



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Democratic and popular republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of higher education and scientific research



Ziane Achour University of Djelfa
Faculty of Exact Sciences and Computer Science
Computer Science Department

جامعة زيان عاشور بالجلفة
كلية العلوم الدقيقة والإعلام الآلي
قسم الإعلام الآلي

Doctoral thesis

Field: Mathematics and Computer Science

Sector: Computer science

Specialty: mathematical optimization for signal processing and communication
networks

Presented by :

Mr. Ali KIDAR

Subject title:

***Contribution to the optimal study
of PV systems in steppe zones
using meta-heuristic methods***

Before the jury:

President	Mr. MESSELMY Farid	Professor	University of Djelfa
Supervisor	Mr. SAADI Slami	Professor	University of Djelfa
Co-supervisor	Mr. KOUZOU Abdellah	Professor	University of Djelfa
Examiner	Mr. AMEUR Aissa	MCA	University of Laghouat
Examiner	Mr. KADDOURI Ameer Miloud	MCA	University of Djelfa
Examiner	Mr. AIDJOULI Hocine	MCA	University of Djelfa
Invite	Mr. KIOUS Mechri	Professor	University of Laghouat

Academic year:2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah, le Tout-Puissant, de me donner la force et le courage pour terminer cette thèse.

Je remercie Prof. Farid MESSELMY (Université de Djelfa) d'avoir accepté de présider le jury de soutenance de ma thèse.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à mon superviseur : Prof Slami SAADI (Université de Djelfa) pour ses conseils et sa patience dans cette recherche. Ce travail a pris forme à partir de nombreuses discussions que nous avons eues, et ses précieux conseils.

Mes remerciements particuliers sont adressés à mon Co-encadreur : Prof. Abdellah KOUZOU (Université de Djelfa) pour son aide et ses conseils durant la réalisation de cette thèse.

Mes remerciements aux examinateurs du jury : Dr. Aissa AMEUR (Université de Laghouat), Pr. KIOUS Mechri, Dr. Ameer Miloud KADDOURI (Université de Djelfa) et Dr. Hocine AIDJOULI (Université de Djelfa) pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Un remerciement spécial à mes amis : Mohamed OMRANE, Tahar BENMESSAOUD, Lakhdar MAZOUZ, Abdelkader ROUIBAH, Ahmed HAFIFA, et tous les gens que j'ai connu ou rencontré dans ma vie sociale et universitaire, et à tous ceux que je n'ai pas cité avec toutes mes excuses.

Ali KIDAR

Dédicaces

- A mes très chers parents Saida et Aissa
- A l'âme de ma Grand-Père Ali et ma chère sœur Zohra.
- A ma femme et mes chers enfants : Ali, Tahar et Abdellah
- A mes chers frères et sœurs
- A toute la famille KIDAR

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو الدراسة المثلى لمحطة لإنتاج الطاقة المتجددة (الكهروضوئية) للتنمية المستدامة في مناطق السهوب. للقيام بذلك، يتم إجراء تحسين تحت برمجية ماتلاب للأداء وخصائص الأنظمة الكهروضوئية (متعدد الكريستالات وأحادي البلورية) وبعد ذلك يتم إجراء مقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها من نوعين من الأنظمة من حيث إنتاج الطاقة والمساحة المشغولة والوزن وتحليل التكلفة والحد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لمعرفة أيهما أفضل وأكثر قابلية للتكيف مع المنطقة المدروسة.

الكلمات المفتاحية: تنمية مستدامة؛ التحسين؛ أداء؛ نظام الكهروضوئية.

Résumé

L'objectif de cette thèse est l'étude optimale d'une centrale de production d'énergies renouvelables « photovoltaïque » pour le développement durable en zones steppiques. Pour ce faire, une optimisation sous matlab des performances et caractéristiques des systèmes photovoltaïques PV (polycristallin et monocristallin) est réalisé après quoi une comparaison entre les résultats obtenus de deux types de systèmes est faite en termes de production d'énergie, espace occupée, poids, analyse de coûts et réduction d'émissions de dioxyde de carbone pour savoir le quel est meilleur et plus adaptable à la région étudiée.

Mots clés : Développement durable ; Optimisation ; Performances ; Système photovoltaïque PV.

Abstract

The objective of this thesis is the optimal study of a “photovoltaic” renewable energy production plant for sustainable development in steppe areas. To do this, an optimization in Matlab of the performances and characteristics of the PV photovoltaic systems (polycrystalline and monocrystalline) is carried out after which a comparison between the results obtained from two types of systems is made in terms of energy production, space occupied, weight, cost analysis and reduction of carbon dioxide emissions to know which is better and more adaptable to the region studied.

Key Words: Sustainable development; Optimization; Performance; PV photovoltaic system.

Table des matières	
Liste des abréviations.....	i
Liste des figures.....	ii
Liste des tableaux.....	v
Introduction Générale.....	1
Chapitre 01: Sources d'énergie	
1.1.Introduction.....	5
1.2.Différents types de sources d'énergie.....	5
1.2.2. Energie solaire photovoltaïque :	6
1.2.1. Énergie hydraulique ou hydroélectrique	6
1.2.2. Biomasse et biogaz	6
1.2.3. Energie solaire thermique	7
1.2.6. Energie hydrolienne.....	7
1.2.7. Energie biomasse et déchets	8
1.2.8. Energie géothermique	8
1.3. Générateur photovoltaïque (GP).....	8
1.3.1. Différents types de panneaux solaires	8
1.3.2. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	10
1.3.3. Classification des systèmes photovoltaïques.....	10
1.3.3.1. Systèmes photovoltaïques autonomes.....	11
1.3.3.2. Systèmes photovoltaïques hybrides.....	11
1.3.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	12
1.3.3.1 Systèmes photovoltaïques résidentiels.....	15
1.3.3.2. Stations photovoltaïques de grande puissance.....	16
1.3.3.3. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	18
1.4. Contexte énergétique en Algérie.....	19
1.4.1 Programme national des énergies renouvelables.....	19
1.4.2 Energie du solaire photovoltaïque en Algérie.....	21
1.5 Conclusion.....	23

Chapitre02 Gisement solaire et méthodes d'optimisation

2.1. Introduction.....	24
2.2. Paramètres caractérisant le système solaire.....	24
2.2.1. Mouvement terre- solaire.....	24
2.2.1.1. Coordonnées Equatoriales Du Soleil	24
2.2.1.1.1. Déclinaison solaire	25
2.2.1.1.2 L'altitude.....	26
2.2.2. Mouvement Du Soleil.....	26
2.2.2.1. Repérage du soleil.....	26
2.2.3. Diagramme solaire.....	27
2.2.4. Masques solaires.....	29
2.3. Gisement énergétique solaire.....	30
2.3.2. Le rayonnement solaire.....	31
2.3.3. Rayonnement global.....	32
2.4 Système de conversion d'énergie photovoltaïque.....	33
2.4.1 Potentiel solaire en Algérie.....	34
2.4.1.1 Gisement Solaire Dans Les Régions Arides.....	35
2.5. Méthodes d'optimisation	35
2.5.1. Méta-heuristiques.....	36
2.5.2. Algorithme génétique (GA).....	38
2.5.2.1. Principe.....	39
2.5.2.2. Recueil du meilleur individu.....	39
2.5.3. Algorithme d'essaims de particules (PSO)	44
2.5.3.1. Principe.....	45
2.5.4. Algorithme d'essaims des Bactéries (BFO).....	48
2.5.4.1. Principe	49
2.5.5. Algorithme des colonies d'abeilles artificielles (ABC).....	49
2.5.5.1. Principe	49
2.5.6. Algorithme ABC	52

Chapitre 03 :Applications optimisation basée sur les méthodes métaheuristiques

3.1 Introduction	54
3.2 Optimisation	54
3.3 Algorithmes d'optimisation	55
3.3.1 Heuristiques	55
3.3.2 Méta heuristiques	55
3.3.2.1 Algorithme Génétique	56
3.3.2.1.1 Principe	56
3.3.2.2 Algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire	58
3.3.2.2.1 Principe	58
3.3.2.2.2 Améliorations	60
3.3.2.3 Algorithme Bacterial Foraging Optimization "BFO"	60
3.3.2.4. Algorithme de Colonie d'Abeilles Artificielles	63
3.3.2.4.1. Principe	64
3.4. Etude comparative entre les méthodes d'optimisation	67
3.4.1. Critères de comparaison	67
3.5. Conclusion	69

Chapitre 04 :Simulations et Résultats

4.1. Introduction	70
4.2 Présentation de l'algorithme de la simulation	70
4.2.1. Fonction d'évaluation	70
4.2.2 Optimisation du dimensionnement d'un Système Hybride photovoltaïque/éolien/batterie	70
4.2.3. Fonction objective	71
4.2.4. Contraintes	72
4.3. Modélisation des modules photovoltaïques	73
4.4. Région d'étude	75
4.5. Description du système photovoltaïque PV	79

4.6. Résultats et discussion.....	81
4.6.1. Analyse de la production d'énergie.....	81
4.6.2. Analyse de coût.....	83
4.6.3. Analyse du poids total des panneaux utilisés.....	85
4.7. Analyse de la réduction des émissions de CO2.....	86
4.8. Conclusion.....	88
Conclusion générale.....	89
Références Bibliographiques.....	90

AC Alternative Current
ACO : Algorithme de colonies de fourmis.
AH : L'angle horaire
BCO : Optimisation par colonie d'abeille.
CIE : Commission internationale d'éclairage.
GAO : Optimisation par algorithmes génétiques.
GP : Générateur photovoltaïque.
PSO : Optimisation par essaims de particules.
PV : Photovoltaïque.
SG : Smart Grids.
WT : Turbine éolienne.
DER : Distributed Energy Resources
DG :Distributed Generation
DR :Demand Response
DC :Direct Current
HAN: Home area networks
LAN :local area network
NAN :Neighborhood Area Network
WAN : Wide Area Network
PLC Power Line Communication
ANSI :l'American National Standards Institute
UIT : l'Union internationale des télécommunications
IEEE : l'Institute of Electrical and Electronics Engineers
DR :dynamique répondent
DSM :Distribution Management System
EMS : Energy management system
PMU : phasor measurement units
CO2 : carbon dioxide
AMI: Advanced metering infrastructure
GA : Algorithme génétique
PSO : Algorithme d'essaims de particules
BFO : Algorithme d'essaims des Bactéries
ABC : Algorithme des colonies d'abeilles artificielles

Fig.1.1 : Energie hydraulique dans le cycle hydrologique	6
Fig.I.2 : Énergie de biomasse et biogaz	7
Fig.1.3 : Générateur photovoltaïque constitué de plusieurs panneaux solaires	8
Fig.I.4 : : Cellules solaire monocristallin	9
Fig.I.5: Cellules solaires poly cristallines	9
Fig.I.6 : Cellules solaires en couches minces	10
Fig.I.7 : Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques	10
Fig.I.8 : Exemple d'un système hybride (photovoltaïque source à combustible)	11
Fig.I.9 : Exemple d'un système hybride (photovoltaïque source à combustible)	11
Fig.I.10 : Système PV résidentiel couplé au réseau	15
Fig.I.11 : La plus grande centrale PV au monde (Chine, 2017)	16
Fig.1.12 : La plus grande centrale solaire au monde en 2016 (Kamuthi-Inde)	17
Fig.1.13 : Objectifs du programme algérien des énergies renouvelables	20
Fig. 2.1 : Description simplifiée du système solaire	24
Fig.2.2 : Description simplifiée du système solaire.....	25
Fig.2.3 : Equinoxes de Printemps Et D'automne	25
Fig.2.4 : Représentation du solstice d'été.....	26
Fig.2.5 : Représentation du solstice d'hiver.....	26
Fig.2.6: Coordonnées horizontales solaire	27
Fig.2.7: La construction du diagramme cylindrique solaire.....	28
Fig.2.8 : Masques dus aux constructions représentées sur deux types de diagrammes (cylindrique et stéréographique).....	30
Fig.2.9 : : Carte préliminaire des irradiances solaire de l'Algérie	31
Fig.2.10 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM	32
Fig.2.11 : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.	32
Fig.2.12: Types de rayonnement solaire reçus au sol	33
Fig.2.13 : Irradiation solaire directe annuelle des pays méditerranéens en 2002.....	34
Fig.2.14 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur un plan horizontal (1992-2002).	35
Fig.2.15: : Méthodes d'Optimisation Exactes & Méta-heuristique	36

Fig.2.16 : Méthodes d'Optimisation Exactes & Méta-heuristique	37
Fig.2.17 : : Roulette et tournoi pour deux.	42
Fig.2.18: Le croisement d'un point avec le codage binaire)	42
Fig.2.19 : Mutation du codage binaire.....	43
Fig.2.20 : Schéma du principe des Algorithmes génétiques	44
Fig.2.21 : Organigramme général du PSO	46
Fig.2.22 : Un exemple montrant la migration intergénérationnelle.....	47
Fig.2.23 : La population converge vers l'optimum global malgré l'ajout de "bruit" sinusoïdal (fonction bruitée).....	47
Fig.2.24: L'indice de la direction.....	50
Fig.2.25 : Comportement typique de la recherche de nourriture dans une colonie d'abeille.....	51
Fig.3.1 : : croisement en 1 point.....	57
Fig.3.2 : croisement en 2 point.....	57
Fig.3.3 : Mutation.....	57
Fig.3.4 Déplacement d'une particule.....	59
Fig.3.5 : Fonction objective par différentes méthodes (PSO, ABC, BFO et GA).....	68
Fig.4.1 : Coûts Concept de modification d'un point de recherche par le PSO.....	70
Fig.4.1 : Système Hybride photovoltaïque/éolien/batterie	71
Fig. 4.2: Circuit équivalent du modèle à diode unique de la cellule PV.....	73
Fig.4.3 : L'irradiation moyenne quotidienne pour l'emplacement considéré dans les quatre mois sélectionnés.....	76
Fig.4.4 : Température moyenne quotidienne pour l'emplacement considéré dans les quatre mois sélectionnés.....	76
Fig.4.5 : L'irradiation moyenne mensuelle pour l'emplacement considéré tout au long de l'année 2020.....	78
Fig.4.6 : La température moyenne mensuelle pour l'emplacement considéré tout au long de l'année 2020.....	78
Fig.4.7 : Profil énergétique récolté par les deux centrales tout au long de chaque mois tout au long de l'année 2020. (a) premier semestre, (b) deuxième semestre.....	82

Fig.4.8: Nombre de batteries selon leur capacité et la puissance produite.....84

Fig.4.9: Coûts totaux du nombre optimal de batteries utilisées et de l'onduleur sélectionné85

Fig.4.10 : Poids total des panneaux utilisés pour les deux types.....86

Tableau I.1: Puissance photovoltaïque installée et connectée hors de l'Union Européenne durant l'année 2018 (en GW)	12
Tableau I.2: Puissance photovoltaïque installée et connectée dans l'Union Européenne durant les années 2016 et 2017 (en MW).....	14
Tableau I.3: Liste des 10 plus grandes centrales <i>PV</i> au monde.....	18
Tableau I.3: 4 Phases du programme algérien de développement des énergies renouvelables, objectifs Cumulés par filière.....	20
Tableau.2.1 : potentiel solaire par région.....	34
Tableau 4.1 : Caractéristiques principales et paramètres du panneau PV monocristallin.....	80
Tableau 4.2 : Caractéristiques principales et paramètres du panneau PV polycristallin.....	81
Tableau 43 : Emissions mensuelles et annuelles de CO2 évitées grâce à l'utilisation des panneaux PV pour tous les cas étudiés pour les deux technologies Monocristallin et Polycristallin.....	87

Introduction Générale

L'activité humaine partout dans le monde nécessite un minimum d'énergie provenant de sources disponibles et accessibles pour répondre à ses besoins quotidiens de manière plus simple et moins chère. Où, cette exigence impérative ne semble pas remplie pour le quart de la population mondiale qui se concentre principalement dans les pays pauvres, notamment en Afrique. Cela est dû à l'absence d'installations électriques du système électrique dans les régions rurales et urbaines éloignées, soit en raison des difficultés techniques rencontrées pour couvrir toute cette région pour assurer leur raccordement aux réseaux principaux, soit en raison de la situation économique des pays, soit au développement lent de ces pays [1-2].

En effet, au cours de l'année écoulée, tous les gouvernements des pays développés et en développement du monde ont orienté leurs efforts vers la tentation de diminuer la dépendance aux ressources conventionnelles et d'encourager les populations à utiliser et exploiter les ressources renouvelables durables disponibles.

L'exploitation des sources d'énergie renouvelables est limitée en raison du fait qu'ils sont encore riches en énergies conventionnelles et que leurs coûts sont en fait relativement faibles. L'Algérie est l'un des pays qui produit encore son énergie électrique à partir de source conventionnelle comme le gaz naturel. Cependant, le gouvernement a du mal à être plus dépendant de ces sources et son orientation est de faire une grande transition vers les énergies renouvelables en suivant une feuille de route conçue, en particulier l'énergie solaire où l'Algérie est considérée comme l'un des pays du monde qui a un potentiel très important d'une telle énergie qui peut couvrir une partie importante de la demande mondiale d'énergie. Dans ce contexte, le long de la ligne steppique de la frontière ouest ($1,67^{\circ}\text{W}$) à la frontière est (8°E) en Algérie qui occupait une grande surface du pays, dans une zone de transition entre l'Atlas tellien dans la région nord (35°N) et l'Atlas saharien dans la région sud (33°N) sur 20 millions d'hectares [3] et qui se caractérise par un climat semi-aride avec des hivers froids et humides et des étés chauds et secs, cependant l'irradiation solaire a un fort potentiel tout au long de l'année.

En Algérie, le gouvernement a lancé des projets à moyenne échelle d'énergie solaire renouvelable basés le long des steppes comme première étape, de l'autre côté, il a encouragé les personnes vivant dans des zones reculées à utiliser des panneaux photovoltaïques pour satisfaire leur demande énergétique en accordant une subvention spéciale pour les aider contre les prix relativement élevés dans le temps réel. Cette politique permettra de réduire la migration des personnes des régions rurales vers les régions urbaines, de diminuer les causes de la désertification et d'améliorer la vie des personnes vivant dans ces régions. En effet, le

principal problème de la steppe est la disponibilité de l'eau et de l'énergie, qui sont les sources fondamentales de vie et de développement de ces régions [3-5].

C'est en effet un fait que la mise en place de fermes d'énergies renouvelables à différentes échelles et capacités en plus du creusement de puits pour extraire l'eau renouvelable disponible aidera à restaurer vie permanente et stable à ces régions. Une grande partie de ces pompes sont des électropompes qui nécessitent des groupes électrogènes, dont le fonctionnement nécessite une grande quantité de carburant et le plus important est que leur maintenance nécessite des techniciens spécialisés et nécessite des pièces de rechange, notamment dans les zones isolées. De plus, le rejet de gaz dans l'atmosphère augmente le niveau de pollution et perturbe l'environnement. Par conséquent, il est d'une grande importance de trouver une solution urgente pour assurer l'énergie électrique des régions éloignées de la région des steppes. Par conséquent, il est nécessaire de développer de nouvelles sources d'énergie, en particulier l'énergie solaire qui est la source d'énergie renouvelable la plus importante dans ces régions en raison de la forte irradiation annuelle. Cependant, il est important de rechercher les technologies appropriées et les solutions optimales du point de vue de l'efficacité, des performances et des coûts, et qui correspondent aux exigences des conditions météorologiques existantes. D'un autre côté, il serait très utile pour les utilisateurs privés d'avoir plus de connaissances sur les différents équipements à obtenir en fonction de leurs performances réelles, de leur coût et de leur adaptation aux conditions météorologiques du lieu. Les systèmes solaires sont bien connus par leur efficacité et leur meilleure adéquation pour satisfaire certaines demandes énergétiques dans ces régions [6-8].

