37].

II.3.5.1 Architecture à bus à Courant Continu

Dans l'architecture à bus CC **Figure II.5**, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC [38].

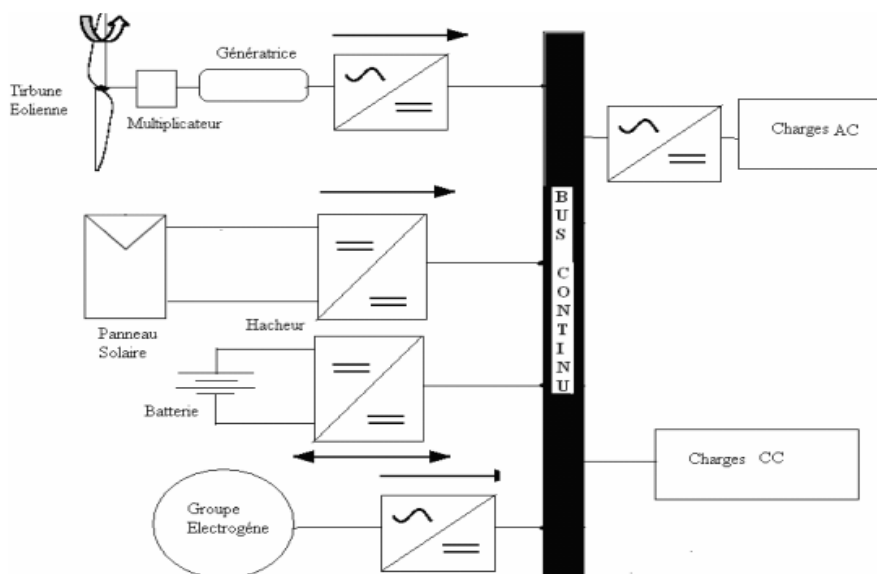


Figure II.5: Architecture du système multi-sources à bus à CC [23].

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients du couplage DC [36].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Possibilité d'utilisation directe des sources de production ; – Peu de pertes ; – Peu d'équipements ; – Facilité d'extension. 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessite l'ajout d'onduleur ou l'augmentation de la capacité de l'onduleur en cas de forte demande ; – Coût élevé de l'appareillage de connexion et de protection en CC ; – Perte de disponibilité pour AC en cas de panne de l'onduleur.

II.3.5.2 Architecture à bus à Courant Alternatif

Dans cette architecture, toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs à l'exception du générateur diesel qui peut fixer la fréquence du bus. La **Figure II.6** représente un exemple des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable.

Dans cette configuration, la fréquence reste constante tant que la puissance produite par le système est égale à la puissance demandée par la charge [39]. Un déséquilibre de puissance augmente ou diminue la vitesse de rotation du générateur diesel.

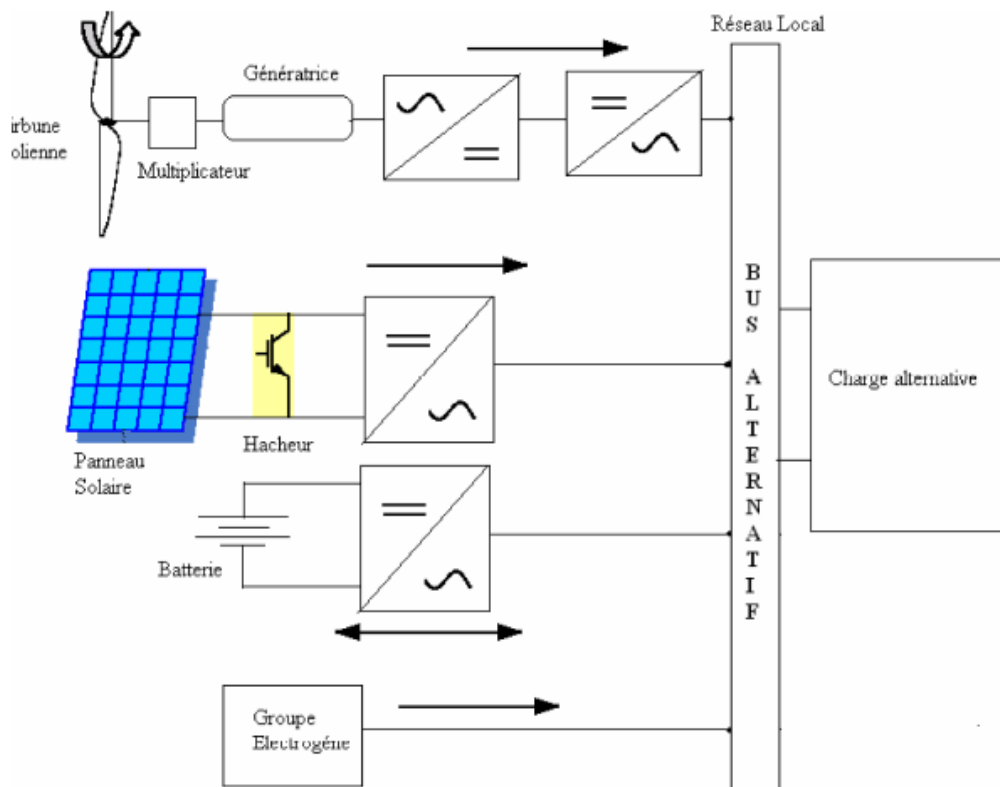
**Figure II.6:** Architecture du système multi-sources à bus à AC [23].

Tableau II.3 : Avantages et inconvenients du couplage AC [36]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité d'augmenter la tension alternative avec un composant passif (le transformateur) ; - Appareillage moins cher qu'en courant continu et disponible facilement ; - Possibilité d'utiliser la fréquence comme moyen de réglage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes de puissance multiples dues aux nombreux convertisseurs ; - Utilisation de plusieurs convertisseurs (coût élevé des équipements) ; - Obligation de synchroniser toutes les sources alternatives (utilisation d'un bus de communication par exemple).

II.3.5.3 Architecture mixte à bus à CC/CA

Parmi les architectures des systèmes multi-sources les plus répandues celles contenant deux bus : Un bus a Courant Continu et un bus à Courant Alternatif [40]. En fonction de leur nature, les sources sont connectées soit au bus à CC ou au bus à CA par l'intermédiaire des convertisseurs statiques (**Figure II.7**).

Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et le générateur diesel peuvent alimenter directement (sans convertisseur statique) une partie de la charge à courant alternatif, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du générateur diesel.

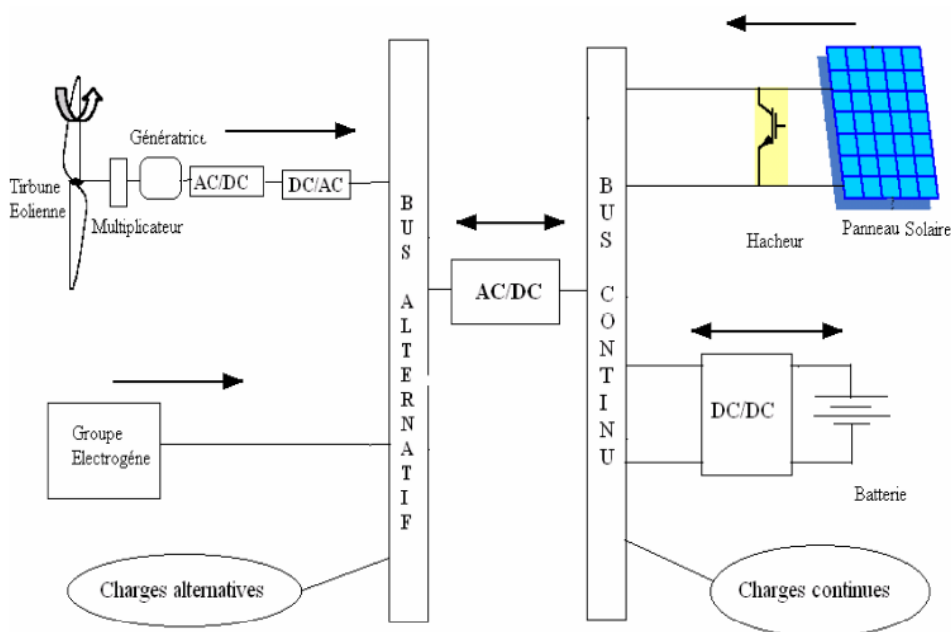


Figure II.7: Architecture du système multi-sources a bus à CC et à CA [23].

Tableau II.4 : Avantages et inconvénients du couplage DC/AC [36].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> – Bon rendement ; – Possibilité de connecter directement la charge AC ; – Moins de contrainte sur l'onduleur ; – Possibilité d'alimenter des charges à partir d'une source importante AC. 	<ul style="list-style-type: none"> – Baisse de rendement en matière de consommation de carburant en cas de charge partielle.

L'objectif de notre étude est de développer une méthode d'optimisation applicable à tous systèmes multi-sources selon des critères de performances préétablis. Compte tenu de la nature de l'applicatif, nous allons travailler dans cette thèse avec un système a architecture de bus a Courant Continu.

II.3.6 Etudes des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable à base de PV et éolien

Les énergies solaires et éoliennes représentent les ressources les plus populaires pour l'hybridation ; elles sont considérées comme complémentaires pour fournir de l'électricité ; de même, elles sont librement et largement disponibles dans le monde. De plus, elles peuvent être facilement installées pour générer de la puissance à grande échelle, et elles représentent des technologies écologiques, et nécessitent de faibles coûts d'entretien. De plus, les systèmes photovoltaïques, éoliens et multi-sources sont des systèmes fiables et coûtent moins cher par rapport à un système à source unique. Ces énergies servent à limiter l'utilisation de sources conventionnelles tels que les générateurs diesel qui peuvent minimiser le coût du système et surtout réduire les émissions de gaz à effet de serre, une cause du réchauffement global de la terre et en minimisant la consommation de carburant. De surcroît, elles peuvent assurer une alimentation continue et réduire la taille du stockage d'énergie nécessaire.

Au vue de nombreuses et diverses études, une synthèse de quelques études réalisées sur ces systèmes est présentée dans ce paragraphe.

II.3.6.1 Systèmes multi-sources avec source d'énergie conventionnelle

Une étude et l'installation d'un système multi-sources PV-diesel avec batterie de stockage sont fait dans [41], le système est représenté dans **Figure I.8**, se constitue de :

- ✓ Un générateur diesel d'une puissance de 31kVA/25.2kW ;
- ✓ Un générateur photovoltaïque de puissance 10 kWc et une tension de 300Vdc ;
- ✓ Une batterie tubulaire ouverte 3000Ah C100/48V ;
- ✓ Un onduleur 15 kVA ;
- ✓ Un régulateur de charge 48V / 320A.

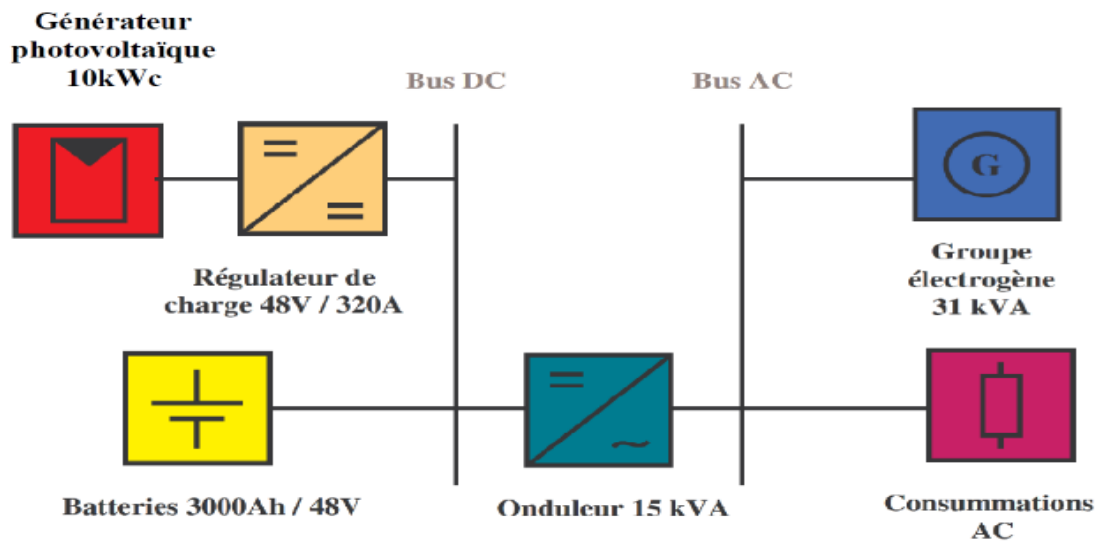


Figure II.8 : Système multi-sources installé au village de Baouth (Sénégal) [41]

La stratégie adoptée agissant sur la durée de fonctionnement des groupes diesel permet d'optimiser les coûts de fonctionnements des équipements et d'augmenter la durée de vie des batteries.

Dans [42] une étude de commande d'un système multi-sources PV-diesel avec stockage, représentée sur la **Figure II.9**. Les auteurs ont développé le programme HOGA (Optimisation Hybride par Algorithmes Génétiques), qui utilise un Algorithme Génétique (GA) lequel sert à contrôler le dimensionnement et le fonctionnement d'un système PV-diesel. Le programme a été développé en C++. L'étude a montré que si ces systèmes multi-sources sont conçus de manière optimale, ils peuvent être plus rentables et plus fiables que les systèmes PV seuls.

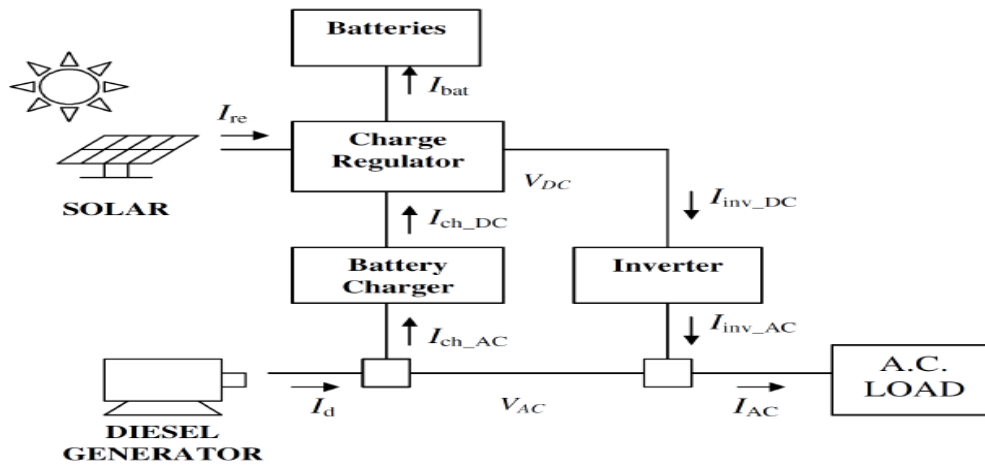


Figure II.9: Configuration du système multi-sources PV-diesel [42]

Une méthodologie de commande des couplages des sources d'énergie renouvelable développée en [23], afin de maintenir la tension du bus à une valeur de référence pour une alimentation correcte de la charge. Le système étudié est constitué d'un générateur diesel, d'une éolienne, de panneaux photovoltaïques, et d'un banc de batteries acide-plomb, le tout alimentant une charge donnée. Ces sources sont interfacées par des convertisseurs d'électronique de puissance.

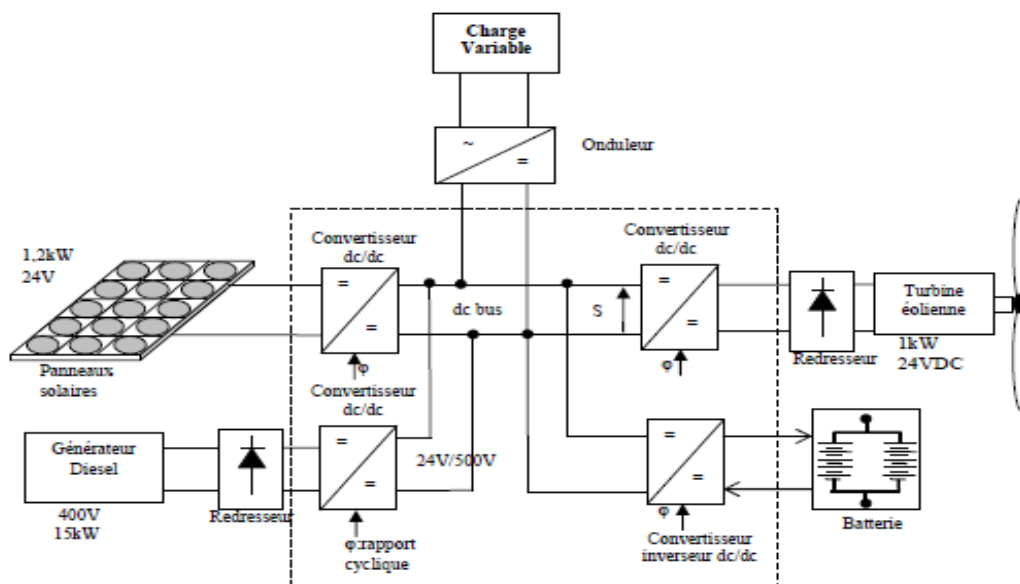


Figure II.10: Configuration de la micro centrale multi-sources [23].

Maria et al. [43] ont effectué une étude sur la commande hiérarchique pour un système d'énergie multi-sources constitué d'une éolienne, de panneaux photovoltaïques, d'une batterie de stockage et d'un bus à Courant Continu.

L'étude proposée comprend une commande locale destinée à la régulation du flux d'énergie vers la charge et la batterie et a pour objectif de maximiser l'utilisation des sources renouvelables en minimisant le raccordement du système au réseau électrique.

Les résultats des simulations obtenus ont permis de montrer l'efficacité et les performances de la commande hiérarchique selon la stratégie de fonctionnement du système multi-sources.

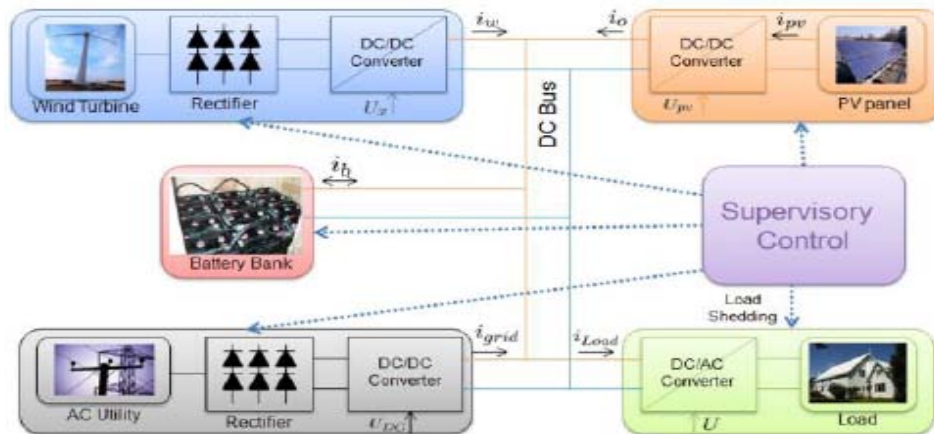


Figure II.11: Configuration du système multi-sources PV-éolien connecté au réseau [43].

II.3.6.2 Systèmes multi-sources sans source conventionnelle

Une méthodologie d'optimisation d'un système multi-sources PV-éolien avec batteries de stockage dans la Figure II.12 a été développée dans [44]. La méthode consiste à déterminer les nombres optimums de panneaux photovoltaïques et de batteries selon deux critères d'optimisation, LPSP (*Loss of Power Supply Probability*), et le coût du système.

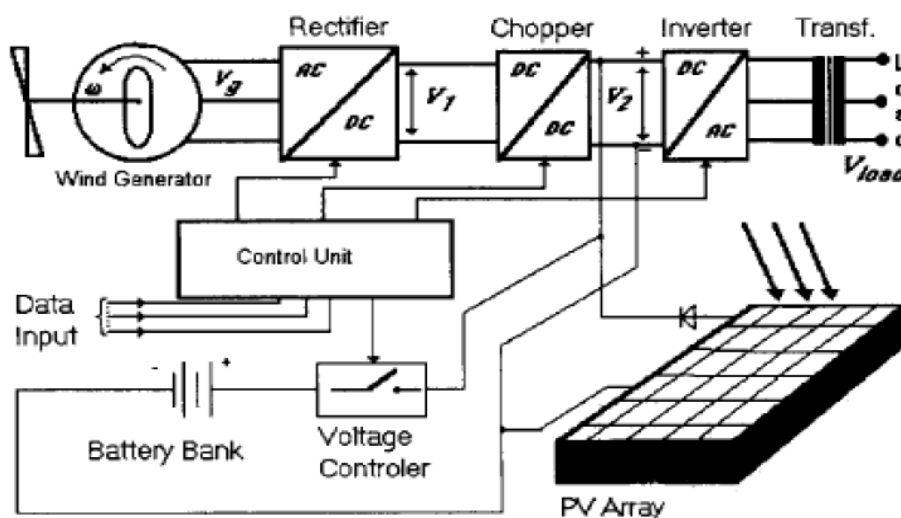


Figure II.12: Système multi-sources autonome PV-éolien [44].

Le but dans [45] est de concevoir et optimiser un système multi-sources PV-éolien (**Figure II.13**) avec batteries pour satisfaire aux besoins d'un habitat résidentiel en électricité.

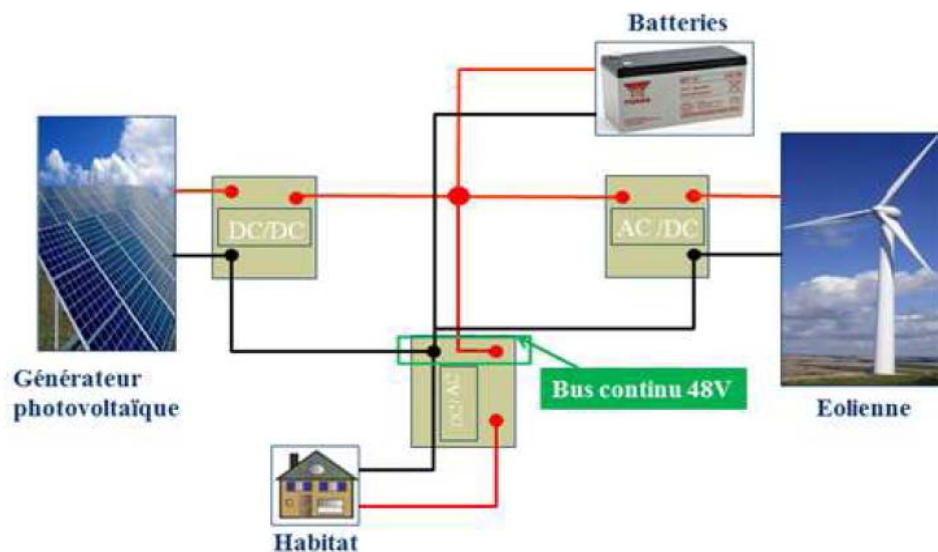


Figure II.13: Architecture du système multi-sources éolien photovoltaïque avec batteries [45].

Une étude de la conception d'un système multi-sources de production d'énergie électrique pour l'électrification d'un site isolé a été réalisée dans [36], le système est composé de panneaux photovoltaïques, de générateurs éoliens et d'un système de stockage par batteries d'accumulateurs (**Figure II.14**). Ce qui permet de dimensionner de façon optimale l'ensemble des constituants du système, en tenant compte de toutes les contraintes considérées.

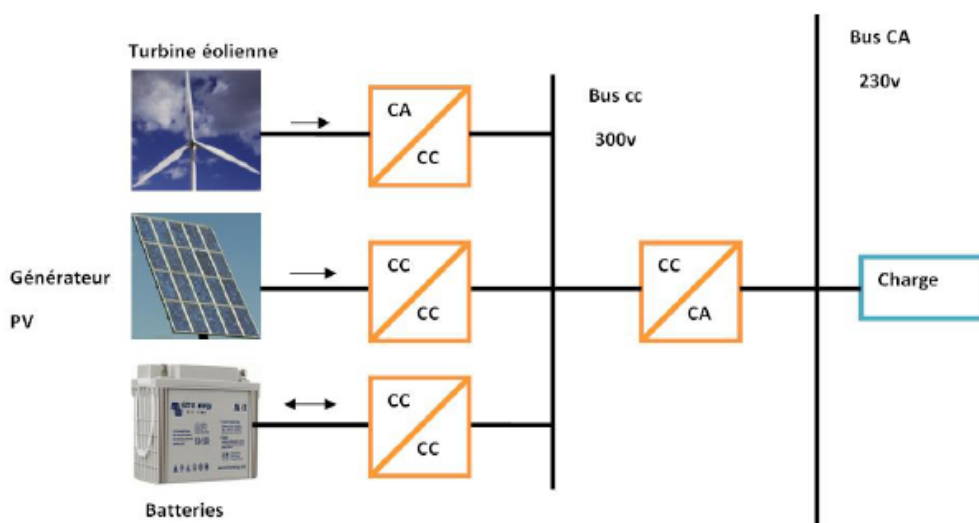


Figure II.14: Schéma de principe du système multi-sources centralisé [36].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude est effectuée pour présenter des caractéristiques des systèmes multi-sources et différents types d'architectures existants.

Une attention particulière a été consacrée aux systèmes multi-sources composés de générateurs photovoltaïques, éoliens et diesel, ainsi que des batteries de stockage afin de déterminer la stratégie de commande adaptée pour notre problématique liée à l'optimisation des systèmes multi-sources.

Chapitre III

Etat de l'Art sur les méthodes

d'optimisation et de commande

III.1 Introduction

Vu l'importance de l'utilisation des systèmes énergétiques multi-sources dans ces dernières années, plusieurs chercheurs, à travers le monde, ont développé des travaux dans le cadre de la stratégie optimale de commande des systèmes multi-sources permettant d'atteindre les objectifs de minimisation du coût de kWh, de satisfaction de la demande de la charge et de maximisation de la pénétration du renouvelable, etc. [16].

Dans cette partie, une étude détaillée sur les techniques modernes de commande et d'optimisation des systèmes multi-sources a été présentée ; aussi, les logiciels de calcul dans le cadre d'optimisation ont de même été brièvement discutés.

III.2 Stratégies de commande des systèmes multi-sources

La commande des systèmes multi-sources a fait l'objet de plusieurs études. Les auteurs se sont principalement intéressés [23] :

- ✓ Soit au dimensionnement, [12], [23] et [47] ;
- ✓ Soit à la stabilité et à la commande des convertisseurs ou à la supervision et à la gestion du transfert d'énergie dans le système multi-sources [48-53].

Les stratégies de commande et le choix des convertisseurs dépendent de la configuration du système (connexion ou non au réseau, taille du système, architecture du bus, etc.) [23].

Une stratégie de commande adéquate peut permettre d'intégrer d'une manière optimale de différents composants et rendre, de manière conséquente, le système plus rentable, où son but se présente sous forme de la supervision de fonctionnement des différentes sources interconnectées en termes de mise en marche et d'arrêt, la connexion/déconnexion des charges, l'utilisation du stockage et de la gestion du surplus et du déficit d'énergie [54]. Par conséquent, deux parties distinctes dans la stratégie de contrôle des systèmes de puissance : Le contrôle des sources et la gestion du stockage [22].

Ohsawa et al. ont appliqué les réseaux de neurone dans leur stratégie de commandes d'un système multi-sources PV-diesel [55]. Connaissant la demande de la charge et l'irradiation solaire et en utilisant une programmation dynamique, les auteurs ont optimisé le fonctionnement du générateur diesel en minimisant les coûts de carburant. Cette stratégie a été présentée comme une stratégie intelligente adaptative aux conditions réelles.

Barley et al. ont proposé plusieurs stratégies de fonctionnement des systèmes multi-sources PV-diesel avec batteries [56]. Ils ont pris un pas de calcul d'une heure (1h) où la production du système est considérée invariable. Les batteries sont considérées idéales, l'impact des cycles de charge/décharge sur la durée de vie n'est pas pris en compte. Le modèle du générateur diesel utilisé est celui proposé dans [57]. Les trois stratégies de commande proposées sont :

- ✓ *Zéro-charge*, où les batteries ne doivent pas être chargées par le générateur diesel ;
- ✓ *Cycle-charge complet*, où les batteries sont complètement chargées chaque fois que le générateur diesel est démarré. Dans ce cas, l'état de charge des batteries (State of Charge, *SOC*) est à 100% ($SOC = 100\%$) ;
- ✓ *Commande prédictive*, la charge des batteries dépend de la consommation et de l'énergie produite par les sources renouvelables. Le but de cette stratégie est de réduire la perte de l'énergie provenant des sources renouvelables car les batteries ne peuvent pas stocker toute l'énergie produite. Cette stratégie exige une connaissance précise de la situation future (consommation et production d'énergie). Cette situation n'est pas toujours certaine pour un système multi-sources réel.

Barly et Winn [57] ont amélioré la stratégie précédente citée dans [56] en ajoutant des nouveaux paramètres : La puissance critique de décharge (L_d) qui présente la valeur à partir de laquelle l'énergie nette (la différence entre la demande de la charge et la production des sources renouvelables) est plus rentable que l'énergie produite par le générateur diesel, et la puissance critique de charge (L_c) qui présente la valeur de la demande nette en dessous de laquelle il est plus rentable d'alimenter la charge à partir des batteries après avoir été chargées par le générateur diesel. Les auteurs proposent quatre stratégies de commande, à savoir :

- ✓ *Stratégie Frugal Dispatch* : Si la demande est supérieure à L_d , le générateur diesel est utilisé, sinon les batteries sont utilisées ;
- ✓ *Stratégie de poursuite de la charge* : Le générateur diesel ne doit jamais chargé les batteries ;

- ✓ Stratégie de *SOC Setpoint* : Le générateur diesel fonctionne à sa puissance maximale en chargeant les batteries jusqu'à ce que le *SOC Setpoint* soit atteint ;
- ✓ Stratégie de fonctionnement du générateur diesel à la puissance maximale durant un temps minimal (charge des batteries).

Ashari et Nayar ont développé une stratégie de commande d'un système multi-sources PV-diesel [38]. Il s'agit d'un algorithme de commande pour l'interaction entre les différents composants du système. Le rôle de cet algorithme est de déterminer les instants de démarrage et d'arrêt du générateur diesel et du chargeur de batterie ainsi que les instants de couplage et de découplage des sources d'énergie renouvelable. Ces opérations sont souvent faites en se basant sur certains pourcentages de la charge du système ou de l'état de charge (*SOC*) du banc de batteries. La détermination de la meilleure valeur de ces pourcentages est la clef d'un fonctionnement optimal du système.

Dufo-López et al. ont présenté, dans [59], une nouvelle stratégie de commande d'un système multi-sources autonome avec stockage d'hydrogène. Cette stratégie permet, par le biais d'un algorithme génétique, d'optimiser le système multi-sources en minimisant son coût total pendant sa durée de vie. Le système multi-sources optimisé est composé de sources renouvelables (PV, éolienne et hydrolienne), de batteries, de pile à combustible, de générateur diesel et d'électrolyseur. Si les sources renouvelables produisent plus d'énergie que celle demandée par la charge, le surplus d'énergie peut être utilisé soit pour charger les batteries soit pour produire de l'hydrogène avec l'électrolyseur. La stratégie de commande optimise la manière dont ce surplus d'énergie est utilisé. Si la quantité d'énergie demandée par la charge est supérieure à celle produite par les sources renouvelables, la stratégie de commande détermine la manière la plus économique pour couvrir le déficit d'énergie.

III.3 Etat de l'art sur les logiciels et les outils de dimensionnement et d'optimisation des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable :

Pour réaliser un projet, les chercheurs, ingénieurs et décideurs s'appuient sur des outils logiciels qui permettent de dimensionner, d'optimiser, d'analyser et de simuler des systèmes. Donc, ces outils se divisent en trois catégories [36] :

- ✓ Les logiciels d'étude de faisabilité comme RETScreen et LEAP ;

- ✓ Les logiciels de conception, d'analyse et de simulation comme SOMES et HOMER... ;
- ✓ Les logiciels d'analyse et de simulation comme SOLSIM et RAPSIM.

Ces outils s'appuient sur les principaux facteurs suivants [23] :

- ✓ Les conditions environnementales du site (vitesse de vent, ensoleillement, température, humidité) ;
- ✓ Le profil de charge ;
- ✓ Les préférences et les demandes du client ;
- ✓ Le coût ;
- ✓ La disponibilité de la technologie et le support technique.

De plus, nous présentons ci-dessous quelques outils qui ont été présentés dans les travaux précédents [16] [36], [60-62], ces programmes utilisés pour le dimensionnement, l'optimisation et la simulation des systèmes multi-sources.

III.3.1 SOMES

SOMES (*Simulation and Optimisation Model for renewable Energy Systems*), développé par l'université d'Utrecht aux Pays-Bas, est un logiciel développé en 1992. Il permet de simuler et d'analyser le fonctionnement d'un système multi-sources PV-éolien-diesel avec stockage par batteries. La simulation est faite avec un pas de calcul d'une heure et le fonctionnement du système est évalué sur une base technique et économique. Une optimisation du coût est faite en comparant plusieurs combinaisons. Par contre, il ne permet pas de déterminer une stratégie de fonctionnement optimale, et les critères concernant le démarrage et l'arrêt du générateur diesel sont fournis par l'utilisateur [16] [63]. Malgré le fait qu'il permet de réaliser une analyse économique des projets et une optimisation, il n'assure pas la commande des systèmes [36].

III.3.2 HOMER

HOMER (*Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable*) [64], est un logiciel initialement développé dès 1993 par le *National Renewable Energy Laboratory* pour les programmes d'électrification rurale. Depuis 2009, il est disponible sous la licence *Homer Energy*. C'est un outil pour la conception et l'analyse des systèmes d'alimentation multi-sources (générateurs conventionnels, production combinée de chaleur et d'électricité, éoliennes, solaire photovoltaïque, piles, piles à combustible, énergie hydraulique, biomasse etc.). Il permet de déterminer la faisabilité économique d'un système d'énergie multi-sources, d'optimiser la conception du système, et permet aux utilisateurs de comprendre comment fonctionne un système multi-sources d'énergies renouvelables. Il est utilisé pour effectuer des simulations de différents systèmes énergétiques, comparer les résultats et obtenir une projection réaliste de leur capital et les dépenses d'exploitation. C'est un outil intéressant au service des décideurs publics, des intégrateurs de systèmes, et de nombreux autres types de développeurs de projets, afin d'atténuer le risque financier de leurs projets de centrales multi-sources [36] [65-67]. HOMER ne propose pas de solution pour la commande du système [36].

III.3.3 HYBRID2

HYBRID2 [67], développé en 1994 par NREL et l'université de Massachussets [68], est un outil de simulation des systèmes hybrides définis par l'utilisateur. HYBRID2 vise à fournir un modèle souple pour l'analyse technique et économique du fonctionnement du système hybride. Le modèle inclut une série de temps et une approche statistique pour simuler le fonctionnement du système. La simulation réalisée par HYBRID2 est plus précise que celle réalisée par HOMER. Le programme possède plus de 200 paramètres d'entrée et les intervalles du temps de calcul sont configurables entre 10 minutes et 01 heure. Le système peut comporter des générateurs diesels, un système de distribution alternatif, un système de distribution à Courant Continu, des charges, les sources d'énergie renouvelables (éoliennes ou photovoltaïques), du stockage d'énergie, des convertisseurs de puissance, etc. Il offre une solution complète, flexible et conviviale basée sur un large éventail de choix de composants du système et les stratégies d'exploitation. Les possibilités en termes de stratégies de commande sont beaucoup plus riches que dans le cas de HOMER. Le laboratoire NREL recommande d'optimiser, dans un premier temps, le système hybride souhaité avec le logiciel HOMER et d'améliorer, par la suite, sa conception en utilisant HYBRID2 [16] [36] [63] [66] [67] [69].

III.3.4 HOGA

HOGA (*Hybrid Optimization by Genetic Algorithms*) [16], [59], [70] développé en C++ par le département de génie électrique de l'université de Saragosse (Espagne), est un logiciel d'optimisation mono-objectif ou multi-objectif des systèmes hybrides d'énergie renouvelable. Il utilise les algorithmes génétiques pour optimiser des systèmes hybrides constitués de panneaux PV, turbines éoliennes, batteries, turbines hydrauliques, générateurs diesel, électrolyseurs, piles à combustibles, redresseurs et onduleurs. Les stratégies de commande sont optimisées en utilisant les algorithmes génétiques. La simulation est effectuée en utilisant des intervalles d'une heure (01 heure), durant lesquels tous les paramètres restent constants.

III.3.5 SOLSIM

SOLSIM [71] développé au Fachhochschule Konstanz en Allemagne, est un outil de simulation des systèmes hybrides. Il donne le détail des modèles techniques des panneaux PV, des éoliennes, des générateurs diesel, des batteries et des installations de biogaz ou de biomasse. Le logiciel SOLSIM permet de simuler le système hybride, d'optimiser l'angle d'inclinaison des panneaux PV et de calculer les coûts du cycle de vie d'un système donné. Il se caractérise par ses limites en matière de commande [16] [36] [72].

III.3.6 RAPSIM

RAPSIM [73] (*Remote Area Power Supply Simulator*) développé en C++ à *Murdoch Energy Research Institute* (MUERI), dans un projet financé par l'*Australian Research Cooperative Centre* pour les énergies renouvelables (ACRE) en Australie, est un logiciel de simulation des systèmes hybrides PV-éolien-diesel. Ce logiciel permet à l'utilisateur de sélectionner un système hybride (PV et/ou éolienne et/ou diesel) et de le simuler tout en calculant son coût total. Il analyse des éléments tels que le profil de charge, les données météorologiques pertinentes. Cette analyse permet de voir comment les différents systèmes peuvent interagir dans un environnement particulier. L'utilisateur peut aussi modifier les paramètres du système (nombre de batteries, d'éoliennes, puissance des générateurs diesels) pour choisir la meilleure solution répondant à son besoin.

L'utilisateur a également la possibilité de modifier les paramètres à l'intérieur du système, (nombre de batteries, d'éoliennes, puissance des générateurs diesels) [16] [36] [63] [72]. Il est limité à la simulation des systèmes.

III.3.7 ARES

ARES (*Autonomus Renewable Energy Systems*) a été développé en 1995 et amélioré en 1997 à l'université de Cardiff au Royaume-Uni. Il sert à simuler les systèmes hybrides PV-éolien avec batteries de stockage [16] [36] [61] [72]. La modélisation des batteries se base sur le calcul de l'état de tension (*State of Voltage, SOV*) au lieu de l'état de charge (*SOC*) en ajoutant l'effet de la température. La taille des batteries est déterminée par le taux de décharge nécessaire pendant le fonctionnement du système. La technique de simulation a été validée en comparant les résultats obtenus avec des résultats expérimentaux. L'inconvénient de ce logiciel est le défaut de prise en compte du vieillissement des batteries et de son effet sur le fonctionnement du système [1]. Ses fonctions limitées à la simulation des systèmes [36].

Un résumé sur les références des outils de dimensionnement, optimisation et de simulation des systèmes multi-sources, ainsi que des observations sur leurs méthodologies de conception sont présentées par Bouchebbat [61]. De même, une étude comparative entre ces outils a été étudiée par Sinha et al [75].

Le logiciel qui est le plus largement utilisé dans les travaux précédents est Homer. Rohani et al. [76], Fazelpour et al. [77] et Ataei et al. [78] ont utilisé le logiciel Homer dans leurs travaux pour faire une étude économique des systèmes multi-sources d'énergie renouvelable.

III.4 Les algorithmes d'optimisation utilisée pour résoudre les problèmes de conception, planification et de contrôle des systèmes multi-sources :

III.4.1. L'optimisation

Les ingénieurs se heurtent quotidiennement à des problèmes technologiques de complexité grandissante, qui surgissent dans des secteurs très divers, comme dans le traitement des images, la conception des systèmes mécaniques, la recherche opérationnelle et l'électronique. Le problème à résoudre peut fréquemment être exprimé sous la forme générale d'un *problème d'optimisation* dans lequel on définit une fonction Objectif, que l'on cherche à minimiser par rapport à tous les paramètres concernés [79].

III.4.2 Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation ?

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum donc) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes [79].

Ce besoin d'optimisation vient de la nécessité de l'ingénieur de fournir à l'utilisateur un système qui répond au mieux au cahier des charges. Ce système devra être calibré de manière à :

- ✓ Occuper le volume minimum nécessaire à son bon fonctionnement (coût des matières premières) ;
- ✓ Consommer le minimum d'énergie (coût de fonctionnement) ;
- ✓ Répondre à la demande de l'utilisateur (cahier des charges).

Mathématiquement parlant, un problème d'optimisation se présente sous la forme suivante :

Minimiser $f(x)$ (Fonction à optimiser)

Avec $g(x) \leq 0$ (contraintes d'inégalité)

Et $h(x) = 0$ (contraintes d'égalité)

On a : $x \in R^n$, $g(x) \in R^m$ et $h(x) \in R^p$

On peut classer les différents problèmes d'optimisation que l'on rencontre dans la vie courante en fonction de leurs caractéristiques :

- a) Nombre de variables de décision :
 - ✓ Mono-variable ;
 - ✓ Multi-variable.
- b) Type du variable de décision :
 - ✓ Nombre réel continu (continu) ;
 - ✓ Nombre entier (entier ou discret) ;
 - ✓ Permutation sur un ensemble fini de nombres (combinatoire).

- c) Type de la fonction Objectif :
- ✓ Fonction linéaire des variables de décision => linéaire ;
 - ✓ Fonction quadratique des variables de décision => quadratique ;
 - ✓ Fonction non linéaire des variables de décision => non linéaire.
- d) Formulation du problème :
- ✓ Avec des contraintes (contraint) ;
 - ✓ Sans contraintes (non contraint).

III.4.2.1 Problème mono-objectif

Un problème d'optimisation mono-objectif est présenté sous la forme suivante :

Minimiser $f(x, u)$ (Fonction à optimiser)

III.4.2.2 Problème multi-objectif

L'optimisation de multi-objectif est une branche de l'optimisation combinatoire dont la particularité est de chercher à optimiser simultanément plusieurs objectifs d'un même problème.

Minimiser $f_i(x, u)$, $i = 1, \dots, N_{obj}$ (N_{obj} Nombre de fonction à optimiser)

Les méthodes d'optimisation ou bien les algorithmes sont souvent employés pour leur facilité de programmation et de manipulation. Elles sont en effet facilement adaptables à tout type de problème d'optimisation.

Plusieurs techniques et algorithmes ont été développés afin de résoudre les problèmes de dimensionnement, stratégies de contrôle et de gestion optimale de l'énergie dans les systèmes multi-sources. Suivant le système étudié, les conditions météorologiques, le profil de charge et d'autre contraintes, les chercheurs ont développé des algorithmes pour optimiser un ou plusieurs paramètres afin d'améliorer le fonctionnement et la consommation de l'énergie.

Un certain nombre de méthodes ont été utilisées dans des travaux liés aux systèmes énergétiques multi-sources (HES), précédemment et récemment, comme la programmation linéaire [80], la méthodologie de surface de réponse [81], [82] la programmation dynamique [83], l'algorithme simplex [84], l'optimisation basée sur l'enseignement-apprentissage (TLBO) [85], algorithme génétique (GA) [86], optimisation de l'essaim de particules (PSO) [87], recherche de taboue (TS) [88], recuit simulé (SA) [89] ou combinaison entre eux [90] [91].

Dans la littérature, il existe plusieurs états d'art sur l'optimisation des systèmes multi-sources, en particulier les systèmes multi-sources à base de solaires et l'éolien, parmi lesquels on trouve les travaux [33], [92-95].

Bhargava et al. [92] ont rapporté un état de l'art de diverses techniques d'optimisation multi-objectif, lesquelles sont comparées en termes d'analyse de fiabilité et de coût. Elles ont considéré que l'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) représente un outil d'optimisation extrêmement utile et très utile pour fournir des solutions quasi-optimales pour des systèmes complexes.

Al Badwawi et al. [33] ont rapporté un état de l'art des principaux travaux de recherche concernant la conception optimale de dimensionnement, les topologies et le contrôle de l'électronique de puissance. Les auteurs passent en revue l'état de l'art des systèmes multi-sources solaires et éoliennes connectés au réseau et autonomes.

Sinha et al. [93] ont discuté sur les techniques d'optimisation récentes pour les systèmes multi-sources photovoltaïque et éolienne. Dans cette étude, il est montré que les algorithmes d'intelligence artificielle de nouvelle génération sont principalement utilisés en raison de leur temps de calcul réduit et leur meilleure précision, une bonne convergence par rapport aux méthodes traditionnelles. Les auteurs ont suggéré d'utiliser l'hybridation de deux ou plusieurs algorithmes pour surmonter les limites d'un seul algorithme. Cet état de l'art sera utile aux chercheurs pour faire face à la complexité et aux défis de la recherche sur les systèmes multi-sources basés sur les énergies renouvelables.

Sawle et al. [94] ont rapporté un état de l'art des configurations des systèmes multi-sources, de la modélisation, des sources d'énergie renouvelables, des critères d'optimisation du système multi-sources et des stratégies de contrôle, ainsi que des logiciels utilisés pour le dimensionnement optimal. Une étude de cas est discutée, une comparaison de diverses combinaisons de systèmes multi-sources autonomes pour la région de Barwani, en Inde, est faite.

Khare et al. [95] ont présenté un état de l'art de divers aspects de système multi-sources solaire-éolien. Il contient des analyses de préfaisabilité, de dimensionnement, de modélisation, de contrôle et de fiabilité

Dans ce qui suit, nous allons énumérer les différents algorithmes utilisés dans la littérature utilisés pour l'optimisation de plusieurs types de problèmes rencontrés par les systèmes multi-sources.

III.4.3 Les méthodes récentes utilisées pour l'optimisation du système multi sources

Il existe plusieurs méthodes d'optimisation utilisées pour le dimensionnement des systèmes d'énergie renouvelable, cette section fournit les travaux les plus récents liés à l'optimisation des systèmes multi-sources.

III.4.3.1 L'algorithme DIRECT

Division des rectangles (**DI**viding **RECT**angles), L'algorithme DIRECT représente une technique d'optimisation globale, déterministe et sans dérivée, visant à résoudre des problèmes complexes de l'optimisation globale avec des contraintes liées et des fonctions Objectif à valeur réelle. L'algorithme DIRECT représente une modification de l'optimisation Lipschitzienne [96]. Nous présentons ici un résumé des travaux utilisant l'algorithme DIRECT pour les (HES), de la manière qui suit :

Belfkira et al. [97] ont proposé une nouvelle méthode pour la conception d'un système multi-sources PV-Eolien-Batterie. Basé sur un processus d'optimisation utilisant l'algorithme DIRECT, la méthodologie proposée aide les auteurs à déterminer les nombres et les types optimaux de panneaux Photovoltaïques, d'éoliennes et d'unités de stockage en minimisant le coût total du système (STC) tout en garantissant une disponibilité permanente d'énergie pour couvrir les besoins en charge d'énergie. La méthodologie développée ayant été appliquée pour optimiser le système multi-sources est basée sur l'utilisation de trois mois de données de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et de la température ambiante dans la région de Haute Normandie et en France.

Belfkira et al. [98] se sont concentrés sur l'étude d'impact de l'introduction d'autres sources d'énergie dans l'optimisation de dimensionnement d'un système multi-sources autonome Eolien-PV utilisant l'algorithme DIRECT. Les nombres optimaux et les types de composants du système multi-sources sont optimisés, le coût total du système a été minimisé. Dans cette application, un générateur diesel et quatre types d'éoliennes, des panneaux photovoltaïques et des batteries ont été utilisés. La collecte de six mois de données météorologiques a été utilisée pour la région de Dakar, au Sénégal. Une comparaison entre le coût total du système multi-sources PV-Eolien-DG avec des batteries et le système d'énergie multi-sources Eolien-PV-Eolien-DG sans batteries ; les résultats démontrent l'influence du stockage par batteries sur le coût total du système multi-sources et la grande influence du potentiel énergétique et du profil de charge sur le dimensionnement du système.

Zhang et al. [99] ont développé une méthode de dimensionnement optimal d'un système d'énergie PV-Eolien-DG. La fonction Objectif est la minimisation du coût total du système (STC) en utilisant l'algorithme DIRECT. Les auteurs ont étudié quatre combinaisons différentes de systèmes multi-sources PV-Eolien-DG avec et sans batteries, Eolien-DG et PV-DG. L'étude est basée sur l'utilisation d'une année de données de vitesse du vent, de rayonnement solaire et de température ambiante du site du Havre, en France. En outre, il y a quatre panneaux Photovoltaïques différents, des éoliennes, de groupe de batteries et un générateur diesel d'une puissance nominale de 10 kW qui sont utilisés dans cette étude.

Zhang et al. [100] ont étudié quatre combinaisons différentes des systèmes multi-sources supposés être installés dans la ville du Havre, en France, où sont collectées les données horaires de l'environnement (rayonnement solaire, vitesse du vent et température ambiante) sur une période de 05 ans. L'algorithme DIRECT a été appliqué pour simuler et optimiser le nombre, le type de chaque composant du système et le coût le plus économique du système multi-sources. Les résultats concluent que le système PV-Eolien-DG-Batt représente la combinaison la plus optimale pour le site du Havre, et que l'utilisation des données à long terme est très utile pour calculer la performance du système multi-sources.

Zhang et al. [101] se sont concentrés sur le développement d'une méthode de dimensionnement des systèmes multi-sources PV-Eolien-Batt-DG et PV-Eolien-DG en utilisant l'algorithme DIRECT. Les systèmes d'énergie sont supposés être installés dans une zone éloignée expérimentale, en France, avec une période de données de 05 ans de rayonnement solaire moyen. Les valeurs optimales obtenues comprennent le nombre de modules photovoltaïques, la surface du module Photovoltaïque, le nombre d'éoliennes, la hauteur d'installation de l'éolienne, le nombre de groupe de batteries et les heures de fonctionnement du générateur diesel avec leur coût d'investissement total le plus bas STIC sur une période de 20 ans et une analyse détaillée de STIC. A la lumière des résultats, le système le plus rentable est le système d'alimentation multi-sources PV-Eolien-Batt-DG. Il est à noter que l'utilisation de la batterie a un impact sur la réduction des heures de fonctionnement du générateur diesel qui influe la production de CO₂ dans l'environnement.

III.4.3.2 Algorithmes Génétiques

Les Algorithmes Génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastiques inspirés des systèmes génétiques naturels. Les AGs sont des algorithmes de recherche heuristiques adaptatifs basés sur les idées évolutives de la sélection naturelle et de la génétique. Aussi, les AGs sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. La conception de systèmes d'énergie fait partie de ces problèmes complexes ; par conséquent, diverses études de recherche ont eu recours aux AGs pour les résoudre ; cette sous-section couvre les travaux les plus importants.

Premièrement, Dufo-López et al. [70] ont développé un programme qui utilise un algorithme génétique pour concevoir un système PV-DG-Batt, l'outil d'optimisation multi-sources par algorithmes génétiques (HOGA) a été développé en C++. Le système optimisé est situé à Saragosse, Espagne. De même, le système optimisé par HOGA est comparé à un Photovoltaïque autonome, et une autre comparaison a été réalisée entre HOGA et un programme commercial d'optimisation des systèmes hybrides HOMER. Dans cette étude, cinq profils de charge différents ont été considérés. Le programme trouve la meilleure solution avec le coût actuel net le plus bas de la configuration optimale, il donne précisément ce qui suit : Le nombre de panneaux photovoltaïques, le type de panneaux photovoltaïques, le nombre de batteries, le type de batterie, la puissance du convertisseur, la puissance du générateur diesel, la stratégie de contrôle optimale du système avec ses paramètres, la valeur actuelle nette totale du système, les différents coûts relatifs et le nombre d'heures de fonctionnement pour le générateur diesel par an. Les résultats ont montré que le système multi-sources PV-DG représente le système le plus économique.

Koutroulis et al. [102] ont présenté une méthode de dimensionnement optimal d'un système multi-sources PV-Eolien utilisant l'algorithme génétique. Il a été appliqué pour concevoir le système multi-sources afin d'alimenter un ménage résidentiel situé dans la zone de l'Université Technique de Crète, Chania, en Grèce. Le coût du système multi-sources est minimisé pendant 20 ans. Le coût est égal à la somme des coûts d'investissement et d'entretien des composants. Le nombre et le type optimaux de chaque composant du système sont calculés, ainsi que l'angle d'inclinaison des modules Photovoltaïques, la hauteur d'installation du vent et la capacité nominale de la batterie. Les résultats vérifient que le système multi-sources PV-Eolien a un coût inférieur à celui du cas où la source d'énergie est composée d'une seule source d'énergie, soit des éoliens ou panneaux photovoltaïques.

Senjyu et al. [103] ont présenté un dimensionnement d'un système d'énergie multi-sources PV-Eolien-Batt-DG dans les îles isolées : Miyako, Kume et Tokashiki à Okinawa, au Japon, en utilisant l'Algorithme Génétique (GA). La fonction Objectif consiste à minimiser le coût total qui représente la somme des coûts initiaux et d'exploitation par an, afin de déterminer le nombre optimal de panneaux solaires, de générateurs d'éoliennes et de batteries. Dans cette étude, la collecte des données météorologiques de l'année 1993 à Okinawa a été utilisée.

Katsigiannis et al. [104] ont travaillé sur une optimisation Bi-objectif des petits systèmes d'énergie multi-sources autonomes utilisant NSGA-II, en minimisant à la fois le coût d'énergie du système et l'émission totale de gaz à effet de serre (GES) (en anglais: *greenhouse gas*, GHG) pendant leur durée de vie. Le calcul des émissions de GES est basé sur l'analyse du cycle de vie de chaque composant du système. Deux types de systèmes sont examinés : Le premier type contient les Eoliennes, les panneaux photovoltaïques, des générateurs diesel et biodiesel, les Piles à Combustible (FC) avec du gaz naturel comme carburant, des batteries plomb-acide et un convertisseur. Le deuxième type de système utilise l'hydrogène pour le stockage et peut contenir des éoliennes, des photovoltaïques, des générateurs diesel et biodiesel, des Piles à Combustible (FC) avec de l'hydrogène, un électrolyseur, un réservoir d'hydrogène et un convertisseur. Dans cette étude, les données météorologiques nécessaires pour l'estimation des performances éoliennes et photovoltaïques se réfèrent à la région de La Canée, Crète, en Grèce. La comparaison entre les technologies de stockage montre qu'il existe un avantage important dans l'utilisation des batteries au plomb tant sur le plan économique que sur le plan environnemental.

Yang et al. [86] ont recommandé une méthode de dimensionnement optimale pour optimiser les configurations d'un système multi-sources PV-Eolien utilisant des groupes de batteries basées sur l'utilisation de l'algorithme génétique. La méthode proposée a été appliquée pour analyser un projet pour l'alimentation d'une station de relais de télécommunication sur une île isolée le long de la côte sud-est de la Chine. L'année 1989 est choisie comme l'année météorologique typique à Hong Kong pour représenter les conditions climatiques de cette recherche. Dans cette étude, la configuration optimale du système est choisie en tenant compte de la probabilité de perte de l'alimentation ou de la probabilité d'insatisfaction de la demande (en anglais : *Loss of Power Supply Probability*, LPSP) souhaitée avec le minimum du coût annualisé du système. Les variables de décision

incluses dans le processus d'optimisation sont le nombre de modules Photovoltaïques, d'éoliennes et de batteries, en plus de l'angle de pente des panneaux Photovoltaïque et de la hauteur d'installation de l'éolienne. Les résultats montrent qu'une solution solaire ou éolienne seule peut atteindre la même LPSP désirée; cependant, cela représente un coût plus élevé. Dans cette étude, le système multi-sources solaire-éolien avec 03-05 jours de stockage nominal de la batterie est plus approprié pour la LPSP désirée de 01% et 02%, ainsi que la hauteur d'installation de l'éolienne et l'angle de pente du module Photovoltaïque, peuvent influencer les résultats de la simulation.

Bilal et al. [105] ont utilisé les algorithmes génétiques pour le dimensionnement d'un système multi-sources, solaire et éolien avec un stockage de batterie, pour Potou, un site isolé, situé au Sénégal. Les deux fonctions Objectif principales de cette étude sont : La minimisation du coût annualisé du système (en anglais : *Annualized Cost of System*, ACS) et la minimisation de la probabilité de perte de l'alimentation LPSP. Les résultats démontrent que le coût de la configuration optimale dépend fortement du profil de charge. Par exemple, le coût de la configuration optimale diminue de 07% et 05% entre le premier profil et le deuxième profil, et pour ceux qui vont du premier profil au troisième profil.

Afresh et al. [106] ont développé une méthode de calcul de la configuration optimale du système qui permet d'obtenir la probabilité de perte de l'alimentation requise par le client (LPSP = 0) avec un minimum du Coût d'Energie (en anglais : *Cost Of Energy*, COE) des Ressources d'Energie Distribuées (DRE) dans un mini-réseau (en anglais : *MicroGid*, MG), basé sur l'algorithme génétique. Le MG est constitué d'une installation photovoltaïque, éolien, et de biogaz avec convertisseur, et groupe de batteries et installation de stockage de gaz. Les données sur une période d'un an ont été recueillies dans un endroit éloigné à Davarzan, en Iran. La configuration optimale du système est la combinaison entre Photovoltaïque, éolien, l'installation de biogaz et batterie. Les résultats montrent qu'une légère augmentation du Coût d'Energie (COE) pour le MG, par rapport au système à source unique et multi-sources, peut être justifiée par une fiabilité et une autosuffisance accrues. Une comparaison est faite avec les résultats obtenus de HOMER pour les mêmes systèmes ; le programme validé donne des résultats très proches par rapport à HOMER.

Bilal et al. [107] ont travaillé sur le dimensionnement des systèmes multi-sources solaires-Eolien-batt en minimisant le système de coût annualisé et la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP) en utilisant l'Algorithme Génétique. Les variables de décision incluses dans le processus d'optimisation sont le nombre de composants de la configuration optimale. Les données horaires d'ensoleillement, de température et de vitesse du vent collectées pendant un an sur le site du Poitou, situé sur la côte nord-ouest du Sénégal, sont utilisées, et le profil de la charge horaire moyenne annuelle d'un village isolé typique de la côte nord-ouest du Sénégal, dont l'énergie est de 94 kWh / jour, a été utilisé. Les résultats obtenus montrent que le coût de la configuration optimale dépend fortement de LPSP. Par exemple, le coût de la configuration optimale diminue de 25% lorsque la (LPSP) passe à 01% de 0%.

Bilal et al. [108] ont travaillé sur le dimensionnement d'un système multi-sources autonome PV-Eolien-DG-batt en minimisant le coût moyen actualisé de l'énergie (en anglais : *Levelized Cost of Energy*, LCE) et l'émission de CO₂ en utilisant les Algorithmes Génétiques. La méthode développée qui a été appliquée pour l'optimisation des systèmes multi-sources est basée sur l'utilisation du rayonnement solaire, de la température et de la vitesse du vent recueillies sur le site du Poitou, côte nord-ouest du Sénégal. Les résultats montrent que lorsque le coût moyen actualisé de l'énergie (LCE) augmente, alors donc que les émissions de CO₂ diminuent. Il a également été noté que PV-batt ou Eolien-batt n'était pas une configuration optimale avec l'utilisation du profil de charge et les spécifications des dispositifs utilisés. Pour toutes les solutions, le générateur Photovoltaïque était plus adapté pour répondre à la demande d'énergie que les éoliennes.

Abbes et al. [109] ont travaillé sur le dimensionnement d'un système multi-sources PV-Eolien-Batt autonome pour une maison résidentielle, basé sur un triple objectif, à savoir, le Coût du Cycle de Vie (en anglais : *Life Cycle Cost* LCC), l'Energie Intrinsèque (en anglais : *Embodied Energy*, EE) et la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP). Les variables de décision considérées pour l'optimisation de la conception sont la surface installée des panneaux photovoltaïques, la surface balayée par les éoliennes et la capacité des batteries. Dans cette étude, des données sur une demi-heure ont été utilisées pour le Colorado, aux Etats-Unis, sur une période de neuf ans. L'optimisation a été assurée par un modèle dynamique du système sous MATLAB / Simulink.

Eltamaly et al. [110] ont introduit une conception, une simulation, une évaluation et une sélection du système d'énergie renouvelable multi-sources optimal PV-Eolien-DG avec batterie pour alimenter une communauté éloignée en Arabie Saoudite en utilisant l'Algorithme Génétique. Trois configurations ont été étudiées : Couplage en Courant Continu (DCC), Couplage en Courant Alternatif (ACC) et Configurations à Couplage Mixte (MCC). Le dimensionnement optimal pour chaque composant à différentes configurations du système multi-sources est calculé avec un coût minimum d'énergie (COE) dans la limite spécifiée de la probabilité d'une perte de charge (LOLP) et d'une Fraction d'Energie Renouvelable (REF). Le taux de pénétration optimal des systèmes d'énergie renouvelable sera choisi en fonction du prix le plus bas. Pour l'étude, une donnée réelle pour un site distant en Arabie Saoudite a été utilisée. Les résultats montrent que le Couplage en Courant Continu (DCC) a obtenu le Coût d'Energie (COE) le plus élevé par rapport aux deux autres configurations ; cependant, il n'y a pas beaucoup de différence en termes de Coût d'Energie (COE) entre le Couplage en Courant Alternatif (ACC) et les Configurations à Couplage Mixte (MCC). Les résultats obtenus à partir de cette étude sont recommandés pour utiliser la configuration du Couplage en Courant Alternatif (ACC) avec 40% – 60% REF pour le plus bas Coût d'Energie (COE).

Ramoji et al. [111] ont utilisé l'Algorithme Génétique pour dimensionner de manière optimale un système d'énergie multi-sources PV-Eolien, en minimisant le coût total (C_T) du système multi-sources proposé pour électrifier une habitation résidentielle en s'assurant que la charge est satisfaite selon certains critères de fiabilité. Les données de radiation solaire et de vitesse du vent du Centre de Données de Mesure et d'Instrumentation / Laboratoire National des Energies Renouvelables (MIDC / NREL) sont utilisées dans l'étude. La surface totale du PV, la surface balayée totale du rotor et la capacité de stockage de la batterie sont déterminées comme variables de conception dans cette étude. Les résultats d'optimisation sont comparés avec un autre algorithme appelé optimisation basée sur l'enseignement-apprentissage (TLBO). Les résultats indiquent que la combinaison des systèmes d'énergie multi-sources PV-Eolien est la solution la plus économique et fiable, aussi l'algorithme génétique est plus précis que l'algorithme d'optimisation basé sur l'enseignement-apprentissage (TLBO) tenant compte de la comparaison entre les résultats de coûts obtenus et la capacité de convergence à la solution optimale.