En effet, différents types d'énergies peuvent être produites à partir de la conversion de l'énergie solaire, principalement l'énergie électrique et l'énergie thermique, qui peuvent être utilisées dans de larges applications telles que l'éclairage, le pompage de l'eau, le chauffage, le traitement de l'eau, les systèmes de séchage, etc. -dix]. Le développement durable de la steppe qui occupe une superficie de 32 millions d'hectares, dont 12 millions dans la région pré-saharienne. Cette région compte une population de plus de 7,2 millions d'habitants répartis dans 23 Etats (Wilayas) dont une partie importante vit dans des régions reculées où leur principale source de financement repose sur l'élevage des troupeaux, qui sont aujourd'hui portés à plus de 20 millions de têtes. Cependant, surtout pendant les sécheresses, l'approvisionnement en eau et l'herbe pour les troupeaux sont des facteurs spécifiques pour leur survie. Ainsi, la mise en place d'un grand nombre de points d'eau pérennes de pompage et d'irrigation devrait permettre d'éviter les troupeaux au long cours et les petits éleveurs qui

n'ont pas les mêmes moyens que les éleveurs seniors pour élever leurs troupeaux. Ces points d'eau et zones éparses permettront également l'aménagement des parcours, la pratique des céréales et le développement des pâturages agricoles (quoique primitifs), qui visent avant tout l'autoconsommation et contribuent ainsi à la réduction de la pauvreté et de l'exode rural. La feuille de route de protection initiée par le Haut-Commissariat à l'Aménagement de la Steppe (HCDS) a considérablement réduit l'avancée du Sahara et permis le retour de centaines de familles qui ont quitté leurs terres en raison de la sécheresse, de la dégradation des terres et de l'insécurité, où l'une des solutions est d'encourager la mise en place de petites plaques solaires photovoltaïques dans toutes ces régions.

En effet, l'utilisation de l'énergie solaire localement pour le pompage, l'irrigation, la consommation domestique et l'éclairage a été très répandue actuellement chez de nombreuses personnes qui vivent dans ces régions, ce qui a ouvert la concurrence aux entreprises dans ce domaine de l'équipement. Il serait certainement important de se référer à une conception précise de ces plans d'alimentation à petite échelle basés sur des panneaux photovoltaïques dont les revenus et les prix varient d'un fournisseur à l'autre et de s'appuyer sur les recommandations des spécialistes des énergies renouvelables [9-10].

L'objectif principal de cette thèse est de présenter une étude claire d'une centrale électrique à petite échelle basée sur des panneaux photovoltaïques dans une région située au centre de la steppe à titre d'exemple. Les panneaux photovoltaïques présentés dans cette thèse peuvent être obtenus sur le marché local, par conséquent, les principales caractéristiques de l'équipement et les prix sont utilisés dans cette étude.

Cette thèse est structurée en trois chapitres recouvrant les sources d'énergie, le gisement solaire et les méthodes d'optimisation afin de répondre aux objectifs fixés et présentés ci-dessus.

Le premier chapitre est consacré aux sources d'énergie : types des sources d'énergie, leurs performances, leurs descriptions, leurs avantages et inconvénients, et une analyse de leurs caractéristiques, etc.

Le deuxième chapitre traite le gisement solaire et les méthodes déterministes et stochastiques nécessaires à l'optimisation des performances et caractéristiques des systèmes PV.

Le troisième chapitre présente des applications de différents algorithmes Méta-heuristiques pour l'optimisation des performances des systèmes solaires ainsi une comparaison doit être faite pour justifier le choix de la meilleure méthode adoptée.

Le quatrième chapitre présente les modèles mathématiques liés aux performances et caractéristiques d'un système PV (production d'énergie, espace occupée, poids, coût, réduction d'émissions de dioxyde de carbone, etc.) et les résultats de simulations puis une comparaison entre les deux systèmes étudiés pour connaître lequel est adaptable à la région étudiée.

Finalement, on terminera cette thèse par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et on expose quelques perspectives de recherche envisagées.

Sources d'énergie

1.1.Introduction

Dans cette première partie., on va décrire brièvement l'analyse et le principe d'exploitation des différents types de sources d'énergie, leurs performances, leurs descriptions, leurs avantages et inconvénients, et une analyse de leurs caractéristiques, etc.

1.2. Différents types de sources d'énergie

Depuis la première crise du pétrole, les énergies renouvelables sont devenues très importantes en raison de leur pérennité, de leur inépuisabilité, de leur attrait écologique et de leur sécurité énergétique. Les énergies renouvelables devraient dès lors jouer un rôle de premier plan dans la production d'électricité. [11].

Les gouvernements cherchent non seulement à accroître leur utilisation interne de ces énergies, mais également à développer les industries, etc. et à répondre à la demande [12]. Les technologies d'exploitation et de transformation des sources renouvelables ont une maturité qui permet une exploitation efficace dans différentes applications. Une politique énergétique basée sur les sources d'énergie renouvelables conduit à un approvisionnement durable, ce qui réduit la consommation de combustibles fossiles et les émissions de dioxyde de carbone (CO₂).

La demande mondiale d'énergie renouvelable croît rapidement du fait des problèmes climatiques et des ressources pétrolières limitées [13]. Les principales sources d'énergie renouvelable sont l'éolien, le solaire (PV-photovoltaïque, CSP solaire concentré), l'hydroélectricité, l'océan (marée, vague), la géothermie et les biocarburants (biomasse).

1.2.1. Energie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui utilise la puissance du vent pour produire de l'électricité. Les principaux moyens pour l'obtenir sont les éoliennes, des « moulins à vent » de taille variable qui transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique avec leurs pales. L'énergie éolienne peut être obtenue en installant des éoliennes à la fois sur terre et sur le fond marin [14]

De nos jours, l'énergie éolienne est la plus pertinente, non seulement parce que cette énergie occupe la première place parmi les sources d'énergie renouvelables, mais aussi parce que sa part ne cesse d'augmenter en raison des progrès technologiques réalisés ces dernières années [15]. L'énergie éolienne semble être une solution propre et bonne pour faire face à une grande partie de cette demande énergétique [16].

Dans l'Afrique, l'Algérie dispose d'un énorme potentiel pour cette technologie : il est possible d'exploiter les régions du sud pour la production d'énergie électrique. Par exemple dans les régions de Tindouf et Adrar, la vitesse du vent dépasse les 6 m / s [17].

1.2.2. Energie solaire photovoltaïque :

Les panneaux photovoltaïques transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique. Il s'agit de cellules en matériaux semi-conducteurs fonctionnant sur le principe de la jonction PN, réalisées actuellement pour la grande majorité à partir du silicium cristallisé. Une grande partie des systèmes photovoltaïques est associée au bâtiment et au réseau, notamment en Basse Tension (BT). Ils sont aussi utilisés pour l'alimentation des sites isolés.

1.2.2. Énergie hydraulique ou hydroélectrique [18]

L'énergie hydraulique est l'énergie cinétique du mouvement des masses d'eau, ou l'énergie potentielle de l'eau disponible à une certaine hauteur. Comme la plupart des autres énergies renouvelables, l'énergie hydraulique est une conséquence du rayonnement solaire. Le Soleil initie le cycle hydrologique (figure 1.17) en évaporant l'eau de surface de la Terre (océans, lacs, etc.) qui, par la suite, en se précipitant et en s'écoulant à la surface de la terre, est capable de fournir cette énergie.

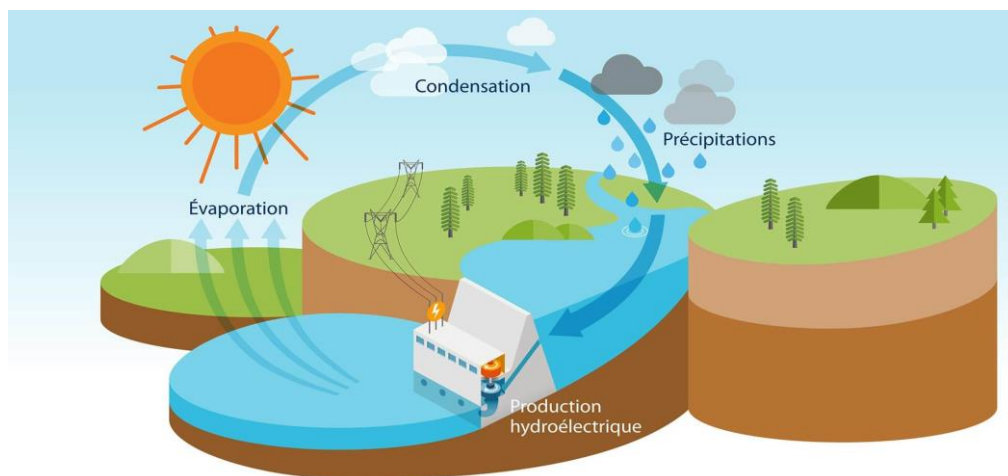


Fig.1.1 : Energie hydraulique dans le cycle hydrologique [18].

1.2.4. Biomasse et biogaz [19]

La biomasse est toute fraction biodégradable des produits et déchets d'origine biologique issus des activités agricoles et de la pêche (déchets agricoles et d'élevage), de la sylviculture (déchets forestiers), ainsi que la fraction organique des déchets industriels et municipaux.

Lorsque la biomasse est transformée à des fins énergétiques, elle devient un biocarburant, qui peut être solide (copeaux, granulés ou petits cylindres de bois broyé et pressé, noyaux d'olives propres, etc.), liquide (biocarburants liquides, tels que le biodiesel ou le bioéthanol)

ou gazeux (biogaz ou gaz de synthèse). Son contenu énergétique peut être utilisé par différents procédés de transformation pour obtenir de l'énergie utile sous ses différentes formes : énergie thermique (chaleur), électrique ou mécanique (biocarburants) : Biomasse thermique : l'utilisation de biocarburants dans des chaudières, poêles, fours ou cheminées produit de la chaleur pour la climatisation (chaude et froide), l'eau chaude sanitaire ou un process industriel.

Biomasse électrique : les biocarburants sont utilisés dans des chaudières pour produire de la vapeur qui est utilisée dans une turbine pour produire de l'électricité. Ils peuvent également être transformés en gaz (biogaz dans les procédés de digestion anaérobie ou gaz pauvre dans les procédés de gazéification) qui sont utilisés dans les turbines à gaz ou les moteurs alternatifs.



Fig.1.2 : Énergie de biomasse et biogaz [20]

1.2.5. Énergie solaire thermique

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façades vitrées) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air. L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications : la production d'eau chaude, le chauffage des maisons, le séchage des récoltes, la réfrigération par absorption pour les bâtiments, la production de très haute température.

1.2.6. Énergie hydrolienne

En utilisant l'énergie cinétique des courants marins, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air, la turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique

par un alternateur. La puissance des centrales hydroliennes est très prometteuse, cependant elles restent encore à l'état de recherche et de développement.

1.2.7. Energie biomasse et déchets

Certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou de déchets industriels et domestiques.

1.2.8. Energie géothermique

Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines dans des zones géographiques spécifiques. Cette chaleur est soit directement utilisée, soit convertie en énergie électrique grâce à des turbines et alternateurs. La taille typique des centrales géothermiques varie de 5 à 50 MW.

1.3. Générateur photovoltaïque (GP)

Un générateur photovoltaïque, ou générateur solaire, est un appareil qui fournit de l'électricité propre et renouvelable lorsque cela est nécessaire et que nous ne pouvons pas utiliser le réseau général. Ces générateurs peuvent être fixes ou mobiles et, contrairement aux générateurs traditionnels, ils sont conçus pour fournir et stocker l'énergie produite par des panneaux solaires [21].



Fig.1.3 : Générateur photovoltaïque constitué de plusieurs panneaux solaires [2136]

Le domaine de fabrication des composants de cellules photovoltaïques est en plein essor, ce qui a entraîné l'apparition de plusieurs centrales de production d'électricité à base de panneaux solaires.

1.3.1. Différents types de panneaux solaires [22]

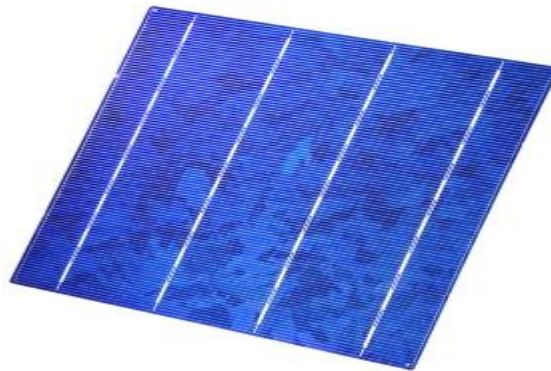
Il y a trois générations des panneaux solaire, la première génération, concerne les cellules en silicium cristallin, qui sont relativement condensées dont le rendement est de 12%. Ces

cellules, souvent en silicium, ne contiennent qu'une seule jonction "p-n".



Fig.1.4 : Cellules solaire monocristallin [22]

Les cellules poly cristallines sont raffinées à partir de silicium en vrac qui a été cristallisé en plusieurs structures cristallines. Si vous regardez attentivement, vous pouvez voir que les positions des cristaux sont différentes, et c'est ce qu'on appelle la différence de



couleur.

Fig.1.5 : Cellules solaires poly cristallines [23]

Le rendement est de 11-15 % et la puissance de sortie est de 110-150 Wc/m². Ces cellules sont encore les plus utilisées en raison de leur excellent rapport "performance/prix". Le plus gros inconvénient est un faible éclairage, ce qui entraîne inévitablement de faibles rendements. Cellules monocristallines : Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par refroidissement progressif et contrôlé du silicium. Ce type de rendement présente des avantages significatifs, avec un rendement de 12 à 19 % à une puissance de 120 à 190 Wc/m². Cependant, les principaux inconvénients de ces cellules sont leur coût élevé et leurs performances médiocres lorsque le niveau de lumière diminue. Dans la deuxième génération, qui est basée sur des couches minces, le semi-conducteur est déposé directement sur le matériau support par dépôt en phase vapeur. Plus précisément, cette génération comprend le silicium amorphe, le silicium

amorphe gris foncé, le tellure de cadmium et l'indium cuivre sélénium [39]. Technologie utilisée dans les montres et les calculatrices

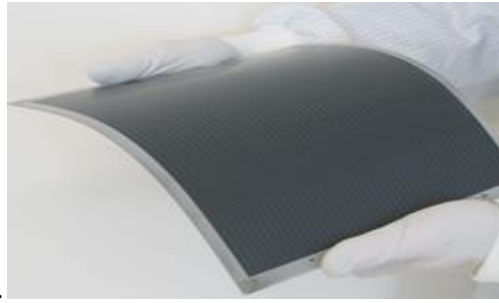


Fig.1.6 : Cellules solaires en couches minces [24].

La 3ème génération est une évolution des 1ère et 2ème génération. Son rendement est de 30 %.

1.3.2. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [25]

La figure 1.16 montre les caractéristiques courant-tension typiques d'une cellule solaire. V_{oc} et I_{sc} sont respectivement la tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit de la cellule solaire. La figure se réfère à un point adapté à la puissance maximale P_{max} . Cela nous permet de décrire les valeurs maximales V_{max} et I_{max} correspondant aux points trouvés par l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking).

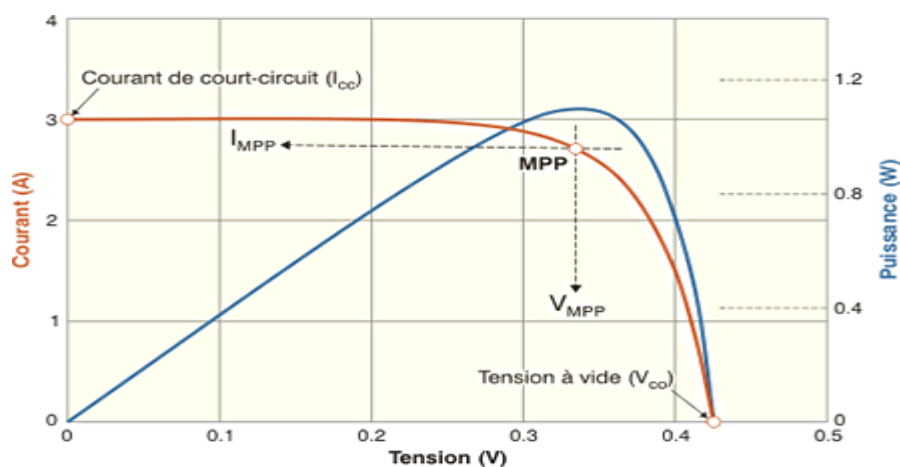


Fig.1.7 : Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques [26].

1.3.3. Classification des systèmes photovoltaïques

Selon la manière dont l'énergie est utilisée, il existe trois différents types de systèmes PV que nous allons présenter dans ce qui suit :

I.3.3.1. Systèmes photovoltaïques autonomes

Un système photovoltaïque autonome est généralement conçu et dimensionné pour alimenter un ou plusieurs consommateurs sans être connecté au réseau électrique. Ce système se compose d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries et éventuellement d'un onduleur.

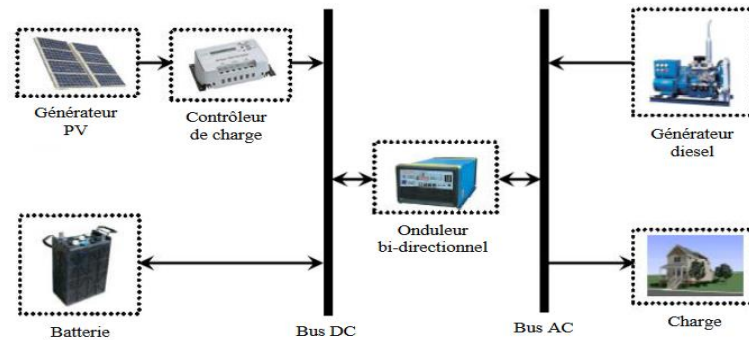


Fig.I.8 : Exemple d'un système hybride (photovoltaïque source à combustible)

I.3.3.2. Systèmes photovoltaïques hybrides

Les systèmes de production multi-sources (appelés hybrides) sont généralement des systèmes *PV* couplés à d'autres sources comme par exemple une éolienne ou un groupe électrogène à combustible afin de mieux garantir la continuité de l'approvisionnement en électricité (voir figure I.9).

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et/ou fossiles et des moyens de stockage associés afin de garantir une fourniture d'électricité plus fiable et moins coûteuse [27].

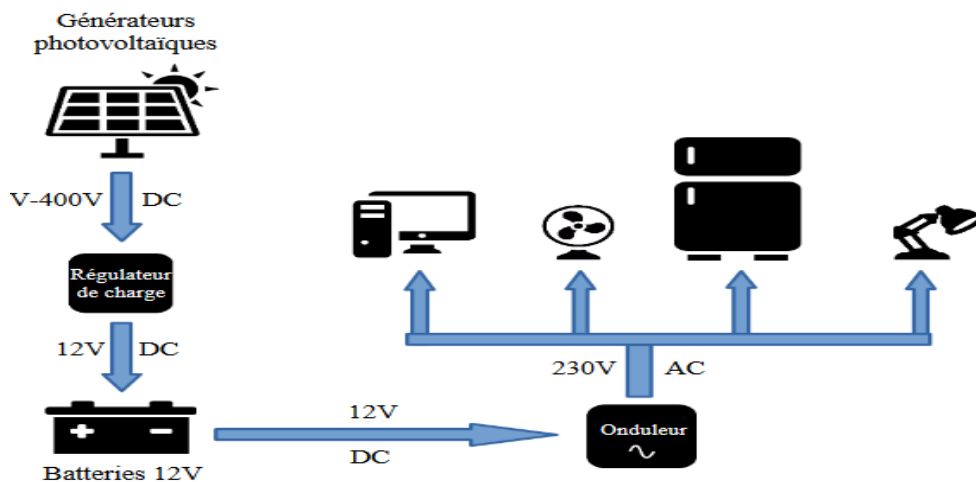


Fig. I.9 : Exemple d'un système hybride (photovoltaïque source à combustible) [27]

Devant la complexité de ces systèmes, il convient de développer des méthodes de dimensionnement intégrant une optimisation de la gestion de l'énergie et une étude de coût optimal de production.

I.3.3. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau électrique constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coût. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordés au réseau électrique.

Selon les données les plus récentes, publiées le 15 avril 2019 par les experts de l'IEA PVPS (International Energy Agency-Photovoltaïque Power Systems Programme), font état d'une puissance nouvellement installée de 99.8 GW (comparée à 98.9 MW en 2017), confirmant une stabilité de la puissance raccordée [23]. En effet, la Chine disposait d'une puissance solaire photovoltaïque cumulée connectée au réseau de 174.65 GW fin 2018, en croissance de 33.9 % par rapport à 2017 (130.25 GW). Ces chiffres supposent une augmentation de la puissance raccordée de 44,4 GW durant l'année 2018 (contre 52.8 GW durant l'année 2017), soit une baisse annuelle de la puissance raccordée de 8.42 GW (- 16 % par rapport à 2017), voir tableau (I.1).