Okinda et al. [112] ont utilisé l'algorithme génétique (GA) pour dimensionner de manière optimale un système d'énergie renouvelable multi-sources Eolien-PV avec un groupe de batteries. Plusieurs scénarios ont été étudiés et simulés pour obtenir une configuration optimale. La production d'énergie solaire et éolienne est sélectionnée pour une ville dans une région éloignée du Kenya. Les données utilisées pour dériver une courbe de charge journalière typique couvrent le mois de septembre pour les années 2009 à 2012. Dans le problème d'optimisation, le Coût Nivelé de l'Energie (LCOE) est considéré comme un indice économique et la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP) comme un indice technique. Les variables considérées sont le nombre de batteries, de panneaux et d'éoliennes. Les résultats montrent que la plupart des scénarios avec une exigence de fiabilité inférieure (10% LPSP) ont abaissé le coût moyen actualisé de l'énergie de moins de 20 Cents américains par kWh, et le meilleur scénario avec une exigence de fiabilité élevée (05% LPSP). Les résultats obtenus ont été validés par comparaison avec la base de données des coûts transparents (TCD) publiée par openei.org.

Merei et al. [113] ont travaillé sur la modélisation et l'optimisation d'un système d'énergie multi-sources autonome utilisant l'algorithme génétique. Le système comprend des panneaux Photovoltaïque, une éolienne, un générateur diesel et des batteries pour stocker l'énergie excédentaire. Les données météorologiques étaient composées de l'irradiation, de la vitesse du vent et de la température de l'air mesurées par intervalles de 10 minutes pendant 10 ans à Aix-la-Chapelle, en Allemagne. En outre, l'optimisation a de même été effectuée pour un site à Quneitra, en Syrie. L'étude est basée sur des profils de conditions météorologiques similaires pour les deux endroits. L'objectif est de fournir l'énergie électrique au prix de l'énergie le moins cher et d'évaluer la performance des systèmes pendant 20 ans. Trois technologies de batteries différentes ont été considérées (batteries au plomb, à flux redox et au lithium-ion) ou une combinaison entre elles utilisant un Système de Gestion de Batterie (BMS). En outre, l'optimisation a été effectuée pour six scénarios différents avec différentes configurations de système. Les résultats de l'optimisation montrent que l'utilisation de batteries en combinaison avec les énergies renouvelables est plus économique et écologique. De plus, un système composé uniquement de batteries, de Photovoltaïque et d'éoliennes peut être applicable pour satisfaire la demande de puissance. L'utilisation d'une combinaison de plus d'une technologie de batterie comme stockage d'énergie n'est pas favorable. L'utilisation de batteries à flux redox comme système de

stockage est la meilleure solution, le système le moins cher avec un coût d'énergie de 0,65 €/ kWh à Aix-la-Chapelle et de 0,34 €/ kWh pour Quneitra. Une combinaison de trois technologies de batterie est une solution optimale pour le système multi-sources autonome où les générateurs diesel ne sont pas utilisés.

Al-Shamma'a et al. [114] ont présenté une méthodologie de dimensionnement optimale pour optimiser la configuration du système d'énergie multi-sources PV- Eolien-DG- Batt, basée sur les algorithmes génétiques. La méthode consiste à trouver le coût d'énergie le plus bas (COE) et une Fraction d'Energie Renouvelable appropriée (REF) qui satisfait aux exigences de la demande de charge sans Probabilité de Perte de l'Alimentation (LPSP). La méthode d'optimisation a été appliquée pour évaluer : Le nombre de Photovoltaïque, le nombre Eoliennes, le type Eoliennes et le nombre de batteries. Neuf systèmes étudiés en termes de performance économique et environnementale comprennent un système multi-sources, un système Photovoltaïque autonome, un système éolien autonome et un système diesel. Dans cette étude, la vitesse du vent horaire est mesurée à 30m au-dessus du niveau du sol à Arar, en Arabie Saoudite. Les résultats montrent que la séquence optimale pour le choix du type HES devrait être PV-Eolien-Batt-DG, Eolien-Batt-DG, PV-Eolien-DG, Eolie-DG, PV-Batt-DG, PV-Eolien- Batt, Eolien-Batt et ensuite le PV-Batt car ils résultent en un Coût d'Energie (COE) inférieur. La densité de l'énergie solaire et la vitesse du vent ont un impact sur le dimensionnement des systèmes. De plus, le Coût d'Energie (COE) n'est pas linéairement dépendant de la Fraction d'Energie Renouvelable (REF) ; par exemple, une légère augmentation de la Fraction d'Energie Renouvelable (REF) entraînera une forte augmentation du Coût d'Energie (COE). La batterie a un effet important sur le COE du système multi-sources.

Suryoatmojo et al. [115] ont proposé un dimensionnement optimal du système Eolien-PV-DG-Batt avec évaluation des émissions de CO₂ en utilisant les algorithmes génétiques (GA). La fonction Objectif représente le Coût Annualisé du Système (ACS) qui contient le coût d'investissement avec les valeurs actualisées actuelles de tous les coûts tout au long de la durée de vie totale de l'installation. Dans la méthode proposée, la configuration optimale inclut un nombre optimal pour les éoliennes, les panneaux photovoltaïques et les batteries. Les données météorologiques, le profil de charge et les autres facteurs ont été pris sur une île isolée de l'est de Nusa Tenggara, en Indonésie, sur la base de données de

charge horaire en une journée répétées pour la simulation d'une année. Les résultats montrent que le système proposé est capable de minimiser le coût annuel total du système et de réduire les émissions de CO₂ générées par les générateurs diesel. La configuration proposée du système Eolien-DG-Batt réduit le coût annuel total du système par rapport au système diesel existant dans l'île. En bref, le système multi-sources proposé est meilleur d'un point de vue économique et environnemental.

Abdelhak et al. [116] ont utilisé un algorithme génétique flou-adaptatif pour optimiser la configuration du système d'énergie multi-sources PV-Eolien-Batt dans deux cas : Lorsque la durée de vie d'une batterie est déterminée avec le nombre de charge / décharge, et quand seulement la durée de vie moyenne est prise, et il y a lieu de faire la comparaison entre les deux cas. La fonction Objectif consiste à minimiser le coût total tout en garantissant la disponibilité permanente d'énergie pour couvrir les besoins en charge d'énergie. Cette approche est utilisée pour obtenir les nombres optimaux, qui sont le nombre de panneaux Photovoltaïques, Eoliennes et de batteries, basés sur l'utilisation de données à long terme : la vitesse du vent et l'estimation de l'irradiation solaire pour la cité Troyes-Barbèrey en France sont utilisées. De même, l'optimisation sous algorithmes génétiques et l'algorithme génétique flou-adaptatif sont réalisées en utilisant deux scénarios différents de demande de charge. Les résultats des deux scénarios montrent que l'algorithme génétique flou-adaptatif est meilleur que l'Algorithme Génétique standard et que l'utilisation de la durée de vie réelle de la batterie donne une solution acceptable par rapport à la durée de vie moyenne.

III.4.3.3 Optimisation par Essais Particulaires :

L'Optimisation par Essais Particulaires (PSO) est un algorithme méta-heuristique inspiré du comportement social des organismes biologiques [117]. La PSO a été proposée par Kennedy et Eberhart en 1995[118]. Kusakana et al. [119] ont présenté une étude sur la plupart des applications de PSO dans le domaine du dimensionnement optimal des systèmes d'énergie renouvelable multi-sources autonomes et connectés au réseau. Un résumé des applications de PSO pour le dimensionnement optimal des systèmes multi-sources renouvelables PV-Eolien est présenté ci-dessous.

Jahanbani et al. [120] ont travaillé sur le dimensionnement du système d'énergie multi-sources Eolien-PV-Batt. Le but de l'étude est de minimiser le coût net actualisé (NPC) du système au cours de ses 20 années de fonctionnement. Le Facteur de Perte Équivalent (ELF) est choisi comme indice de fiabilité principal. Il est considéré comme une contrainte qui doit être satisfaite, dans cette étude, le Facteur de Perte Équivalent (ELF) $< 0,01$ est acceptable. En outre, d'autres indices sont calculés dans cette étude, à savoir : la Perte de Charge Prévues (LOLE), la Perte d'Énergie Prévues (LOEE) et l'Énergie Prévues Non-fournie (EENS). Trois scénarios sont proposés dans cette étude : Le système multi-sources, le Photovoltaïque autonome et l'éolien autonome. Les variables à définir dans le processus d'optimisation sont le nombre d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques, l'angle des panneaux photovoltaïques, la capacité de la batterie, la hauteur du moyeu et la capacité du convertisseur. La vitesse du vent horaire, le rayonnement solaire vertical et horizontal horaire, et les données de charge pendant une année sont utilisées dans la province d'Ardebil, Iran. Les résultats montrent que le système multi-sources Eolien-PV-Batt est la meilleure solution. L'indice de fiabilité d'un système avec une éolienne est inférieur à celui d'un système avec un générateur photovoltaïque, car les fluctuations du vent dans cette région sont plus élevées que les fluctuations du rayonnement solaire. En outre, le nombre de composants dépend directement de la charge ; le nombre de batteries dans le système éolien-batterie est plus que les deux autres systèmes autonomes Photovoltaïque et éolien.

Yazdanpanah-Jahromiet al. [121] ont travaillé sur la conception d'un système multi-sources autonome Eolien-PV-DG-Batt utilisant multi-objectif PSO (MOPSO). Les objectifs sont la minimisation à la fois du Coefficient d'Inégalité (IC) et du Coût Annualisé du Système (ACS) et de la maximisation à la fois du Taux de Correspondance Electrique (en anglais : *Electricity Match Rate*, EMR) et du Coefficient de Corrélacion (CC). La méthodologie développée est appliquée pour sélectionner le nombre optimal d'éoliennes, de modules photovoltaïques et de batteries. Les données météorologiques, le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent pendant un an, sont collectées dans la ville de Zabol, en Iran. Les résultats ont donné plusieurs solutions qui sont présentées comme un front optimal de Pareto ; cela peut aider les concepteurs à choisir la meilleure configuration.

Bagdadee et al. [122] ont travaillé sur le dimensionnement des systèmes multi-sources Eolien-PV-Batt en utilisant le PSO, la fonction Objectif consistant à minimiser le coût annuel total du système, qui comprend le coût des divers composants du système et le coût annuel de la perte de puissance ayant utilisé le facteur de compensation. Les variables considérées dans l'étude sont les types et le nombre d'éoliennes, des cellules Photovoltaïques et des batteries et l'inclinaison des cellules photovoltaïques. La meilleure solution obtenue avec un coût minimum de $5.2705 * 10^7$ et avec la valeur de la LPSP 0.0287.

Panwar et al. [123] ont appliqué l'algorithme de l'Optimisation par Essaims Particulaires pour le dimensionnement de système multi-sources PV-Eolien-DG avec un système de groupe de batteries. Le problème du dimensionnement est formulé comme un problème d'optimisation combinant deux objectifs économiques, la minimisation des coûts et les émissions environnementales intégrées. Les résultats ont démontré que la combinaison des intérêts économiques et environnementaux pourrait altérer la sélection et la taille des ressources de production.

Ram et al. [124] ont proposé un dimensionnement du système autonome PV-Eolien-Batt connecté à un générateur diesel utilisant le PSO, l'objectif de la méthodologie étant de minimiser le coût total qui inclut les coûts initiaux, opérationnels et d'entretien. Divers critères de conception en utilisant des itérations variées de 100 à 500, ont été mis en œuvre pour trouver la solution optimale pour la zone balayée par le rotor, la superficie des panneaux photovoltaïques et les taux de décharge horaire. La méthodologie suggérée démontre que le système multi-sources est la meilleure solution avec le coût le plus bas est la conception avec 400 itérations.

Maleki et al. [125] ont utilisé un algorithme d'Optimisation par Essaims Particulaires Améliorée (IPSO), pour l'optimisation du système multi-sources PV-Eolien-DG avec un système de stockage des batteries pour l'électrification d'une zone éloignée hors réseau. L'objectif est de minimiser le coût annuel total qui comprend le coût annuel en capital, le coût d'entretien annuel et le coût annuel total de la consommation de carburant du générateur diesel, les paramètres sont le nombre d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques et de batteries aux fins de satisfaire à la demande. Les données horaires de vitesse du vent et les données d'isolation solaire et la charge horaire de dix bâtiments résidentiels typiques,

pendant une année, ont été recueillies dans une zone éloignée de Rafsanjan, Kerman, Iran. A cette fin, des différents systèmes, à savoir : PV-Eolien-DG-Batt, PV-DG-Batt, Eolien-DG-Batt, et DG seul, sont étudiés et comparés en termes de coût. Les coûts annuels totaux pour les systèmes autonomes PV-DG-Batt, PV- Eolien-DG- Batt, Eolien-DG-Batt et générateur diesel sont respectivement de 24.009 \$, 24.008 \$, 28.821 \$ et 31.036 \$. D'après les résultats, les systèmes multi-sources PV-DG-Batterie, PV-Eolien-DG- Batt, Eolien-DG-Batt, représentent un meilleur choix que le générateur diesel seul, ils représentent la solution la plus économique pour l'électrification des régions étudiées.

Pirhaghshenasvali et al. [126] ont proposé un dimensionnement optimal d'un système multi-sources autonome PV-Eolien-DG avec un groupe de batteries utilisant la PSO, pour un village de Kerman, Iran. L'objectif était de minimiser le coût total du système afin de garantir la disponibilité de l'énergie nécessaire. Le coût total des éoliennes, des systèmes Photovoltaïques et des batteries est minimisé. Des différents types d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques et de batteries sont utilisés. Cette approche s'est basée sur les données locales du rayonnement solaire et de la vitesse du vent et les états de fonctionnement pour la charge du système en 24 heures pour un village éloigné à Kerman, en Iran. D'après les résultats de la simulation, le système multi-sources est la solution la plus optimale.

Bashir et al. [127] ont proposé une méthode de dimensionnement optimal d'un système multi-sources Eolien-PV avec stockage de la batterie en utilisant l'Optimisation par Essaims Particulaires en vue de trouver le nombre d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques et de batteries. La méthode proposée a pris en compte l'incertitude dans la production d'énergie éolienne et de Photovoltaïque solaire ; ils ont formulé l'algorithme pour déterminer la capacité de l'éolienne, de Photovoltaïque et de la batterie. La fonction Objectif consiste à minimiser le coût sur ses 20 ans, le Facteur de Perte Équivalent (en anglais : *Equivalent Loss Factor*, ELF) est considéré comme une contrainte de l'algorithme d'optimisation et il est utilisé pour évaluer la fiabilité du système multi-sources. Les données qui ont été utilisées sont basées sur un intervalle de deux heures pour une période totale de 32 ans en Oregon, Etats-Unis. Les résultats indiquent que, lorsque l'incertitude des sorties d'énergie éolienne et solaire est prise en compte, le coût total de la réduction du système par rapport à l'incertitude n'est pas considéré avec la même valeur du Facteur de Perte Équivalent (ELF).

Bashir et al. [128] se sont concentrés sur l'optimisation des multi-sources Eolien-PV-Batt avec PSO pour déterminer le nombre d'éoliennes, de panneaux solaires, de turbines marémotrices et de batteries avec un objectif de coût minimum et une contrainte de fiabilité. La méthode de coût net actualisé (NPC) a été utilisée pour calculer le coût total du système pendant sa durée de vie de 20 ans. Le Facteur de Perte (ELF) a été utilisé comme un indice pour évaluer le niveau de fiabilité du système. Les données horaires de la vitesse du vent, du rayonnement solaire, de la vitesse de l'eau et la charge sont utilisées pour la simulation. Elles sont obtenues à partir de la moyenne de 16 ans des données horaires de l'Etat de l'Oregon, Etats-Unis. Les résultats ont démontré que le système multi-sources éolien, solaire, turbine marémotrice et de batterie est le plus économique et qu'il peut satisfaire toutes les contraintes, en comparaison avec le système multi-sources autonome éolien-solaire.

Saber et al. [129] ont suggéré l'introduction de charges contrôlables avec optimisation intelligente comme une nécessité pour la mise en œuvre de Micro-Réseaux Intelligents (SMG). Un problème d'optimisation multi-objectif a été formulé avec deux objectifs, à savoir la minimisation des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation soumis à des contraintes telles que l'émission nette zéro pour le dimensionnement des composants de Micro-Réseaux Intelligents (SMG). L'historique de la vitesse du vent, le rayonnement solaire et les profils de charge sur une longue période de temps sont utilisés comme entrées du modèle et un système intelligent de gestion de l'énergie. Le site Rolla, Missouri, Etats-Unis, est utilisé pour cette approche. Les résultats de l'optimisation ont généré un front de Pareto avec les solutions possibles qui peuvent aider les opérateurs à choisir en fonction de leurs besoins.

Navaerfad et al. [130] ont exploité l'algorithme d'Optimisation par Essaims Particulaires pour obtenir le dimensionnement optimal des ressources de l'énergie distribuée dans un micro réseau constitué d'un système multi-sources Eolien-solaire avec un électrolyseur, un réservoir d'hydrogène, des Piles à Combustible et des batteries. Les simulations sont faites dans deux scénarios, dans le premier scénario, l'incertitude du vent n'est pas prise en compte et dans le second scénario, elle est considérée. Ils ont proposé l'incertitude de l'énergie éolienne avec un indice de fiabilité comme contraintes. Les variables de décision incluses dans le processus d'optimisation sont le nombre de module Photovoltaïque,

éolienne, batterie, électrolyseur, pile à combustible et réservoir d'hydrogène avec le coût net actualisé (NPC) le plus bas et l'indice Facteur de Perte (ELF) de divers types d'indices de fiabilité. Les données annuelles sur le rayonnement solaire et la vitesse du vent, ainsi que les données de charge horaire sont prises pour une région nord-ouest de l'Iran. Les résultats montrent que, compte tenu de l'incertitude liée au vent, le niveau de la puissance de sortie des éoliennes augmentera, mais cela entraînera une augmentation des coûts.

Acakpovi et al. [131] ont résolu un problème d'optimisation des coûts du système multi-sources solaire-Eolien-système hydroélectrique en utilisant la PSO. La fonction Objectif a diminué le coût moyen actualisé de l'énergie (LCE). Les données sur la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la température à Accra, au Ghana, ont été recueillies à l'aide du logiciel RETScreen Plus. L'approche de programmation linéaire a également été testée. Un essai Khi-Carré a été exploité pour comparer les deux séries de données obtenues à partir des deux approches. Les résultats ont montré que l'essai Khi-Carré a montré que l'approche d'optimisation linéaire par simulation est en accord avec les résultats de simulation de la PSO. L'essai Khi-Carré montre une grande similitude confirmant la fiabilité de la PSO.

Tudu et al. [132] ont présenté une version améliorée de la méthode d'Optimisation par Essais Particulaires pour dimensionner et réaliser une analyse de faisabilité techno-économique d'un système d'énergie multi-sources hors réseau Eolien-solaire-Batt-DG pour la région Sundarban, au Bengale occidental, Inde. Les données de charge réelle et d'autres paramètres météorologiques sont utilisées pour le village de Laxmijanardanpur, en Inde. Les coût net actualisé (NPC) et le Coût d'Energie (COE) ont été pris en compte pour obtenir le dimensionnement optimal du système. L'émission à partir du système multi-sources est également calculée et comparée à un système d'énergie conventionnel. Le système multi-sources Solaire-Eolien-Batt-DG est la meilleure solution pour ce type d'environnement avec moins de Coût d'Energie (COE) (8.927 Rs./kWh). Les résultats montrent que le système est tout à fait comparable au système conventionnel, et que les émissions du système (0,116 kg / kWh) sont inférieures à celles de la centrale électrique indienne de 60 MW (0,804 kg / kWh).

Borhanazad et al. [133] ont utilisé l'Optimisation multi objectifs par Essaims Particulaires (MOPSO) pour l'optimisation du système de micro-réseaux multi-sources (HMGS), PV-Eolien-DG-Batt pour trois sites différents en Iran, à savoir Nahavand, Rafsanjan et Khash. Le Coût d'Energie (COE) et la Probabilité de perte de l'alimentation (LPSP) sont définis comme des fonctions Objectif en plus de la contrainte d'un facteur renouvelable, afin de définir les différentes composantes du HMGS. Dans cette étude, une stratégie de contrôle pour un système de micro-réseau multi-sources est proposée pour fournir la charge en continu. Les résultats ont démontré que le système multi-sources est la meilleure solution pour des différentes zones, mais le plus économique avec le Coût d'Energie (COE) le plus bas (\$/kWh) 0.32, 0.35 est le HMGS de Rafsanjan, HMGS de Khash respectivement. En outre, Rafsanjan a le potentiel le plus élevé pour l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Le HMGS de Nahavand fonctionne essentiellement sur batterie et générateur diesel en raison du faible potentiel des énergies renouvelables.

III.4.3.4 Colonie Artificielle d'Abeilles

La Colonie Artificielle d'Abeilles (ABC) a été proposée par Dervis Karaboga en 2005 [134]. ABC est une méta-heuristique de recherche basée sur la population dans laquelle les individus sont des positions alimentaires modifiées par les abeilles artificielles, et l'objectif de l'abeille est de découvrir les sources de nourriture à haute teneur en nectar jusqu'à atteindre le nectar le plus élevé (optimum) [135]. Les applications de l'algorithme ABC dans la littérature revue par Karaboga et al [136]. L'ABC a été utilisé pour le dimensionnement des systèmes d'énergie renouvelable, il est résumé dans les contributions suivantes.

Javadi et al. [137] ont appliqué la Colonie Artificielle d'Abeilles (ABC) au dimensionnement du système multi-sources PV-Eolien-Batt dans lequel ils le comparaient aux AG et PSO. La fonction Objectif est de minimiser le coût net actualisé (NPC), ce qui veut dire la somme de tous les coûts actuels nets tout en supposant un approvisionnement continu et fiable de la charge par le nombre de cellules Photovoltaïque, d'éoliennes et de batteries. La moyenne de toutes les données utilisées est calculée pendant une semaine, les données sont des moyennes horaires de la vitesse du vent et du rayonnement solaire dans les provinces de l'Iran. Le profil de charge choisi est considéré avec un pic de 01 kW. Les résultats de la simulation démontrent que les systèmes multi-sources Photovoltaïques –

éoliens ont le coût du système le plus bas par rapport aux cas où une seule source est utilisée. En outre, il est apparu que la performance de l'algorithme ABC est supérieure à la recherche du minimum global en termes de vitesse de convergence.

Nasiraghdam et al. [138] ont présenté un nouvel algorithme ABC multi-objectif (MOABC) pour résoudre une reconfiguration de système de distribution et un dimensionnement de système d'énergie multi-sources PV-Eolien-FC. Les objectifs comprennent la perte de puissance totale, le coût total de l'énergie électrique et l'émission totale produite par le système d'énergie multi-sources et la minimisation du réseau, ainsi que l'Indice de Stabilité de la Tension (VSI) de la maximisation du système de distribution. L'algorithme proposé est testé sur 33 systèmes de distribution de bus et les solutions obtenues sont comparées aux méthodes de l'Algorithme NSGA-II et à l'algorithme (MOPSO). Les solutions obtenues par l'algorithme MOABC ont une bonne qualité et une meilleure diversité du front de Pareto par rapport aux méthodes NSGA-II et MOPSO.

III.4.3.5 Recherche d'Harmonie

La Recherche d'Harmonie (HS) est un algorithme méta-heuristique inventé par Geem [139]. L'algorithme (HS) s'inspire du processus d'improvisation des musiciens de jazz. La HS est un algorithme efficace, il est facile à mettre en œuvre et il a une capacité de convergence plus rapide pour échapper aux optima locaux. Manjarres et al. [140] rapporté les applications récentes développements associés de HS atteints au cours des dernières années. Il est appliqué dans plusieurs réseaux intelligents de disciplines, énergie renouvelable, et autres domaines variés. La littérature utilisant la méthode (HS) pour l'optimisation des systèmes d'énergie multi-sources est résumée ci-dessous.

Askarzadeh et al. [141] ont développé une méthodologie pour optimiser des systèmes d'énergie multi-sources Eolien-PV-Batt en utilisant l'algorithme de la Recherche d'Harmonie Discrète (DHS). Le but de la méthode est de minimiser le coût annuel total, cela veut dire la somme du coût d'investissement annuel et du coût d'entretien annuel. Les variables sont composées du nombre de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et de batteries. La demande horaire moyenne annuelle, la puissance annuelle générée par chaque éolienne et la puissance annuelle générée par chaque panneau solaire sont utilisées dans les contraintes de cette étude. Les résultats démontrent que la DHS a trouvé les résultats les plus précis en moins d'une seconde, avec un coût optimal de 7988 \$.

Maleki et al. [142] ont présenté une modélisation d'un système multi-sources [multi-source] hors réseau, et un dimensionnement optimal PV-Eolien-DG-Batt, et comparé à un système diesel en termes du coût annuel total et d'émissions environnementales. Pour cela, le nombre de composants différents est optimisé par l'utilisation de l'algorithme (HS) pour une zone éloignée située à Rafsanjan, en Iran. Le dimensionnement optimal du système est trouvé par une Recherche d'Harmonie Discrète (DHS) et les résultats sont comparés à un algorithme du Recuit Simulé Discrét (DSA). Des différents systèmes de génération (PV-Eolien-DG-Batt, Eolien-DG-Batt, PV-DG-Batt, DG seul) sont étudiés. L'étude de cas montre que l'utilisation de Eolien-DG-Batt est le système le plus rentable avec un coût de 15673 \$. De plus, l'utilisation de la DHS donne des résultats plus précis que le DSA.

Maleki et al. [143] se sont concentrés sur la modélisation, le dimensionnement et l'analyse des coûts d'un système multi-sources PV-Eolien-DG en considérant deux dispositifs de stockage, à savoir : La batterie et la pile à combustible (FC). L'objectif est de garantir que le coût total du système diminue pendant 20 ans et de trouver le nombre optimal de composants du système grâce auxquels le système peut satisfaire la charge requise. Les données de la vitesse de vent et d'isolation solaire pour une année sont obtenues à Rafsanjan, Iran. Le profil de la demande de charge horaire au cours d'une année de trois bâtiments résidentiels typiques est considéré. Des différents systèmes multi-sources : PV-Eolien-DG-FC, PV-DG-FC, éolien-DG-FC, PV-Eolien-DG-Batt, PV-DG-Batt et Eolien-DG-Batt sont étudiés. Une comparaison avec un autre algorithme est faite avec l'algorithme de recuit simulé et le logiciel HOMER. Parmi les différents systèmes multi-sources, le plus rentable est le système PV-Eolienne-DG-Batt. D'après les résultats, les systèmes de stockage d'énergie à hydrogène ne sont pas économiquement compétitifs avec les systèmes de stockage de batterie. De plus, les résultats de la Recherche d'Harmonie Discrète (DHS) sont plus précis que les résultats du Recuit Simulé Discrét (DSA) et HOMER.

Chauhan et al. [144] ont travaillé sur l'optimisation d'un système composé de sources d'énergie hydraulique (MHP), biogaz, biomasse, éolienne et solaire utilisant l'algorithme de la Recherche d'Harmonie Discrète (DHS), afin de répondre aux besoins en énergie électrique et de cuisine d'une groupe de village pour un groupe de hameaux de villages dans le district de Chamoli, dans l'Etat d'Uttarakhand, en Inde. Le coût net actualisé total (NPC), la taille optimale des composants du système pour différents scénarios de

ressources, a été calculé pour une valeur de fiabilité de l'énergie de la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP) de 00%. Dans cette approche, quatre scénarios de ressources différents sont considérés, MHP-biogaz-solaire-Batt, MHP-biogaz-Eolien-solaire-Batt, MHP-biogaz-biomasse-solaire-Batt et MHP-biogaz-biomasse-Eolien-solaire-Batt. La radiation horaire moyenne mensuelle, la température et vitesse de vent de la zone d'étude sont utilisées dans cette étude. Les systèmes MHP-biogaz-biomasse-Eolien-PV-Batterie offrent le coût de revient actuel le plus bas de 49.0309 INR au coût moyen Coût Nivelé de l'Energie estimé de l'énergie (LCOE) de 5,47 INR / kWh.

III.4.3.6 Algorithme de Colonies de Fourmis

L'Optimisation des Colonies de Fourmis (ACO) est une technique d'optimisation qui a été introduite dans les années 1990 par Marco Dorigo et ses collègues. Le développement de cet algorithme a été inspiré par l'observation des colonies de fourmis [145]. Dans ce but, il est exploité pour résoudre des problèmes d'optimisation discrets, d'autres détails d'application de l'algorithme sont disponibles dans la littérature résumée dans [146]. Récemment, l'ACO a été mise en œuvre pour des problèmes d'optimisation liés aux systèmes d'énergie renouvelable qui sont présentés dans cette sous-section.

Menshsari et al. [147] ont appliqué l'algorithme (ACO) pour l'optimisation d'un système qui contient des petites sources hydroélectriques, éoliennes et solaires basées sur le stockage de l'hydrogène. Les données sur le rayonnement solaire et éolien utilisées dans la recherche proviennent de la région nord-ouest de la province d'Ardebil, en Iran. Deux objectifs sont considérés dans cette étude, la fiabilité du système étudié et la fonction d'objectif de coût du système, en tenant compte des paramètres de configuration de l'éolienne, du panneau solaire, de la micro-turbine hydroélectrique et de la pile à combustible. MATLAB a été utilisé pour des expériences ; les résultats montrent que le système multi-sources composé d'éolienne, d'énergie solaire, de micro-turbine hydraulique et de pile à combustible possède la construction et la production les plus basses pendant 20 ans.

Suhane et al. [148] ont travaillé sur le dimensionnement optimal d'un système d'énergie Eolien-solaire-Batt, le système a été analysé pour un profil de charge particulier. L'objectif est de minimiser le coût total du système qui comprend le coût d'investissement, le coût d'exploitation et d'entretien et le coût de remplacement, tandis que les variables de

décision sont composées du nombre de Photovoltaïque, d'éoliennes et de batteries. Les besoins annuels de charge, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la température sont utilisés comme variables d'entrée. Les résultats sont comparés aux techniques appliquées précédemment. Les résultats démontrent que l'Optimisation par (ACO) donne de meilleurs résultats par rapport à la technique précédemment discutée dans [149], avec sa vitesse de convergence pour la fonction de coût de minimisation, et le Coût Par Unité minimum (PUC) obtenu est 0,2025 \$ / kWh.

Fetanat et al. [150] ont introduit une conception de système PV-Eolien avec batterie en utilisant l'ACO pour les domaines continus basés sur la programmation en nombres entiers. La fonction Objectif est le coût total de conception qui est la somme du coût total en capital et du coût total d'entretien qui doit être minimisé. L'énergie totale produite par les panneaux solaires et les éoliennes devrait être supérieure ou égale à l'énergie totale requise par les utilisateurs. Dans ce problème, le nombre de panneaux solaires, d'éoliennes et de batteries sont des variables de décision. Les résultats d'optimisation ont démontré que cette méthode donne les meilleurs résultats en quelques secondes seulement par rapport à la méthode de Colonie Artificielle d'Abeilles (ABC), l'Algorithme Génétique (GA) et Branchement et de Liaison (B&B) conventionnelle.

Dong et al. [151] ont proposé une version améliorée de l'algorithme d'Optimisation des Colonies de Fourmis (ACO) pour le dimensionnement d'un système multi-sources autonome PV-Eolienne-batterie-hydrogène. Le sous-système hydrogène comprend une pile à combustible (FC), un électrolyseur et un réservoir d'hydrogène. Deux objectifs sont visés, à savoir le coût minimum du système et la fiabilité maximale du système. Le coût minimum du système comprend les coûts d'investissement, l'entretien et le remplacement des composants pendant 20 ans. La fiabilité maximale du système est basée sur la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP) pour trouver le nombre optimal de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes, de nombre de batteries et de réservoirs d'hydrogène. L'irradiation moyenne, la vitesse moyenne du vent et la charge quotidienne autour de l'année pour une île de Housman, Zhejiang, Chine, sont utilisées pour la simulation. Diminuer le coût du système et augmenter la fiabilité du système sont de type paradoxal. Le système multi-sources représente la meilleure solution avec un coût bas de $2,04 \times 10^5$ dans le cas de la LPSP 0.0003 donnée.

III.4.3.7 Algorithme de Recherche de Coucou (CS)

La Recherche Coucou (CS) représente un nouvel algorithme heuristique rencontré ; il a été développé par Yang et Deb en 2009. Cet algorithme est basé sur le comportement parasitaire obligatoire des couvées de certaines espèces de coucous en combinaison avec le comportement en vol de Levy de certains oiseaux et mouches des fruits [152]. La CS a été utilisée pour résoudre les problèmes d'optimisation dans l'ingénierie, tel que discuté dans [153]. L'exploitation de la CS pour résoudre le dimensionnement optimal des systèmes multi-sources Photovoltaïque – éolien est résumée ci-dessous.

Sanajaoba et al. [154] ont appliqué l'algorithme de la Recherche de Coucou pour le dimensionnement optimal du système PV-Eolien-Batt à une zone éloignée située dans le district d'Almora à Uttarakhand, en Inde. L'objectif est la minimisation du coût total du système en tenant compte de la variation saisonnière de la charge. De plus, la Perte de Charge Prévue (LOLE) et l'Energie Prévue Non-fournie (EENS) sont utilisées pour effectuer une évaluation de fiabilité. Les données relatives au rayonnement solaire et à la vitesse du vent ont été prises dans le district d'Almora sous forme de valeurs moyennes mensuelles. Le programme de simulation HOMER est utilisé pour générer des données horaires synthétiques à partir des valeurs moyennes mensuelles disponibles à l'emplacement donné. L'efficacité de l'algorithme de la CS pour résoudre ce problème est comparée avec d'autres algorithmes d'optimisation, à savoir, l'Algorithme Génétique (GA) et l'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO). Les résultats ont montré que le système multi-sources donne le schéma de système le plus fiable et le plus économique pour la zone d'étude. En outre, cette approche a démontré l'effet du Taux de Coupure de Force du générateur de la turbine éolienne (FOR) sur la fiabilité et l'économie optimales du système. En outre, les résultats révèlent que la Recherche de Coucou (CS) est meilleure que l'Algorithme Génétique (GA) et l'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) en termes de qualité de la solution et de la vitesse de convergence.

Nadjemi et al. [155] ont présenté une nouvelle approche de dimensionnement basée sur l'algorithme de la Recherche de Coucou (CS) pour un système d'énergie multi-sources PV- Eolien-Batt connecté au réseau. L'optimisation du dimensionnement est formulée comme un problème multi-objectif avec des contraintes économiques, techniques et environnementales. Le coût total du système et la Probabilité d'Absorption de la Puissance

du Réseau (GPAP) sont tous deux minimisés ; de plus, l'émission de carbone est indirectement considérée comme un objectif d'optimisation car elle dépend linéairement de la GPAP. La nouvelle méthode est appliquée à la fois pour une maison d'habitation et une ferme d'élevage à Ghardaia, en Algérie. Les données de rayonnement solaire pour l'emplacement étudié ont été obtenues à partir de la base de données de Météorologie de Surface et d'Energie Solaire de la NASA ; et des données sur la vitesse moyenne du vent pendant une année sont extraites d'une série de données enregistrées à long terme (de 2006 à 2010) par l'Office National Algérien de Météorologie. Une comparaison avec l'algorithme de la PSO est faite. Les résultats ont montré que l'algorithme de la CS a obtenu une meilleure précision, une convergence plus rapide et un temps de calcul inférieur par rapport à l'algorithme de la PSO pour le problème étudié.

III.4.3.8 Autres algorithmes

Il existe d'autres algorithmes qui sont utilisés pour le dimensionnement d'un système multi-sources PV-Eolien, tel que le Recuit Simulé (SA), la Recherche Tabu, l'algorithme d'optimisation du lion et l'algorithme compétitif impérialiste. Cette sous-section décrit les études connexes.

Nowdeh et al. [156] ont appliqué une méthode appelée l'Optimisation de Lion des Fourmis (ALO) pour optimiser un système multi-sources composé de Photovoltaïque, d'éolienne et de piles à combustible qui contient un électrolyseur et un réservoir de stockage d'hydrogène. Il est conçu de manière optimale en utilisant l'ALO basé sur la minimisation du coût annuel et en considérant la fiabilité comme une perte de variation de la probabilité d'alimentation. Des différents scénarios sont comparés pour étudier l'impact du coût et de la variation de la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP) sur les résultats de conception optimaux. Le rayonnement solaire et la vitesse annuelle du vent pour les régions nord-ouest de l'Iran et une charge de pic de 50 kW sont utilisés dans cette étude. Les résultats ont montré qu'il y a une augmentation du coût annuel du système alors qu'il y a une diminution de la LPSP, ce qui signifie que le coût annuel de la perte de charge est diminué et que les indices de fiabilité sont améliorés.

Tarazouei et al. [157] ont présenté une conception optimale d'un système multi-sources autonome solaire-Eolien-DG utilisant l'Algorithme de Concurrence Impérialiste (ICA), l'objectif étant la minimisation du Coût de Revient Actuel du système multi-sources pendant la durée de vie du projet, compte tenu de l'approvisionnement fiable de l'indice de fiabilité de la charge et de la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP). En outre, une comparaison avec l'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) et l'Optimisation des Colonies de Fourmis (ACO) est effectuée. Les coûts obtenus de l'ICA, de la PSO et de l'ACO sont respectivement de 60670 \$, 61730 \$ et 61600 \$. Les indices de fiabilité pour la combinaison optimale de ces systèmes sont respectivement de 3,7%, 4,4% et 4,1%. Les résultats montrent que l'ICA est plus rapide et plus précis que les deux autres algorithmes étudiés.

Nowdeh et al. [158] ont proposé une conception optimale d'un système multi-sources renouvelable PV-Eolien-FC basé sur l'algorithme de la Recherche de Chasse (HUS). L'optimisation est basée sur l'indice de fiabilité de l'approvisionnement en charge (Perte de Charge Prévue (LOLE), Perte d'Energie Prévue (LOEE) et la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP), avec un coût net actualisé (NPC) de coût minimum sur une période de 20 ans d'énergie. Le NPC inclus l'investissement, l'entretien et les coûts de réparation en plus des coûts associés à la perte de la charge d'alimentation. Les résultats obtenus montrent que la méthode proposée était capable de générer une conception de système multi-sources avec un coût de système minimal et de satisfaire à l'indice de fiabilité.

Maleki et al. [159] ont travaillé sur le dimensionnement optimal d'un système d'énergie multi-sources composé de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et de piles à combustible en utilisant l'Optimisation par Essaims d'Abeilles Artificielles (ABSO). L'objectif était la minimisation du coût annuel total qui inclut le coût annuel en capital et le coût annuel d'entretien en tenant compte de la Probabilité de Perte de l'Alimentation (LPSP) comme une contrainte. Les variables de décision sont le nombre de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et de réservoirs d'hydrogène. Les données utilisées pour la vitesse du vent et l'énergie solaire pendant une année d'isolation sont obtenues à Rafsanjan, dans le sud de l'Iran. D'après les résultats, l'ABSO trouve rapidement le dimensionnement optimal des systèmes multi-sources. En outre, il est apparu qu'à la $LPSP_{max}$, fixée à 0%, 0,3% et 01%, le système multi-sources est le système d'énergie le plus rentable et, qu'à la $LPSP_{max} = 2\%$, les éoliennes avec la pile à combustible constituent le système multi-sources le plus rentable.

Katsigiannis et al. [88] ont travaillé sur le problème de dimensionnement optimal pour un petit système d'alimentation isolé qui contient les PV-Eolien-DG-Batt, en utilisant l'algorithme de la recherche Taboue (TS). La fonction Objectif à minimiser était le Coût d'Énergie (COE). Les données éoliennes et solaires nécessaires pour l'étude réalisée dans la région de La Canée, en Crète, en Grèce. MATLAB est utilisé pour l'implémentation de l'algorithme de la Recherche Taboue (TS). La valeur minimale pour le COE du système est de 0,239 €/ kWh et elle est obtenue à la 73^{ème} itération de l'algorithme.

Ekren et al. [89] ont utilisé l'algorithme de Recuit Simulé (SA) pour le dimensionnement optimal d'un système d'énergie multi-sources PV-Eolien avec stockage de la batterie. La méthode proposée a été appliquée pour minimiser le coût total du système multi-sources et la performance de la solution optimale du système multi-sources est confirmée en termes d'analyse la Probabilité de Perte de Charge LLP et d'autonomie sur une base horaire. Les variables à trouver sont la surface de Photovoltaïque, la surface balayée par le rotor de la turbine et la capacité de la batterie. Les radiations solaires horaires et la vitesse du vent pour la période 2001-2003 enregistrées à la station météorologique, sur une zone de campus, en Turquie, sont utilisées. La simulation est faite en utilisant le logiciel ARENA 12.0. Le résultat optimal obtenu par l'algorithme SA est comparé au résultat de l'étude précédente basé sur la méthodologie de la surface de réponse. Les résultats montrent que les résultats de Recuit Simulé (SA) correspondent à une amélioration de 10,13% sur la fonction Objectif par rapport à l'étude précédente.

Hadidian-Moghaddam et al. [160] ont proposé un nouvel algorithme méta-heuristique, appelé Optimisateur de Loup Gris (GWO), pour le dimensionnement optimal d'un Système autonome multi-sources PV-Eolien-Batt. Le but de l'approche est de minimiser le Coût Annuel Total (TAC) du système multi-sources et de trouver le nombre optimal d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques et de batteries. Les indices sont appliqués pour évaluer la fiabilité : La probabilité de perte de l'alimentation (LPSP), Energie Non Fournie (ENS) et Fiabilité de l'Alimentation Electrique (RPS). L'algorithme GWO est comparé aux résultats précédents (Recherche d'Harmonie Discrète (DHS), Branchement et de Liaison (B&B)) ; les résultats obtenus montrent que la méthodologie proposée trouve des résultats identiques mais avec une convergence plus rapide. En outre, les résultats ont démontré que la fiabilité a un impact important sur le dimensionnement optimal, le coût et

le niveau d'alimentation de la charge. De plus, l'augmentation de l'efficacité de l'onduleur peut diminuer le coût du système et augmenter la fiabilité de l'alimentation de la charge.

Tudu et al. [161] ont travaillé sur des types de dimensionnement d'unités des systèmes d'énergie combinant hydro-PV-Eolien-FC et Eolien-PV-Piles à Combustible en utilisant l'algorithme des abeilles (BA). Les systèmes ont été optimisés en tenant compte de paramètres, tels que le Coût Net Actualisé (NPC), le Coût de l'Energie (COE) et le Coût (GC) de la production d'énergie. L'étude de cas a été réalisée dans un village agricole typique du Kerala, en Inde, loin de la ligne principale du réseau. A la lumière des résultats, il est donc noté que l'hydro-Eolienne-Piles à Combustible est le système d'énergie multi-sources le plus faisable avec le Coût de Revient Actuel et le Coût de Production de l'énergie aussi bas que Rs.24327.45K et Rs.4.98 / kWh respectivement. Aussi, le coût de l'énergie pour ce cas est de Rs.7.53 par kWh.

III.4.3.9 Les méthodes Hybrides

La méthode hybride combine deux ou plusieurs algorithmes, les algorithmes hybrides sont développés en utilisant les avantages et les inconvénients de deux ou plusieurs méthodes d'optimisation [93]. La description de certaines études connexes peut être trouvée ci-dessous.

Geem et al. [162] ont travaillé sur le dimensionnement des systèmes multi-sources PV-Eolien et PV-Eolien-Batt en utilisant des méthodes de Branchement et de Liaison (B&B) et de Gradient Généralisé Réduit (GRG). Cette étude a utilisé un outil commercial nommé Solver, afin de minimiser le coût total de la conception qui consiste en coût d'investissement total et coût d'entretien total en trouvant le nombre de panneaux solaires, d'éoliennes et de batteries. La B&B est appliquée aux variables entières (nombres de panneaux solaires, éoliennes et batteries) dans cette étude, et le GRG est appliqué pour trouver des solutions optimales une fois qu'un ensemble de valeurs entières est sélectionné par la B&B.

Katsigiannis et al. [91] ont présenté un outil logiciel qui a été implémenté dans MATLAB, combine l'optimisation de la recherche de tabou et d'algorithme génétique, pour obtenir la configuration optimale de systèmes multi-sources qui contiennent les PV-Eolien-Batt-DG. L'objectif est de trouver le minimum du Coût d'Energie (COE) compte tenu des contraintes opérationnelles et de taille des composants. Les données météorologiques, y compris les séries chronologiques de données solaires, éoliennes et de température, et les

données de charge, utilisées pour la région montagneuse de Keramia, à Chania, en Crète, en Grèce. Les variables de dimensionnement sont la taille de différents composants. Des différents scénarios ont été étudiés afin d'étudier l'incertitude dans les principaux paramètres d'entrée. Les résultats montrent que le potentiel éolien affecte plus la valeur du COE par rapport au potentiel solaire. L'absence des générateurs diesel ont provoqué une augmentation du nombre de batteries. L'outil logiciel développé a présenté des capacités adéquates pour le dimensionnement de systèmes multi-sources.

Sharma et al. [163] ont développé une nouvelle heuristique nommée hybride GAPSO (HGAPSO) pour concevoir et optimiser un système multi-sources Photovoltaïque-Eolien-Batt hors réseau combinant d'autres sources renouvelables telles que générateur de biogaz, le générateur de biomasse et le générateur hydraulique. L'objectif est de trouver le minimum du coût annuel minimum. D'après les résultats obtenus, les systèmes d'énergie multi-sources qui incluent des sources d'énergie renouvelables aident à réduire le coût de l'électricité, et il est plus efficace et économiquement plus faisable. La HGAPSO est supérieure à l'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) et l'Algorithme Génétique (GA) en termes de critère de terminaison requis, pour le problème considéré en termes de générations de convergence et de temps de calcul. En outre, la technique d'optimisation hybride GAPSO donne de meilleurs résultats que l'algorithme GA et l'algorithme PSO en termes de réduction du coût, par exemple, 10,56% de moins que la PSO.

Askarzadeh et al. [164] ont proposé une nouvelle méthode hybride combinant la Recuit Simulé (SA), Recherche d'Harmonie (HS) et recherche chaotique, nommée l'Algorithme Discret de Recuit Simulé Basé sur la Recherche de l'Harmonie Chaotique (DCHSSA) qui a été utilisé pour le dimensionnement d'un système multi-sources Photovoltaïque-Eolien avec stockage de batterie. La fonction Objectif est la minimisation du coût annuel total que le coût d'investissement annuel et le coût d'entretien annuel sont soumis à certaines contraintes. Les variables de décision sont le nombre de panneaux Photovoltaïque, d'éoliennes et de batteries. Deux autres algorithmes sont étudiés, le Recuit Simulé Discret (DSA), le Recuit Simulé Discret Basé sur la Recherche de l'Harmonie Discrète (DHSSA). Les données de cette étude utilisées pour alimenter une maison située dans une région éloignée de South-Central-Monatana, aux Etats-Unis. Les résultats démontrent que le système multi-sources est la meilleure configuration et que le DCHSSA proposé a obtenu de meilleurs résultats que les autres méthodologies étudiées.

III.4.3.10 Critères pour le dimensionnement optimal et l'optimisation des coûts

Plusieurs critères et indices pour le dimensionnement et l'optimisation sont introduits dans la littérature et il existe de nombreuses classifications ; par exemple, ils peuvent être catégorisés en facteurs technologiques, économiques, sociopolitiques et environnementaux [165]. Parmi les indices utilisés dans la littérature, on peut citer : La probabilité de perte de l'alimentation (LPSP), la Perte d'Énergie Prévues (LOEE) ou l'Énergie Prévues Non-fournies (EENS), la Perte de Charge Prévues (LOLE), la Perte d'Heures de Charge (LOLH), le Risque de Perte de la Charge (LOLR), le Facteur de Perte Équivalent (ELF), la Perte d'Énergie Totale (TEL), le Niveau d'Autonomie (LA), l'Énergie Intrinsèque du Système (EE), l'État de Charge (SOC), la Valeur Actuelle Nette (NVP), Coût Annualisé du Système (ACS), le coût moyen actualisé de l'énergie (LCE), le Coût du Cycle de Vie (LCC), le Coût d'Énergie (COE), le Coût de Production Moyen d'Énergie (C_{av}), le Facteur de Récupération du Capital (CRF), la Consommation due Carburant (FC), l'Émission de CO₂, l'Acceptabilité Sociale (SA), le Risque de Portefeuille (PR). Fathima et al. [166], Sinha et al. [93] et Bhandari et al. [167] ont discuté des critères d'indices de performance pour le dimensionnement et l'optimisation des coûts. L'intention du chercheur est purement basée sur l'utilisation du coût du système, le coût d'énergie, la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP) pour donner plus de crédibilité à leur analyse et cette considération aidera les concepteurs dans la sélection des composants pour le système désiré.

Les résultats de la plupart des travaux montrent que les systèmes multi-sources PV-éoliens sont préférables aux sources d'énergie, en particulier ceux qui n'utilisent qu'une seule source car elles sont plus économiques, plus écologiques et peuvent être facilement installés. Parfois, les Photovoltaïques-Eoliens sont complétés par du diesel ou des batteries pour les systèmes hors réseau ; cependant, l'utilisation de batteries peut réduire le coût du système et minimiser l'utilisation du générateur diesel en réduisant le temps de fonctionnement du générateur diesel. La comparaison entre les technologies de stockage montre qu'il y a un avantage significatif à utiliser des batteries au plomb tant sur le plan économique que sur le plan environnemental. L'hydrogène est plus propre que le diesel et les batteries, mais actuellement, il n'est pas encore économiquement viable.

Des différents paramètres ont un impact sur le dimensionnement du système multi-sources, telles que les conditions météorologiques, la demande de charge et d'autres facteurs. Il ressort de l'analyse que :

- La configuration optimale dépend fortement des indices de performance tels que la perte de la probabilité de perte de l'alimentation (LPSP) et son coût, tel que discuté dans [86] et [105].
- La Configuration (AC), (DC) ou mixte a un effet sur le dimensionnement optimale, par exemple dans [110], ils ont recommandé d'utiliser la configuration AC.
- L'utilisation de données à long terme est très utile pour calculer la performance du système multi-sources, tel que discuté dans [100] où les données d'environnement horaires ayant été recueillies pour une période de 05 ans sont prises.
- Une grande influence du potentiel énergétique et du profil de charge sur le dimensionnement optimal du système multi-sources, parfois le potentiel éolien affecte le dimensionnement en comparaison avec le potentiel solaire et inversement. Il est préférable de mettre en œuvre un système purement éolien ou solaire dans certaines régions [142] ; on constate que l'utilisation de Eolien-DG-Batt est la solution optimale.

Dans la plupart des articles cités, les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB. Un certain nombre d'auteurs ont utilisé des outils commerciaux pour comparer et valider leurs résultats, en particulier le logiciel HOMER. Les variables considérées dans la plupart des travaux sont les nombres de différents composants. L'optimisation mono-objectif est largement utilisée, elle est plus appliquée que l'optimisation multi-objectif. Plusieurs indices sont introduits dans cette recherche et les indices les plus couramment utilisés sont la Probabilité d'une Perte de l'Alimentation Electrique, le coût du système et le Coût Nivelé d'électricité.

Au cours des dernières années, les chercheurs ont préféré utiliser les méta-heuristiques en raison de la complexité des problèmes des Systèmes d'Energie Renouvelables (RES) plutôt que des méthodes classiques, telles que la Recherche Taboue (TS), l'Algorithme Génétique (GA), le Recuit Simulé (SA), la Recherche d'Harmonie (HS), BBO, l'Optimisation des Colonies de Fourmis (ACO)... Parmi ces algorithmes, l'Algorithme Génétique (GA) et Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) sont les méthodes les plus populaires.

Très peu de travaux ont comparé les performances de différents algorithmes d'optimisation. Par exemple, [168] et [169] ont travaillé sur le dimensionnement des systèmes multi-sources PV-Eolien-FC et PV-Eolien-Batt en utilisant des algorithmes méta-heuristiques hétérogènes, à savoir Optimisation par Essaims Particulaires (PSO), Recherche Taboue (TS), Recuit Simulé (SA) et Recherche d'Harmonie (HS). L'algorithme PSO a obtenu de meilleurs résultats que les autres algorithmes étudiés. Parfois, on remarque que dans certains cas, on utilise l'hybridation de deux algorithmes ou plus, diverses combinaisons d'algorithmes hybrides comme GA-PSO [163], GA-TS [91] pour passer de la recherche globale à la recherche locale.

On peut constater que la nouvelle génération d'algorithmes comme Recherche Coucou (CS), Optimisation de Lion des Fourmis (ALO), Recherche de Chasse (HUS) et ACA, a montré des résultats prometteurs et des propriétés de recherche plus fortes. Cependant, ils sont encore sous-utilisés, ainsi montrés dans le Tableau **III.1**.

Tableau III.1. Comparaison de quelques algorithmes appliqués pour les systèmes multi-sources à base de PV-Eolien.

Réf.	Systèmes multi-sources	Algorithmes d'optimisation	Autonome / connecté au réseau	Fonctions objectif	Indices de fiabilité
[101]	PV/Eolien/Batterie/Diesel	L'algorithme DIRECT	Autonome	- Min. (STIC)	-
[105]	PV/Eolien/Batterie	L'algorithme génétique	Autonome	- Min. (ACS)	LPSP
[110]	PV/Eolien/Batterie/Diesel	L'algorithme génétique	Autonome	- Min. (COE)	LOLP et REF
[120]	Eolien-PV-Batterie	L'algorithme PSO	Autonome	- Min. NPC	ELF, LOLE, LOEE et EENS
[129]	PV-Eolien-Batterie	L'algorithme PSO	Connecté au réseau	- Min. Coûts d'investissement - Min. Coût de fonctionnement	-
[138]	PV-Eolien-Pile à combustible	L'algorithme ABC	Connecté au réseau	- Min. Perte de puissance - Max.L'indice de stabilité de tension (VSI) - Le Min. coût de l'énergie générée par les DG et l'énergie achetée à partir du réseau. - Min. Emissions totales produites par les DG et le réseau.	-
[141]	PV-Eolien- Batterie	L'algorithme DHS	Autonome	- Min. (C_T)	-
[148]	PV/Eolien/Batterie/Diesel	L'algorithme ACO	Autonome	- Min. Coût total du système	LPSP
[154]	PV/Eolien/Batterie	L'algorithme CS	Autonome	- Min. Coût total du système (C_{Total})	LOLE, EENS
[156]	PV/Eolien/Pile à combustible	L'algorithme ALO	Autonome	- Min. Coût annuel	-LPSP
[161]	Hydro-solaire-Eolien-Pile à combustible Eolien-solaire-Pile à combustible	L'algorithme BA	Autonome	- Min. (NPC), - Min. (COE) - Min. coût de production	-
[163]	PV-Eolien-Batterie avec d'autres biogaz, biomasse, et micro-hydro-générateur d'énergie renouvelable.	L'algorithme GAPSO	Autonome	- Min. Coût annuel du système	-
[164]	PV/Eolien/Batterie	L'algorithme DCHSSA	Autonome	- Min. Coût total annuel du système	-

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude de l'art des stratégies de commande, les outils de dimensionnement et d'optimisation ainsi que les techniques et algorithmes d'optimisation des systèmes multi-sources. Aussi, nous avons fait une comparaison des outils et méthodes utilisées.

Le but de ce qui précède est d'assurer la disponibilité énergétique et satisfaire à la charge ; aussi, avoir un taux de pénétration important des sources renouvelable, en d'autres termes, le bon fonctionnement des systèmes.

Dans ce but, les principaux composants du système multi-sources étudiés sont modélisés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

**Modélisation et formulation du
problème d'optimisation**

IV.1 Introduction

Ce chapitre propose, dans un premier temps, quelques modèles du système photovoltaïque, éolien et l'élément de stockage sous forme de la batterie dans la littérature. Dans un deuxième temps, une modélisation des principales parties de systèmes multi-sources étudiées, à savoir le système photovoltaïque, le système éolien, le banc de batterie et le générateur diesel, les modèles adaptés à l'extraction des puissances maximales des ressources renouvelables. Ensuite, la formulation du problème d'optimisation, l'établissement des fonctions objectives et la prise en compte les contraintes. Finalement, la méthode d'optimisation utilisée est présentée.

IV.2 Modélisation des systèmes photovoltaïques, éoliens et élément de stockage

IV.2.1 Modélisation des systèmes

La modélisation des composants a été développée pour donner une stratégie globale de gestion de l'énergie pour le système proposé et pour étudier la performance du système. De divers modèles pour le système multi-sources photovoltaïque-éolien ont été rapportés dans la littérature. Bourennani et al. [170] ont discuté des modèles existants utilisés pour le dimensionnement des systèmes renouvelables multi-sources. Une description, prise à partir des études précédentes et utilisée pour aider les auteurs dans les différents travaux, est présentée dans la sous-section ci-après.

IV.2 1.1 Modélisation du système photovoltaïque :

En utilisant la commande MPPT, Belfkira et al. [98] ont utilisé un model basé sur le calcul de courant (I_{ppm}) et la tension (V_{ppm}) au point de puissance maximale. Le modèle inclus l'effet de l'irradiation et la température du panneau sur la puissance, la puissance maximale (P_{ppm}) peut être écrite comme suit :

$$P_{mpp} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (IV.1)$$

$$I_{mpp} = I_{sc} \cdot \left\{ 1 - C_1 \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{max}}{C_2 \cdot V_{OC}}\right) - 1 \right] \right\} + \Delta I \quad (IV.2)$$

$$V_{mpp} = V_{max} + \mu_{V,OC} \cdot \Delta T \quad (IV.3)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{SC}} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{max}}{C_2 \cdot V_{OC}}\right) \quad (IV.4)$$

$$C_2 = \left(\frac{V_{max}}{V_{OC}} - 1 \right) \cdot \left[\ln\left(1 - \frac{I_{max}}{I_{SC}} \right) \right]^{-1} \quad (IV.5)$$

$$\Delta I = I_{SC} \cdot \left(\frac{G_T}{G_{ref}} - 1 \right) + \mu_{I,sc} \cdot \Delta T \quad (IV.6)$$

$$\Delta T = T_c - T_{c,ref} \quad (IV.7)$$

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot G_T \quad (IV.8)$$

Où:

G_{ref} : L'irradiation solaire dans les conditions standards égales à 1000 W/m² ;

G_T (W/m²): L'irradiation solaire horaire ;

I_{max} (A) : Le courant maximal du panneau PV sous les conditions standard (irradiation solaire de 1000 W/m² et température ambiante de 25°C) ;

I_{mpp} (A) : Le courant du panneau PV au point de puissance maximale ;

I_{SC} (A) : Le courant de court-circuit du panneau PV ;

V_{max} (V) : La tension maximale du panneau PV sous les conditions standard ;

V_{mpp} (V) : La tension du panneau PV au point de puissance maximale ;

V_{OC} (V) : La tension du circuit ouvert du panneau PV ;

$\mu_{I,sc}$ (A/°C) : Le coefficient de la température pour un court-circuit ;

$\mu_{V,OC}$ (V/°C) : Le coefficient de la température pour un circuit ouvert ;

T_a (C) : La température ambiante du site d'étude ;

T_c (C) : La température de la jonction de la cellule PV ;

$T_{c,ref}$: La température du panneau PV sous les conditions standard égale 25°C ;

$NOCT$ (°C) : La température de la cellule PV lorsque le panneau PV fonctionne sous une irradiation solaire de 800 W/m² et une température ambiante de 20°C, la valeur de $NOCT$ est toujours entre 42°C et 46°C.

Abbes et al. [109] ont utilisé l'équation suivante pour définir la puissance du générateur photovoltaïque :

$$P_{pv} = \eta_{pv} \times A_{pv} \times I_r \quad (IV.9)$$

$$\eta_{pv} = \eta_r \times \eta_{pc} \times [1 - \beta \times [T_c - NOCT]] \quad (IV.10)$$

$$T_c = 30 + 0.0175 \times (I_r - 300) + 1.14 \times (T_a - 25) \quad (IV.11)$$

Où :

η_{pv} : Le rendement global du module ;

A_{pv} (m²) : La surface des panneaux photovoltaïques ;

I_r (W/m²) : L'éclairement ;

η_r : Le rendement de référence du module photovoltaïque ;

η_{pc} : Le facteur de dégradation ;

β : Le coefficient de l'influence de la température des cellules photovoltaïques sur le rendement du générateur ;

T_c (°C) : La température de la cellule ;

$NOCT$ (°C) : La température d'utilisation de la cellule ;

T_a (°C) : La température ambiante.

Bilal et al. [107] ont utilisé ce model pour exprimer la puissance photovoltaïque :

$$P_{PV}(t) = V_{CO}(t). I_{sc}(t). FF \quad (IV.12)$$

$$I_{sc}(t) = [I_{sct} + K_i \cdot (T_c(t) - 25)] \cdot \frac{G(t)}{1000} \quad (IV.13)$$

$$V_{CO}(t) = V_{cost} - K_v \cdot T_c(t) \quad (IV.14)$$

$$T_c(t) = T_a(t) + \frac{NOCT-20}{800} \cdot G(t) \quad (IV.15)$$

Où:

I_{sct} (A) : Le courant de court-circuit ;

K_i (A /°C) : Le coefficient de la température pour un court-circuit ;

$G(t)$ (W/m²) : L'irradiation solaire ;

V_{cost} (V) : La tension de circuit ouvert ;

$NOCT$: Normal Operating Cell Temperature;

K_v (V /°C) : Le coefficient de la température pour un circuit ouvert ;

T_c (° C) : La température de la jonction de la cellule PV ;

T_a (° C) : La température ambiante ;

FF : Le facteur de forme.

Jahanbani et al. [120] ont utilisé cette équation pour définir la puissance du system PV

$$P_{pv} = \frac{G}{1000} \times P_{pv,rated} \times \eta_{MPPT} \quad (IV.16)$$

$$G(t, \theta_{pv}) = G_V(t) \times \cos(\theta_{pv}) + G_H(t) \times \sin(\theta_{pv}) \quad (IV.17)$$

Où:

G (W/m²) : L'irradiation perpendiculaire ;

$P_{pv,rated}$: La puissance nominale du PV au $G=1000$ W/m²; η_{MPPT} rendement du convertisseur DC/DC du *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) ;

$G_V(t)$ (W/m²) : Le taux des irradiances verticales ;

$G_H(t)$ (W/m²) : Le taux des irradiances horizontales.