Tableau I.1 : Puissance photovoltaïque installée et connectée hors de l'Union Européenne durant l'année 2018 (en GW)

Pays	Puissance photovoltaïque Connectée au réseau en 2018
Chine	44.4
Inde	10.8
Etats-Unis	10.6
Japon	6.5
Australie	3.8
Mexique	2.7
Turquie	1.6

Cette baisse du marché s'explique par la décision du gouvernement, prise sans préavis le 31 mai 2018, de ne plus accorder d'autorisation de mise en service à toutes les nouvelles grandes centrales, et ce jusqu'à la fin de l'année, tout en réduisant fortement les tarifs d'achat réglementés des installations existantes (une coupe de l'ordre de 0.05 yuan/kWh, soit 6 à 9 % selon les régions).

En revanche, parmi les marchés en croissance, l'Inde aurait installé 10.8 GW en 2018, l'Australie affiche une croissance importante de 3.8 GW, suivie de près par le Mexique (2.7 GW). Le marché turc a été moins performant (1.6 GW).

Les marchés africains et du Moyen-Orient ont également augmenté, mais les experts s'attendent à une croissance plus importante en 2019, avec la mise en service de parcs importants en Égypte et aux Émirats arabes unis.

D'autre part, le tableau (I.2) montre la capacité *PV* installée en *SPVCR* (Système Photovoltaïque Couplé au Réseau) et en systèmes *PV* autonomes, dans l'Union européenne de 2016 à 2017 en MW [28]. Les systèmes photovoltaïques intégrés aux réseaux électriques sont liés à plusieurs domaines : la physique en général notamment celle des semi-conducteurs, l'électronique de faible et grande puissances, etc... [29]. On peut dire qu'ils débouchent sur une science plus thématique que l'énergétique ou autres (génie électrique, électrotechnique, etc...). Le développement des installations raccordées au réseau dépend essentiellement du tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque imposé par le distributeur. Ainsi, la proportion de ce type d'installation dans le monde a tendance à augmenter.

Tableau I.2 Puissance photovoltaïque installée et connectée dans l'Union Européenne durant les années 2016 et 2017 (en MW) [24]

	2016		2017	
	SPVCR	Autonome	SPVCR	Autonome
Allemagne	1492.0	0.0	1678.0	0.0
France	588.0	0.5	875.0	0.0
Royaume-Uni	2363.8	0.0	861.0	0.0
Pays-Bas	534.0	.0.0	700	0.0
Italie	382.0	0.0	409.4	.0.0
Belgique	179.0	0.0	285.0	0.0
Autriche	158.4	0.5	152.0	0.0
Espagne	55.0	0.0	134.3	0.0
Hongrie	105.0	.8.0	85.0	0.0
Suède	47.0	2.0	78.0	.0.0
Pologne	97.7	0.0	77.3	0.0
Portugal	55.0	8.0	44.1	0.0
Danemark	68.4	0.4	58.6	0.0
Finlande	20.0	.0.0	26.0	0.0
Slovenie	0.0	0.0	25.0	0.0
Chypre	8.0	0.0	21.3	.0.0
Malte	19.6	0.0	15.6	0.0
Luxembourg	5.7	0.1	5.0	.0.0
Irlande	3.8	.0.01	3.0	0.0
Croatie	2.4	0.	2.0	0.0
Lituanie	7.0	0.0	2.0	0.0
Grèce	0.0	0.0	1.1	0.0
Roumanie	46.3	0.0	1.7	.0.0
Bulgarie	0.0	.0.0	0.2	0.0
Slovaquie	0.0	0.0	0.0	0.0
Estonie	0.0	0.0	0.0	0.0
Rep tchèque	.0.0	0.0	.0.0	0.0
Lettonie	0.0	.0.0	0.0	.0.0
Totale	6238.1	19.5	5540.5	0.0

I.3.3.1 Systèmes photovoltaïques résidentiels

Les systèmes résidentiels nommés parfois inter-échangeant avec le réseau (<20 kWc) sont des systèmes attachés à un consommateur d'électricité, qu'il soit à usage (maisons individuelles, habitat collectif social ou privé) ou professionnel (bureaux, commerces, équipements publics, industrie, agriculture, ...) [30]. Les modules peuvent être « surimposés » à la toiture (toit en pente ou toiture-terrasse) sans assurer le clos ni le couvert ou bien « intégrés au bâti » dans une logique de double fonction (clos et couvert, bardage, verrière,

garde-corps, ...) [31]. Leur surface active va de quelques dizaines à quelques milliers de mètres carrés, soit des puissances de quelques kilowatts crêtes à quelques mégawatts crêtes. Les systèmes photovoltaïques résidentiels couplés aux réseaux injectent l'énergie issue des modules sur le réseau de distribution (voir figure I.10).

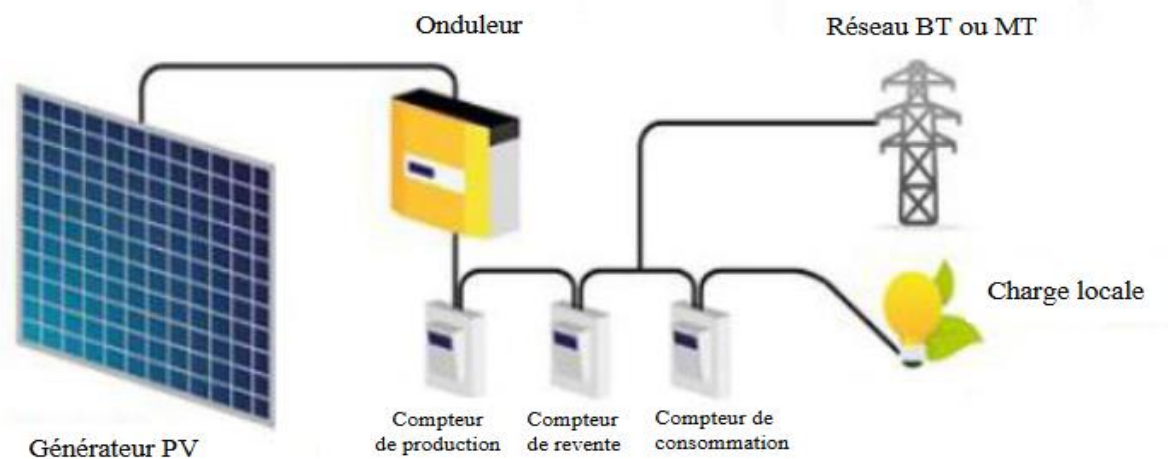


Figure I.10 : Système PV résidentiel couplé au réseau [32]

Il existe deux types d'installations dédiées à l'injection de la production au réseau :

a) Injection de la totalité de la production : L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injection sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque [33].

b) Injection du surplus de production : L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau [34].

I.3.3.2. Stations photovoltaïques de grande puissance

Les systèmes *PV* à grande échelle sont devenus un domaine de développement majeur pour la recherche. La puissance de ce type de systèmes énergétiques a progressivement augmenté au cours de la dernière décennie, avec de nouveaux records de capacité.

Les centrales photovoltaïques au sol sont constituées de quantités importantes de modules posés sur des structures porteuses, et leur production est exclusivement destinée à l'alimentation directe du réseau électrique. Leur surface active va de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés (puissance de plusieurs dizaines de mégawatts).

Avec les applications photovoltaïques connectées aux réseaux électriques, une nouvelle tendance se dégage ; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés [35], [36].

Dans ce cadre, notre étude s'attache à la filière photovoltaïque « à grande échelle » comme les centrales au sol qui sont en plein développement dans tous les pays développés (Chine, Allemagne, Etats-Unis, Japon, Italie, Espagne, ...).

En 2017, la Chine a construit la plus grande centrale solaire photovoltaïque (parc solaire du barrage) du monde. Cette centrale est conforme à la nouvelle stratégie énergétique de ce pays qui vise à devenir un leader global de l'énergie renouvelable. Située en Longyangxia et en développement depuis 2013. Elle est d'une capacité de 850 GW soit de quoi alimenter 200000 foyers [37]. Elle compte 4 millions de panneaux solaires, s'étend sur 27 kilomètres carrés, et a coûté à la Chine 721.3 millions de dollars (voir figure I.11) [38]. Cette station solaire s'intègre dans la nouvelle politique environnementale de la Chine, qui a récemment annulé la construction de plus de 100 centrales à charbon car elles entraînent de graves problèmes de pollution.



Fig I.11 : La plus grande centrale *PV* au monde (Chine, 2017) [37]

D'autre part, la figure (I.12) illustre la centrale photovoltaïque indienne Kamuthi, plus grande centrale photovoltaïque au monde en 2016 devant la Solar Star de Californie (579 MW), précédente détentrice de ce titre.



Fig I.12 : La plus grande centrale solaire au monde en 2016 (Kamuthi-Inde) [38]

Le projet, qui a coûté 679 millions de dollars, s'étend sur un périmètre de 10 km carrés et peut délivrer 648 MW de puissance, soit de quoi alimenter 150 000 foyers lorsqu'elle tourne à pleine puissance. Cette station indienne est constituée de 2 500 000 modules solaires, 576 onduleurs, 154 transformateurs et près de 7 500 km de câbles. Elle a été mise en service le 21 septembre 2016 [37].

Avec cette centrale, l'Inde montre qu'elle devient aussi un acteur mondial du solaire photovoltaïque. Cette filière d'énergie solaire PV en Inde a beaucoup progressé ces dernières années, de façon plus importante que le solaire thermique ou thermodynamique à concentration.

Pour la production interne mais aussi pour les marchés extérieurs, l'Inde suit le même chemin que la Chine qui, elle aussi, développe cette technologie chez elle et la vend ailleurs, devenant le numéro un du secteur.

Le tableau suivant présente les plus grandes centrales photovoltaïques actuelles (en opération) de puissance supérieure à 80 MW.

Tableau I.3 Liste des 10 plus grandes centrales PV au monde [39]

Puissance	Localisation	Pays	Surface	Date de mise en
850	Longyangxia	Chine	2700	Février 2017
648	Kamuthi, Tamil Nadu	Inde	1000	Septembre 2016
579	Solar Star, Californie	Etats-Unis	1300	Fin 2013
550	Desert Sunlight, Californie	Etats-Unis	1540	Février 2015
320	Longyangxia	Chine	916	Décembre 2013
300	Centrale solaire de Cestas	France	260	Fin 2015
168	Senftenberg/Schipkau (Meuro), Brandebourg	Allemagne	353	Octobre 2011
100	Perovo, Crimée	Ukraine	64	Décembre 2011
84	Montalto di Castro	Italie	166	Fin 2010
80	Sarnia, Ontario	Canada	365	Fin 2015

I.3.3.3. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Avantages et inconvénients qui sont rappelés brièvement ci-après [40-43]:

Avantages de l'énergie photovoltaïque

- ✓ Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe terrestre,

5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière ;

- ✓ Propreté durant son utilisation ;
- ✓ L'installation ne produit aucun bruit ;
- ✓ Sa fiabilité et la longue vie de l'installation ;
- ✓ Sa grande souplesse de production (dimensionnement selon les besoins, modularité) ;
- ✓ Son coût de maintenance bas ;
- ✓ Elle n'exige presque aucun entretien ;
- ✓ Utilisation autonome et décentralisée.

Inconvénients :

- ✓ Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces ;
- ✓ Le coût élevé de l'installation ;

- ✓ Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque ;
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

- ✓ Difficulté à recycler les composants du système,
- ✓ Investissement élevé dépendant des décisions politiques.

I.4. Contexte énergétique en Algérie

En 2015, l'Algérie était le 18ème producteur de pétrole, le 10ème producteur de gaz naturel et le 6ème exportateur de gaz naturel au monde [44]. De plus, l'Algérie comme plusieurs pays du monde est fortement caractérisée par une compatibilité climatique des saisons, ce qui assure un champ important d'exploitation des sources d'énergie renouvelable alternatives au gaz naturel qui présente actuellement la seule matière fossile utilisée pour la production de l'énergie électrique dans tout le pays pratiquement. Selon [45], 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 révisée en mai 2015 et placé au rang de priorité nationale en février 2016. De ce fait, l'Algérie s'engage dans une nouvelle stratégie énergétique durable avec un programme des énergies renouvelables qui consiste dans sa version actualisée, à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22000 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.

I.4.1 Programme national des énergies renouvelables

A travers le programme d'énergie 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 et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité et 27% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable [46]. En effet, des tarifs d'achat garantis sur 20 ans ont été mis en place

pour les filières photovoltaïque et éolienne. Les projets des autres filières seront financés à hauteur de 50 % à 90 %, taux variable selon la technologie et la filière, par le fonds national des énergies renouvelables et cogénération, alimenté par un prélèvement de 1 % sur la redevance pétrolière [47].

Comme le montre la figure I.13, l'énergie solaire photovoltaïque est la source d'énergie la plus importante dans le programme algérien des énergies renouvelables.

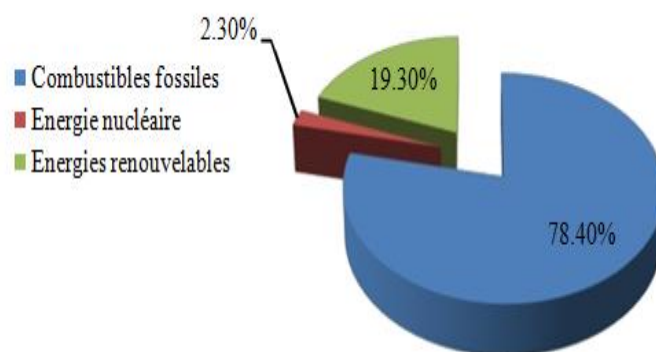


Figure I.13 Objectifs du programme algérien des énergies renouvelables [46]

D'autre part, la consistance du programme de développement des énergies renouvelables à réaliser sur la période 2015-2030, est répartie par filière comme suit :

Tableau I.4 Phases du programme algérien de développement des énergies renouvelables, objectifs Cumulés par filière [46]

	1 ^{ère} phase 2015-2020 [MW]	2 ^{ème} phase 2021-2030 [MW]	TOTAL [MW]
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
Thermique	–	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4525	17475	22000

I.4.2 Energie du solaire photovoltaïque en Algérie

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement Économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Pour ce faire, il est prévu la construction d'une usine de fabrication de silicium.

Par ailleurs, il est attendu qu'un réseau de sous-traitance nationale soit mis en place pour la fabrication des onduleurs, des batteries, des transformateurs, des câbles et autres équipements entrant dans la construction d'une centrale photovoltaïque. L'Algérie devrait disposer également, sur la même période, de capacités de conception, de procurèrent et de réalisation capable d'atteindre un taux d'intégration de l'ordre de 60% par des entreprises algériennes.

Sur la période 2015-2020, le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

Dans le cadre de la concrétisation du programme national des énergies renouvelables, un projet de 400 MWc en photovoltaïque, représentant la première tranche de ce programme a été lancé durant le 2^{ème} semestre de l'année 2013. Faisant partie du programme Complémentaire de production de l'électricité, prévu pour l'été 2014, ce projet a bénéficié de mesures dérogatoires d'urgence de passation, d'exécution, de règlement et de contrôle des marchés. Les contrats de réalisation y afférents ont été signés le 04 décembre 2013. Ce projet consiste en la réalisation de 23 centrales solaires photovoltaïques, dans la région des hauts plateaux : Ain Azel (Sétif), Ras el oued (B.B Arreridj), Oued El Ma (Batna), Chelghoum El Aïd (Mila), Oued El Kebrit (Souk Ahras), Ain El Melh (M'sila), Ain El Ibil (Djelfa), El Kheneg (Laghouat), Hdjiret (Ouargla), Ain Skhoua (Saïda), Sedrat Leghzel (Naâma), Labiodh Sid Cheikh (El Bayadh) et Telagh (Sidi Belabbes) ; et dans la région du sud-ouest : Aoulef, Zaouyet Kounta, Timimoun, Kabertene, Reggan, Adrar et Ain Salah pour une puissance globale de 318MW ; ainsi que dans la région du grand sud (Djanet, Tindouf et Tamanrasset) pour une puissance de 25MW.

Il ya lieu de rappeler que 16 centrales solaire photovoltaïques d'une capacité installée de 184 MW ont été mises en service durant la période 2014-2016.

Voici l'ensemble des centrales photovoltaïques réalisées pendant cette période [48] :

- Centrale photovoltaïque pilote de 1.1 MW à Ghardaïa, mise en service en juin 2014 ;
- Centrale photovoltaïque de 3 MW à Djanet (Illizi), mise en service en février 2015 ;
- Centrale photovoltaïque de 20 MW à Adrar, mise en service en octobre 2015 ;
- Centrale photovoltaïque de 3 MW à Kabertene (Adrar), mise en service en octobre 2015 ;
- Centrale photovoltaïque de 13 MW à Tamanrasset, mise en service en novembre 2015 ;
- Centrale photovoltaïque de 9 MW à Tindouf, mise en service en décembre 2015 ;
- Centrale photovoltaïque de 6 MW à Zaouiet Kounta (Adrar), mise en service en janvier 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 9 MW de Timimoune (Adrar), mise en service en février 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 5 MW de Reggane (Adrar), mise en service en janvier 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 5 MW d'In-Salah (Tamanrasset), mise en service en février 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 5 MW d'Aoulef (Adrar), mise en service en mars 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 20 MW d'Ain El-Ibel (Djelfa), mise en service en avril 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 20 MW de Kheneg (Laghouat), mise en service en avril 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 15 MW d'Oued El-Kebrit (Souk Ahras), mise en service en avril 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 20 MW de Sedrate Leghzal (Nâama), mise en service en mai 2016 ;
- Centrale photovoltaïque 30 MW d'Ain Skhouana (Saida), mise en service en mai 2016

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des statistiques sur la consommation, la production et les réserves d'énergies primaires fossiles et énergies renouvelables dans le monde, ainsi que le taux de la consommation annuel moyen des énergies renouvelables. Ces statistiques montrent le rôle important que jouent les sources d'énergie d'origines renouvelables en générale et l'énergie solaire photovoltaïque en particulier. En effet, celle-ci elle pourrait atteindre environ 1800 GW en 2030, pour une production représentant 14 % de la consommation mondiale d'électricité.

L'état de l'art des systèmes photovoltaïques connectés au réseau ou isolés ont aussi discutés, ils assument implicitement l'application des cellules cristallines, qui représentent plus de 85% du marché mondial du PV.

Dans plusieurs pays industrialisés, le marché de l'énergie solaire photovoltaïque est en très forte croissance, grâce à des centrales PV à grande échelle raccordées aux réseaux et bénéficiant d'un prix incitatif de rachat de l'électricité. Ceci nous a motivé à orienter, vers le control et la gestion de l'intégration de l'énergie d'une centrale photovoltaïque de grande puissance dans réseau électrique.

On a ensuite présenté l'importance de la production nationale d'électricité à partir des sources renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

On a également présenté la structure d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables pour couvrir une part de la demande nationale en électricité. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire photovoltaïque une part essentielle. L'objectif est d'atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Enfin, on a montré via un état d'art les capacités des différentes centrales photovoltaïques de puissance connectées au réseau (en opération ou en voie) installées en Algérie.

Gisement solaire et méthodes d'optimisation

2.1. Introduction

Ce présent chapitre s'articule sur deux axes distincts. Dans le premier axe, on va commencer par un aperçu sur l'ensoleillement à l'échelle urbaine puis on donne une description simplifiée du système solaire ainsi l'exposition de ses différentes performances et on termine par des détails sur le gisement solaire. Pour le deuxième axe, on va citer les différentes méthodes et approches d'optimisation des performances des systèmes solaires telles que les méthodes déterministes et les méthodes d'intelligence artificielle.

2.2. Paramètres caractérisant le système solaire

2.2.1. Mouvement terre- solaire

La course de la terre autour du soleil décrit une ellipse légèrement aplatie. Dans cette ronde annuelle autour du soleil, la terre effectue un tour complet sur elle-même en 365 jours autour de l'axe des pôles. Cet axe Nord-Sud fait un angle de $23^{\circ}27'$ avec la direction perpendiculaire au plan de l'orbite terrestre autour du soleil. [49]. Cette inclinaison est constante tout au long de la course autour du soleil et est responsable des variations saisonnières.