IV.2 1.2 Modélisation de la turbine éolienne:

Dans les travaux précédents, divers modèles de systèmes éoliens ont été utilisés et parmi ceux-ci, les modèles suivants qui sont énumérés ci-dessous :

Belfkira et al. [98] ont utilisé le model suivant pour calculer la puissance de la turbine éolienne :

$$v = v_{hr} \cdot \left(\frac{h}{h_r}\right)^y \quad (IV.18)$$

$$P_{WT} = \begin{cases} a \cdot v^3 - b \cdot P_R v_{ci} & v_{ci} < v < v_r \\ P_R v_r & P_R v_r < v < v_{co} \\ 0 & \text{autre} \end{cases} \quad (IV.19)$$

$$a = \frac{P_R}{v_r^3 - v_{ci}^3} \quad (IV.20)$$

$$b = \frac{v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} \quad (IV.21)$$

Où:

P_R (W) : La puissance nominale de la turbine éolienne ;

V (m/s) : La vitesse de vent à la hauteur h ;

v_{ci} (m/s) : La vitesse initiale de démarrage de la turbine éolienne (cut-in) ;

v_{co} (m/s) : La vitesse de vent maximale admissible par l'éolienne appelée aussi, vitesse d'arrêt de la turbine (cut-off) ;

v_{hr} (m/s) : La vitesse de vent à la hauteur de référence h_r ;

v (m/s) : La vitesse à la hauteur du moyeu ;

h_r (m) : La hauteur de référence ;

h (m) : La hauteur du moyeu.

Abbes et al. [109] ont utilisé le modèle suivant pour exprimer la puissance de la turbine éolienne :

$$P_{wg} = C_p \times \eta_{gb} \times \eta_g \times \frac{1}{2} \times \rho \times A_{wt} \times V^3 = \eta_t \times \frac{1}{2} \times \rho \times A_{wt} \times V^3 \quad (IV.22)$$

Où

ρ (kg/m³) : La densité d'air ;

$$\rho = (354.049/Ta) \exp(-0.034 \times Z/Ta) \quad (IV.23)$$

$\eta_t = C_p \times \eta_{gb} \times \eta_g$. Le rendement global ;

Z (m) : La hauteur ;

Ta (°C) : La température ;

V (m/s) : La vitesse de vent ;

Awt (m²) : La surface balayée par le rotor de l'éolienne ;

C_p : Le rendement de la turbine ;

η_{gb} : Le rendement du variateur de vitesse ;

η_g : Le rendement de la génératrice.

Bilal et al. [107] ont utilisé le modèle suivant pour définir la puissance éolienne

$$P_{\text{moy}}(t) = \begin{cases} P_n \cdot \left(\frac{V(t)^2 - V_d^2}{V_n^2 - V_d^2} \right) & \text{Si } V_d \leq V(t) \leq V_n \\ P_n & \text{Si } V_n \leq V(t) \leq V_c \\ 0 & \text{Si } V(t) \leq V_d \text{ ou } V(t) \geq V_c \end{cases} \quad (\text{IV.24})$$

Où :

V_d : La vitesse initiale de démarrage de la turbine éolienne ;

V_n : La vitesse de vent nominale de fonctionnement de l'éolienne ;

P_n : La puissance nominale de l'éolienne ;

V_c : La vitesse du vent maximale admissible par l'éolienne ;

$V(t)$ (m/s) : La vitesse du vent.

IV.2 1.3 Modélisation du système de stockage :

Fathima et al. [160] ont présenté des différents systèmes de stockage d'énergie, qui sont actuellement utilisés dans les systèmes multi-sources, à savoir le stockage hydraulique par pompage (PHS), les systèmes de stockage d'énergie par batterie (BESS), le stockage d'énergie par air comprimé (CAES), le système de stockage d'énergie à base d'hydrogène (HESS), le système de stockage d'énergie par volant (FESS), le stockage d'énergie magnétique supraconductrice (SMES) et les systèmes de stockage d'énergie super-condensateurs ou ultra-condensateurs ou condensateurs électriques à double couches (EDLC). Le système le plus populaire parmi eux est le BESS. Une modélisation d'un système de stockage de batterie au plomb-acide est présentée ci-dessous.

Belfkira et al. [98] ont utilisé l'équation suivante pour exprimer l'état de charge (SOC) du banc de batterie pendant le processus de chargement et déchargement :

$$\text{SOC}(t + \Delta t) = \text{SOC}(t) + \eta_{\text{bat}} \left((P_B(t)) / V_{\text{bus}} \right) \Delta t \quad (\text{IV.25})$$

Où :

η_{bat} : Le coefficient d'autodécharge de la batterie, η_{bat} est le rendement de la batterie égal à 100% dans le cas de décharge.

$P_B(t)$: La puissance d'entré/sortie du banc de batterie ;

V_{bus} (V) : Le voltage du bus et Δt est le pas de temps de calcul ;

Abbes et al. [109] ont utilisé le model suivant pour exprimer l'état de chargement et de déchargement du banc de batterie :

✓ **Pour le processus de chargement :**

$$soc(t) = soc(t - \Delta t) + \left(P_{pv}(t) \times \eta_{dc} + P_{wg}(t) \times \eta_{ac} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{wr} \times \eta_{inv}} \right) \times \frac{\eta_{cha}}{U_{bus}} \times \Delta t \quad (IV.26)$$

✓ **Pour le processus de déchargement :**

$$soc(t) = soc(t - \Delta t) + \left(P_{pv}(t) \times \eta_{dc} + P_{wg}(t) \times \eta_{ac} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{wr} \times \eta_{inv}} \right) \times \frac{\eta_{cha}}{\eta_{dis} \times U_{bus}} \times \Delta t \quad (IV.27)$$

Où:

$P_{load}(t)$: La puissance consommée par l'habitat résidentiel à l'instant t .

t est le pas de simulation.

η_{dc}, η_{ac} et η_{inv} : Les rendements respectifs des convertisseurs DC/DC, AC/DC et DC/AC

η_{cha}, η_{dis} : Les rendements de la charge et de la décharge des batteries ;

η_{wr} : Introduit pour tenir compte des pertes dans les câbles et les connexions ;

U_{bus} : La puissance du bus ;

De même, il existe d'autre model mathématique pour des déférents systèmes multi-sources dans la littérature [169] [86] et [151], aussi dans les travaux de [12],[62], les auteurs ont discutés largement sur les modèles utilisés surtout pour les systèmes photovoltaïques et éoliens.

IV.3 Architecture des systèmes proposés :

Dans le cadre de ce travail, l'objet de l'étude est l'optimisation des systèmes multi-sources à base de panneaux photovoltaïques, de turbines éoliennes et de batteries et générateur diesel. Le système multi-sources objet de l'étude, est le système multi-sources présenté

dans la **Figure IV.1**, composé de panneaux photovoltaïques, de turbines éoliennes et de batteries et d'un générateur diesel.

L'architecture retenue est du type DC. Des hacheurs sont utilisés pour élever la tension du bus DC. La charge de la batterie s'effectue via un contrôleur de charge connecté sur le bus continu. Un convertisseur DC/AC (onduleur) permet de générer une tension de 220V, 50Hz alternative qui sera distribuée.

Des différents systèmes, à savoir : PV-DG-Batt, Eolien-DG-Batt, PV-Eolien-DG, PV-DG et Eolien-DG, sont étudiés et comparés en termes de coût.

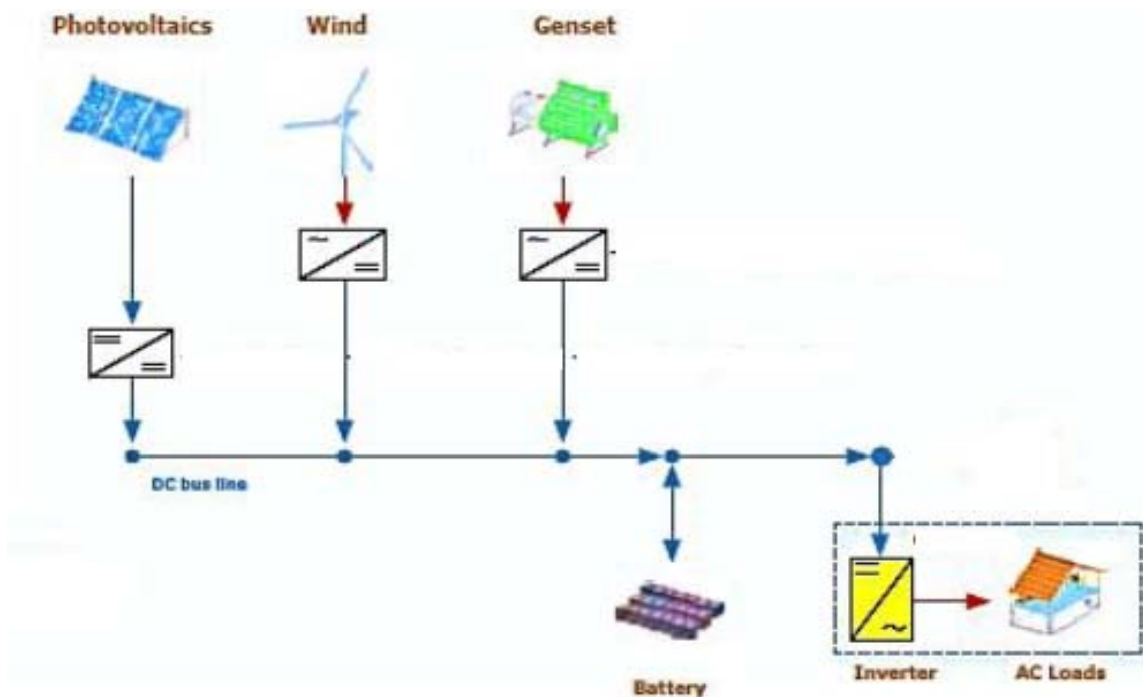


Figure IV.1 : Configuration du système multi-sources PV-Eolien-Diesel-Batterie.

IV.4 Modèle du système PV:

Dans notre étude, nous allons utiliser un model simple, le model utilisé par Bilal et al. [107] pour exprimer la puissance photovoltaïque (équation (IV.12)). Donc, la puissance totale des panneaux PV ($P_{PV}(t)$) est calculé :

$$P_{PV}(t) = N_{PV} \cdot P_{pv}(t) \quad (IV.28)$$

$$N_{PV} = N_{PV,s} \cdot N_{PV,p} \quad (IV.29)$$

Où:

$N_{PV,s}$: Le nombre des panneaux connectés en série, ne représente pas des variables d'optimisation ;

$N_{PV,p}$: Le nombre de branches de panneaux photovoltaïques connectées en parallèle, représente le variable de l'optimisation.

$N_{PV,s}$ est calculé :

$$N_{PV,s} = \frac{V_{bus}}{V_{PV,nom}} \quad (IV.30)$$

V_{bus} est la tension du bus continu et $V_{PV,nom}$ est la puissance nominale du panneaux. Dans cette étude, le voltage du bus DC est égal à 48 V.

IV.5 Modèle de l'éolienne

La puissance de sortie d'une éolienne sur un site spécifique dépend de la vitesse du vent à une hauteur du moyeu et des caractéristiques données de la turbine. La vitesse du vent à une hauteur du moyeu donné peut être calculée en utilisant l'équation de loi (empirique) de Davenport et Harris qui exprime cette dépendance par la relation :

$$v = v_r \cdot \left(\frac{h}{h_r}\right)^\gamma \quad (IV.31)$$

v et v_r sont les vitesses de vent au moyeu et à la hauteur de référence h et h_r ;

γ est le coefficient de cisaillement dépendant de la rugosité du terrain.

L'exposant γ varie entre 0,1 et 0,4 (0,1 correspond à la mer, 0,16 à une plaine, 0,28 à une forêt et 0,4 à une zone urbaine).

Pour exprimer la puissance éolienne, nous allons utiliser un model simple [107] (équation IV.24) ; donc, la puissance totale des éoliennes $P_W(t)$ est calculée :

$$P_W(t) = N_{Wt} \cdot P_w(t) \quad (IV.32)$$

Où:

N_W : Le nombre d'éolienne.

IV.6 Modèle de batterie utilisé pour le dimensionnement du system multi-sources

Le modèle utilisé de la batterie a pour but de calculer le transfert d'énergie entre le bus continu et la batterie avec un pas de temps ($\Delta t = 1h$). Cependant, le modèle proposé permet de calculer l'état de charge à chaque pas de temps et prend en compte les rendements selon que l'on charge ou l'on décharge la batterie. L'état de charge des batteries est une grandeur importante pour les simulations accompagnant le processus de dimensionnement du système multi-sources car il détermine, à chaque pas de temps, la capacité de l'unité de stockage à fournir de l'énergie au consommateur ou à stocker le surplus d'énergie en provenance des sources [16].

Une modélisation d'un système de stockage de batterie au plomb-acide est présentée ci-dessous. L'état de charge des batteries est exprimé dans ce modèle en (Wh) et non en pourcentage et peut être calculé comme suit :

✓ **Pendant le processus de chargement :**

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + (P_{RE}(t) - (P_{load}(t)/\eta_{inv}))\eta_{cha}\Delta t \quad (IV.33)$$

✓ **Pendant le processus de déchargement :**

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + (P_{RE}(t) - (P_{load}(t)/\eta_{inv}))/\eta_{dech}\Delta t \quad (IV.34)$$

η_{cha} et η_{dech} sont les rendements de chargement et déchargement (dans cette étude, $\eta_{cha} = 90\%$ and $\eta_{dech} = 85\%$ à [171]), η_{inv} est le rendement du convertisseur, (dans cette étude $\eta_{inv} = 95\%$ [171])

Pendant le processus de chargement et déchargement, la capacité des batteries est soumise à des contraintes suivantes [172], pour les protéger contre tout endommagement qui peut raccourcir leur durée de vie :

$$C_{bat_{min}} \leq C_{bat}(t) \leq C_{bat_{max}} \quad (IV.35)$$

$C_{bat_{min}}$ et $C_{bat_{max}}$ sont calculées comme discuté dans [144], sont la capacité maximale et minimale des batteries. $C_{bat_{min}}$ est déterminé par :

$$C_{bat_{min}} = (1 - DOD) C_{bat_{max}} \quad (IV.36)$$

Le nombre total est défini par :

$$N_{BAT} = N_{BAT,s} \cdot N_{BAT,p} \quad (IV.37)$$

Où:

$N_{BAT,s}$ est le nombre des batteries connectés en série, ne représentent pas des variables d'optimisation, $N_{BAT,s}$ est calculé :

$$N_{BAT,s} = \frac{V_{bus}}{V_{BAT,nom}} \quad (IV.38)$$

$N_{BAT,p}$ est le nombre de branches de batteries connectées en parallèle, représentent le variable de l'optimisation.

IV.7 Modèle du générateur Diesel :

La puissance produite du diesel $P_{DG}(t)$ dépend de la puissance totale renouvelable, le profil de charge, la stratégie de commande du system et l'état de charge de la batterie. La consommation du carburant pendant une heure dépend de la puissance nominale P_R et à la puissance générée $P_{DG}(t)$.

Cette dépendance s'exprime par la relation [115] :

$$F(t) = 0.246 P_{DG}(t) + 0.08415 P_R \quad (\text{IV.39})$$

Où:

$F(t)$: La consommation du carburant en l/h ;

$P_{DG}(t)$: La puissance produite du générateur, kW ;

P_R : La puissance nominale du générateur, kW ;

Le coût du carburant consommé par le générateur diesel pendant une heure de fonctionnement est exprimé par la formule suivante [115] [173] :

$$C_f = P_f \cdot \sum_{t=1}^{8760} F(t) \quad (\text{IV.40})$$

P_f est le prix du carburant (/l).

La puissance générée du générateur doit être délimitée dans la gamme comme suit :

$$P_{DGmin}(t) \leq P_{DG}(t) \leq P_{DGmax}(t) \quad (\text{IV.41})$$

Dans notre étude, le diesel est connecté directement à la charge.

IV.8 Stratégies de fonctionnement :

Le système multi-sources fonctionne pour satisfaire la demande, les conditions météorologiques ont un impact sur la puissance renouvelable ; par conséquent, la combinaison de la source renouvelable, avec le DG et le banc de batterie fournit une solution plus fiable et réalisable pour fournir de l'énergie. Lorsque la puissance produite par le système multi-sources est suffisante pour alimenter la charge, l'excès de l'énergie sera fourni pour charger les batteries jusqu'à ce qu'elle soit complètement chargée. Si les batteries sont complètement chargées, le surplus de puissance est délesté.

Lorsque la demande est élevée et l'énergie du système de stockage n'est pas suffisante pour satisfaire la demande, les batteries ou le générateur diesel fournissent la puissance pour répondre aux exigences de charge. Cette stratégie peut être expliquée par les étapes suivantes :

$$\Delta P = P_{RE}(t) - P_L(t) \quad (IV.42)$$

$P_{RE}(t)$ est l'énergie renouvelable totale.

$$P_L(t) = \frac{P_{load}}{\eta_{inv}} \quad (IV.43)$$

P_{load} est la puissance de la charge ;

$P_L(t)$ est la puissance à l'entrée de l'onduleur ;

$P_B(t)$ est la puissance entrée ou sortie de la batterie.

1- Si $\Delta P = 0$, les batteries ne sont ni chargées ni déchargées ($P_B(t) = 0$), l'état de charge des batteries dépend de la valeur précédente $C_{bat}(t) = C_{bat}(t - 1)$. Le générateur diesel est en arrêt.

2- Si $\Delta P > 0$, le surplus de puissance sera utilisé pour charger les batterie ($P_B(t) = \Delta P$). Le générateur diesel est en arrêt et l'état de charge est calculé suivant l'équation (IV.33).

Lorsque l'état de charge des batteries atteint sa valeur maximale $C_{bat}(t) \leq C_{bat_{max}}$, le surplus de puissance est délesté.

3- Si $\Delta P < 0$, le déficit de puissance sera fourni par le banc de batteries ou par le générateur diesel selon les stratégies suivantes :

- ✓ Si l'état de charge du banc de batteries est supérieur à son minimum $C_{bat_{min}} \leq C_{bat}(t)$, les batteries sont déchargées ($P_B(t) = \Delta P$) et l'état de charge est calculés suivant l'équation (IV.34), le générateur diesel est en arrêt.
- ✓ Si l'état de charge du banc de batterie est égal à son minimum $C_{bat_{min}} = C_{bat}(t)$, le générateur diesel se met en marche et les batteries ne seront ni chargées ni déchargées ($P_B(t) = 0$). La puissance électrique produite par le générateur diesel, $P_{DG}(t)$, est égale, dans ce cas, à la différence entre les puissances $P_L(t)$ et $P_{RE}(t)$.

- ✓ Si la puissance demandée par la charge est inférieure à la puissance minimale du générateur diesel, le générateur fonctionne à sa puissance nominale, P_R , les batteries seront chargées et la puissance P_B sera calculée comme suit :

$$P_{DG}(t) = P_R \quad (\text{IV.44})$$

Et,

$$P_B = (P_{RE}(t) - P_R(t)) - P_L(t) \quad (\text{IV.45})$$

La stratégie du fonctionnement du système multi-sources et l'état de charge et de décharge du banc des batteries est représenté sur la **Figure IV.2**.

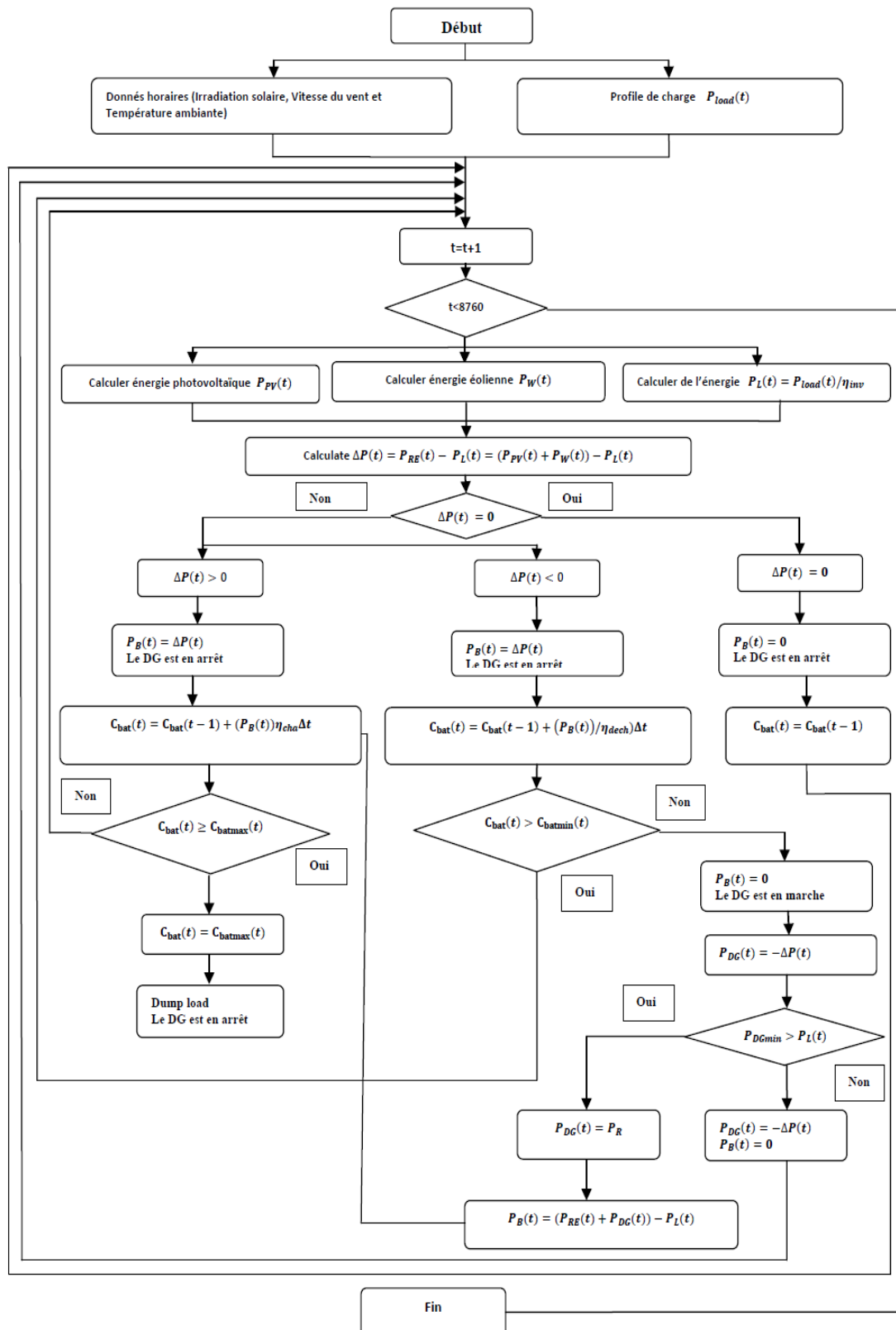


Figure IV.2 : Stratégies de fonctionnement de système multi-sources PV-éolien-Diesel-batterie

La stratégie de fonctionnement des systèmes PV-Diesel et éolien-Diesel est identique à celle du système multi-sources PV-éolien-Diesel :

- ✓ Pour le système PV –Diesel : $P_{RE}(t) = P_{PV}(t)$;
- ✓ Pour le système éolien-Diesel : $P_{RE}(t) = P_W(t)$.

IV.9 Formulation du problème d'optimisation : établissement des fonctions objectives et prise en compte les contraintes :

La méthode de dimensionnement présentée dans ce travail consiste à déterminer la configuration optimale du système, permettant de satisfaire les besoins de la charge selon les critères d'optimisation choisis.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes concentrés sur une optimisation mono-objective où la fonction Objectif représente le coût total d'investissement du système (STC) pendant sa durée de vie, la fraction de l'énergie (RF) est considérée comme contrainte.

IV.9.1 Critère économiques : Le coût d'investissement total du système STC

Tel que précédemment discuté, plusieurs techniques économiques utilisées pour déterminer le coût de la puissance générée des systèmes ; le coût total d'investissement du système (STC) est parmi les indicateurs privilégiés dans l'analyse économique. Il comprend le coût d'acquisition, le coût d'installation, le coût de la maintenance des différents composants et le coût d'exploitation des groupes électrogènes au cours de la vie du système. La formule mathématique du STC est [98] :

$$STC = \{C_A(x) + C_M(x) + C_I(x) + C_{T,D}\} \quad (IV.46)$$

$$\text{Où } x = \{N_{PV,p} + N_{Wt} + N_{BAT,p}\}$$

$$C_A(x) : \text{Le coût d'acquisition ;} \quad (IV.47)$$

$$C_M(x) : \text{Le coût de la maintenance ;} \quad (IV.48)$$

$$C_I(x) : \text{Le coût de l'installation.} \quad (IV.49)$$

Le STC s'écrit comme suit :

$$\text{STC} = \sum N_{PV,P} \times N_{PV,S} \times (C_{A,PV} + 20 \times C_{M,PV} + C_{I,PV}) + \sum N_{WT} \times (C_{A,WT} + 20 \times C_{M,WT} + C_{I,WT} + C_{A,h} + 20 \times C_{M,h} + C_{I,h}) + \sum N_{BAT,P} \times N_{BAT,S} \times (C_{A,BAT} + C_{I,BAT} + r_{BAT} \times (C_{A,BAT} + C_{I,BAT}) + (20 - r_{BAT} - 1) \times C_{M,BAT}) + C_{T,D} \quad (\text{IV.50})$$

$C_{A,PV}$: Le coût d'acquisition du PV (€) ;

$C_{M,PV}$: Le coût de la maintenance du PV par an (€/an) ;

$C_{I,PV}$: Le coût d'installation du PV (€) ;

$C_{A,WT}$: Le coût d'acquisition de la turbine éolienne (€) ;

$C_{M,WT}$: Le coût de maintenance de la turbine éolienne par an (€/an) ;

$C_{I,WT}$: Le coût d'installation de la turbine éolienne (€) ;

$C_{A,h}$: Le coût d'acquisition du mât de la turbine (€) ;

$C_{M,h}$: Le coût de maintenance du mât de la turbine (€/an) ;

$C_{I,h}$: Le coût d'installation du mât de la turbine (€) ;

$C_{A,BAT}$: Le coût acquisition de la batterie (€) ;

$C_{M,BAT}$: Le coût de maintenance de la batterie par an (€/an) ;

$C_{I,BAT}$: Le coût d'installation de la batterie (€).

r_{BAT} : Le nombre prévu de remplacements de la batterie pendant la durée de vie du projet.

Le coût total du générateur diesel, est écrit sous la forme suivante :

$$C_{T,D} = C_{I,D} + M_D + \frac{C_D}{Life_D} + C_f \quad (\text{IV.51})$$

$C_{I,D}$: Le coût d'installation du générateur diesel (€) ;

$C_{A,D}$: Le coût d'acquisition (€) ;

M_D : Le coût de maintenance par heure (€/h) ;

$Life_D$: La durée de vie du générateur diesel (h) ;

C_f : Le coût total du carburant consommé par le générateur (€).

Dans cette étude, d'autres composants de coût, comme le coût de l'onduleur, le coût de redresseur, le coût de câble et le coût de système de contrôle ... etc., ne sont pas pris en compte. Dans certains travaux [172],[159],[144] et [174], le STC est utilisé comme critères d'optimisation.

IV.9. 2 Les critères techniques du facteur d'énergies renouvelables (RF) :

L'énergie électrique fournie à la demande au moyen de sources l'énergie renouvelable est connue comme un facteur d'énergies renouvelables (RF) [174] ou fraction d'énergie renouvelable [175]. Parmi les formules de calcul de RF, la formule suivante [175] :

$$RF = \frac{E_{RE}}{E_{RE} + P_{DG}} \quad (IV.52)$$

E_{RE} représente l'énergie renouvelable et $E_{RE} + P_{DG}$ représente l'énergie totale du système multi-sources.

RF est un nombre entre 1 et 0, si RF est égal à 1, cela signifie que l'alimentation totale de la charge est générée à la charge à partir de source d'énergie renouvelable ; de l'autre côté, si la valeur de RF est zéro, la charge est alimentée par le DG.

$$RF_{désiré} \leq RF \leq 1 \quad (IV.53)$$

Certaines approches sont basées sur l'utilisation du RF comme indicateur d'optimisation [104],[176]],[177],[133],[178].

IV.9. 3. Les fonctions objectives et les constraints :

Afin d'examiner la relation entre le coût et le RF, la fonction STC est minimisée, tandis que la fonction RF est considérée comme contrainte.

$$\text{Min } obj_{obj} (STC) \quad (IV.54)$$

Sous réserve de la restriction imposée par le critère de satisfaction énergétique.

$$RF_{désiré} \leq RF \quad (IV.55)$$

Limites inférieure et supérieure des variables de décision (nombre du PV, des éoliens et des batteries) :

$$N_{PV,pmin} \leq N_{PV,p} \leq N_{PV,pmax} \quad (IV.56)$$

$$N_{BAT,pmin} \leq N_{BAT,p} \leq N_{BAT,pmax} \quad (IV.57)$$

$$N_{wt,min} \leq N_{wt} \leq N_{wt,max} \quad (IV.58)$$

$N_{PV,pmax}$, $N_{BAT,pmax}$ et $N_{wt,max}$ sont respectivement le nombre maximal de branches de panneaux photovoltaïque connectées en parallèle, le nombre maximal de branches des batteries reliées en parallèle, le nombre maximal des éoliennes.

Le nombre maximal de chaque type de éléments est calculé comme étant le rapport entre le pic de puissance consommée par la charge et de la puissance nominale du composant (pour panneau PV ou turbine éolienne) et la capacité nominale de batteries.

$N_{PV,pmin}$, $N_{BAT,pmin}$ et $N_{wt,min}$ sont respectivement le nombre minimal de branches de panneaux photovoltaïques connectées en parallèle, le nombre minimal de branches des batteries reliées en parallèle, le nombre minimal des éoliennes.

IV.10 Méthode d'optimisation choisie

IV.10.1 L'optimisation par les algorithmes génétiques

Les Algorithmes Génétiques (GA) sont des algorithmes d'optimisation stochastiques inspirés des systèmes génétiques naturels, ils représentent les algorithmes de recherche basés sur les idées évolutives de la sélection naturelle et de la génétique, initialement proposés par John Holland en 1975 [179].

Un algorithme génétique est basé sur une population d'individus dont chacun est une solution candidate du problème. Chaque solution doit être codée. Cette représentation codée est appelée *chromosome*, et est composée de *gènes*. Le degré d'adaptation d'un individu à l'environnement est exprimé par la valeur de la fonction coût (fonction Objectif) correspondante.

La taille de la population reste constante tout au long de l'algorithme génétique. La recherche de la solution est réglée par trois opérateurs qui sont appliqués successivement : La sélection, le croisement et la mutation [180].

- ✓ **La sélection** sert à choisir dans l'ensemble de la population, les individus qui participeront mieux à la reproduction.
- ✓ **Le croisement** combine les gènes des deux individus parents pour donner deux nouveaux chromosomes enfants. La zone de croisement est généralement choisie aléatoirement dans les chromosomes.
- ✓ **La mutation** est un processus selon lequel un élément du chromosome est permuté au hasard. Cette opération n'est activée qu'occasionnellement. Cependant, elle joue un rôle fondamental dans l'algorithme génétique en ramenant du matériel génétique qui aurait été oublié par les opérateurs de la sélection et du croisement.