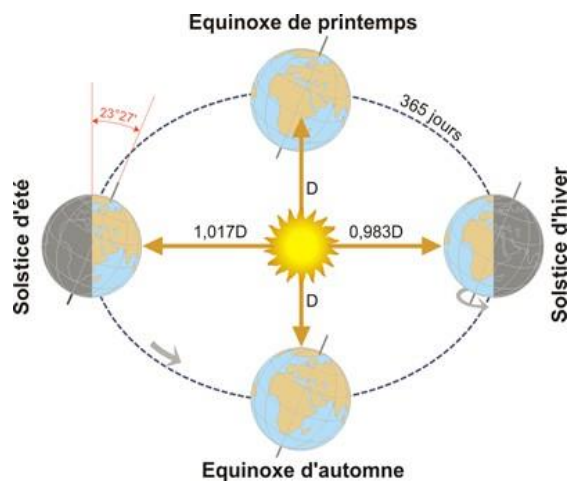


Fig. 2.1 : Description simplifiée du système solaire.

2.2.1.1. Coordonnées Equatoriales Du Soleil

Les coordonnées équatoriales du soleil sont à cette déclinaison et à cette heure. Ces coordonnées solaires sont indépendantes de la position de l'observateur sur Terre. Cependant, selon la position de la latitude sur Terre, l'orbite apparente du Soleil dans le ciel apparaît différente aux observateurs au sol.

2.2.1.1.1. Déclinaison solaire

L'axe de rotation de la Terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique. La déclinaison solaire est l'angle de la direction du soleil et le plan de l'équateur terrestre. Cet angle change avec les saisons.

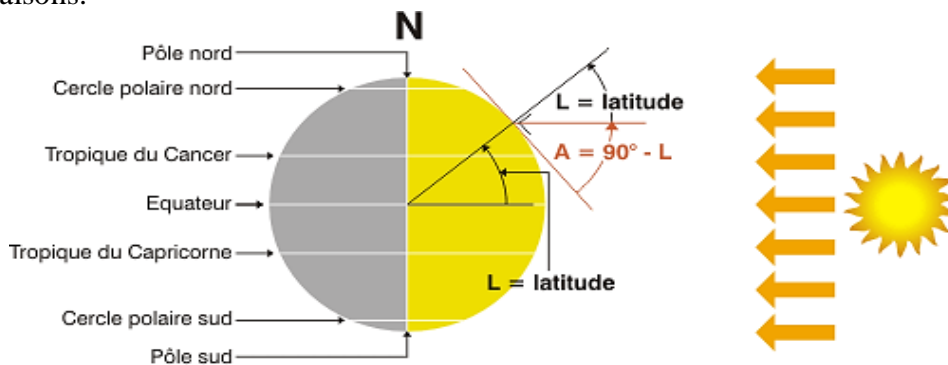


Fig.2.2 : Description simplifiée du système solaire.

La déclinaison : l'angle entre le plan équatorial et la direction Terre et Soleil. Il change de manière sinusoïdale entre le solstice d'été à 23 degrés 27 minutes et le solstice d'hiver à -23 degrés 27 minutes. L'inclinaison de la Terre aide à exprimer le trajet de Soleil en ciel. A midi, aux équinoxes de printemps / d'automne, le rayonnement est perpendiculaire à l'équateur (0° de latitude) et la durée du jour et de la nuit est la même partout sur Terre. Midi est le moment le plus facile pour calculer la position du soleil. En fait, l'altitude du soleil est égale à sa latitude plus son angle. $H = 90^\circ - L$

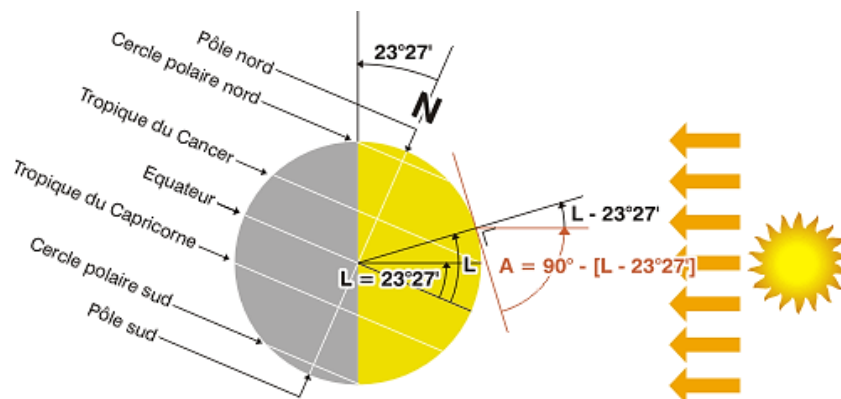


Fig.2.3 : Equinoxes De Printemps Et D'automne.

Si la Terre est inclinée par rapport aux rayons du Soleil, $H = 90^\circ - L + 23^\circ 27'$; l'altitude du Soleil à midi (Soleil) est de $23^\circ 27'$ au-dessus de l'équinoxe vernal, qui marque le solstice d'été.

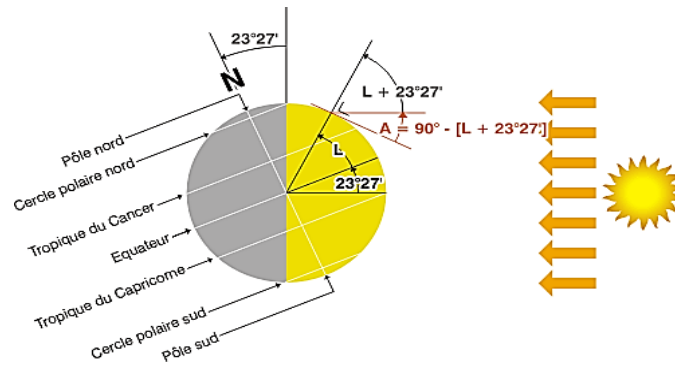


Fig.2.4 : Représentation du solstice d'été

L'inversion de l'inclinaison donne $H=90^{\circ}-L-23^{\circ}27'$. A midi, la température inférieure de $23^{\circ}27'$ à celle de l'équinoxe vernal, qui marque le solstice d'hiver [50].

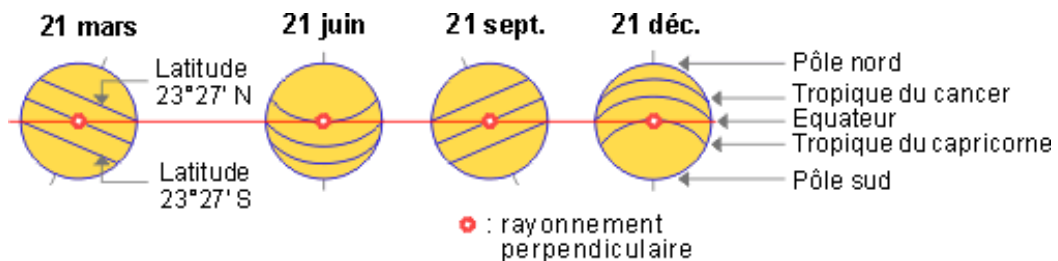


Fig.2.5 : Représentation du solstice d'hiver

2.2.1.1.2 L'altitude

Altitude est La position d'un lieu sur Terre déterminée par. Les coordonnées géographiques exprimées en valeurs angulaires sont des distances angulaires par rapport au plan de référence, au nord / au sud de l'équateur. Reliant les endroits de la terre avec la même latitude forme un cercle dont la face est // au plan équatorial. De là est venu un autre terme pour la latitude, "parallèle". Cinq degrés de latitude sont comptés de -90° à $+90^{\circ}$, la latitude à l'équateur étant de 0° [51].

2.2.2. MOUVEMENT DU SOLEIL

le Soleil se déplace, et pour un observateur n'importe où, Le mouvement du Soleil est ce à quoi il ressemble pendant la journée .En dehors des régions polaires, équatoriales et tropicales, il apparaît sous l'horizon oriental au lever du soleil le matin et à midi, le Soleil est à son point culminant au sud ou au nord. Leur chemin évident. Et le soir, sur l'horizon encore bas à l'ouest, c'est l'heure du coucher.

2.2.2.1. Repérage du soleil

La compréhension et la localisation constantes de la position du soleil dans le ciel sont

essentielles pour une exécution réussie du projet sur le terrain. Savoir choisir le meilleur alignement, choisir le bon moment pour être intéressant à publier et le bon moment pour le protéger. Pour en profiter au maximum. En hiver comme en été, il capte la lumière du soleil grâce à des systèmes actifs ou passifs. Position de l'espace intérieur et de la lumière naturelle : position des fenêtres, auvents, etc. à un instant donné on peut déterminer la position du soleil dans le ciel, ont utiliser deux coordonnées horizontales du soleil : l'azimut et l'altitude.

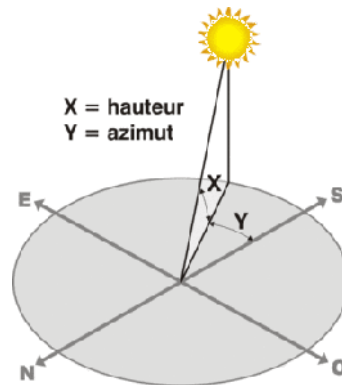


Fig 2.6: Coordonnées horizontales solaire.

2.2.3. Diagramme solaire

La carte du soleil offre un moyen pratique et facile de trouver la trajectoire du soleil dans le ciel n'importe où sur Terre. Une carte solaire est une représentation bidimensionnelle de la trajectoire du soleil à travers la sphère céleste en coordonnées locales. C'est la partie du ciel qui est visible dans toutes les directions au-dessus de l'horizon. La grille d'Une carte solaire montre les angles horizontaux et verticaux de chaque point de la sphère céleste. Les observateurs trouvent l'azimut et l'altitude du soleil dans un hémisphère transparent au-dessus et étire cette partie de la sphère en un cylindre vertical. Quelque chose à dire. [51].

La ligne horizontale de la carte représente la hauteur sous un angle de 10° au-dessus de l'horizon (0° pour l'horizontale, 90° pour le zénith). Les lignes verticales sur la figure représentent des angles d'azimut de 10° à 10° . Ceux-ci permettent de localiser le soleil dans le ciel en intégrant différentes positions du soleil à différents moments de la journée pour déterminer sa trajectoire. A partir de ces deux dernières coordonnées (azimut et élévation) on peut déterminer : Un simple masque solaire.

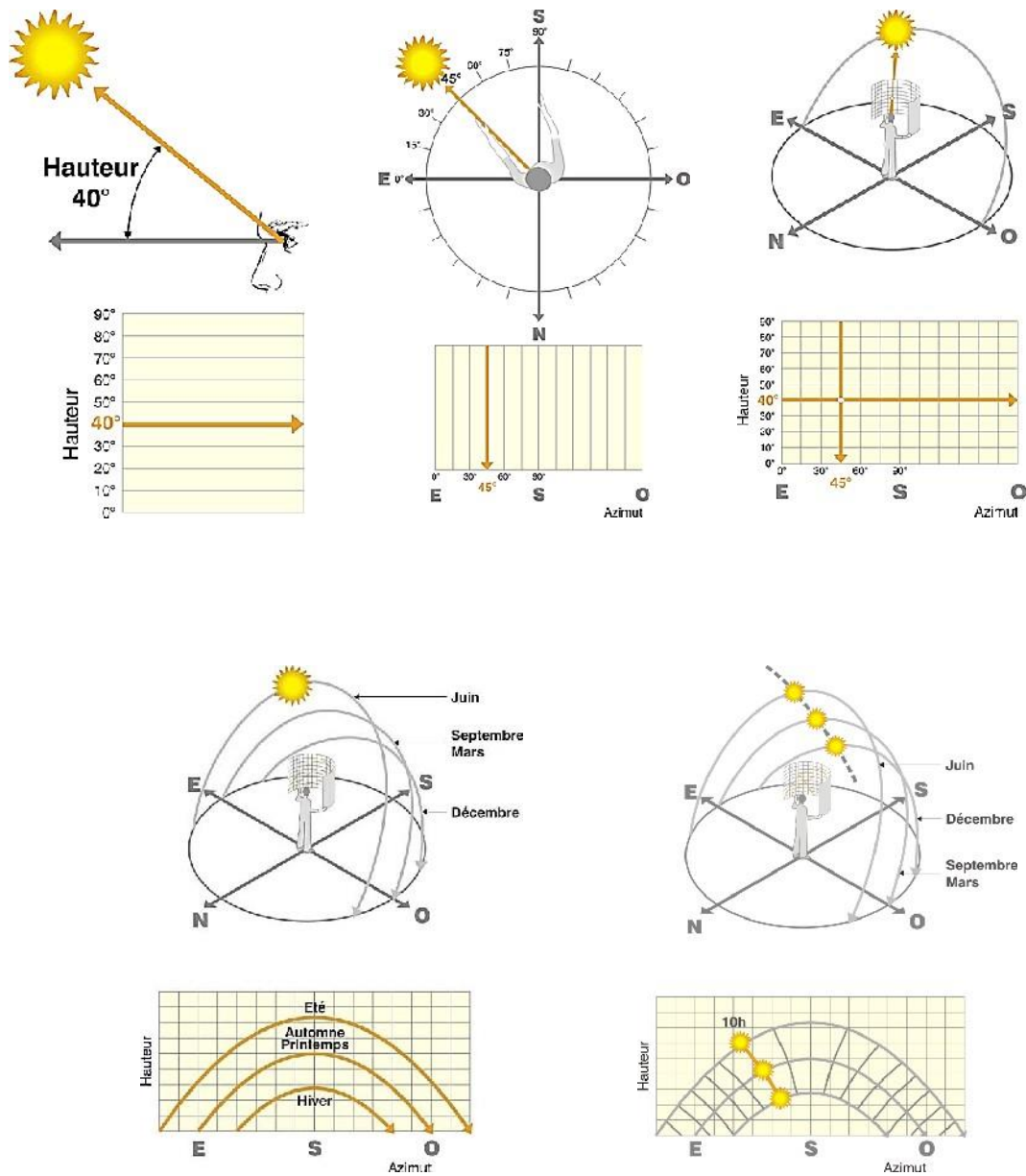


Fig.2.7 : Construction du diagramme cylindrique solaire

2.2.4. Masques solaires

L'origine des stores qui réduisent l'exposition au soleil des fenêtres ou des capteurs. Ils peuvent être causés par des mesures architecturales liées au relief, à la végétation existante, aux bâtiments voisins, voire au bâtiment lui-même. Dans la relation entre le soleil et l'architecture, la forme architecturale joue un rôle important non seulement en assurant la transmission/dissimulation des ressources énergétiques solaires, mais aussi en rendant plus visible l'apparence du bâtiment par la production d'ombres. En milieu urbain, ces masques représentent un solide bouclier aux zones voisines. Son rôle peut être positif lorsqu'une protection contre le soleil est recherchée. C'est le cas dans les villes méditerranéennes traditionnelles où les rues étroites et les hauteurs de construction sont sévèrement restreintes. Réduit le rayonnement direct et fournit une ombre confortable. En revanche, il peut être négatif si vous souhaitez laisser entrer le soleil, mais que les immeubles voisins le bloquent, comme dans une ville à basse altitude ou lorsque le soleil est bas. Il est important d'utiliser l'abaque du masque solaire pour mesurer l'impact des effets de masquage dans la conception bioclimatique. [51]

Définissez les zones qui seront ensoleillées et celles qui seront ombragées à un moment donné en raison des effets de masque architecturaux et urbains. La réponse est facile à dire oralement, mais pas exhaustive lorsqu'elle est présentée dans un outil graphique. Pour cette raison, il peut être souhaitable de se concentrer uniquement sur les saisons où la surface est entièrement, partiellement ombragée ou pas ombragée du tout par le masque. Celle-ci est transformée par la représentation de la courbe de l'orbite du soleil donnée dans son "schéma". Regardez la quantité de rayonnement solaire à l'emplacement et déterminez également la quantité de rayonnement absorbée par les obstacles. Pour cela, vous devez remonter le masque sur la partie où vous souhaitez utiliser le potentiel du soleil. Il est également nécessaire de déterminer les angles d'élévation et d'azimut de tous les obstacles et de les reporter sur un diagramme cylindrique ou volumétrique montrant la projection de la course annuelle du soleil et les silhouettes des bâtiments adjacents. Vous pouvez facilement saisir les heures d'ensoleillement et calculer le coefficient de réduction de la quantité d'ensoleillement, de sorte que vous pouvez connaître les heures de lever et de coucher du soleil selon la saison. [51].

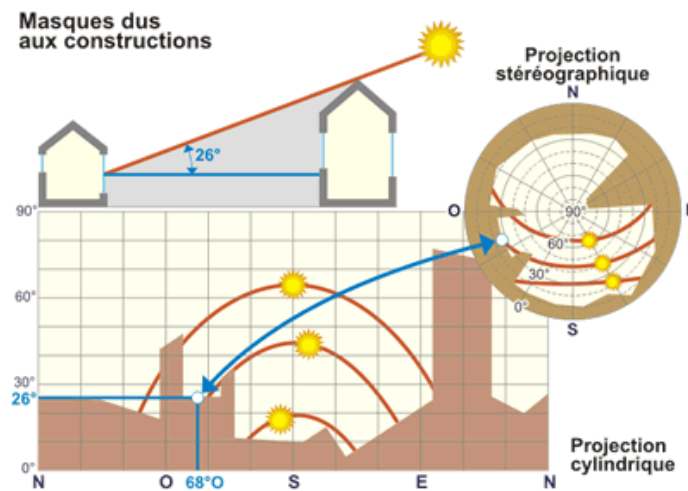


Fig.2.8 : Masques dus aux constructions représentées sur deux types de diagrammes (cylindrique et stéréographique).

2.3. Gisement énergétique solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour déterminer l'énergie reçue par un système énergétique solaire et aide au dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes à satisfaire.

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise :

- Selon la densité des stations pour lesquelles on a des données.
- Selon le nombre d'années de mesures disponibles.
- Selon le pas de temps des données (mois, jour, heure).
- Selon la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol etc.....

Les différentes irradiances solaires utilisées par les concepteurs de systèmes solaires, sont :

- L'irradiation directe à incidence normale.
- Les irradiances de base, la composante diffuse et la composante globale mesurées sur plan horizontal.
- L'irradiation solaire globale reçue sur des plans verticaux orientés Est, Ouest et Sud.
- L'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et orienté Sud.

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, est donnée par la figure (2.9) ci-dessous. Elle présente les différents niveaux énergétiques qui donnent

ainsi un découpage du pays en régions iso énergétiques. [52]

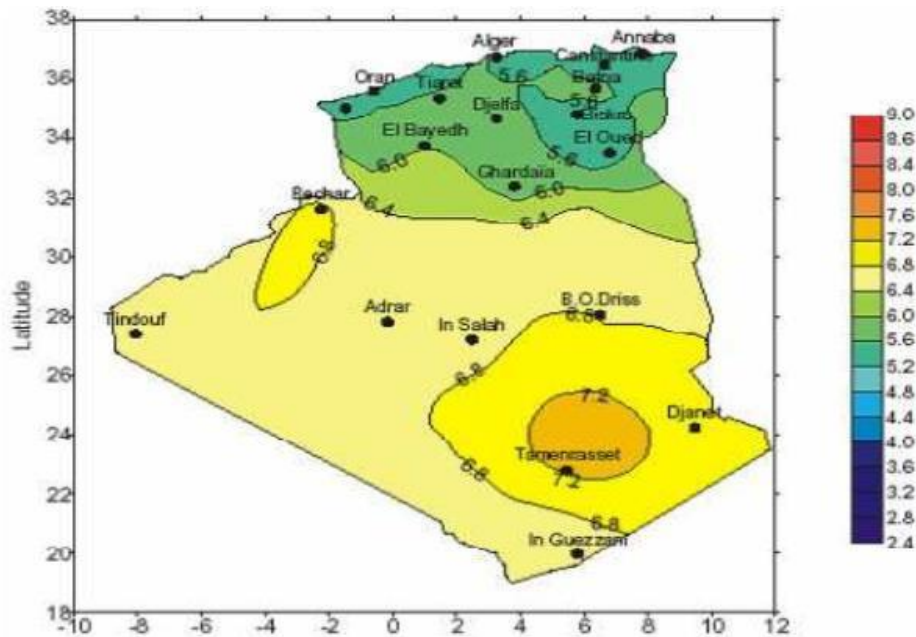


Fig. 2.9: Carte préliminaire des irradiations solaire de l'Algérie [52].

2.3.2. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5 \mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m^2 (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre, figure (2.11). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833W/m^2 (AM1.5) [534].

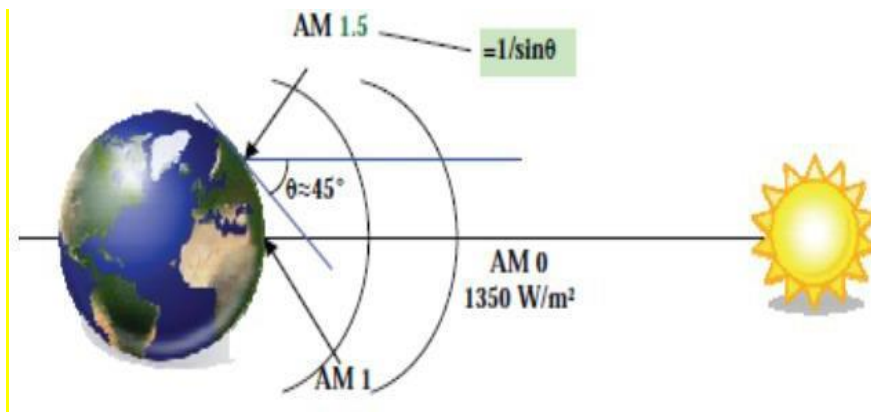


Fig.2.10 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [53]

2.3.3. Rayonnement global

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 , figure (2.12) [54]

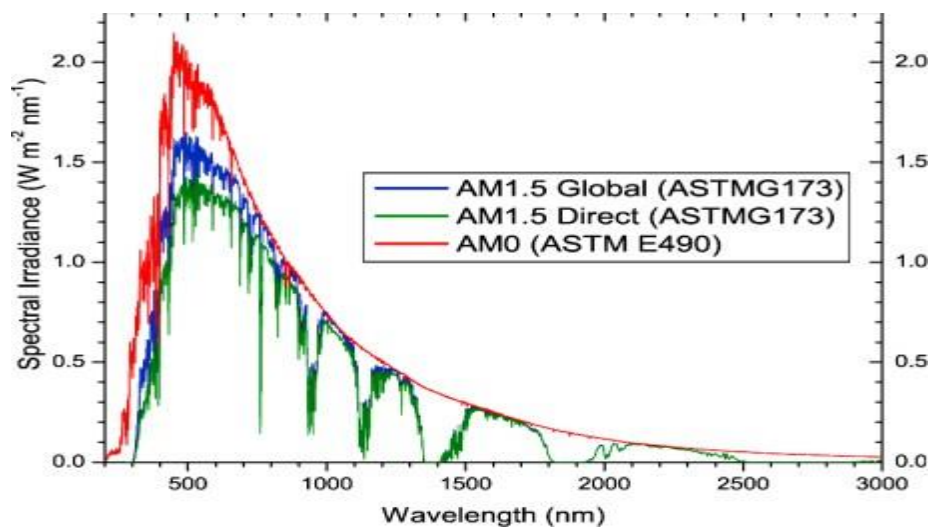


Fig. 2.11 : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. [54]

- Le rayonnement direct : la conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.
- Le rayonnement diffus : il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

- Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol : C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).
- Le rayonnement global : le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.

Dans la figure (2.13) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre. [53]

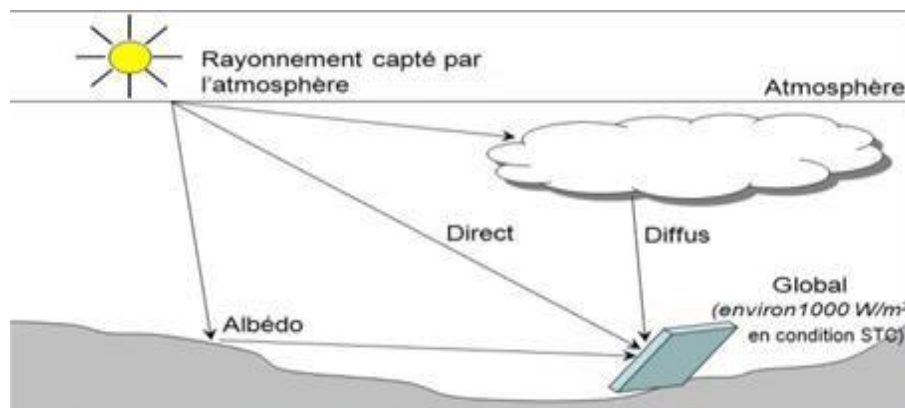


Fig. 2.12 : Types de rayonnement solaire reçus au sol [53]

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclaircissement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons.

2.4. Système de conversion d'énergie photovoltaïque

La technique de transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique (effet photovoltaïque) a été découverte par E. Becquerel en 1839, puis développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell. Ces chercheurs ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés" (c'est une technique de dopage qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs). Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque a progressé régulièrement, et même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance (montres, calculatrices,

pompes, réfrigérateurs solaires...). En effet, cette source d'énergie représente une solution idéale pour produire une électricité sans pollution et alimenter les réseaux électriques.

2.4.1 Potentiel solaire en Algérie

Discussion sur le développement durable. Se concentre sur les énergies renouvelables comme solution durable à la crise énergétique actuelle avec la hausse des prix du pétrole.

En raison de sa position géographique, l'Algérie, comme tous les pays méditerranéens, possède les plus grands gisements solaires au monde, ce qui la place parmi les premiers pays au monde avec de production d'énergie solaire thermique par an.

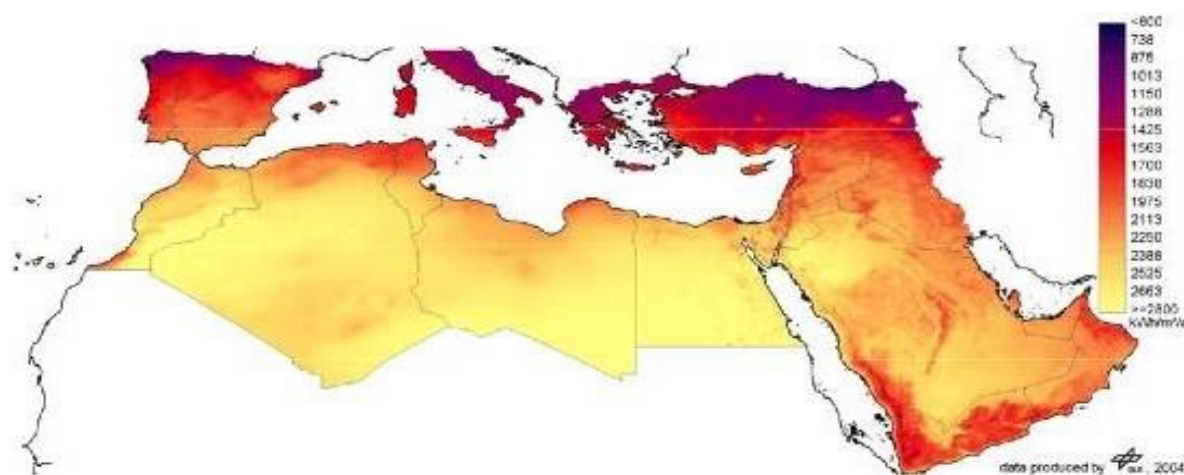


Fig.2.13 : L'irradiation solaire directe annuelle des pays méditerranéens et la péninsule arabe en 2002.

S. Bentouba et al (2010) rapportent le potentiel de l'Algérie d'énergies renouvelables, de l'énergie solaire et éolienne, et qu'une étude mondiale montre que le défi pressant de l'Europe dans les années prochaines est de développer son énergie dans le Grand Sahara. importé de D'où vient l'effort de l'Allemagne pour exportation de l'énergie solaire du Grand désert du Sahara vers l'Europe.

Le tableau (2.1) montre le potentiel de l'énergie solaire de chaque région climatique au territorial algérien en fonction de la quantité de rayonnement solaire reçue par an.

Tableau.2.1 : *potentiel solaire par région.*

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1700	2650

Les heures d'ensoleillement dépassent 2000 heures par an dans la majeure partie du pays, atteignant 3900 heures dans le désert du Sahara. Un mètre carré de surface horizontale reçoit environ 5 KWh d'énergie chaque jour pour la majorité du pays. Et de 1700 KWh/m²/an dans le nord et 2650 KWh/m²/an dans le sud.

Avec l'adoption du Plan National de Développement, l'état algérien fixe des objectifs pour le développement des énergies renouvelables. Et d'ici 2030, 37% de la demande d'électricité du pays sera satisfaite par des systèmes solaires thermiques et photovoltaïques.

2.4.1.1 Gisement Solaire Dans Les Régions Arides

Sahara algérien représente une véritable oasis énergétique avec un fort ensoleillement direct et est le pays le plus ensoleillé du monde de manière quotidienne et quasi continue (3000-3500 heures / an contre 1500 heures / an en France). La région du grand désert du Sahara est exposée à jusqu'à 2 900 kWh/m² de rayonnement direct par an et occupe la majeure partie de la zone requise pour la production d'énergie renouvelable à grande échelle. De même, les mesures satellitaires du rayonnement solaire par le Centre spatial allemand (DLR) montrent des valeurs d'ensoleillement exceptionnelles de l'ordre de 1200 kWh/m² /an (nord. Du Grand Sahara)

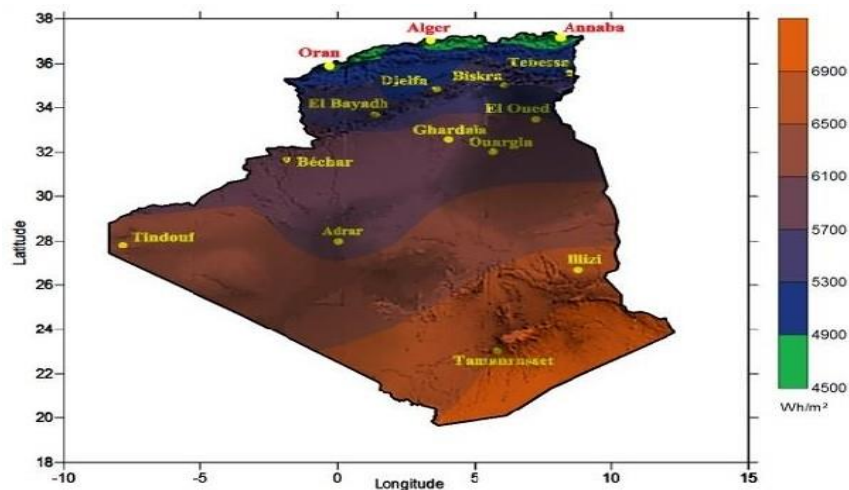


Fig.2.14 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur un plan horizontal (1992-2002).

2.5. Méthodes d'optimisation

L'optimisation consiste à trouver la meilleure solution parmi de nombreuses solutions possibles. Un objectif majeur de l'optimisation de la rentabilité des systèmes hybrides, y compris les sources de production d'énergie et les composants associés, est

de déterminer les ensembles de paramètres, les topologies et le nombre d'unités utilisées pour répondre aux spécifications et aux objectifs. Spécifique aux contraintes de conception. performance, efficacité, quantité, coût, etc. Pendant des décennies, les ingénieurs ont utilisé des techniques d'optimisation pour optimiser les dispositifs de systèmes hybrides, leurs composants et même les systèmes de contrôle. Le but de cette partie est de démontrer les techniques d'optimisation couramment utilisées dans le domaine du dimensionnement des systèmes hybrides, de démontrer diverses opérations liées aux réseaux intelligents et d'explorer diverses optimisations déterministes et stochastiques en présentant un algorithme.

2.5.1. Méta-heuristiques

Les Méta-heuristiques sont des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers l'optimum par échantillonnage d'une fonction dite « objectif ». Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques du problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution. Il existe un grand nombre de Méta-heuristique différentes, Fig.1.1, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. Ces méthodes utilisent cependant un haut niveau d'abstraction, leur permettant d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents

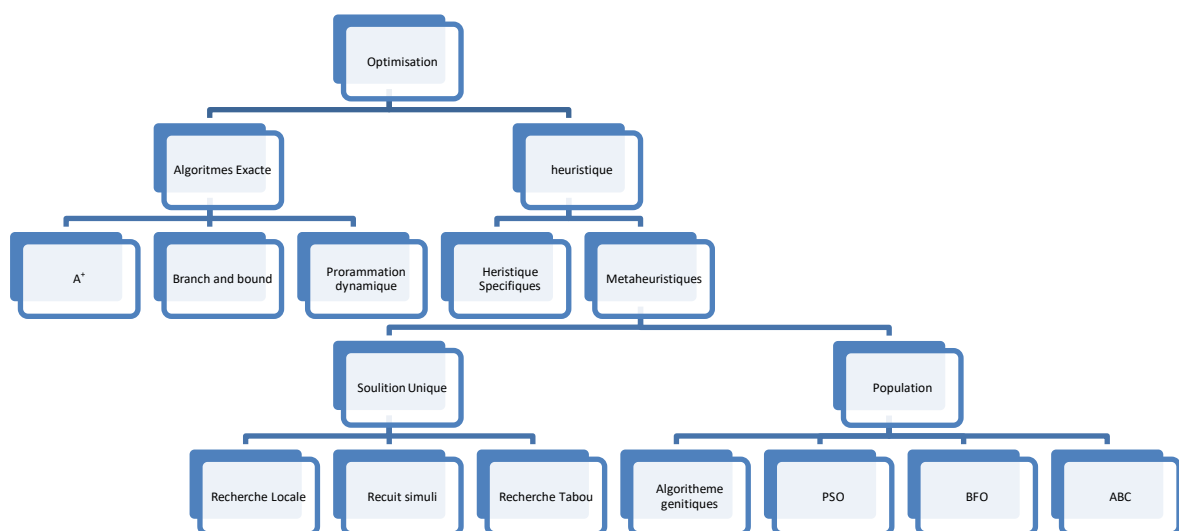


Fig.2.15 : Méthodes d'Optimisation Exactes & Méta-heuristique

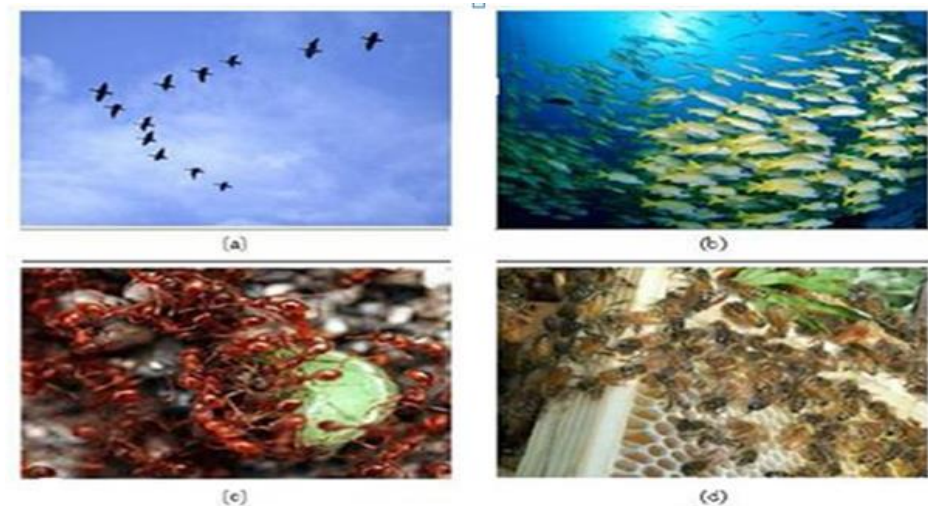


Fig.2.16 : Méthodes d'Optimisation Exactes & Méta-heuristique

Les Méta-heuristique sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (ex. le recuit simulé), en biologie (ex. les algorithmes génétiques, le système immunitaire), ou en éthologie (ex. colonies de fourmis, optimisation par essaims particuliers). Ces dernières constituent à part entière une catégorie de méthodes de résolution que l'on peut nommer « les heuristiques biomimétiques ». Depuis longtemps, ont été découverts les comportements variés des insectes et des animaux dans la nature. Les nuées d'oiseaux dans le ciel, le fourragement de nourriture des colonies de fourmis, les mouvements des bancs de poissons tourbillonnant en concert, etc. Ces types de comportements sont qualifiés de comportements en essaim.

Les recherches dans ce domaine ont amené à étudier ces comportements afin de savoir comment ces populations interagissaient, accomplissaient des tâches et évoluaient. En informatique, ces recherches ont mené à des modélisations issues directement de ces comportements notamment le principe qu'un groupe d'entités plutôt simples et obéissant à des règles locales de coordination pour leurs déplacements sont capables d'engendrer des mouvements globaux beaucoup plus complexes. Ces modélisations caractérisées par « l'intelligence en essaim ». L'organisation des populations en essaims est caractérisée par un phénomène de groupe, dont les particularités sont les suivantes :

1. Information locale limitée : chaque individu possède une connaissance locale de son environnement et ne connaît rien de la fonction globale de la population.

2. Des règles individuelles simples : chaque individu possède un jeu de règles comportementales simples limitées. Ce jeu de règles permet au groupe de coordonner ses actions collectivement et de construire une structure ou d'adopter une configuration globale.

3. La structure globale émergente accomplit une certaine fonction : cette structure permet au groupe de résoudre un problème. Pour cela, cette structure doit être :

- Flexible (adaptabilité à l'environnement) ;
- Robuste (adaptabilité aux erreurs de certains individus) ;

-Stable (capacité de cohésion lorsque l'essaim est en mouvement, afin de discriminer les répulsions au profit des attractions). Par exemple, dans le cas d'une formation d'oiseaux migrateurs, chaque oiseau essaie simplement de rester près de son voisin tout en évitant la collision avec lui. De plus, contrairement à ce que l'on pourrait penser, il n'y a pas de chef, chaque oiseau pouvant se trouver en tête de formation, au milieu ou à l'arrière de la formation. Ce type de comportement permet aux oiseaux de se protéger des prédateurs (pour ceux situés au milieu) et d'améliorer la recherche de nourriture (l'ensemble profitant des yeux de chacun).

La forme caractéristique en V de telles populations n'est donc en rien calculée, elle résulte uniquement de l'émergence d'une forme stable étant données les quelques règles simples présentées. Des comportements similaires se retrouvent dans le vol en groupe chez les insectes notamment les criquets à la recherche de la nourriture, ou encore dans la nage collective de certaines espèces de poissons, par exemple pour la chasse en groupe, le banc de thons prend la forme d'un entonnoir, et pour échapper à un ennemi, le banc prend des mouvements d'explosion.

2.5.2. Algorithme génétique (GA)

Les algorithmes génétiques s'inspirent de la théorie de l'évolution. Dans cette théorie, une population d'individus évolue grâce au mécanisme de la reproduction sexuée. Les individus les plus adaptés à leur milieu se reproduisent plus que les autres, favorisant les caractères les plus adaptés. Dans la famille des algorithmes stochastiques, beaucoup plus robustes que les algorithmes déterministes, les algorithmes génétiques sont de plus en plus utilisés. Ils sont basés sur un phénomène naturel qui a fait ses preuves : l'évolution. Plus précisément, ils s'inspirent de l'évolution d'une population d'individus dans un milieu donné. C'est en 1975 que J. Holland et son équipe adaptaient, pour la première fois,

les algorithmes génétiques pour la résolution de problèmes d'optimisation, en faisant un parallèle entre un individu dans une population et une solution d'un problème parmi un ensemble de solution. Ces algorithmes permettent de calculer une solution acceptable à un problème dont l'espace de solutions est trop grand pour être parcouru dans un temps raisonnable. Les algorithmes génétiques bases sur des éléments principaux : la sélection, le croisement et la mutation. Dans la littérature on parle alors d'opérateurs de reproduction [55].

2.5.2.1. Principe

Leur principe est simple [56]. Il est basé sur trois phases :

-La genèse : l'initialisation aléatoire d'individus pour la population de la première génération.
-La reproduction : l'évolution des individus de la génération courante vers la suivante à travers :

- 1) la sélection des individus reproducteurs.
- 2) le croisement génétique de ces individus pour la création de nouveaux individus.
- 3) la mutation de certains individus pour que le pool génétique ne s'affaiblisse pas.
- 4) l'évaluation des individus par le calcul de leur fitness.

2.5.2.2. Recueil du meilleur individu

On recherche le personnel le plus approprié en fonction de vos conditions souhaitées. Les étapes 2 et 3 sont répétées autant de générations (itérations d'algorithme) que nécessaire pour satisfaire le critère d'arrêt. Ceci est déterminé avant le début du processus. Et cette solution est représentée par les meilleurs individus de la dernière génération. La mise en œuvre d'un algorithme génétique nécessite une description détaillée de plusieurs étapes.

- 1/ le codage individuel représenté par les chromosomes.
- 2/ trouver la fonction de fitness et d'adaptation.
- 3/ définir les opérateurs de reproduction (c'est-à-dire la sélection, le croisement, la mutation).