Le principe de fonctionnement de l'algorithme est représenté par le pseudo code suivant :

Algorithme génétique

Définition de la fonction Objectif (x) , $x = (x_1, \dots, x_n)$

Représentation de la solution sous forme de chromosome

Génération de la population initiale

Evaluation de fitness

Initialiser les probabilités de croisement (p_c) et mutation (p_m)

$t \leftarrow 1$

tant que ($t < \text{max-génération}$) **faire**

Générer de nouvelle solution par mutation et croisement

si $p_c > \text{rand}$ **alors**

croisement

fin

si $p_m > \text{rand}$ **alors**

mutation

fin

Accepter les nouvelles solutions si leur fitness est amélioré.

Sélectionner les meilleures solutions actuelles pour la nouvelle génération

$t \leftarrow t + 1$

fin

Décodage et visualisation des résultats.

Les principales caractéristiques de GA et de ses Domaines d'application sont présentées dans [181].

Avec l'utilisation des algorithmes génétiques, la reproduction et le recueil de meilleurs individus se répètent autant de fois qu'il y aurait besoin de générations (itérations de l'algorithme génétique) pour satisfaire un critère d'arrêt. Les critères d'arrêt les plus utilisés sont :

- ✓ L'arrêt après un certain nombre de générations ;
- ✓ L'arrêt lorsque le meilleur individu n'a pas été amélioré depuis un certain nombre de générations ;
- ✓ L'arrêt lorsqu'il y a une perte de diversité génétique.

La solution obtenue est alors représentée par le meilleur individu de la dernière génération.

IV.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des modèles énergétiques simplifiés des différentes parties de système multi-sources, à savoir le système photovoltaïque et éolien ainsi que la batterie pour l'élaboration des formules mathématiques nécessaires pour la modélisation des composants des systèmes étudiés.

De même, nous avons décrit brièvement les formules mathématiques nécessaires pour le système éolien, photovoltaïque, batterie et du générateur diesel, utilisés dans notre étude. Aussi, la méthodologie d'optimisation du dimensionnement est présentée ; elle est basée sur deux critères : Critère économique selon le concept de STC et critères techniques selon le facteur RF. En outre, ces considérations seront mises en application dans les étapes suivantes de l'optimisation.

Chapitre V

Résultats & Discussions

V.1 Introduction

Ce chapitre a pour but d'étudier de façon détaillée la solution optimale. La méthodologie proposée dans cette thèse est appliquée en utilisant des données d'entrées (température, vent et irradiation solaire) mesurées, les modèles des sous systèmes présentés dans le quatrième chapitre et le modèle du profil de charge choisi. Nous rappelons que le pas de la simulation Δt est de 01 heure et la simulation est effectuée pour une année. Trois paramètres de dimensionnement sont à déterminer à savoir : Le nombre de panneaux photovoltaïques, les nombres des batteries et d'éoliennes. L'étude est basée sur deux critères à savoir: Le coût d'investissement total (STC), le facteur d'énergie renouvelable (RF). Le critère économique STC est analysé en fonction du critère technique RF.

V.2 Application au site choisi

Les données horaires de l'irradiation solaire globale horizontale, de la température ambiante et du vent d'un site isolé algérien sont disponibles.

Des hypothèses simplificatrices ont été prises en considération afin de mener à bien cette simulation, qui sont :

- ✓ Le banc des batteries est considéré plein au début d'étude ;
- ✓ Les pertes de puissance sont considérés négligeables dans le système complet;
- ✓ Le phénomène du vieillissement de la batterie est négligeable ;
- ✓ Les prix sont considérés constants (maintenance) pendant toute la durée de l'étude qui est, dans notre cas, 20 ans ;
- ✓ Le profil de charge, et le potentiel des sources sont supposés inchangés sur la période considérée ;
- ✓ Nous avons considéré que les puissances des modules photovoltaïques et des éoliennes sont des puissances maximales ;
- ✓ Le générateur diesel est connecté directement à la charge ;
- ✓ Un schéma de câblage est effectué, mais n'est pas considéré dans l'étude économique ;
- ✓ D'autres composants de coût, comme du système de contrôle, les onduleurs ne sont pas pris en compte pour le calcul du STC.

V.2.2 : Evaluation des ressources et de la demande

Comme indiqué précédemment, les principaux paramètres utilisés pour le dimensionnement de composants sont les données météorologiques (vitesse de vent, température ambiante), tandis que les données solaires, du site objet de l'étude. Pour ce faire, nous avons considéré une période d'une année.

V.2.2.1 : Ressource éolienne

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne. Elle représente un variable important. Les données pour l'emplacement étudié ont été obtenues à partir de la base de données de Météorologie de Surface et d'Energie Solaire de la NASA. Le site de la NASA offre les moyennes de vent mensuelles en fonction de la latitude et la longitude d'un lieu déterminé. Le programme de simulation HOMER est utilisé pour générer des données horaires synthétiques à partir de ces valeurs moyennes mensuelles. La **Figure V.1.** illustre la vitesse du vent pendant une année pour le site de Ghardaïa.

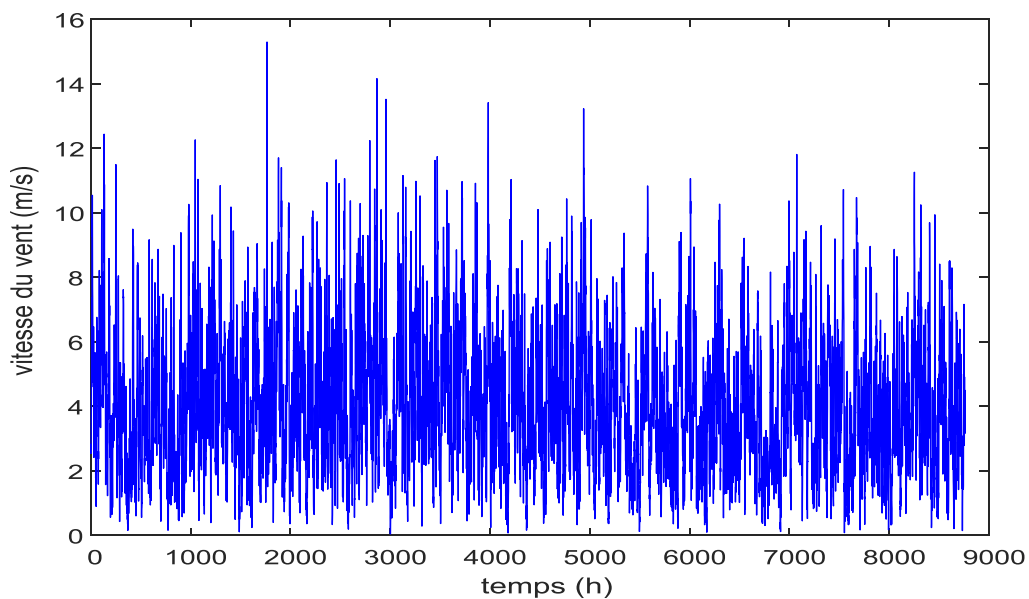


Figure V.1 : Evolution annuelle du vent à 50 m

V.2.2.2 Ressource solaire

L'irradiation solaire influe le fonctionnement solaire. Le courant est proportionnel à l'intensité lumineuse, contrairement à la tension qui diminue légèrement avec l'irradiation solaire. L'irradiation solaire réelle pour le site de Ghardaïa est disponible, la **Figure V.2** montre l'éclairement incident du site pendant une année.

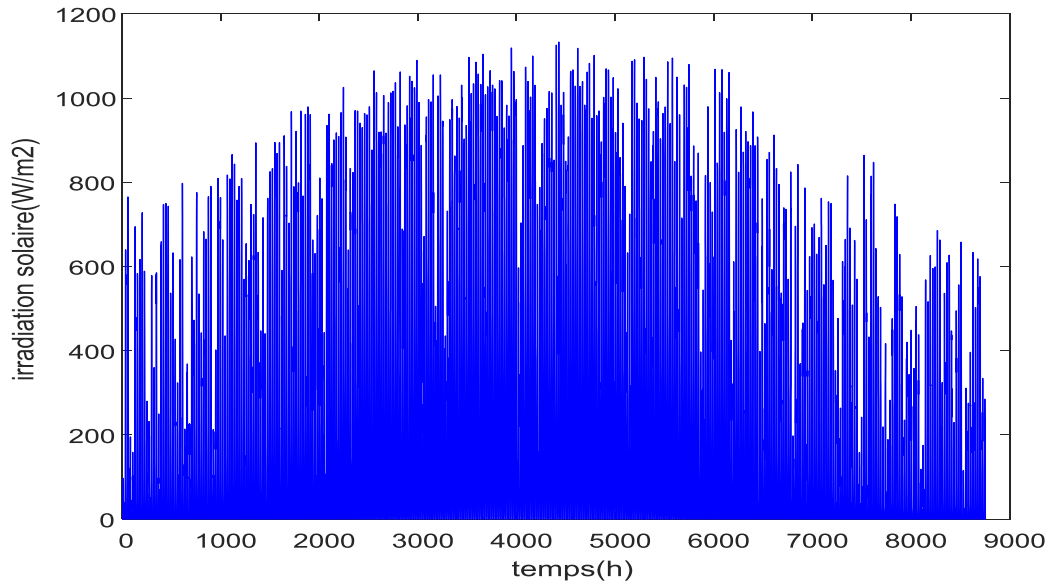


Figure V.2 : L'irradiation solaire annuelle

V.2.2.3 : La température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Son augmentation entraîne d'une part, une augmentation du courant photonique. C'est un paramètre qui permet, avec l'irradiation solaire, de calculer la température de la jonction d'une cellule PV et donc de calculer la puissance produite par le panneau PV. La **Figure V.3** représente l'évolution annuelle de la température ambiante réelle du site de Ghardaïa.

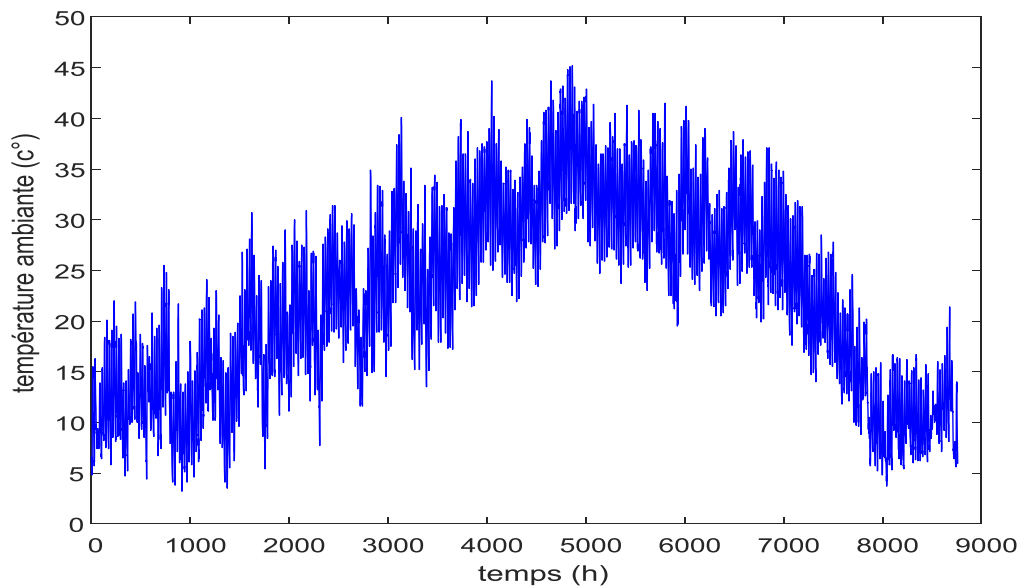


Figure V.3 : Evolution annuelle de la température ambiante

V.2.2.4 : Courbe de charge

Le profil de charge représente des besoins en énergie des populations et de leur rythme de vie. La distribution horaire de la demande de puissance pendant une année est présentée dans la **Figure V.4**.

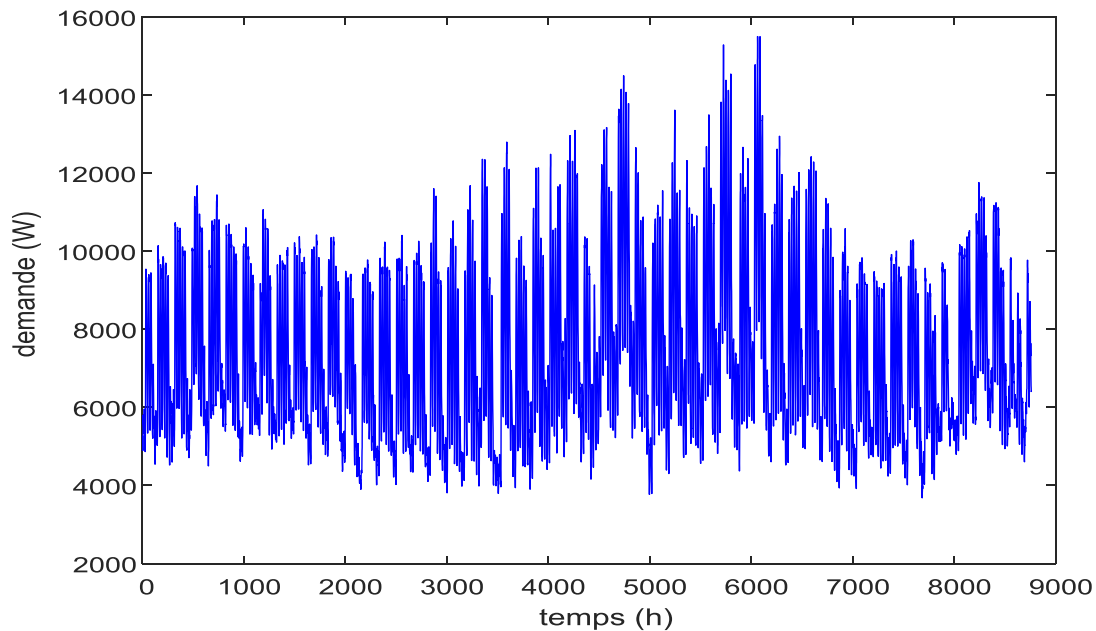


Figure V.4 : Profil de consommation pendant une année

V.3 Les paramètres économiques et techniques utilisés

Les données économiques et les caractéristiques de différents composants utilisés dans la simulation sont exposées en Euro. La durée de vie des systèmes est supposée égale à celle du composant du système qui bénéficie de la plus longue durée de vie. Il s'agit, dans notre cas, du panneau PV qui a une durée de vie qui varie entre 15 ans et 30 ans. Dans ce travail, nous avons opté de les assigner à une durée de vie ramenée à 20 ans.

Les caractéristiques et les coûts des différents composants du système sont présentés dans les tableaux suivantes : **Tableau V.1**, **Tableau V.2** et **Tableau V.3**.

Le prix des différents composants du système en € et DA, sachant qu'on a utilisé un taux de change de $1€ = 103,27$ DA (taux moyen durant ces 7 dernières années selon ANDI, Agence Nationale de Développement de l'Investissement [183]),

Tableau V.1 : Caractéristiques des panneaux PV [101]

V_{mp} (V)	35,30
I_{mp} (A)	7,65
V_{OC} (V)	45,50
I_{sc} (A)	8,90
K_v (%/°C)	- 0,335
K_i (%/°C)	0,047
NCOT (°C)	46,00
$C_{A,PV}$ (€)	228,65 (23612,68 DA)
$C_{I,BAT}$ (€)	33,50 (3459,54 DA)
$C_{M,BAT}$ (€/year)	6,85 (707,39 DA)

Tableau .2 : Caractéristiques des turbines éoliennes [98].

P_R (Kw)	5
v_r (m/s)	10
v_{ci} (m/s)	2
v_{co} (m/s)	18
$C_{A,WT}$ (€)	11086 (1144851,22 DA)
$C_{I,WT}$ (€)	1108,6 (114485,12 DA)
$C_{M,WT}$ (€/an)	110,86 (11448,5122 DA/an)
$C_{A,h}$ (€)	741 (76523,07 DA)
$C_{I,h}$ (€)	74,1 (7652,30 DA)
$C_{M,h}$ (€/an)	7,41 (765,23 DA/AN)

Tableau V.3 : Caractéristiques des batteries [101]

$C_{BAT,nom}$ (Ah)	180
$V_{BAT,nom}$ (V)	12
DOD (%)	85
$C_{A,BAT}$ (€)	147,90 (15273,63 DA)
$C_{I,BAT}$ (€)	20,88 (2156,27 DA)
$C_{M,BAT}$ (€/year)	5,68 (586,57 DA)

Dans cette étude, le générateur diesel choisi est de puissance nominale égale à 16 KW [98], son coût d'acquisition est de 6830 € (705334,1 DA), sa durée de vie est de 7000 h, le coût d'installation représente 10% de coût d'acquisition et la maintenance représente 0.2 €/h (20,654 DA/h), et le prix du carburant est de 0,17 €/l (17,55 DA/l) selon [182].

V.4 Formulation du problème d'optimisation

La procédure d'optimisation du système, dans le cadre de ce travail, vise les objectifs principaux suivants :

- ✓ La gestion de l'énergie produite par le système, afin de pouvoir fournir au consommateur l'énergie dont il a besoin. Vue la stratégie adoptée dans cette étude, le générateur diesel comble toujours le déficit et donc la demande est toujours satisfaite ;
- ✓ La détermination des nombres optimaux de composants (PV, Eolien et Batterie) pour le système multi-sources étudié PV-Eolien-Batt-DG, permettant de minimiser le STC du système en fonction de RF ;
- ✓ La comparaison des résultats obtenus avec 02 autres systèmes (PV-Batt-DG et Eolien-Batt-DG) ;
- ✓ La comparaison des résultats obtenus avec autres systèmes sans batterie (PV-Eolien-DG, PV-DG et Eolien-DG).

Après avoir présenté, dans le chapitre précédent, une vue générale sur d'optimisation en expliquant la technique utilisée dans le cadre de ce travail, cette partie est dédiée à la prise en main de l'étude avec différentes configurations et différents scénarios afin de valider le bon fonctionnement du système étudié et tirer des conclusions.

Le système est optimisé avec une fonction objectif, à savoir : Le coût d'investissement total du système (STC) et une contrainte appelé facteur d'énergies renouvelables (RF). Les variables considérées pour l'optimisation sont :

- ✓ Le nombre de panneaux photovoltaïques en parallèle ($N_{PV,p}$) ;
- ✓ Le nombre de batteries en parallèle ($N_{BAT,p}$) ;
- ✓ Le nombre de turbines éoliennes (N_{Wt}).

Les nombres d'éléments en série (batteries, panneaux photovoltaïques) sont fixés en tenant compte des tensions aux bornes de chaque élément, et de la tension de bus 48V. Ainsi nous avons :

- ✓ Le nombre de panneaux photovoltaïques en série: $N_{PV,s} = 2$;
- ✓ Le nombre de batteries en série: $N_{BAT,s} = 4$.

Les batteries utilisées ont une durée de vie maximale égale à 04 ans. Elles seront donc remplacées 05 fois dans une période de 20 ans.

La fonction Objectif :

$$\text{Min} (STC) \quad (V.1)$$

Sous la contrainte des limites inférieure et supérieure des variables de décision (nombre du PV, des éoliens et des batteries) :

$$\begin{cases} 1 \leq N_{PV,p} \leq N_{PV,pmax} \\ 1 \leq N_{BAT,p} \leq N_{BAT,pmax} \\ 1 \leq N_{wt} \leq N_{wt,max} \end{cases} \quad (V.2)$$

Sous réserve des contraintes additionnelles :

$$C_{bat\ min} \leq C_{bat} (t) \leq C_{bat\ max} \quad (V.3)$$

Et

$$P_{DGmin} (t) \leq P_{DG} (t) \leq P_{DGmax} (t) \quad (V.4)$$

En ce qui concerne la technique d'optimisation, le troisième chapitre et a permis de déterminer que l'algorithme génétique était bien adapté à notre problématique.

L'algorithme génétique implémenté dans MATLAB en tant que la commande « ga » est utilisé pour l'optimisation afin de déterminer le dimensionnement optimal des systèmes multi-sources.

Dans cette simulation, nous avons fixé les paramètres suivants pour notre application.

- ✓ Nombre de populations est considéré 40 d'après l'équation :
nombre de populations = $\max(\min(10 \cdot \text{nombre de variables}, 100), 40)$

Chaque chromosome est composé de gènes (le nombre de PV, le nombre de l'éolien et le nombre de batterie). Des différentes configurations et scénarios sont étudiés et comparés en termes de coût.

L'application de l'approche choisie conduit à obtenir les différentes configurations optimales présentées dans les tableaux et les figures suivantes.

V.5 Résultats et discussions

V.5.1 Etude de l'influence de variation du facteur d'énergie renouvelable (RF) sur la configuration optimale

Nous avons dans cette partie du travail, effectué une optimisation d'un système PV-Eolien-Batt-DG avec deux taux élevés de RF, le tableau V.4, donne les configurations obtenues pour un RF désiré de 0.5 % et 0.8 %. Les résultats par l'approche proposée conduit à obtenir les configurations optimales présentées dans le **Tableau V.4**

Tableau V.4 : Configurations optimales obtenues

Systèmes	$RF_{désiré}$	RF	$N_{PV,p}$	N_{wt}	$N_{BAT,p}$	STC(€)	STC(DA)
PV-Eolien-Batt-DG	0,5	0.74	27	2	7	220744	22796232,88
	0,8	0.81	28	3	7	223968	23129175,36

- ✓ On peut noter qu'avec l'augmentation du taux de pénétration de l'énergie renouvelable RF, le STC augmente.
- ✓ L'étude de cas montre que l'utilisation de PV-Eolien-Batt-DG avec un facteur renouvelable $RF_{désiré} = 0,5$ est le système le plus rentable avec un STC de 220744€ (22796232,88DA). La valeur minimale pour le STC du système est obtenue à la 54^{ème} itération de l'algorithme comme présenté sur la **Figure V.5**.

La **Figure V.5** présente les variations de STC en fonction du nombre de générations pendant la procédure d'optimisation pour les deux cas.

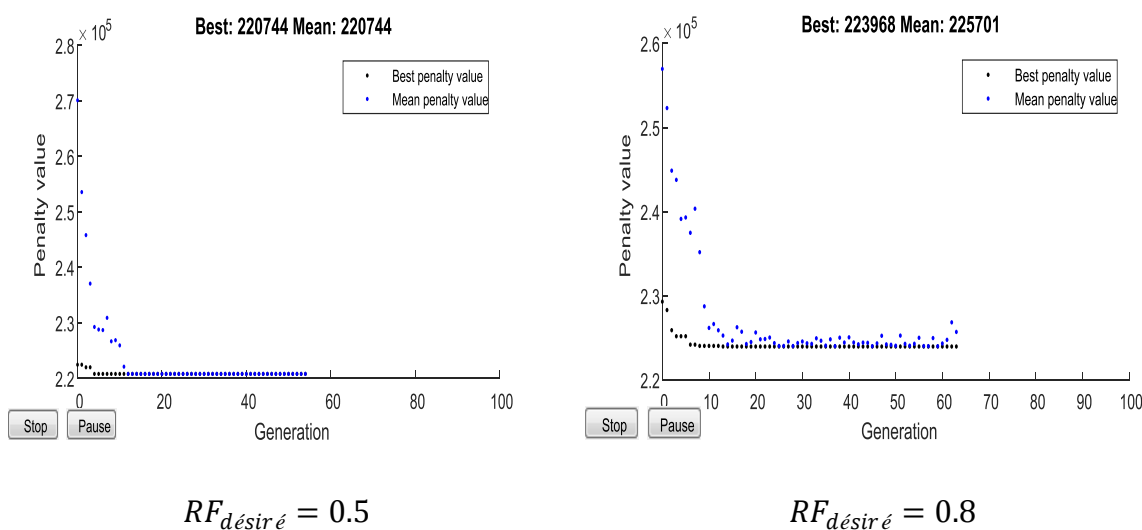


Figure V.5 : Performance de l’algorithme génétique pour les deux taux de RF

Le STC de la configuration optimale de 220744 € (22796232,88 DA) se répartit ainsi :

- ✓ Acquisition inclus remplacement : 127529 € (13169919,83DA) ;
- ✓ Installation : 8074 € (833801,98 DA) ;
- ✓ Maintenance : 56805€ (5866252,35 DA);
- ✓ Carburant : 28336€ (2926258,72DA).

La **Figure V.6** suivante illustre cette répartition

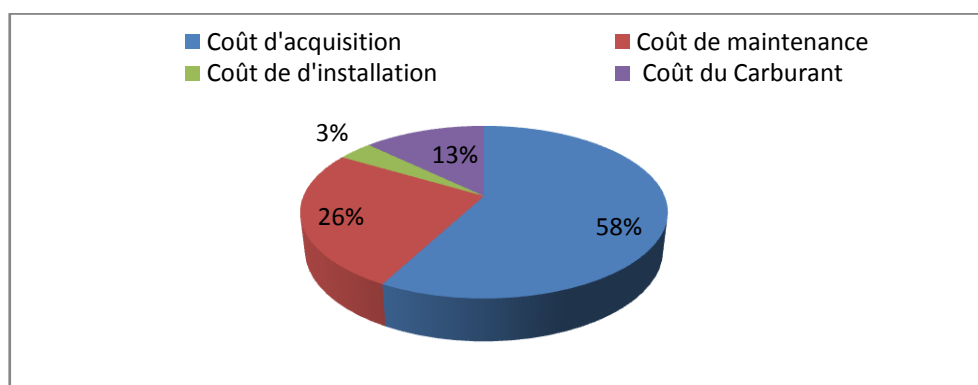


Figure V.6 : Répartition du STC pour la configuration optimale

On remarque que la principale dépense est liée à l’achat et au renouvellement de certains équipements. En effet, compte tenu par exemple du générateur diesel, parce ce que leur vie est limitée par un nombre d’heures déterminé durant la durée de vie du projet, le coût d’acquisition représente 58% du coût global du système. La deuxième dépense la plus

importante est, quant à elle, engendrée par la maintenance des équipements (26% du coût global). Et après le coût du carburant (13% du coût global), vient en dernier lieu le coût d'installation, qui ne représente que 03% des charges. Le coût du diesel occupe le grand pourcentage (**Figure V.7**).

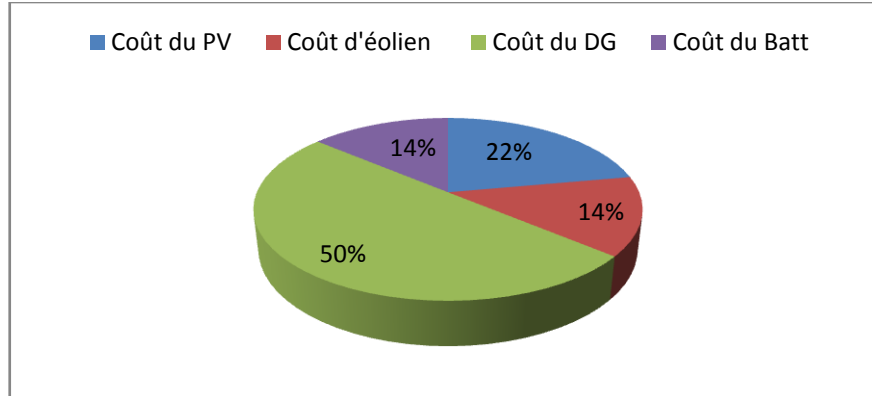


Figure V.7 : Répartition des coûts des composants en % sur le STC

V.5.2 Influence du potentiel disponible sur la configuration optimale

Dans cette partie du travail, nous avons effectué une optimisation des différents systèmes multi-sources (PV-Eolien-Batt-DG, PV-Batt-DG, Eolien-Batt-DG) afin d'étudier l'influence du potentiel sur le STC.

Tableau V.5 : Configurations optimales obtenues en utilisant trois valeurs de $RF_{désiré}$: 0,1, 0,5 % et 0,8 % et trois différents systèmes

Systèmes	$RF_{désiré}$	$N_{PV,p}$	N_{wt}	$N_{BAT,p}$	STC(€)	STC(DA)
PV-Eolien-Batt-DG	0,1	27	2	7	220744	22796232,88
	0,5	27	2	7	220744	22796232,88
	0,8	28	3	7	223968	23129175,36
PV-Batt-DG	0,1	35	N/A	7	236294	24402081,38
	0,5	35	N/A	7	236294	24402081,38
	0,8	50	N/A	7	244072	25205315,44
Eolien-Batt-DG	0,1	N/A	3	2	294366	30399176,82
	0,5	N/A	Pas de solution			
	0,8	N/A				

- ✓ L'étude de cas montre que la configuration optimale avec un STC de 220744€ (22796232,88 DA), est le système PV-Eolien-Batt-DG. Ces résultats prouvent que l'hybridation est avantageuse est plus efficace que l'utilisation d'une seule source d'énergie renouvelable.
- ✓ On peut noter qu'avec l'augmentation du taux de pénétration de l'énergie renouvelable, le STC augmente.
- ✓ Les résultats montrent que le potentiel éolien affecte plus la valeur du STC par rapport au potentiel solaire, il est clairement que la qualité des ressources énergétiques influe directement sur la configuration optimale.
- ✓ Toutefois, l'utilisation de l'éolienne, malgré un coût plus élevé, a l'avantage de réduire légèrement le nombre de batteries (02 au lieu de 07) car l'éolienne peut fournir de l'énergie dans la nuit.
- ✓ A partir de ces résultats et d'après la **Figure V.8** qui présente les puissances renouvelables, les puissances maximales photovoltaïques et éoliennes produites par le système dans le cas de la configuration optimale obtenue, on peut constater que le taux de pénétration de la puissance PV est supérieur à celui de la puissance éolienne. La faible production de la puissance éolienne par rapport à la puissance PV est due à la faible vitesse du vent du site de Ghardaia et à la forte irradiation.

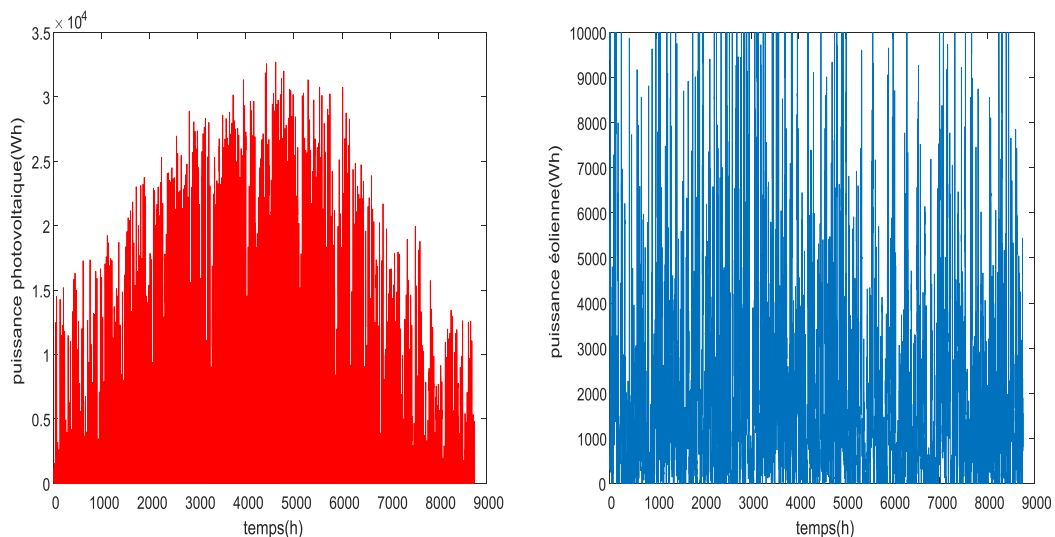


Figure V.8 : Puissances maximales photovoltaïques et éoliennes pendant une année

V.5.3 Influence de l'élément de stockage sur la configuration optimal

Nous avons, dans cette partie du travail, effectué une optimisation des différents systèmes multi-sources PV-Eolien-Batt-DG, PV-Batt-DG, Eolien-Batt-DG avec et sans stockage afin d'étudier l'influence de l'élément de stockage sur le STC, ainsi que sur la quantité de gaz à effet de serre (CO₂) générée.