Algorithmes Génétiques	Organismes biologiques
Chaîne de bits	Chromosome (génotype)
Bit	Gène
Position	Locus
Valeur du bit	Allèle
Mesure de performance	Adaptation à l'environnement
Solution, Structure décodée	Phénotypes
Epistatique	Non linéaire

Le codage des algorithmes génétiques. Il permet de représenter l'individu sous la forme d'un chromosome. Ce chromosome est constitué de gènes qui prennent des valeurs dans un alphabet binaire ou non. Le choix du codage est délicat. Il doit permettre de coder toutes les solutions et permettre la mise en œuvre des operateurs de reproduction. C'est ainsi que le bon déroulement des algorithmes génétiques sera assuré. Plusieurs codages sont employés. Voici quelques exemples :

- 1. Le codage binaire :** Le gène est codé par un caractère binaire, 0 ou 1. C'est le plus courant et celui qui a été employé lors de la première application des algorithmes génétiques.

Exemple							
Chromosome A							
0	1	0	0	1	1	0	1
Chromosome B							
1	1	1	0	0	1	0	1

- 2. Le codage par permutations de valeurs entières :** Le gène est codé par une valeur entière dans un ensemble de cardinalité égale au nombre de gènes. Ce codage est bien adapté aux problèmes d'ordonnancement.

Exemple							
Chromosome A							
1	3	6	2	5	8	4	7
Chromosome B							
6	1	3	2	7	4	5	8

3. Encodage par valeur : Les gènes sont encodés par des valeurs tirées d'un ensemble fini ou infini. Cet encodage est utilisé pour les valeurs qui ne peuvent être placées dans aucune des deux formes d'encodage précédentes. ces valeurs sont liées au problème à résoudre

Exemple							
Chromosome A							
A	A	C	G	T	T	C	G
Chromosome B							
2.34	6.67	0.50	0.34	1.87	5.78	3.67	9.12
Chromosome C							
BLUE	RED	GREEN	BLUE	WHITE	RED	RED	BLAK

Une fonction d'adaptation ou fitness attribue une valeur à chaque individu. Cette valeur est destinée à évaluer si certains individus sont mieux adaptés à leur environnement que d'autres. Cela signifie quantifier la réponse à un problème de solution possible particulier. De cette façon, les individus peuvent être comparés les uns aux autres.

Cette fonction spécifique à un problème peut souvent être facilement formulée avec seulement quelques paramètres. A l'inverse, les paramètres sont difficiles à définir lorsqu'il existe de nombreux paramètres ou des paramètres corrélés. Dans ce cas, la fonction est une somme pondérée de plusieurs fonctions. Dans ce cas, vous devrez ajuster les coefficients.

Les algorithmes génétiques sont basés sur le phénomène naturel de l'évolution. Plus précisément, ils émettent l'hypothèse que deux individus a priori adaptés à leur environnement produiront un individu mieux adapté par recombinaison génétique. Trois opérateurs sont disponibles pour cela : sélection, accouplement et mutation, et un opérateur optionnel, l'élitisme.

Le but de la sélection est de sélectionner des individus dans la population totale pour participer à la reproduction.

Il existe plusieurs méthodes, généralement basées sur la théorie darwinienne. En conséquence, les meilleurs individus ont une plus grande chance de survie et de reproduction. Voici deux des plus célèbres.

La technique de la roulette utilise une métaphore de roue de roulette de casino. La roue est divisée en autant de secteurs qu'il y a d'individus dans la population. La taille de ces

secteurs est proportionnelle à la personnalisation de chacun. Faire tourner la roue sélectionne un point unique pour le point d'arrêt de la balle. Par conséquent, il est plus probable que la personne la plus appropriée soit tirée au sort lorsque le jeu est chaotique.

Les méthodes de tournoi sont similaires à la vie réelle. Comme son nom l'indique, deux personnes ou plus s'affrontent et la meilleure gagne. Il existe plusieurs variantes. Par exemple, nous pouvons modifier le nombre de personnes qui doivent initialement s'inscrire ou permettre à la même personne d'être éligible plusieurs fois au cours du même tournoi.

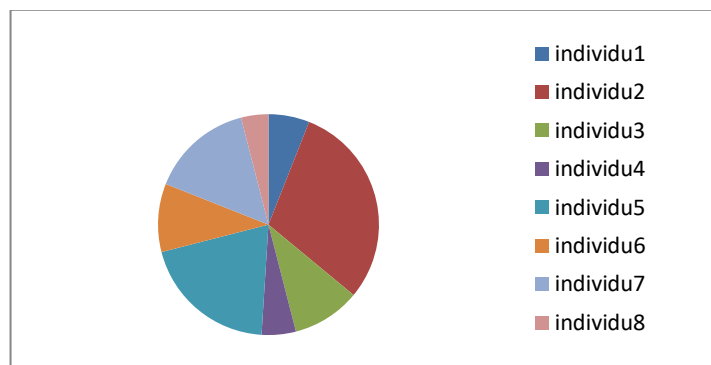


Fig.2.17 : Roulette et tournoi pour deux

L'accouplement combine les gènes des deux individus parents, ce qui donne deux nouveaux chromosomes à la progéniture. Les zones de croisement sont généralement sélectionnées au hasard dans le chromosome. Les techniques de croisement sont liées au codage. Croiser des chromosomes codés en binaire n'est pas la même chose que croiser des chromosomes codés en entier, mais le principe est le même. Lors du franchissement d'un point sur un chromosome. Ensuite, la première partie du chromosome du parent 1 est copiée sur l'individu de la génération suivante, l'enfant 1, et la première partie du chromosome du parent 2 est copiée sur l'enfant 2. Dans la deuxième partie du chromosome, les parents échangent leurs enfants, donc le parent 1 est copié sur l'enfant 2 et le parent 2 est copié sur l'enfant 1.

Parent 1								Enfant 1							
1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1
Parent 2								Enfant 2							
1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0
(a)								(b)							

Fig.2.18 : Le croisement d'un point avec le codage binaire

Comme les individus les mieux adaptés sont les plus susceptibles d'être choisis lors de la sélection, la perte de certains gènes est inévitable avec le temps. La mutation est l'opérateur qui permet d'éviter la dégénérescence de la population et d'enrichir le pool de gènes. Cette dégénérescence peut se traduire par une convergence des individus vers un optimum local. Classiquement, la mutation modifie aléatoirement, un petit nombre de gènes, avec un faible taux de probabilité.

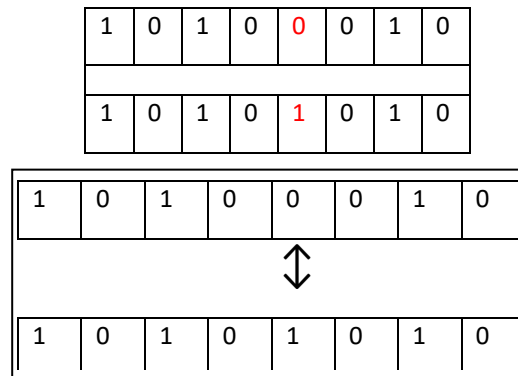


Fig.2.19 : Mutation du codage binaire

Elitisme est un opérateur d'options spéciales. Cela permet de s'assurer que les personnes les plus qualifiées sont transmises de génération en génération. En pratique, l'opérateur de sélection peut ne pas sélectionner pour lui, et l'accouplement avec un autre individu peut entraîner un individu moins apte si le gène n'est pas recombinaison avec succès, ou sa mutation peut entraîner un individu moins apte.

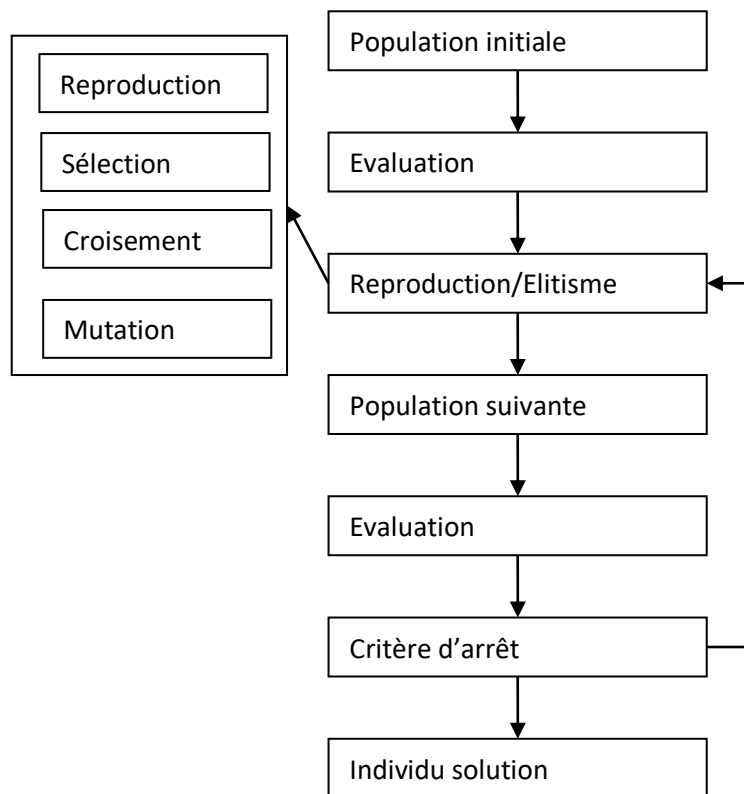


Fig.2.20 : Schéma du principe des Algorithmes génétiques

2.5.3. Algorithme d'essaims de particules (PSO)

Les algorithmes d'optimisation des essaims de particules ont été introduits par Kennedy et Eberhart en 1995 comme alternative aux algorithmes génétiques standards [57]. Ces algorithmes s'inspirent des essaims d'insectes (ou des bancs de poissons ou des volées d'oiseaux) et de leurs mouvements coordonnés. Tout comme ces animaux se déplacent en groupe pour trouver de la nourriture et éviter les prédateurs, les algorithmes d'essaim de particules recherchent des solutions aux problèmes d'optimisation. Les individus dans l'algorithme sont appelés particules et les populations sont appelées essaims. Dans cet algorithme, les particules décident de leur prochain mouvement en fonction de leur expérience. Dans ce cas, il se souvient de la meilleure position atteinte et de ses meilleurs voisins. La nouvelle vitesse et la direction des particules sont définies sur la base de trois tendances. La tendance à suivre son propre chemin, la tendance à revenir à la position la plus atteinte et la tendance à se déplacer vers le meilleur voisin.

2.5.3.1. Principe

Le principe du PSO développé par Kennedy et Eberhart [57] se base sur le comportement des nuées d'oiseaux. Ainsi, PSO a été fondamentalement développé à travers la simulation du comportement des nuées d'oiseaux dans l'espace bidimensionnel.

La position de chaque agent est représentée par ses coordonnées suivant les deux axes X et Y auxquels on associe les vitesses exprimées par V_x (vitesse suivant l'axe X) et V_y (vitesse suivant l'axe Y). La modification du comportement de chaque agent se base sur les informations de position et de vitesse. A chaque itération l'agent procède via une fonction objective à l'évaluation de sa meilleure valeur jusqu'à la (pbest) et sa position, suivant les deux axes X et Y. Cette information est obtenue à partir de l'analyse des expériences personnelles de chaque agent. En plus, chaque agent connaît la meilleure valeur globale du groupe (gbest) parmi les (pbests). Cette information représente la valeur autour de laquelle d'autres agents sont performants. Ainsi, chaque agent essaye de modifier sa position en se basant sur les informations suivantes :

- Position courante (x, y),
- Vitesse courante (V_x , V_y),
- Distance entre la position courante et pbest
- Distance entre la position courante et gbest

Cette modification peut être représentée par le concept de vitesse. La vitesse modifiée de chaque agent s'écrira de la manière suivante [58]:

$$V_i^{k+1} = W V_i^k + C_1 \text{rand}1 \times (pbest_i - S_i^k) + C_2 \text{rand}1 \times (gbest - S_i^k) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

Où : V_i^k : Vitesse de l'agent i à l'itération k W : Fonction de pondération

C_i : Facteur de pondération rand : Nombre aléatoire entre 0 et 1

S_i^k : Position courant de l'agent i à l'itération k

pbest i : Meilleur position de l'agent i. gbest : Meilleur position globale du groupe

La Fonction de pondération habituellement utiliser dans l'équation (2.1) est la suivante

$$W = W_{max} - \frac{W_{max}-W_{min}}{iter_i} \times iter \dots\dots\dots(2.2)$$

Où : Wmax : Poid final, Wmin : Poids initial, Iter max : Nombre maximum d'itération

Iter : Nombre courant d'itération

Le modèle utilise dans l'équation (2.2) est appelé approche poids inertie (Inertia Weights Approach IWA) 40. La position courante (cherchant le point dans l'espace de solution) est modifiée suivant l'équation ci-dessous :

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \dots\dots\dots(2.3)$$

S_i^k : Position courante de l'agent

S_i^{k+1} : Position modifiée de l'agent

V_i^{k+1} : vitesse modifiée de l'agent

Les Concepts de PSO présentes jusqu'ici nous permettent de construire l'organigramme

Suivant, Fig.2.21

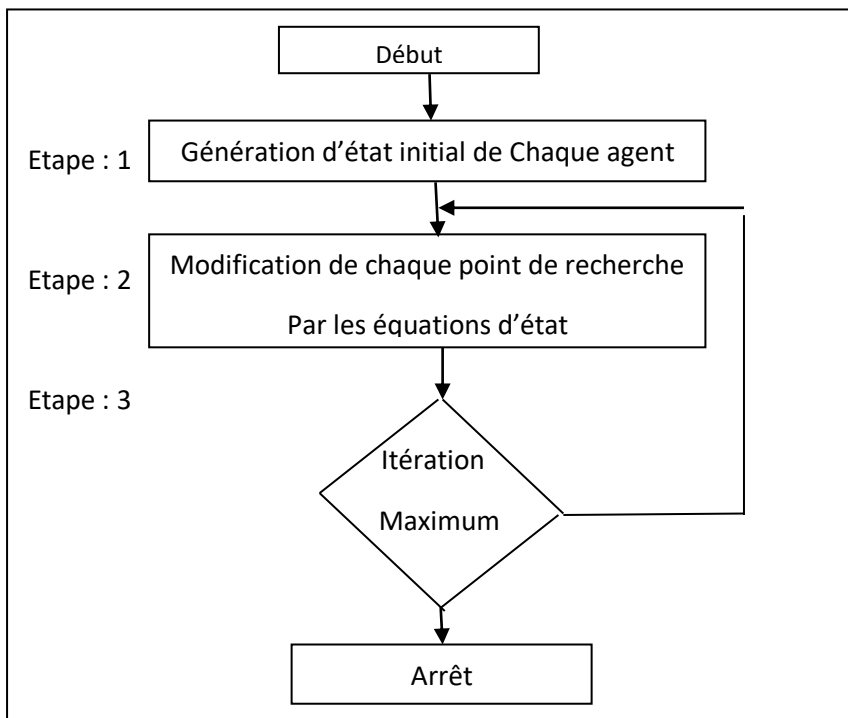


Fig.2.21 : Organigramme général du PSO

Cette Algorithme est particulièrement simple à mettre en œuvre. On le voit, l'espace des solutions est exploré par de multiples particules, les meilleures zones découvertes par une particule étant communiquées à un voisinage donné afin de répercuter l'information. Cependant, en général le voisinage n'est pas complet, ce qui évite à l'algorithme de tomber dans des optima locaux.

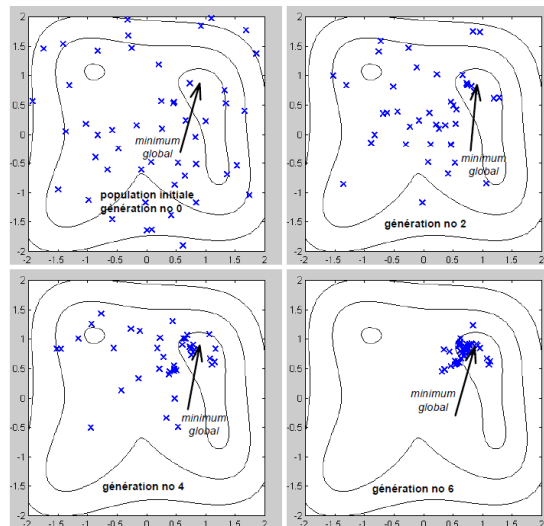


Fig.2.22 : Un exemple montrant la migration intergénérationnelle.

Les lignes représentent l'équivalence de la fonction de coût, où il y a 3 minima locaux et 1 minimum global (la fonction est sans bruit).

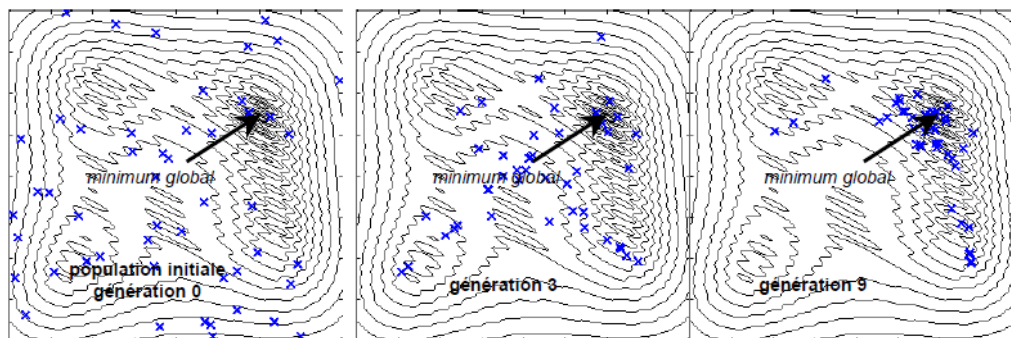


Fig.2.23 : La population converge vers l'optimum global malgré l'ajout de "bruit" sinusoïdal (fonction bruitée)

La PSO est une technique d'optimisation particulièrement efficace (même pour les fonctions objectives bruitées, Fig. 1.9) et, dans de nombreux cas, semble plus performante que les algorithmes génétiques, qui souffrent d'une mauvaise induction. En effet, un croisement de deux codes génétiques notés « bon » ou « adapté » ne garantit pas que le résultat sera

également adapté. En d'autres termes, PSO utilise des vecteurs de vitesse que les algorithmes génétiques n'utilisent pas. Les algorithmes PSO peuvent être utilisés pour résoudre différents problèmes d'optimisation pour différents domaines d'application. Il suffit d'ajuster les variables et paramètres de l'algorithme à ceux du problème considéré.

```
For each particle  $i = 1, \dots, s$  do
    Randomly initialize  $x_i$ 
    Randomly initialize  $v_i$  (or just set  $v_i$  to zero)
    Set  $y_i = x_i$ 
End for
Repeat
For each particle  $i = 1, \dots, s$  do
    Evaluate the fitness of particle  $i$ ,  $f(x_i)$ 
    Update  $v_i$  using equation
    Update  $\hat{y}$  using equation
For each dimension  $j = 1, \dots, Nd$  do
    Apply velocity update using equation
End loop
    Apply position update using equation
End loop
    Until some convergence criteria is satisfied
```

2.5.4. Algorithme d'essaims des Bactéries (BFO)

La recherche de nourriture comprend la localisation, la manipulation et l'ingestion d'aliments. Les animaux qui ont de bonnes stratégies de recherche de nourriture sont favorisés car ils peuvent obtenir assez de nourriture pour leur permettre de reproduire, et donc ils sont plus susceptibles de profiter de succès de la reproduction. Cela a conduit les scientifiques à modéliser l'activité de recherche de nourriture comme un processus d'optimisation. (Kevin et al.2002) dans [59] explique la biologie et la physique sous-jacente de le comportement a chimiotactiques (l'alimentation) de la bactérie *E. coli* (ceux qui vivent dans nos intestins), et

donne un programme informatique qui simule le processus d'optimisation distribué représenté par l'activité de recherche de nourriture bactérienne sociale et de l'appliquer dans des régulateurs adaptatifs.

2.5.4.1. Principe

La stratégie d'alimentation des bactéries dans l'intestin humain peut s'expliquer par quatre processus :

a/Chimiotactisme, b/L'essaimage,c/La reproduction, d/ L'élimination et la dispersion:.

2.5.5. Algorithme des colonies d'abeilles artificielles (ABC)

L'Algorithme artificiel de colonie d'abeille (ABC) est un algorithme d'optimisation basé sur le comportement intelligent de fourrager de l'essaim d'abeille à miel, proposé par Karaboga en 2005 [60]. Dans sa version de base, l'algorithme exécute un genre de recherche de voisinage combiné avec la recherche aléatoire et peut être employé pour tous les deux optimisation combinatoire et optimisation fonctionnelle.