V.5.3.1 La quantité de CO₂

La quantité de CO₂ est calculée en utilisant l'équation (V.5), Le facteur d'émission par litre de combustible consommé est de 3,15 kgCO₂/litre utilisé dans ce travail a été adopté par la [180] :

$$Q = 3,15 * \sum F(t) \quad (V.5)$$

Où :

$F(t)$: La consommation en combustible donnée par l'équation (IV.37) en (I) ;

Q : La quantité de CO₂ émise en (kg).

Les résultats obtenues avec un $RF_{désiré} = 0,1$

Les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau V.6**.

Tableau V.6 : Configurations optimales obtenues pour les différents systèmes.

Systèmes	$N_{PV,p}$	N_{wt}	$N_{BAT,p}$	STC(€)	Nbr d'heures de fonctionnement du DG h/an	Q Kg/an
PV-Eolien-DG- Batt	27	2	7	220744 (22796232,88DA)	3417	30885
PV-Eolien-DG	23	3	N/A	285580 (29491846,6 DA)	5694	49087
PV-DG -Batt	35	N/A	7	236294 (24402081,38DA)	4007	37608
PV- DG	29	N/A	N/A	277278 (28634499,06 DA)	6364	58201
Eolien-DG-Batt	N/A	3	2	294366 (30399176,82 DA)	6740	63037
Eolien -DG	N/A	3	N/A	323078 (33364265,06 DA)	7841	71849

- ✓ L'analyse des résultats montre une variation de la puissance renouvelable, la puissance du générateur diesel et l'état de charge des batteries pour chaque méthode.
- ✓ L'étude de cas montre que la configuration optimale est le système PV-Eolien-Batt-DG en raison du bon effet complémentaire entre l'énergie solaire et l'énergie éolienne pour satisfaire la demande.
- ✓ Le STC du système Eolien-DG est le plus coûteux en raison de l'augmentation des heures de fonctionnement du diesel.
- ✓ Le nombre des heures de fonctionnement des générateurs diesel atteint sa valeur la plus basse dans la configuration PV-Eolien-DG (avec ou sans batterie) par rapport aux autres systèmes.
- ✓ L'augmentation du STC des systèmes due à l'utilisation des groupes électrogènes implique l'augmentation de la quantité de CO₂ émise.
- ✓ L'association d'un système de stockage, batterie dans notre cas est nécessaire pour satisfaire la charge à moindre coût. Les résultats vérifient que les systèmes contenant des batteries ont un coût inférieur à celui du cas où les systèmes sont composés des sources d'énergie seules, comme indiqué sur la **Figure V.9**.
- ✓ Le STC des systèmes sans batterie sont les plus coûteux en raison de l'augmentation des heures de fonctionnement du diesel (**Figure V.10**).
L'excès de puissance générée par les sources renouvelables est abandonné. Le déficit de puissance sera fourni par le générateur diesel afin satisfaire la demande. Donc, il s'avère nécessaire d'associer un système de stockage dans un système multi-sources pour satisfaire la charge.
- ✓ La présence des batteries dans un système multi-sources minimise l'utilisation du générateur diesel en réduisant le temps de fonctionnement du DG, la consommation du carburant et ce qui peut réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Au contraire, la durée de fonctionnement des générateurs diesel augmente dans les systèmes multi-sources qui ne contiennent pas des batteries.

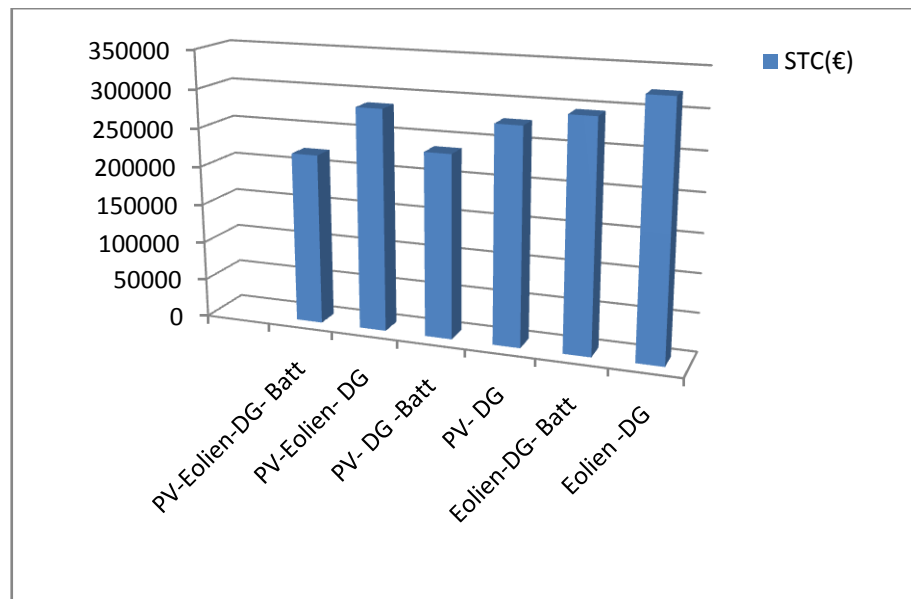


Figure V.9 : STC pour différentes configurations optimales

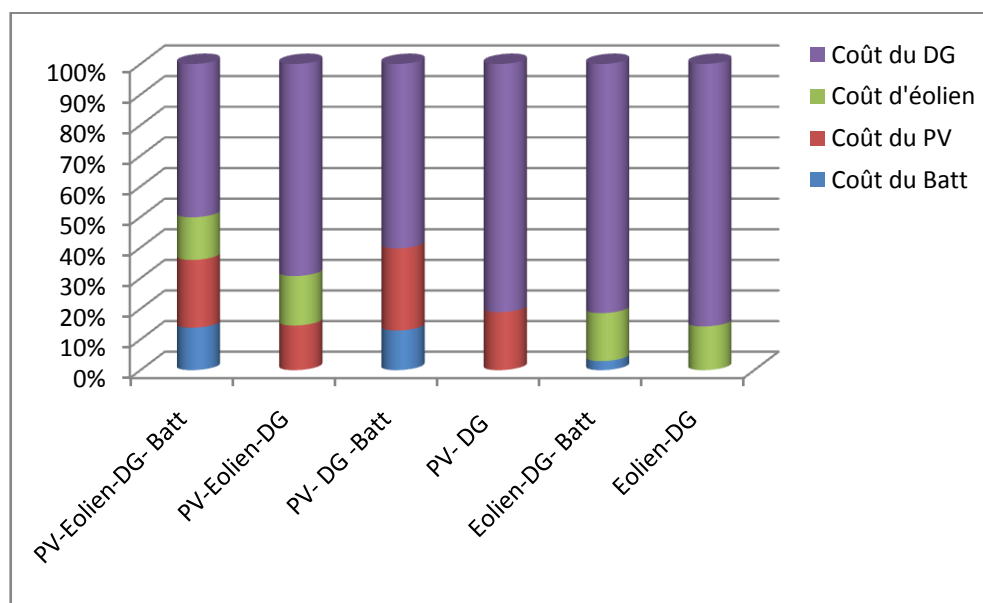


Figure V.10 Récapitulatifs des STC pour chaque composant pour

On remarque que dans tout les cas (**Figure V.11**), pour les configurations optimales, le coût l'acquisition représente environ la moitié du STC du projet, et l'autre moitié est répartie entre le coût de maintenance des équipements, le coût d'installation et le coût du carburant.

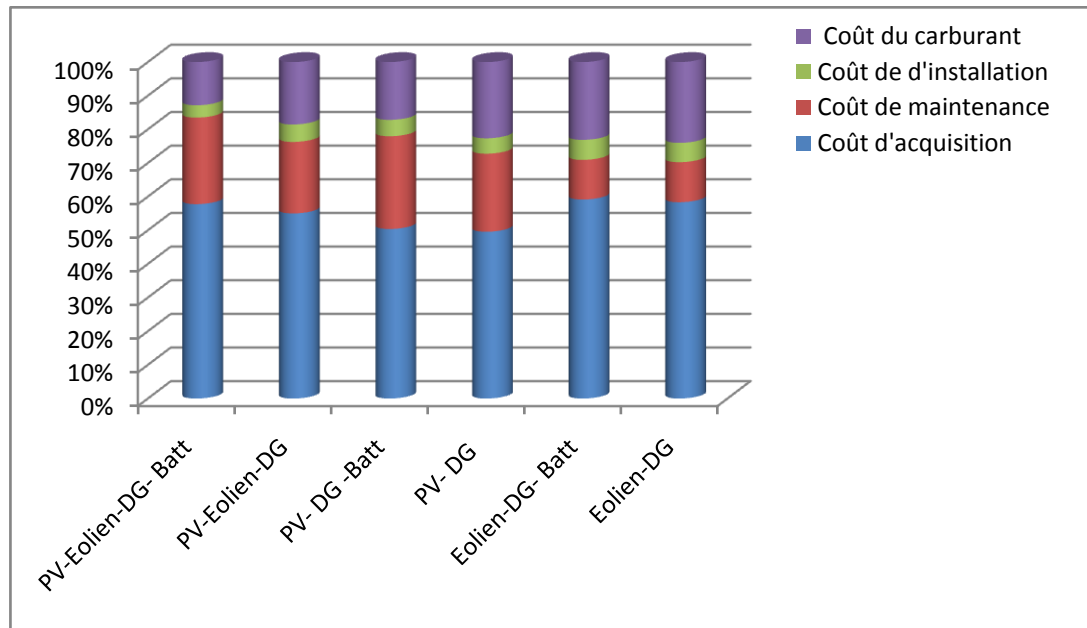


Figure V.11 : Représentation graphique de différentes répartitions des coûts pour toutes les configurations optimales

Le **Tableau V.7** présente l'énergie produite, la contribution des différents générateurs ainsi que le surplus d'énergie calculés.

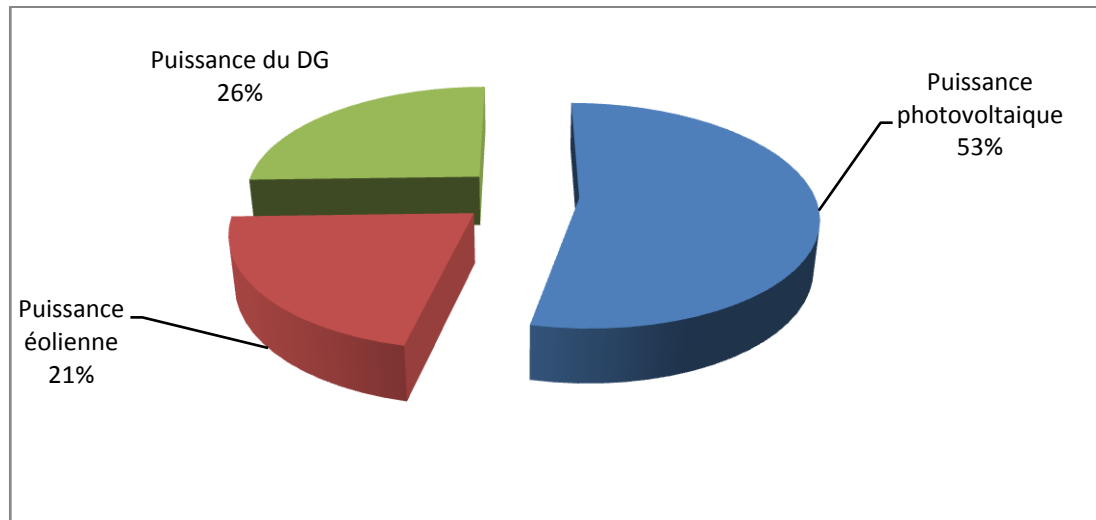
Tableau V.7 : L'énergie produite, la contribution des différents générateurs et le surplus d'énergie calculés

Systèmes	RF	L'énergie produite	Fraction de l'énergie produite par l'éolien (%)	Fraction de l'énergie produite par le PV (%)	Surplus de l'énergie (%)
PV-Eolien-DG- Batt	0,74	$8,28 \times 10^7$	28	72	18
PV-Eolien- DG	0,66	$9,59 \times 10^7$	41	59	35
PV- DG -Batt	0,70	$9,02 \times 10^7$	N/A	100	25
PV- DG	0,56	$9,29 \times 10^7$	N/A	100	24
Eolien-DG- Batt	0,37	$7,05 \times 10^7$	100	N/A	5
Eolien -DG	0,34	$7,58 \times 10^7$	100	N/A	3

Pour ces configurations, l'énergie produite est de $8,28 \times 10^7$ kWh/an, $9,59 \times 10^7$ kWh/an, et $9,02 \times 10^7$ kWh/an, $9,29 \times 10^7$ kWh/an, $7,05 \times 10^7$ kWh/an et $7,58 \times 10^7$ kWh/an respectivement. Le surplus d'énergie est de 18%, 35%, 25 %, 25% ,5% et 3% respectivement, On remarque que le surplus d'énergie est plus faible pour les deux derniers systèmes (Eolien-DG-Batt et Eolien -DG) que pour les autres systèmes, car dans ce cas, l'énergie produite est mieux consommée.

Pour le cas optimal, les contributions éoliennes et photovoltaïques représentent 28% et 72% de la production renouvelable, respectivement.

La répartition de la production annuelle d'électricité est illustrée à **La Figure V.12**, la contribution de la production photovoltaïque atteint 53% de la production totale. Viennent ensuite, la production du générateur diesel (26%) et enfin la production éolienne avec 21%.



La Figure V.12 : Pourcentage de différentes puissances pendant une année de la configuration optimale

Une simulation des différentes puissances produites par la configuration optimale obtenue du système multi-source PV-Eolien-DG-Batt, effectuée sur une période d'une année, est présentée dans la **Figure V.13**.

- ✓ Concernant l'état de charge des batteries, il est important de signaler que tout au long de l'année, celui-ci est toujours compris entre 15% (batteries profondément déchargées) et 100% (batteries pleinement chargées) comme le montre la **Figure V.13**, ce qui respecte l'objectif que nous avons fixé au niveau de la gestion de la batterie.
- ✓ On constate que le nombre de marche / d'arrêt du générateur diesel dépend de l'état de charge de la batterie.

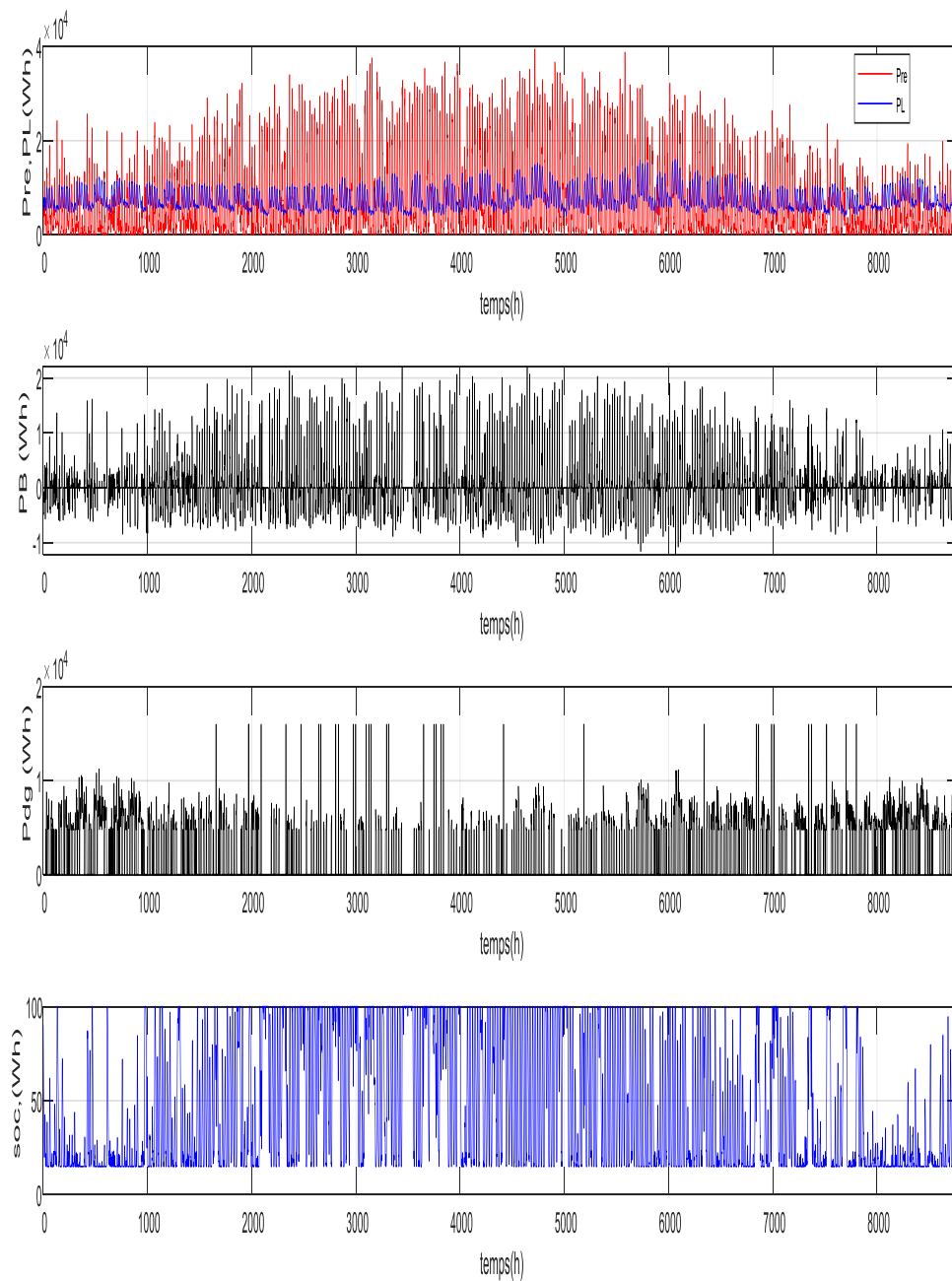


Figure V.13 : L'évolution des puissances $P_{RE}(t)$, $P_L(t)$, $P_B(t)$, $P_{DG}(t)$ et de l'état de charge de batteries en % (SOC) pendant une année

Une simulation des différentes puissances produites par la configuration optimale obtenue du système multi-sources PV-Eolien-DG-Batt, effectuée sur une période de 15 jours, est présentée dans la **Figure V.14**.

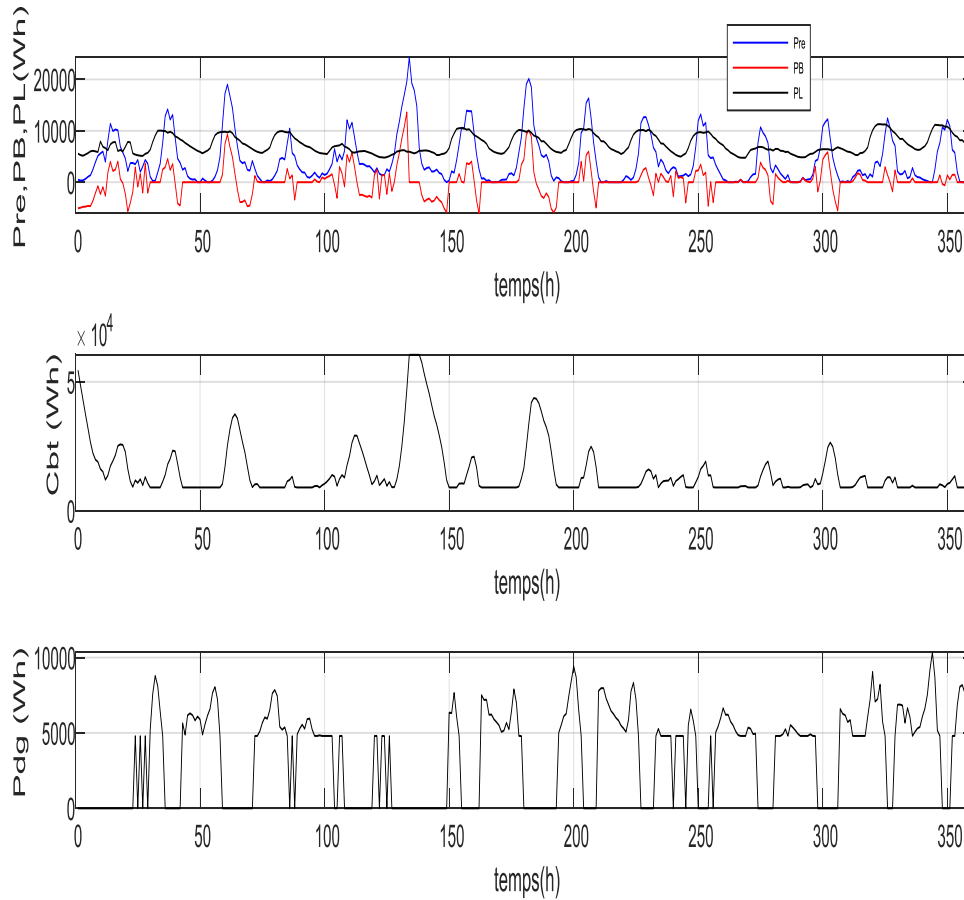


Figure V.14 : Puissances produites par les ressources renouvelables $P_{RE}(t)$, demandées par le consommateur $P_L(t)$, d'entrée / sortie du banc de batteries $P_B(t)$, et la puissance produite par le générateur diesel $P_{DG}(t)$

On peut vérifier d'après la **Figure V.14** que :

- ✓ Lorsque la puissance $P_{RE}(t)$ est supérieure à $P_L(t)$, le banc de batteries se charge ($P_B(t) > 0$) et se décharge ($P_B(t) < 0$) dans le cas contraire ;
- ✓ Le générateur diesel se met en marche quand la puissance $P_{RE}(t)$ est inférieure à $P_L(t)$ et les batteries sont déchargées, le générateur diesel est utilisé pour couvrir le déficit d'énergie ;
- ✓ De plus, le DG ne fonctionne jamais en dessous de la valeur minimale, qui est 30% de sa puissance nominale ;
- ✓ Dans tous les cas, l'état de charge de batteries ne dépasse jamais la valeur maximale et ne peut jamais être inférieur à la valeur minimale admissible.

V.6 Conclusion

La méthodologie de dimensionnement mono-objectif de système multi-sources proposée dans le cadre de ce travail est appliquée afin de proposer des solutions optimales encore plus réalistes pour l'électrification en Algérie.

Les conclusions que nous pouvons tirer de cette étude sont les suivantes :

- ✓ Le facteur d'énergie renouvelable (RF) influe le coût d'investissement total (STC).
- ✓ La qualité du potentiel énergétique disponible sur un site donné est l'un des paramètres influençant les dimensions des systèmes.
- ✓ Le système multi-sources PV-Eolien-DG-Batt est avantageux à cause de son faible impact environnemental et son coût économique raisonnable, son coût est inférieur à celui du cas où la source d'énergie est composée d'une seule source d'énergie, soit des éoliens ou panneaux photovoltaïques.
- ✓ L'utilisation de batteries peut réduire le STC du système, les systèmes qui contiennent les batteries ont un coût inférieur à celui du cas où les systèmes ne contiennent pas des batteries.
- ✓ L'utilisation de la batterie a un impact sur la réduction des heures de fonctionnement du générateur diesel, ce qui influe la production de CO₂ dans l'environnement.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans cette thèse consiste à élaborer une stratégie de commande et d'optimisation d'un système multi-sources, destiné à alimenter un site isolé. Notre but est d'optimiser un système énergétique, au moindre coût d'investissement (STC) et au maximum de pénétration de l'énergie renouvelable.

Pour résumer le bilan de ce travail, nous citons les principales étapes de notre contribution :

Nous avons présenté des généralités sur les différents systèmes multi-sources à sources d'énergie renouvelables, où la combinaison de deux ou plusieurs ressources énergétiques renouvelables est faite avec et/ou sans un élément de stockage et aussi avec et/ou sans source conventionnelle.

Ensuite, nous présentons une formulation pour notre problématique. Le travail a consisté, à partir des caractéristiques, d'un site donné (ressources disponibles, besoins énergétiques). L'étude a été effectuée à l'aide d'un programme élaboré sous MATLAB, en vue de faciliter l'analyse du problème d'optimisation pour différents scénarios et d'étudier de diverses configurations. De plus, quelques hypothèses ont été prises pour mener à bien cette simulation.

Les résultats obtenus montrent:

- ✓ L'impact du RF sur le STC et sur le choix de la meilleure configuration.
- ✓ L'adaptabilité des modèles utilisées et de la méthode proposée.
- ✓ L'importance du potentiel de l'utilisation du système multi-sources.
- ✓ La complémentarité entre l'éolienne et le photovoltaïque.

Enfin, les résultats d'analyses peuvent être utilisés pour aider les concepteurs dans la sélection des composants pour le système désiré aux fins de former les décisions politiques et les décisions de planification en raison du fait que le choix du système multi-sources constitue un moyen très économique pour l'électrification des sites isolés.

Comme perspectives, a long terme, nous prévoyons d'améliorer le travail de diverses manières, à savoir :

- ✓ Amélioration des stratégies de contrôle des sources d'énergie, prise en compte d'autres critères technologiques, économiques, sociopolitiques et environnementaux.
- ✓ L'utilisation d'un autre algorithme, comme le PSO par exemple, va permettre de comparer les résultats en termes de valeurs finales ou bien en termes de temps de calcul.
- ✓ Etudier l'influence d'ajouter d'autres coûts comme le coût du convertisseur.
- ✓ L'étude de l'optimisation multi-objectif d'un système multi-sources, afin de poursuivre de nouveaux objectifs a permis de montrer l'influence de plusieurs paramètres comme la diminution des émissions de CO₂.
- ✓ L'étude de l'influence des variations des potentiels éolien et solaire dans différentes régions sur l'optimisation.
- ✓ L'architecture de système multi-sources peut être étendue avec plusieurs types d'énergies renouvelables ainsi que les formes de stockage.
- ✓ Rajouter un électrolyseur pour produire de l'hydrogène directement sur le site en se servira de surplus d'énergie.
- ✓ Mise en place d'un banc d'essai pour émuler le fonctionnement du système multi-sources et analyser son comportement.

Références

- [1]. Minh Huynh Quang. Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé. Automatique. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2013
- [2]. Global Energy Statistical Yearbook 2017. Enerdata. <https://www.enerdata.net/>
- [3]. Observ'ER. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. Collection chiffres et statistiques. Quinzième inventaire - Édition 2013
- [4]. Renewable capacity highlights. IRENA, 2018.
- [5]. Bénéfices économiques d'un renforcement de la coopération des échanges au Maghreb. Rapport définitif, Juin 2010, SOFRECO
- [6]. Site officiel du SONELGAZ, <http://www.Sonelgaz.dz>.
- [7]. <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/energie-renouvelable.pdf>
- [8]. <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels>
- [9]. Guide des énergies renouvelables, Ministère de l'Énergie et des Mines, Edition 2007.
- [10]. https://portail.cder.dz/IMG/pdf/Programme_des_energies_renouvelables_et_de_l_efficacite_energetique_FR.pdf
- [11]. https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_photovolta%C3%AFque
- [12]. BELHOUR Souad. Elaboration d'une stratégie optimale pour l'exploitation combinée des énergies renouvelables. Energétique. Université des Frères Mentouri-Constantine 1. 2016
- [13]. ABOUDA Salim. Contribution a la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage. Thèse de doctorat en co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax. 2015
- [14]. CABAL Cedric. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. Micro and nanotechnologies/Microélectroniques. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008
- [15]. www.techno-science.net
- [16]. BELFKIRA Rachid. Dimensionnement et optimisation de centrales hybrides de production d'énergie électrique a base d'énergies renouvelables: application aux sites isolés. Thèse de Doctorat a l'Université du Havre, 2009.
- [17]. <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/12/>
- [18]. www.energies-renouvelables.org

- [19]. BOUKHEZZAR Boubekur. Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable. *Automatique / Robotique*. Université Paris Sud - Paris XI, 2006.
- [20]. Y. Amirat, M. Benbouzid, B. Bensaker, and R. Wamkeue. The State of the Art of Generators for Wind Energy Conversion Systems. *Electromotion*, vol. 14, no. 4, pp. 163–172, 2007.
- [21]. Duc Hoan Tran. Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive: analyse de robustesse, validation expérimentale. *Energie électrique*. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2010.
- [22]. Lila Croci. Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs. *Automatique*. Université de Poitiers, 2013
- [23]. Alioune Badara MBOUP. Commande d'un système de production d'énergie électrique multi-sources: application aux sites isolés Thèse de Doctorat à Université du Havre et Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2011.
- [24]. José Luis Rodríguez Amenedo. Análisis Dinámico y Diseño del Sistema de Control de Aeroturbinas de Velocidad Variable con Generador Asíncrono de Doble Alimentación. Thèse Doctorale à l'Université Carlos III de Madrid, 2000.
- [25]. BELGHITRI houda. Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque. Mémoire De Magister, Université Abou-BakrBelkaid de Tlemcen, 2010.
- [26]. N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme. Technologie des Systèmes Eoliens – Intégration dans les Réseaux Electriques. *la Revue 3EL*, N° 39, 2004.
- [27]. E. HAU, *Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics* . Editions Springer 2000.
- [28]. Olivier Gergaud. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associe a un accumulateur. *Electric power*. Ecole normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2002
- [29]. B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, Etat de l'art dans l'aérogénérateur, L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. NOVELECT - ECRIN, mai 2002, pp.97-154
- [30]. Ludmil Stoyanov. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. *Electric power*. Université Pascal Paoli, 2011.

- [31]. R. Luna-Rubio, Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies, *Sol. Energy*, vol. 86, pp. 1077–1088, 2012.
- [32]. Rodolfo Dufo López. Dimensionado y control óptimos de sistemas híbridos aplicando algoritmos evolutivos , Thèse de Doctorat, Université de Saragosse, Espagne, avril 2007.
- [33]. R. Al Badwawi, M. Abusara, and T. Mallick. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System. *Smart Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 127–138, 2015.
- [34]. A. Chauhan and R. P. Saini. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 99–120, 2014.
- [35]. S. Phrakonkham, J. Y. le Chenadec, D. Diallo, G. Remy, and C. Marchand. Reviews on micro-grid configuration and dedicated hybrid system optimization software tools: Application to Laos. *Eng. J.*, vol. 14, no. 3, pp. 15–34, 2010
- [36]. Abdoulaye Kébé. Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Sénégal. Université Paris Sud - Paris XI, 2013.
- [37]. B. Wichert, PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation – A review of current practice and future developments, *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol.1, No. 3, pp.209-228, 1997.
- [38]. M.Ashari, C.V. Nayar, An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)- diesel-battery hybrid power system , *Renew Energy*, vol. 66, No. 1, pp. 1-9,1999
- [39]. I. Kamwa, B. Saulnier and R. Reid, Modélisation, simulation et régulation d'un réseau Eolien/diesel autonome, Rapport IREQ4340, Institut de recherche de l'Hydro-Quebec Varennes, Québec, 1989.
- [40]. J. G. McGowan, J.F.Manwell, Hybrid/PV/diesel system experiences, *Renew Energy*, vol. 66, pp. 928-933, 1999
- [41]. J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L.Rogers, *Wind energy explained*, Wiley, 2002,
- [42]. Rodolfo Dufo-Lopez, Jose L. Bernal-Agustin. Design and control strategies of PV-diesel systems using genetic algorithms. Associate Editor Hansjorg Gabler, 2004.
- [43]. Maria E. Torres-Hernandez Hierarchical Control of Hybrid Power Systems. *IEEE International Power Electronics Congress* 2008.