2.5.5.1. Principe

Les algorithmes basés sur les colonies d'abeilles sont des Méta-heuristique évolutives qui appartiennent à la classe des algorithmes d'intelligence d'essaim. Dans la dernière décennie, beaucoup d'études basées sur divers comportements de colonies d'abeilles ont été développées pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoires complexes. Les rapports et les phénomènes internes d'une colonie d'abeilles sont très complexes, car en permanence des milliers d'abeilles ajoutent simultanément de petits éléments comportementaux qui s'assemblent pour constituer le comportement collectif de la colonie. Ces algorithmes sont principalement basés sur deux modèles différents : recherche de nourriture et mariage. Chaque modèle définit un comportement donné pour une tâche spécifique.

Généralement, une colonie d'abeilles se compose de femelles fertiles appelées reines, de milliers de mâles appelés bourdons et de milliers de femelles stériles appelées abeilles ouvrières. Après s'être accouplée avec quelques bourdons, la reine des abeilles engendre un grand nombre de jeunes abeilles appelées bourdons. L'abeille qui cherche à manger, appelée « éclairceuse », se trouve devant une tâche formidable. Elle quitte la ruche et cherche à manger,

elle doit donc reconnaître les bonnes sources de nourriture. Pour cela, elle doit enregistrer sa position par rapport à la ruche et accomplir le chemin du retour.

En arrivant, elle doit faire part de ses découvertes aux autres ouvrières et les persuader de s'envoler et de récolter de la nourriture dans la nouvelle source. Ceci doit être fait de la façon la plus économique possible, en tenant compte de la qualité de la nourriture et de sa distance par rapport à la ruche. Lorsqu'une abeille qui cherche à manger trouve une source de nourriture, cela peut être loin (jusqu'à dix kilomètres) de la ruche, Elle doit retourner dans son nid et informer les autres travailleurs acharnés de sa découverte. Pour ce faire, nous devons utiliser des informations sur la direction du nid, même si nous parcourons un cercle complet

Pour arriver là où nous sommes. Elle doit ensuite dire aux autres travailleurs acharnés la direction et la distance de la source de nourriture du nid et leur donner certains indices quant à sa qualité. Elle doit donc attirer l'attention des autres ouvrières, qui peuvent déjà être occupées à autre chose ou avoir reçu des messages d'autres abeilles.

Plus la source est riche (la quantité de nourriture), plus les abeilles se déplacent longtemps. Les directions sont données par rapport à l'azimut du soleil (dans le plan horizontal). La position angulaire de la source lumineuse est indiquée par l'angle que fait le méandre avec la normale du rayon, comme le montre la figure suivante.

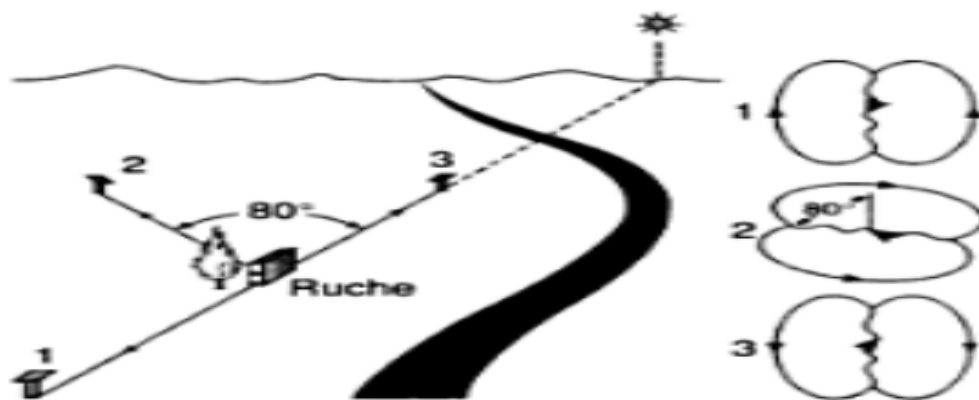
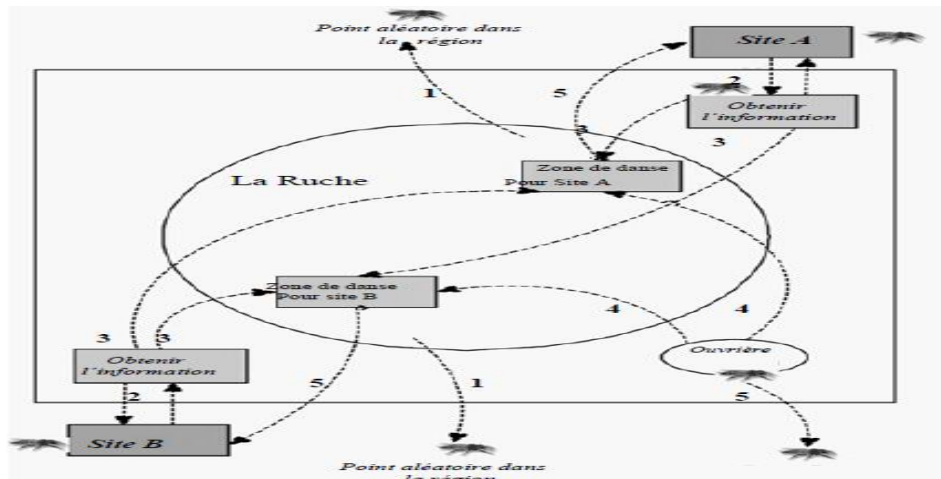


Fig.2.24 : L'indice de la direction.

Les abeilles recrutées qui ont suivi la danse effectuée par l'abeille éclaireuse commencent la recherche en utilisant les informations obtenues de la danse, donc la danse est un moyen de recrutement, tel que le nombre des abeilles allant explorer un certain site dépend de la qualité de nourriture, la distance et la direction de ce dernier. Le comportement de la recherche de nourriture dans une colonie d'abeille est représenté dans la figure suivante :



1 : Exploration, 2 : Collecte d'information, 3 : Retour à la ruche pour exécuter la danse, 4 : Observation de la danse, 5 : Partie pour la récolte de la nourriture.

Fig.2.25 : Comportement typique de la recherche de nourriture dans une colonie d'abeille.

Les algorithmes basés sur les insectes sociaux et l'intelligence des essaims commencent à prouver leur puissance et leur efficacité dans de nombreuses applications. Sur la base du comportement des abeilles, les scientifiques ont développé plusieurs algorithmes puissants. Si vous ne prenez que quelques-unes des propriétés et des comportements de l'abeille et que vous ajoutez de nouvelles fonctionnalités, vous pouvez concevoir une nouvelle classe d'algorithmes. L'algorithme ABC, a été appliqué pour la modélisation et la classification des données. Dans cet algorithme, les abeilles sont divisées en trois groupes : les abeilles ouvrières (butineuses), les abeilles spectatrices (abeilles d'observation) et les abeilles orienteuses (abeilles éclaireuses).

Chaque source de nourriture n'a qu'une seule abeille ouvrière. Cela signifie que le nombre d'abeilles utilisées correspond au nombre de sources de nourriture. Les abeilles qui utilisent les sites de butinage sont obligées de devenir des éclaireuses à la recherche aveugle de nouvelles sources de nourriture. Les abeilles ouvrières échangent des informations avec les abeilles gardiennes au sein de la ruche, ce qui leur permet de sélectionner les sources de nourriture à explorer. Une fonction objective donnée $f(x)$ peut être encodé comme $F(x)$ pour représenter la quantité de nectar à l'emplacement x , ainsi la probabilité P_i d'une abeille spectatrice choisissant de s'attaquer à la source de nourriture préférée x_i peuvent être définies par :

$$p_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{j=1}^S F(x_j)} \dots \dots \dots (2.3)$$

Tel que S est Nbre de sources de nourriture.

À une source précise de nourriture, l'efficacité de la choisi est déterminée par F et T où F est la quantité de nectar et T est le temps passé à la source de nourriture. Si une source de nourriture est explorée à un nombre donné des explorations sans amélioration, alors elle est abandonnée. Le pseudo code simple pour l'algorithme ABC est donné ci-dessous :

2.5.6. Algorithme ABC

1. Évaluer l'aptitude de la population.
2. Une nouvelle population est créée (alors que les critères d'arrêt ne sont pas remplis).
3. Emplacement sélectionné pour la recherche de voisins.
4. Recrutez des abeilles à l'endroit que vous avez choisi (plus il y a d'abeilles, mieux c'est).
Emplacement et évaluation de la condition physique.
5. Sélectionnez les meilleures abeilles de chaque lit.
6. Affectez au hasard les abeilles restantes à l'étude et évaluez leur fitnesses.
7. Terminez le processus tant que les critères d'arrêt sont remplis

. En plus du comportement de butinage, il existe un autre algorithme inspiré du processus de reproduction biologique des abeilles appelé MBO (Marriage in Honey Bees Optimization). L'optimisation du mariage des abeilles est apparue en 2001 et a d'abord été appliquée au problème des 3 satellites et plus tard à d'autres problèmes tels que la coloration de graphes, le partitionnement, l'exploration de données et la programmation stochastique dynamique. Pour initialiser l'algorithme MBO, nous avons fixé cinq paramètres : (1) le nombre de reines, (2) le nombre d'abeilles ouvrières, (3) le nombre de poussins, (4) le nombre de poussins volants, (5) la taille du sperme de la reine sac.

Dans le processus de recherche, la reine représente la solution et les ouvriers représentent l'heuristique utilisée pour la recherche locale (amélioration). La taille des vésicules séminales indique le nombre d'accouplements par reine. Au début de l'algorithme, les travailleurs sont initialisés à l'aide de certaines heuristiques.

Un groupe de reines a été engendré au hasard et leurs génotypes ont été améliorés à l'aide d'une heuristique (ouvrière) pour n'obtenir que les meilleures reines. Une série de vols d'accouplement est ensuite effectuée, la vitesse et l'énergie de chaque reine étant initialisées de manière aléatoire à des valeurs de $[0,5,1]$ pour s'assurer que les reines effectuent un certain nombre de vols. La transition effectuée par chaque reine est fonction de cette vitesse et de cette énergie. Lors de chaque vol répété, la reine des abeilles s'accouplera avec les drones qu'elle rencontre sur sa trajectoire de vol en fonction de la probabilité. Après un accouplement réussi, le sperme de bourdon (génotype) est introduit dans les vésicules séminales de la reine des abeilles. Une fois que toutes les reines ont terminé leur vol, le processus de formation des poussins commence. Pour créer un nouveau poussin, une reine est sélectionnée en fonction de son coût génotypique et du sperme est sélectionné au hasard dans les vésicules séminales de la reine. Le sperme est ensuite accouplé avec le génotype de la reine. Utilisez ensuite le travailleur pour appliquer des mutations à de nouveaux poussins et durcir le travailleur. Les poussins nouvellement améliorés sont ensuite triés en fonction de leur morphologie physique (forme physique), remplaçant les reines de mauvaise qualité jusqu'à ce qu'aucun poussin ne soit meilleur que chaque reine.

Les poussins restants sont ensuite tués et un nouveau vol d'accouplement est effectué. Ceci est répété jusqu'à ce que tous les vols de mariage soient générés ou qu'un critère d'arrêt soit rempli.

Applications et
optimisation basée sur
les méthodes
métaheuristiques

3.1 Introduction

L'optimisation est un sujet capital dans la recherche opérationnelle, un grand nombre de problèmes pouvant en effet être transformés en des problèmes d'optimisation. Les problèmes d'identification, l'apprentissage supervisé de réseaux de neurones, problème du voyageur de commerce ou encore le problème de plus court chemin sont, par exemple, des problèmes d'optimisation utilisés dans de nombreux domaines, ces méthodes présentent l'avantage d'être généralement efficaces, sans pour autant que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme qu'il utilise.

Ces algorithmes stochastiques d'optimisation globale peuvent être appliqués à tout problème. Ce sont en général des problèmes aux données incomplètes, incertaines, bruitées ou confrontés à une capacité de calcul limitée. Ces algorithmes sont inspirés par la physique (recuit simulé, recuit micro canonique), la biologie (algorithmes évolutionnaires) ou l'éthologie (colonies de fourmis, essaims particuliers). Ils se prêtent aussi à toutes sortes d'extensions, notamment en optimisation multi objectif.

Ce chapitre présente un état de l'art des méta heuristiques d'optimisation pour les problèmes mono-objectif aussi bien que pour les problèmes multi objectifs. Les méta heuristiques sont une famille d'algorithmes stochastiques. Apparues au début des années quatre-vingts, elles sont destinées à résoudre des problèmes d'optimisation difficile.

3.2 Optimisation

Un problème d'optimisation en général est défini par un espace de recherche S et une fonction objective f . Le but est de trouver la solution $\mathbf{s}^* \in S$ de meilleure qualité $f(\mathbf{s}^*)$. Suivant le problème posé, on cherche soit le minimum soit le maximum de la fonction f . L'équation (2.1) montre bien l'aspect de minimisation, maximiser une fonction f étant équivalent à minimiser f .

$$\mathbf{s} = \min(f(\mathbf{s}) \mid \mathbf{s} \in S) \quad (3.1)$$

De plus, un problème d'optimisation peut présenter des contraintes d'égalité et/ou d'inégalité sur les solutions candidates $\mathbf{s} \in S$, être multi objectif si plusieurs fonctions objectives doivent être optimisées.

Il existe de nombreuses méthodes déterministes (exactes) qui permettent de résoudre certains problèmes d'optimisation en un temps fini. Néanmoins, ces méthodes sollicitent que la fonction objective présente un certain nombre de caractéristiques, telles que la convexité, la continuité ou encore la dérivabilité.

Certains problèmes restent cependant trop compliqués à résoudre pour les méthodes exactes. Certaines caractéristiques peuvent poser des soucis pour ces méthodes. Dans ce cas, le problème d'optimisation est dit difficile, car aucune méthode déterministe ne peut résoudre ce problème en un temps raisonnable [61].

Les problèmes d'optimisation difficile se divisent en deux catégories : les problèmes à variables discrètes et les problèmes à variables continues. De façon générale, un problème d'optimisation à variables discrètes, ou combinatoire, consiste à trouver, dans un ensemble discret, la meilleure solution réalisable, au sens du problème défini par (2.1). Le problème majeur réside ici dans le fait que le nombre de solutions réalisables est généralement très élevé, donc il est très difficile de trouver la meilleure solution dans un temps raisonnable.

Les problèmes à variables continues sont, eux, moins formalisés que les précédents. En effet, la grande majorité des méta heuristiques existantes ont été créées pour résoudre des problèmes à variables discrètes [62].

Cependant, la nécessité croissante de méthodes pouvant résoudre ce type de problèmes a poussé les chercheurs à adapter leurs méthodes au cas continu. Les difficultés les plus courantes de ce type de problèmes sont les corrélations non identifiées entre les variables, le caractère bruité des fonctions ou encore des fonctions objectives qui ne sont accessibles que par dispositif expérimental. Il est à noter qu'il existe des problèmes à variables mixtes, c'est-à-dire que le problème présente à la fois des variables discrètes et continues.

3.3 Algorithmes d'optimisation

3.3.1 Heuristiques

On appelle une heuristique d'optimisation toute méthode approximative se voulant primitive, rapide et adaptée à un problème donné. Sa capacité à optimiser un problème avec un minimum d'informations est contredite par le fait qu'elle n'offre aucune assurance quant à l'optimalité de la solution trouvée. Du point de vue de la recherche opérationnelle, cette anomalie n'est pas toujours un obstacle, tout particulièrement quand une seule approximation de la solution optimale est recherchée [61].

3.3.2 Méta heuristiques

Certaines heuristiques sont applicables à de nombreux différents problèmes sans apporter des changements majeurs dans l'algorithme, c'est le cas des méta heuristiques. La plupart des heuristiques et des méta heuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information et de faire face à des problèmes comme l'explosion

combinatoire. En plus de cette base stochastique, les méta heuristiques sont habituellement itératifs, Elles tirent distinctivement leur gain de leur aptitude à éviter les optimums locaux, soit en acceptant une dégradation de la fonction objective au cours de leur progression, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche. Souvent inspirées de la physique, biologie et éthologie [61].

Finalement, on ne doit pas oublier qu'un des intérêts majeurs des méta heuristiques est leur facilité d'utilisation dans des problèmes palpables. Un des investissements des méta heuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et de simplifier son réglage pour l'adapter à un problème d'optimisation donné.

3.3.2.1 Algorithme Génétique

Holland [63] puis Goldberg [64] d'évaluent l'algorithme génétique, un méta heuristique permettant à l'origine de résoudre des problèmes à variables discrètes C'est un algorithme élitiste à base d'une population de solutions. Cette population évolue durant plusieurs générations en sélectionnant, à chaque étape, les individus les plus performants. Certains individus se reproduisent, d'autres sont supprimés, un héritage génétique est transmis de génération en génération et conduit les individus les plus adaptés (i.e. répondant le mieux au problème) à survivre. Le processus est répété jusqu'à un certain critère d'arrêt.

3.3.2.1.1 Principe

Un algorithme génétique (Algorithme 1) consiste à appliquer itérativement un ensemble d'opérations définies comme suit.

Algorithme 1 : Algorithme génétique

```
// Phase d'initialisation de la population, G = 0
1 : Initialisation des N individus selon une distribution uniforme
// Phase d'évolution de la population
2 : tant que critère de fin non satisfait faire
    // Génération suivante G + 1
3 :   Sélection aléatoire de p individus parents
4 :   Croisement des p individus sélectionnés
5 :   Mutation des λ enfants obtenus
6 :   Evaluation des λ enfants obtenus
7 :   Sélection pour le remplacement
8 : fin
```

Sélection

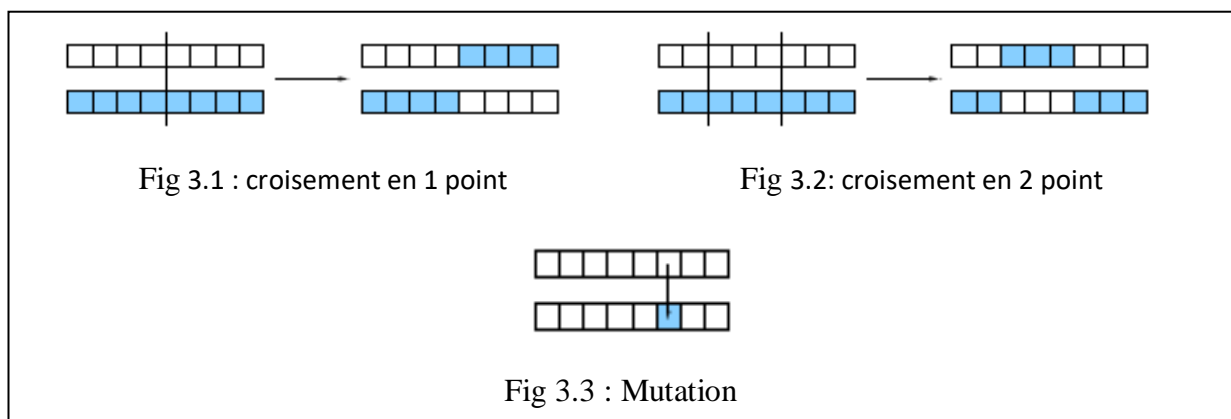
Elle permet de considérer un ensemble d'individus de la population sur la base de leurs performances. Généralement, on distingue deux opérateurs différents de sélection. La sélection parentale est destinée à la reproduction, tandis que la sélection de remplacement maintient la taille de la population constante, en choisissant les individus qui survivront lors de la prochaine génération. Une sélection retient de préférence les meilleurs individus mais doit aussi donner une chance aux moins bons pour éviter les problèmes de convergence prématurée. Cela peut se faire de plusieurs manières aléatoirement, de manière élitiste, par le biais d'un tournoi, etc.

Croisement

L'opération de croisement permet d'explorer l'espace de recherche en diversifiant la population. Elle manipule généralement les chromosomes de deux parents pour générer deux enfants. Il existe différents types de croisement, comme par exemple le croisement en un point (Figure 3.1), en deux points (Figure 3.2).

Mutation

Cette opération reflète le caractère d'exploitation de l'algorithme. La mutation provoque une petite perturbation sur le chromosome d'un individu : un, ou plusieurs gènes, tirés aléatoirement, sont perturbés (Figure 3.3).