-
-
- [44]. B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 2, pp. 367–375, 1996.
- [45]. Dhaker Abbas. Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome. Génie électrique. Université de Poitiers, 2012.
- [46]. R. Belfkira, C. Nichita, P. Reghem, and G. Barakat. Modeling and optimal sizing of hybrid renewable energy system. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC, 2008.
- [47]. R. Belfkira, C. Nichita, P. Reghem, and G. Barakat. Design study and optimization of a grid independent wind/pv/diesel system. 13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE, Barcelone, 2009, pp. 1_10.
- [48]. M. El Mokadem, Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site isolé. Problématique liée aux fluctuations et variations d'énergie au point de couplage, Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2006.
- [49]. A. B. Mboup, F. Guerin, P. A. Ndiaye, D. Lefebvre Three stage control strategy for hybrid electrical energy systems. The International Federation of Automatic Control (IFAC PP&PSC)- Tampere (Finland) 6-8 July 2009.
- [50]. A. B. Mboup, P. A. Ndiaye, F. Guerin, and D. Lefebvre. Control design for hybrid electrical energy systems based on dc/dc converters duty cycle value. *Ecologic Vehicule Renewable Energies EVER*, Monaco, 2009.
- [51]. S. Zerkaoui, A.B. Mboup, D. Lefebvre, F. Guerin, Sliding mode based control strategy for multi-sources renewable energy system. *Electric Power and Energy Conversion Systems*, 2009. EPECS '09. IEEE. pp1–6: 2009
- [52]. M. A. Tankari, M.B. Camara, B. Dakyo, and C. Nichita. Attenuation of power fluctuations in wind diesel hybrid system - using ultracapacitors and batteries. *IEEE XIX International Conference on Electrical Machines ICEM*, Rome, Italy, 2010.
- [53]. M. A. Tankari, M.B. Camara, B. Dakyo, and C. Nichita. Ultracapacitors and batteries integration in wind energy hybrid system - frequencies distribution method. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, No. 2, Vol. 5, 2010.
- [54]. Ionel Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [55]. Y. Ohsawa, S. Emurd, K. Arai, Optimal operation of photovoltaic/diesel power generation system by neural network, proceeding of the Second International Forumon

Applications of Neural Networks to Power Systems, 1993, ANNPS '93, 19-22 April 1993. pp. 99-103.

[56].C. D. Barley, C. B. Winn, L. Flowers, H. J. Green, Optimal control of remote hybrid powers systems, Part I: simplified model, In Proceeding of WindPower'95, Washington DC.

[57]. O. Skarstein, K. Ullen, Design consideration with respect to long-term Diesel saving in wind/Diesel plants, Wind Engineering, Vol. 13, No. 2. 1989.

[58].C. D. Barley, C. B. Winn, Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems, Solar Energy 1996, Vol 58 , pp. 165-179.

[59].R. Dufo-López, J. L. Bernal-Agustín, J. Contreras, Optimization of control strategies for stand-alone renewable systems with hydrogen storage, Renewable Energy, Vol. 32, Issue 7, pp. 1102-1126, June 2007.

[60]. Sengprasong Phrakonkham. Contribution au pré dimensionnement et à l'optimisation des sites de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Laos. Physique. Université Paris-Sud, 2012.

[61].Rochdi BOUCHEBBAT. Algorithmes bio-inspirés appliqués pour la commande des systèmes. AUTOMATIQUE. Université de Skikda,2017

[62]. Mohamed Mladjao Mouhammad Al Anfaf. Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges. Génie des procédés. Université de Lorraine, 2016.

[63]. D. Turcotte, M. Ross, F Sheriff . Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: status and needs, PV Horizon: Workshop on Photovoltaic Hybrid System, Montreal, 10 Sept. 2001

[64].<https://analysis.nrel.gov/homer/>

[65]. V. Demeusy Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque / groupe électrogène avec le logiciel HOMER
http://homerenergy.com/pdf/HOMER_mode_demploi.pdf
http://www.ecreee.org/sites/default/files/eventatt/homergettingstartedguide_french_homer_mode_demploi.pdf

[66]. S. Phrakonkham Review of Micro-Grid Configuration and Hybrid System Optimization Software Tools Application to Laos, 2009

[67] H. J. Green, J. Manwell, HYBRID2 – A versatile model of the performance of hybrid power systems, WindPower'95, Washington DC, March 27-30, 1995

[68]. <http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/>

-
-
- [69]. J. F. Manwell, A. Rogers, G. Hayman, C. T. Avelar, J. G. McGowan, Hybrid2 – a hybrid system simulation model, Theory manual, National Renewable Energy Laboratory, Subcontrat No. XL-22226-2-2 juin 2006
- [70]. R. Dufo-lópez and J. L. Bernal-agustín, Design and Control Strategies of PV-Diesel Systems Using Genetic Algorithms, *Solar Energy*, vol. 79, no. 1, pp. 33–46, 2005.
- [71]. (<http://www.fh-konstanz.de/>)
- [72]. J. L. Bernard - Agustín, R. Dufo-Lopez Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) pp. 2111–2118
- [73]. (<http://wwwcomm.murdoch.edu.au/synergy/9803/rapsim.html>)
- [74]. T. R. Morgan, R. H. Marshall, B. J. Brinkworth, ARES a refined simulation program for the sizing an optimization of autonomous hybrid energy systems, *Solar Energy*
- [75]. S. Sinha and S. S. Chandel, Review of software tools for hybrid renewable energy systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 192–205, 2014.
- [76]. G. Rohani and M. Nour, Techno-economical analysis of stand-alone hybrid renewable power system for Ras Musherib in United Arab Emirates, *Energy*, vol. 64, pp. 828–841, 2014.
- [77]. F. Fazelpour, N. Soltani, and M. A. Rosen, Economic analysis of standalone hybrid energy systems for application in Tehran, Iran, *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 19, pp. 7732–7743, 2016.
- [78]. A. Ataei, R. Rashidi, M. Nedaei, and E. Kurdestani, Techno-economic viability of a hybrid wind and solar power system for electrification of a commercial building in Shiraz, Iran, *Adv. Energy Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 251–263, 2015.
- [79]. Yann Collette, Patrick Siarry, *Optimisation multi-objectif*, Livre, EYROLLES.
- [80]. F. Huneke, J. Henkel, J. A. Benavides González, and G. Erdmann, Optimisation of hybrid off-grid energy systems by linear programming, *Energy. Sustain. Soc.*, vol. 2, no. 7, pp. 1–19, 2012.
- [81]. O. Ekren and B. Y. Ekren, Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology, *Appl. Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 1086–1101, 2008.
- [82]. O. Ekren, B. Y. Ekren, and B. Ozerdem, Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage - A case study, *Appl. Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1043–1054, 2009.

- [83].T. A. Nguyen, M. L. Crow, and I. Fellow, Optimization in Energy and Power Management for Renewable-Diesel Microgrids Using Dynamic Programming Algorithm, Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Cyber Technol. Autom. Control Intell. Syst. May 27-31, 2012, Bangkok, Thail., pp. 11–16.
- [84].S. Belhour and A. Zaatri, Optimal repartition of hybrid renewable energy Pv and wind systems, Glob. Summit Comput. Inf. Technol. Sousse, Tunis. from 14-16 June, , 2014.
- [85].A. Rouhani, M. Jabbari, and S. Honarmand, A Teaching Learning Based Optimization for Optimal Design of a Hybrid Energy System, Int. J. Electr. Comput. Energ. Electron. Commun. Eng., vol. 9, no. 8, pp. 737–744, 2015.
- [86].H. Yang, W. Zhou, L. Lu, and Z. Fang, Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar – wind system with LPSP technology by using genetic algorithm, Elsevier Journal of Solar Energy, vol. 82, no. 4, pp. 354–367, 2008.
- [87].M. Amer, a. Namaane, and N. K. M’Sirdi, Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) Using PSO for Cost Reduction, Energy Procedia, vol. 42, pp. 318–327, 2013.
- [88]. Y. A. Katsigiannis and P. S. Georgilakis, Optimal sizing of small isolated hybrid power systems using tabu search, J. Optoelectron. Adv. Mater., vol. 10, no. 5, pp. 1241–1245, 2008.
- [89].O. Ekren and B. Y. Ekren, Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing, Appl. Energy, vol. 87, no. 2, pp. 592–598, 2010.
- [90].Y. A. Katsigiannis, P. S. Georgilakis, and E. S. Karapidakis, Hybrid Simulated Annealing-Tabu Search Method for Optimal Sizing of Autonomous Power Systems With Renewables, Sustain. Energy, IEEE Trans., vol. 3, no. 3, pp. 330–338, 2012.
- [91].Y. A. Katsigiannis, F. D. Kanellos, and S. Papaefthimiou, A software tool for capacity optimization of hybrid power systems including renewable energy technologies based on a hybrid genetic algorithm tabu search optimization methodology, Energy Syst., vol. 7, no. 1, pp. 33–48, 2014.
- [92].S. K. Bhargava, S. S. Das, and P. Paliwal, Multi-Objective Optimization for Sizing of Solar-Wind Based Hybrid Power System : A Review, vol. 3, no. 3, pp. 195–201, 2014.
- [93].S. Sinha and S. S. Chandel, Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic – wind based hybrid energy systems, vol. 50, pp. 755–769, 2015.

- [94].Y. Sawle, S. C. Gupta, and A. K. Bohre, PV-wind hybrid system : A review with case study, *Cogent Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–31, 2016.
- [95]. V. Khare, S. Nema, and P. Baredar, Solar – wind hybrid renewable energy system : A review, *Rev. Sustain. Energy*, no. May, pp. 23–33, 2016.
- [96].V. O. Okinda and N. A. Odero, A review of techniques in optimal sizing of hybrid renewable energy systems, *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 11, pp. 153–163, 2015.
- [97]. R. Belfikra, O. Hajji, C. Nichita and G. Barakat, Optimal sizing of stand-alone hybrid wind/PV system with battery storage, 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, , Aalborg, Denmark.
- [98].R. Belfkira, L. Zhang, and G. Barakat, Optimal sizing study of hybrid wind / PV / diesel power generation unit, *Sol. Energy*, vol. 85, no. 1, pp. 100–110, 2011.
- [99].L. Zhang, R. Belfkira and G. Barakat, Wind/PV/diesel energy system: Modelling and sizing optimization, *Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications, (EPE 2011)*, Birmingham, United Kingdom.
- [100].L. Zhang, G. Barakat and A. Yassine, Design and optimal sizing of hybrid PV/wind/diesel system with battery storage by using DIRECT search algorithm, in *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2012, September, Novi Sad, Serbia.
- [101]. L. Zhang, G. Barakat, and A. Yassine, Deterministic optimization and cost analysis of hybrid PV/wind/battery/diesel power system, *Int. J. Renew. ENERGY Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 686–696, 2012.
- [102].E. Koutroulis and D. Kolokotsa, Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic / wind-generator systems using genetic algorithms, *Solar Energy*, vol. 80, no. 9, pp. 1072–1088, 2006.
- [103].T. Senjyu, D. Hayashi, A. Yona, N. Urasaki, and T. Funabashi, Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy, *Renew. Energy*, vol. 32, no. 11, pp. 1917–1933, 2007.
- [104].Y. A. Katsigiannis and P. S. G. E. S. Karapidakis, Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables, *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 5, pp. 404–419, 2010.
- [105].B. O. Bilal, V. Sambou, P. A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, and M. Ndongu, Optimal design of a hybrid solar e wind – battery system using the minimization of the annualized

cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP), *Renewable Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 2388–2390, 2010.

[106]. S. M. M. Tafreshi, Optimal Unit Sizing of Distributed Energy Resources in MicroGrid Using Genetic Algorithm. in *Electrical Engineering (ICEE), 2010 18th Iranian Conference on*, Isfahan, Iran, 2010.

[107]. B. O. Bilal, V. Sambou, P. A. Ndiaye, and C. M. F. Kébé, Multi-objective Design of PV-Wind-Batteries Hybrid Systems by Minimizing the Annualized Cost System and the Loss of Power Supply Probability (LPSP), *IEEE IntConfIndTechnol (ICIT)*, Cape Town, South Africa, pp. 861–868, 2013.

[108]. B. O. Bilal, D. Nourou, C. M. F. Kébé, V. Sambou, P. A. Ndiaye, and M. Ndongo, Multi-objective optimization of hybrid PV / wind / diesel / battery systems for decentralized application by minimizing the levelized cost of energy and the CO₂ emissions, *International Journal of Physical Sciences*, vol. 10, no. 5, pp. 192–203, 2015.

[109]. D. Abbes, A. Martinez, and G. Champenois, Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems, *Math. Comput. Simul.*, vol. 98, pp. 46–62, 2014.

[110]. A. M. Eltamaly and A. A. Al-shamma, Optimal configuration for isolated hybrid renewable energy systems, *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 4, 2016.

[111]. S. K. Ramoji, B. B. Rath, and D. V. Kumar, Optimization of Hybrid PV / Wind Energy System Using Genetic Algorithm (GA), *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 29–37, 2014.

[112]. V. O. Okinda and N. A. Odero, Modelling , Simulation and Optimal Sizing of a Hybrid Wind , Solar PV Power System in Northern Kenya, *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 6, no. 4, pp. 1199-1211, 2016.

[113]. G. Merei, C. Berger, and D. U. Sauer, Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm, *Sol. Energy*, vol. 97, pp. 460–473, 2013.

[114]. A. A. Al-Shamma'a and K. E. Addoweesh, Techno-economic optimization of hybrid power system using genetic algorithm, *Int. J. ENERGY Res.*, vol. 38, pp. 1608–1623, 2014.

[115]. H. Suryatmojo, T. Hiyama, A. a Elbaset, and M. Ashari, Optimal Design of Wind-PV-Diesel-Battery System using Genetic Algorithm Optimal Design of Wind-PV-Diesel-Battery System using Genetic Algorithm, *IEEJ Trans. Power Energy*, vol. 129, no. 3, pp. 413–420, 2009.

- [116].B. J. Abdelhak, E. Najib, H. Abdelaziz, F. Hnaïen, and F. Yalaoui, Optimum sizing of hybrid PV/wind/battery using Fuzzy-Adaptive Genetic Algorithm in real and average battery service life, 2014 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, SPEEDAM 2014, Ischia, Italy, pp. 871–876, 2014.
- [117].A. Dali, A. Bouharchouche, and S. Diaf, Parameter identification of photovoltaic cell / module using genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO), Proceeding 3rd Int. Conf. Control. Eng. Inf. Technol. CEIT'2015 Tlemcen, Alger. 25-27 May, 2015.
- [118]. J. Kennedy and R. Eberhart, Particle swarm optimization. Proc. IEEE International Conf. on Neural Networks (Perth, Australia), IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1995, p. 1942-1948
- [119].K. Kusakana and H. J. Vermaak, A survey of particle swarm optimization applications for sizing hybrid renewable power systems, Adv. Sci. Lett., vol. 19, no. 8, pp. 2463–2467, 2013.
- [120].F. Jahanbani and G. H. Riahy, Optimum Design of a Hybrid Renewable Energy System, Renew. Energy - Trends Appl., pp. 231–250, 2011.
- [121]. M. A. Yazdanpanah-Jahromi, S. Barakati, and S. Farahat, An efficient sizing method with suitable energy management strategy for hybrid renewable energy systems, Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 24, no. 10, pp. 1473–1492, 2013.
- [122].A. H. Bagdadee, Using A Battery Storage Wind / PV Hybrid Power Supply System Based Stand-Alone PSO To Determine The Most Appropriate ., Am. J. Eng. Res., vol. 3, no. 8, pp. 234–242, 2014.
- [123].L. K. Panwar, K. S. Reddy, and R. Kumar, Eco-economic sizing of autonomous hybrid energy system (AHES) using particle swarm optimization (PSO), Int. Conf. Adv. Green Energy, ICAGE 2014,India. December, pp. 233–238, 2014.
- [124].G. N. Ram, J. D. Shree, and A. Kiruthiga, Cost Optimization of Stand Alone Hybrid Power Generation System using PSO, Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng., vol. 2, no. 8, pp. 4048–4057, 2013.
- [125].A. Maleki, Optimization of grid independent diesel-based hybrid system for power generation using improved particle swarm optimization algorithm, Int. J. Smart Electr. Eng., vol. 4, no. 1, pp. 29–36, 2015.
- [126].M. Pirhaghshenasvali and B. Asaei, Optimal modeling and sizing of a practical hybrid wind/PV/diesel generation system, Proc. 5th Power Electron. Drive Syst. Technol. Conf, Tehran, Iran, pp. 506–511, 2014.

-
-
- [127].M. Bashir, S. Member, and G. Branch, Optimal Sizing of Hybrid Wind / Photovoltaic / Battery Considering the Uncertainty of Wind and Photovoltaic Power Using Monte Carlo, Proc. 11th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. ,Venice ,May 2012.
- [128].M. Bashir and J. Sadeh, Size optimization of new hybrid stand-alone renewable energy system considering a reliability index, Proc. 11th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. ,Venice May 2012.
- [129].Y. Saber and G. K. Venayagamoorthy, Smart micro- grid optimization with controllable loads using particle swarm optimization, in Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE, Vancouver, 2013.
- [130].A. Navaeefard, S. M. M. Tafreshi, M. Barzegari, and A. J. Shahrood, Optimal sizing of distributed energy resources in microgrid considering wind energy uncertainty with respect to reliability, Proceeding IEEE Int. Energy Conf. Exhib. EnergyCon 2010, pp. 820–825.
- [130].A. Acakpovi, Performance Analysis of Particle Swarm Optimization Approach for Optimizing Electricity Cost from a Hybrid Solar , Wind and Hydropower, Int. J. Renew. Energy Res., vol. 6, no. 1, 2016.
- [132].B. Tudu, P. Roy, S. Kumar, and D. Pal, Techno-Economic Feasibility Analysis of Hybrid Renewable Energy System Using Improved Version of Particle Swarm Optimization, Swarm, Evol. Memetic Comput: Proceeding Third Int. Conf. SEMCCO 2012, Bhubaneswar, India, December 20-22, 2012., vol. 7677, pp. 116–123, 2012.
- [133].H. Borhanazad, S. Mekhilef, V. GounderGanapathy, M. Modiri-Delshad, and A. Mirtaheri, Optimization of micro-grid system using MOPSO, Renew. Energy, vol. 71, pp. 295–306, 2014.
- [134].D. Karaboga An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical report, Computer Engineering Department, Engineering Faculty, Erciyes University, 2005.
- [135].A. F. Mohamed, M. M. Elarini, and A. M. Othman, A new technique based on Artificial Bee Colony Algorithm for optimal sizing of stand-alone photovoltaic system, J. Adv. Res., vol. 5, no. 3, pp. 397–408, 2014.
- [136].D. Karaboga, B. Gorkemli, C. Ozturk, and N. Karaboga, A comprehensive survey: Artificial bee colony (ABC) algorithm and applications, Artif. Intell. Rev., vol. 42, no. 1, pp. 21–57, 2014.

- [137].M. R. Javadi, K. Mazlumi, and A. Jalilvand, Application of GA, PSO and ABC in optimal design of a stand-alone hybrid system for north-west of Iran, Proceeding 7th Int. Conf. Electr. Electron. Eng. (ELECO 2011) Bursa, TURKEY, pp. 203–210, 2011.
- [138].H. Nasiraghdam and S. Jadid, Optimal hybrid PV/WT/FC sizing and distribution system reconfiguration using multi-objective artificial bee colony (MOABC) algorithm, *Sol. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 3057–3071, 2012.
- [139].Z.W Geem, Optimal design of water distribution networks using harmony search. Ph.D. Thesis, Korea University.2000.
- [140].D. Manjarres , I. Landa-Torres , S. Gil-Lopez , J. Del Ser, M.N. Bilbao, S. Salcedo-Sanz, Z.W. Geem, A survey on applications of the harmony search algorithm, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, no. 8, pp. 1818–1831, 2013.
- [141].A. Askarzadeh, Developing a discrete harmony search algorithm for size optimization of wind-photovoltaic hybrid energy system, *Sol. Energy*, vol. 98, no., pp. 190–195, 2013.
- [142].A. Maleki and A. Askarzadeh, Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 7, pp. 147–153, 2014.
- [103].A. Maleki and F. Pourfayaz, Sizing of stand-alone photovoltaic/wind/diesel system with battery and fuel cell storage devices by harmony search algorithm, *J. Energy Storage*, vol. 2, pp. 30–42, 2015.
- [144].A. Chauhan and R. P. Saini, Discrete harmony search based size optimization of Integrated Renewable Energy System for remote rural areas of Uttarakhand state in India, *Renew. Energy*, vol. 94, pp. 587–604, 2016.
- [145].O. Erdinc and M. Uzunoglu, Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 3, pp. 1412–1425, 2012.
- [146]. C. Blum, Ant colony optimization: Introduction and recent trends, *Phys. Life Rev.*, vol. 2, no. 4, pp. 353–373, 2005.
- [147].A. Menshsari, M. Ghiamy, M. Mohammad, M. Mousavi, and H. Asadi, Optimal design of hybrid water-wind-solar system based on hydrogen storage and evaluation of reliability index of system using ant colony algorithm, *Int. Res. J. Appl. Basic Sci.*, vol. 4, no. 11, pp. 3582–3600, 2013.
- [148].P. Suhane and S. Rangnekar, Optimal Sizing of Hybrid Energy System using Ant Colony Optimization, *Int. J. Renew. ENERGY Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 936–942, 2014.

- [149].L. Xu, X. Ruan, C. Mao, B. Zhang, and Y. Luo, An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 774–785, 2013.
- [150].A. Fetanat and E. Khorasaninejad, Size optimization for hybrid photovoltaic–wind energy system using ant colony optimization for continuous domains based integer programming, *Appl. Soft Comput.*, vol. 31, pp. 196–209, 2015.
- [151].W. Dong, Y. Li, and J. Xiang, Sizing of a stand-alone Photovoltaic / Wind Energy System with Hydrogen and Battery Storage based on Improved Ant Colony Algorithm, *Proc. 28th Chinese Control Decis. Conf. (2016 CCDC) China*, pp. 4461–4466.
- [152].X.-S. Yang and Suash Deb, Cuckoo Search via Lévy Flights, *Proc. 2009 World Congr. Nat. Biol. Inspired Comput. (NaBIC 2009)*, India, pp. 210–214.
- [153].X.-S. Yang and S. Deb, Engineering Optimisation by Cuckoo Search, *Int. J. Math. Model. Numer. Optim.*, vol. 1, no. 4, pp. 330–343, 2010.
- [154].S. Sanajaoba and E. Fernandez, Maiden application of Cuckoo Search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System, *Renew. Energy*, vol. 96, pp. 1–10, 2016.
- [155].O. Nadjemi, T. Nacer, A. Hamidat, and H. Salhi, Optimal hybrid PV/wind energy system sizing: Application of cuckoo search algorithm for Algerian dairy farms, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016.
- [156].S. A. Nowdeh and A. Dastjerdi, Hybrid System Optimal Designing Using New Ant Lion Optimization Algorithm Considering Cost / Reliability Evaluation, *proceeding 1st Int. Conf. New Res. Achiev. Electr. Comput. Eng. Hybrid*, 2016.
- [157].L. S. Tarazouei, L. F. Tarazouei, and M. Ghiamy, Optimal Design of a Hybrid Solar -Wind-Diesel Power System for Rural Electrification Using Imperialist Competitive Algorithm, *Int. J. Renew. Energy Res. IJRER*, vol. 3, no. 2, pp. 403–411, 2013.
- [158].S. A. Nowdeh, I. Faraji, M. J. Hadidian, and P. Nazarian, Optimization of Hybrid PV/Wind/FC System Using Hunting Search Algorithm, *Proceding 6th Iran. Conf. Electr. Electron. Eng. (ICEEE2014)*, Iran, 2014.
- [159]. A. Maleki and A. Askarzadeh, Artificial bee swarm optimization for optimum sizing of a stand-alone PV/WT/FC hybrid system considering LPSP concept, *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 227–235, 2014.
- [160].M. J. Hadidian-Moghaddam, S. Arabi-Nowdeh, and M. Bigdeli, Optimal sizing of a stand-alone hybrid photovoltaic/wind system using new grey Wolf optimizer considering reliability, *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 3, 2016.

-
-
- [161].B. Tudu, S. Majumder, K. K. Mandal, and N. Chakraborty, Optimal unit sizing of stand-alone renewable hybrid energy system using bees algorithm, Proc. Int. Conf. Energy, Autom. Signal, ICEAS - 2011, Bhubaneswar, India, pp. 600–605.
- [162].Z. W. Geem, Size optimization for a hybrid photovoltaic-wind energy system, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 42, no. 1, pp. 448–451, 2012.
- [163].D. Sharma, P. Gaur, and A. P. Mittal, Comparative Analysis of Hybrid GAPSO Optimization Technique With GA and PSO Methods for Cost Optimization of an an Off-Grid Hybrid Energy System, Energy Technol. Policy An Open Access J., vol. 1, no. 1, pp. 106–114, 2014.
- [164].A. Askarzadeh, A discrete chaotic harmony search-based simulated annealing algorithm for optimum design of PV / wind hybrid system, Sol. Energy, vol. 97, pp. 93–101, 2013.
- [165].S. Upadhyay and M. P. Sharma, A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 38, pp. 47–63, 2014.
- [166].A. H. Fathima and K. Palanisamy, Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 45, pp. 431–446, 2015.
- [167]. B. Bhandari, K. Lee, G. Lee, Y. Cho, and S. Ahn, Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems : A Review, vol. 2, no. 1, pp. 99–112, 2015.
- [168].A. Maleki and A. Askarzadeh, Comparative study of artificial intelligence techniques for sizing of a hydrogen-based stand-alone photovoltaic / wind hybrid system, Int. J. Hydrogen Energy, vol. 39, no. 19, pp. 9973–9984, 2014.
- [169]. A. Maleki and F. Pourfayaz, Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms, Sol. Energy, vol. 115, pp. 471–483, 2015.
- [170]. F. Bourennani, S. Rahnamayan, and G. F. Naterer, Optimal Design Methods for Hybrid Renewable Energy Systems, Int. J. Green Energy, vol. 12, pp. 148–159, 2015.
- [171]. A. M. Eltamaly, M. A. Mohamed, and A. I. Alolah, A novel smart grid theory for optimal sizing of hybrid renewable energy systems, Sol. Energy, vol. 124, pp. 26–38, 2016.
- [172]. S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions, Appl. Energy, vol. 85, no. 10, pp. 968–987, 2008.

- [173]. H. Suryoatmojo, A. A. Elbaset, F. A. Pamuji, D. C. Riawan, and M. Abdillah, Optimal Sizing and Control Strategy of Hybrid PV-Diesel-Battery Systems for Isolated Island , ADCONP Hiroshima 2014.
- [174]. Y. Sawle, S. C. Gupta, and A. K. Bohre, Socio-Techno-Economic Design of Hybrid Renewable Energy System Using Optimization Techniques, *Renew. Energy*, vol. 119, no. November, pp. 459–472, 2017.
- [175]. Ngoc AnLuu. Control and management strategies for a microgrid. Electric power. Université de Grenoble, 2014
- [176]. A. Ben Jemaa, A. Hamzaoui, N. Essounbouli, F. Hnaïen, and F. Yalawi, Optimum Sizing of Hybrid PV / Wind / Battery / Diesel System Considering Wind Turbine Parameters Using Genetic Algorithm, P2012 IEEE Int. Conf. Power Energy (PECon), 2-5 December 2012, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia.
- [177]. L. Ngoc An, T. Tran-Quoc, B. Seddik, Optimal design of an isolated photovoltaic-diesel-battery hybrid system by using an iterative algorithm, Generatiol Meeting IEEE PES, 2014.
- [178]. S. Upadhyay and M. P. Sharma, Development of hybrid energy system with cycle charging strategy using particle swarm optimization for a remote area in India, *Renew. Energy*, vol. 77, pp. 586–598, 2015.
- [179]. J. H. Holland, Adaptation in natural and artificial system, The University of Michigan Press, 1975.
- [180]. B. Ould Bilal. Mise en oeuvre de nouvelles approches d'optimisation multi-objectif de systèmes hybrides éolien-solaire-batterie-groupe électrogène. Sciences de l'ingénieur [physics]. ESP, UCAD, 2012.
- [181]. LABED SAID, Méthodes bio-inspirées hybrides pour la résolution de problèmes complexes 2013. Université Constantine 2
- [182]. https://www.globalpetrolprices.com/Algeria/diesel_prices/
- [183]. <http://www.andi.dz/index.php/fr/2013-01-02-16-40-57/raisons-pour-investir/136-commerce-exterieur/787-taux-de-change-moyen-da-principales-monnaies>

Liste des travaux scientifiques

1. Gaabour, A., Metatla, A., Kelaiaia, R. et al. Recent Bibliography on the Optimization of Multi-source Energy Systems Arch Computat Methods Eng (2018). <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9271-6>.
2. A.Gabour, A.Metatla, Optimal design and comparison between renewable energy, hybrid energy and non-renewable energy systems: case of skikda, algeria. In proceedings of Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution (ICEMAEP2016), October 30-31, 2016, Constantine, Algeria,
3. A. Gabour, A. Metatla, M. Medkour Optimal Design and Techno-Economic Analysis of PV–Battery and Diesel–Battery Power Systems for a Site in Algeria. International Conference on Technological Advances in Electrical Engineering (ICTAEE'16.), October October, 24-26,2016 Skikda, Algeria,
4. A. Gabour, A. Metatla Comparison Study Between Hybrid Renewable and Non-Renewable Energy Systems for a Site in Algeria with HOMER. The 9th International conference on electrical engineering and first workshop on robotics and controls (CEE2016), October 02-04 Batna, Algeria
- 5.Amina Gabour, Abderrezak Metatla, Optimum Configuration and a Comparison Study between Hybrid Renewable and Non-Renewable Energy Systems for a Site in Algeria Congr  annuel des Sciences et Technologies Appliqu es (CASTA-2016) 18-20Septembre 2016, Boumerdes, Algérie.
- 6.A. Gabour, A. Metatla Feasibility Analysis and Optimization of Renewable Energy, Hybrid Energy and Non-Renewable Energy Systems in Algeria. 3rd International Conference on Embedded Systems in Telecommunications and Instrumentation (ICESTI'16): October 24-26, 2016, Annaba, Algeria
- 7.Amina Gabour , Abderrezak Metatla, Genetic Single Objective Optimization For Sizing Of Renewable Hybrid Pv-Wind System, In Algeria. Journ e des Doctorants En Automatique,  lectronique,  nergies renouvelables et protection de l'environnement. (JDDOCS), Le 25 Mai 2017
8. Gabour Amina, Metatla Abderrezak, Optimization and Techno-economical analysis of stand-alone hybrid renewable power system in Skikda, Algeria.

International Conference on Nanomaterials and Renewable Energies(ICNRE 2018).
15-17 October 2018. Skikda, Algeria.

9. Gabour Amina, Metatla Abbderrezak, Optimization and Control Strategy of multi-sources system: Application to the Case of an Area in Algeria. The 3rdInternational Conference on Electromechanical Engineering (ICEE'2018), November 21-22, 2018, Skikda.