Il existe de nombreuses adaptations pour le contexte continu, RCGA (Real-Coded Genetic Algorithm) [65-68]. Par ailleurs, les stratégies évolutionnaires et l'évolution différentielle sont deux méthodes fondamentalement dédiées à l'optimisation en variables continues.

3.3.2.2 Algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire

L'algorithme « d'Optimisation par Essaim Particulaire » ou Particle Swarm Optimization (PSO) est un algorithme à population, proposé en 1995 par Russel Eberhart et James Kennedy [69]. Contrairement aux algorithmes basés sur des opérateurs génétiques, il ne se base pas sur la sélection, le croisement des meilleurs individus mais sur la collaboration entre eux. De plus contrairement aux ACO, il ne possède pas de mémoire centralisée. La population est ainsi constituée d'un ensemble d'agents, ou particules, peu intelligents (i.e. qui n'ont qu'une connaissance restreinte de leur milieu) mais fortement communicants (selon une architecture définie de voisinage). L'analogie animalière correspond aux bancs de poissons ou aux vols d'étourneaux possédant une dynamique de déplacement complexe. Cette dynamique respecte des contraintes implicites du groupe, de direction et de vitesse permettant de construire une organisation cohérente

2.3.2.2.1 Principe

Chaque particule représente une solution du problème. Elle possède une position (une solution du problème) et une « vitesse ». La vitesse est en fait un vecteur de déplacement, de modification de sa position actuelle, définissant sa future position probable. De plus, chaque particule possède une mémoire de la meilleure position visitée jusqu'alors ainsi que de la meilleure position de son groupe d'informatrices (ou voisinage).

Chaque itération de l'algorithme correspond à un déplacement de sa population de particules dans l'espace de recherche, selon trois typologies de comportements sociaux :

- le comportement inertiel, par lequel la particule tend à suivre le déplacement induit par sa Vitesse ;
- le comportement cognitif, par lequel la particule va avoir tendance à se rapprocher de sa meilleure position visitée ;
- le comportement social, par lequel la particule se base sur les informations de son voisinage pour orienter son déplacement.

Le déplacement effectif de chaque particule, lors d'une itération de l'algorithme, est une combinaison pondérée et probabiliste de ces trois comportements. Il est illustré par la figure

3.4.

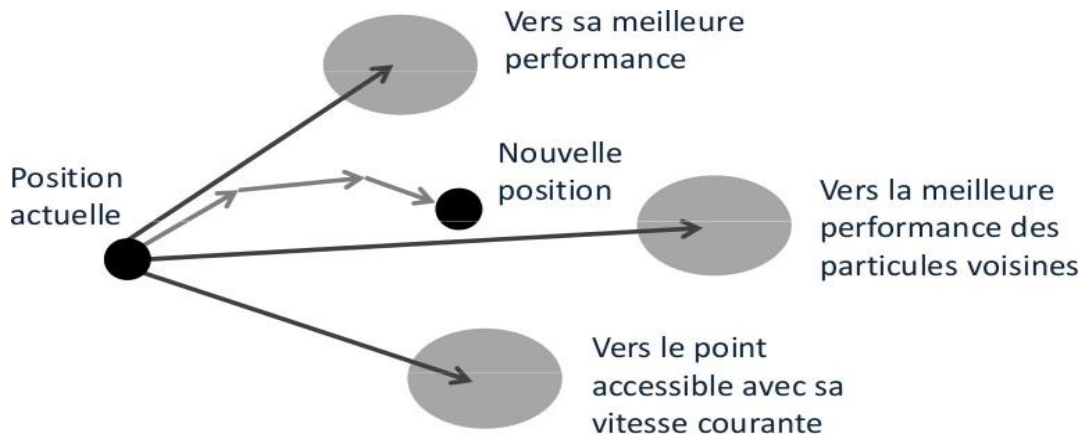


Fig 3.4 : Déplacement d’une particule [70].

Considérant un problème de dimension D , N particules sont initialisées aléatoirement dans l’espace de recherche. La $I^{\text{ème}}$ particule est située à la position $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{iD})$, une solution du problème à optimiser. La qualité de la position de la particule est évaluée par la valeur de la fonction objectif en cette position. La $I^{\text{ème}}$ particule mémorise sa meilleure position atteinte jusqu’alors (en premier lieu, sa position initiale), notée $pbest_i$. Elle connaît également la meilleure position de son voisinage

notée $gbest_i$. Enfin, elle possède une vitesse initiale $V_i = (v_{i1}, \dots, v_{iD})$.

Le déplacement de l’essaim est effectué à chaque itération de l’algorithme. étant donné un état de l’essaim à un temps t , au temps $t + 1$ la vitesse et la position de la $I^{\text{ème}}$ particule sont recalculées selon les équations (3.2) et (3.1) :

$$v_{ij}^{t+1} = wv_{ij}^t + c_1r_{ij}^t(pbest_{ij}^t) + c_2r_{ij}^t(pbest_{ij}^t), \quad j \in \{1, \dots, D\} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}, \quad j \in \{1, \dots, D\} \dots\dots\dots(3.3)$$

Où : w est une constante, le coefficient d’inertie introduit en [71], c_1 et c_2 , deux constantes, les coefficients d’accélération. c_1 correspond à la composante cognitive de la particule car elle pondère le déplacement vers la meilleure position connue de la particule, c_2 correspond à la composante sociale car elle pondère le déplacement vers la meilleure position connue du voisinage de la particule. Enfin, r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires, tirés uniformément dans $[0, 1]$, pour chaque dimension.

L'algorithme 2 décrit le déroulement global de l'algorithme.

Algorithme 2 : Algorithme PSO

```
// Phase d'initialisation de l'essaim
1 : Initialisation des N particules (vitesse  $v_{0i}$ , position  $x_{0i}$  et  $p_{besti} = x_{0i}$ )
2 : évaluation de la qualité des positions de chaque particule
// Phase de déplacement de l'essaim
3 : tant que critère de fin non satisfait faire
4 :   | red pour chaque particule i faire
5 :   |   mise `a jour de  $p_{besti}$  et  $g_{besti}$ 
6 :   | fin
7 :   | pour chaque particule i faire
8 :   |   d`déplacement de la particule selon (1.32) et (1.33)
9 :   |   évaluation de la qualité de la position
10 :  | fin
11 :  Sauvegarde de la meilleure position de l'essaim
12 : fin
```

Les paramètres de l'algorithme sont nombreux : la taille de l'essaim, les différents coefficients w , c_1 et c_2 , la topologie de voisinage utilisée. Différentes stratégies d'amélioration ont été mises en place pour modifier son comportement

3.3.2.2 Améliorations

Au-delà de sa simplicité formelle, les nombreuses caractéristiques de cet algorithme en font un algorithme puissant et fortement configurable. L'étude des différents coefficients comportementaux permettant d'assurer la convergence, l'équation de base de la vitesse, les multiples possibilités de topologies de voisinage, l'évolution de la population sont autant de points d'intérêt des différents travaux de la communauté scientifique.

3.3.2.3 Algorithme Bacterial Foraging Optimization "BFO"

L'algorithme BFO (Passino, 2002), introduit en 2002 par Passino, est un algorithme d'intelligence en essaim basé sur le mécanisme individuel et collectif des bactéries *E. coli* (*E. coli*). En effet, en tant qu'organismes unicellulaires procaryotes, *E. coli* présentent d'excellentes capacités d'organisation et de construction grâce à leur comportements de colonie (Panda and Naik, 2012), particulièrement leur comportement de recherche alimentaire, et précisément le processus par lequel *E. coli* trouvent des nutriments, évitent les substances nocives, tout en se déplaçant simultanément vers d'autres cellules sans

être extrêmement proches d’elles. Ce pendant, la stratégie de recherche de nourriture des bactéries E.coli est dirigée par quatre processus, à savoir la chimio taxie, la reproduction, l’élimination et la dispersion, et l’essaimage. Ci-dessous, nous décrivons brièvement chacun de ces processus.

1. **Chimio taxie** : La chimio taxie repérés ente le processus principal de l’algorithme BFO, selon le quelles bactéries se déplacent et s’orientent dans un gradient de nourriture tout au long des on cycle de vie. Cependant, les bactéries effectuent une marche aléatoire dans leur environnement en alternant entre des déplacements rectilignes, selon un processus appelé la nage (cas der rencontre d’environnement riche en nutriments), et des changements d’orientation aléatoires appelés pivotements ou culbutes (cas de rencontre d’environnement défavorable) (72 -73). Le mouvement chimiotactique de la bactérie peut donc être décrit comme suit, soit S le nombre total de bactérie présent dans la population $\theta^i(j, k, l)$ la i^{me} bactérie ($i = 1, 2, \dots, S$) à la j^{me} étape chimiotactique, à la k^{me} étape de reproduction et à la l^{me} étape d’élimination dispersion. Le mouvement de la bactérie à l’étape chimiotactique($j+1$) est calculé par l’équation (3.4) en fonction de sa position précédente, de la taille du pas $C(i)$ (runlengthunit) et d’une direction aléatoire $\phi(j)$ permettant de décrire les changements directionnels aléatoires.

$$\theta^i(j + 1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\phi(i), \quad \phi(j) = \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^2 \Delta(i)}} \dots\dots\dots(3.4)$$

Où $\Delta(i) \in R^D$ est un vecteur dont les valeurs sont générées aléatoirement dans l’intervalle $[-1,1]$.

L’évaluationdechaquebactérieesteffectuéeencalculantsoncoûtparlaformule suivante :

$$J(i, j + 1, k, l) = J(i, j, k, l) + J_{cc}(\theta^i(j + 1, k, l), P(j + 1, k, l)) \dots\dots\dots(3.5)$$

Le coût lié à une position donnée $J(i, j, k, l)$ est affecté par les forces attractives et répulsives existants entre les bactéries de la population (S), voir l’équation(2.8). Cela dit, si le coût (valeur de la fonction objective) de la ime bactérie à l’étape chimiotactique ($j + 1$) est meilleur que ce lui à l’étape (j) alors cette bactérie va effectuer un mouvement taille $C(i)$ dans la même de direction appelé la nage (swimming), le nombre de nage ne doit pas dépasser Ns .

2. **Essaimage** : Ce processus permet aux bactéries de se déplacer en groupe. Durant la recherche de nutriments, il existe à la fois une attraction et une répulsion entre

les bactéries individuelles. Ces dernières, bactéries génèrent des informations d'attraction pour permettre aux bactéries individuelles de se déplacer vers le centre de la population, les rassemblant. En même temps, les bactéries individuelles sont maintenues à distance en fonction de leur s informations de répulsion respectives [72-73]. L'expression des forces attractives et répulsives existant entre les bactéries de la population est donnée par :

$$J_{cc}(\theta, P(j, 1, k, l)) = \sum_{j=1}^{N_i+1} J_{cc}(\theta, \theta^i(j, k, l)) \dots \dots \dots (3.6)$$

Telque : $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_D]^T$ est un point dans l'espace de recherche de dimension D, q_{ime} la dimension m de la i^{me} bactérie, $P(j, k, l)$ l'ensemble des bactéries (la population). $d_{attract}$, $w_{attract}$, $h_{repellant}$ et $w_{repellant}$ sont des coefficients différents qui doivent être choisis selon le problème à traiter.

3. **Reproduction** : Une les N_c étapes chimiotactiques sont effectuées, les bactéries rentrent de l'étape de la reproduction N_{re} étapes. Dans cette dernière, les bactéries sont triées dans l'ordre croissant de leur coût cumulatif comme suit (Passino, 2002):

$$J_{health}^i = \sum_{j=1}^{N_i+1} J(i, j, k, l) \dots \dots \dots (3.7)$$

Cela signifie que les bactéries faisant partie de la moitié inférieure de la liste meurent, tandis que la moitié la plus saine (les bactéries situées dans un domaine de recherche avec une concentration élevée en nutriments) se reproduit. Chaque bactérie se divise en deux bactéries identiques, placée au même en droit, De cette manière, la population de bactéries reste constante [72-74].

4. **Elimination-Dispersion**: Au cours du processus de recherche de nutriments,

Les bactéries peuvent mourir ou disperser vers d'autres zones. La dispersion permet de favoriser l'exploration de nouvelles régions riche en nutriments. Cependant, chaque bactérie est soumise à une élimination-dispersion avec une probabilité P_{ed} , si la bactérie satisfait cette P_{ed} elle sera remplacée par une autre bactérie générée aléatoirement dans l'espace de solution. Ce qui peut permettre à l'algorithme BFO de sortir de la solution optimale locale, en favorisant la recherche de solution optimal globale [72]. Sachant que le nombre de bactéries dans la population reste constant, car si une bactérie est éliminée, une autre est dispersée à une position aléatoire [72].

L'algorithme 3 résume le déroulement des quatre étapes décrites précédemment

Algorithm 3 Algorithme BFO

```

1: Initialiser les paramètres:  $D, S, Nc, Ns, Nre, Ned, ped, C(i)(i = 1, 2, \dots, S), qi(i = 1, 2, \dots, S)$ 
2: pour ( $l = 1, 2, \dots, Ned$ ) (Étapes d'élimination-disperssion) faire
3:   pour ( $k = 1, 2, \dots, Nre$ ) (Étapes de reproduction) faire
4:     pour ( $j = 1, 2, \dots, Nc$ ) (Étapes chimiotactiques) faire
5:       pour toute bactérie ( $i = 1, 2, \dots, S$ ) faire
6:         Evaluation de la fonction objective  $J(i, j, k, l)$  par l'équation(2.7)
7:          $Jlast = J(i, j, k, l)$ 
8:         Pivotement (Tumble): Génération aléatoire du vecteur  $D(i) \ 2 < D$ 
9:         Déplacement : Calcule de la position  $qi(j + 1, k, l)$  par l'équation(2.6)
10:        Evaluation de la fonction objective  $J(i, j + 1, k, l)$  par l'équation(2.7)
11:        Nage :  $m = 0$ 
12:        tant que ( $m < Ns$ ) faire
13:           $m = m + 1$ 
14:          si ( $J(i, j + 1, k, l) < Jlast$ ) alors
15:             $Jlast = J(i, j + 1, k, l)$ 
16:            Déplacement : Calcule de la position  $qi(j + 1, k, l)$  par l'équation(2.6)
17:            Evaluation de la fonction objective  $J(i, j + 1, k, l)$  par l'équation(2.7)
18:            sinon
19:               $m = Ns$  20: fin si
21:            fin tant que
22:          fin pour
23:        fin pour
24:      pour ( $i = 1, 2, \dots, S$ ) faire
25:        Calcule de:  $Ji\ health = \sum_{j=1}^{Nc+1} J(i, j, k, l)$ 
26:      fin pour
27:      Trier les bactéries par ordre croissant de  $J\ health$ 
28:    fin pour
29:  pour ( $i = 1, 2, \dots, S$ ) faire
30:    Eliminer et disperser la  $i^{me}$  bactérie, avec une probabilité  $Ped$ 
31:  fin pour 32: fin pour

```

3.3.2.4. Algorithme de Colonie d'Abeilles Artificielles

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles ou Artificial Bee Colony (ABC) a été introduit par Dervis Karaboga et développé depuis 2005 par Karaboga et Basturk [75] pour

les problèmes d'optimisation continue. C'est un algorithme à population d'inspiration naturaliste, basé sur le butinage des abeilles.

3.3.2.4.1. Principe

Dans cet algorithme, une solution candidate au problème d'optimisation est représentée par une source de nourriture. Chaque source de nourriture possède une quantité de nectar qui caractérise sa qualité (fitness).

La population de la colonie est divisée en trois groupes d'abeilles, parcourant l'espace de recherche en quête de source de nourriture. Contrairement à l'algorithme précédent, ces groupes d'abeilles ne représentent pas les solutions mais un ensemble d'itérations. Chaque groupe d'itérations correspond au vol d'un des trois types d'abeilles : les abeilles ouvrières, les spectatrices et les exploratrices.

Les ouvrières parcourent le voisinage des sources de nourriture afin de trouver une meilleure source que celle visitée. Elles partagent ensuite la qualité de la source avec les spectatrices. Ces dernières se concentrent essentiellement sur les sources de nourriture de meilleure qualité. Lorsqu'une source de nourriture a été suffisamment explorée, elle est abandonnée et les exploratrices partent aléatoirement à la recherche d'une nouvelle source

L'algorithme 4 résume le processus.

Le nombre d'abeilles ouvrières et de spectatrices correspond au nombre de sources de nourriture. Il y a généralement une abeille exploratrice. Une source de nourriture est un vecteur de dimension D , D étant la dimension du problème, le nombre de sources de nourriture (SN) est un paramètre de l'algorithme.

Initialisation

Premièrement, l'algorithme initialise une population de SN individus, comme décrit en équation (3.8), X_{min} et X_{max} sont les vecteurs des valeurs minimum et maximum de chaque dimension du problème.

$$i \in \{1, \dots, SN\}, j \in \{1, \dots, D\}$$

$$X_{ij} = X_{minj} + \text{rand}[0, 1](X_{maxj} - X_{minj}). \dots\dots\dots 3.8)$$

A chaque source de nourriture est associée une quantité de nectar d' définissant une attractivité, le fitness. Cette valeur est calculée selon l'équation (3.9), où f est la fonction objective.

$$fit(x^i) = \begin{cases} \frac{1}{f(x^i)+1} & ,f(x^i) \geq 0 \\ 1+f(x^i) & ,f(x^i) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(3.9)$$

Algorithme 4 : Algorithme ABC

```

1 : Initialisation des sources de nourriture (3.8) et de leur fitness (3.9)
2 : tant que critère de fin non satisfait faire
    // Vol des ouvrières
3 :   pour i = 1 `a nb Ouvrières faire
4 :     génération d'une nouvelle solution (source de nourriture) Ni selon (3.10)
5 :     si fit(Ni) > fit(Xi) alors
6 :       Xi ← Ni
7 :     fin
8 :     sinon
9 :       nbV isitesi ← nbV isitesi + 1
10 :    fin
11 :  fin
12 : Mise `a jour de la qualité des sources de nourriture (fitness), selon (3.9).
    // Vol des spectatrices
13 :  i ← 1
14 :  tant que i ≤ nb Spectatrices faire
15 :    k ← rand (SN)
16 :    si rand (0, 1) < pk (cf (3.12)) alors
17 :      génération d'une nouvelle solution Nk selon (3.10),
18 :      si fit (Nk) > fit(Xk) alors
19 :        Xk ← Nk
20 :      fin
21 :      sinon
22 :        nb Visites k ← nb Visites k + 1
23 :      fin
24 :      i ← i + 1
25 :    fin
26 :  fin
    // Vol des exploratrices
27 :  pour i = 1 `a nb Exploratrices faire
28 :    Si la source la plus visitée est abandonnée, remplacement par une nouvelle
solution,
    selon (3.8).
29 :  fin
30 :  Sauvegarde de la meilleure source de nourriture.
31 : fin

```

Vol des ouvrières Chaque abeille ouvrière produit une nouvelle solution, au voisinage d'une source de nourriture existante, selon (3.10). Pour la $i^{\text{ème}}$ abeille ($i \in \{1, \dots, SN\}$), $j \in \{1, 2, \dots, D\}$, une dimension choisie aléatoirement, φ_{ij} est un réel aléatoire, uniformément distribué dans l'intervalle $[-1; 1]$ et $k \in \{1, \dots, SN\}$, une solution choisie aléatoirement ($k \neq i$).

$$N_j^i = X_j^i + (X_j^i - X_j^k) \cdot \varphi_{ij}, \dots \dots \dots (3.10)$$

Si la nouvelle source de nourriture N_i ainsi produite possède une meilleure fitness que X_i , elle la remplace. Sinon, un compteur de nombre de visites infructueuses est incrémenté.

Vol des spectatrices Cette série d'itérations est semblable à la précédente, sauf qu'une abeille spectatrice visitera une source de nourriture prometteuse, qui possède une bonne quantité de nectar. Cette information est partagée par les ouvrières en utilisant la valeur de fitness (3.9). Elle permet de calculer une attractivité potentielle sous forme de probabilité de sélection. Il existe plusieurs façons de calculer cette probabilité p_i , comme décrit par les équations (3.11) et (3.12), où $fit(X^i)$ est la fitness de la $i^{\text{ème}}$ solution et fit_{\max} la valeur de fitness maximale pour toute la population

$$p_i = \frac{0.9fit(x^i)}{fit_{\max}} + 0.1 \dots \dots \dots (3.11)$$

$$p_i = \frac{fit(x^i)}{\sum_{k=1}^{SN} fit(x^k)} \dots \dots \dots (3.12)$$

Lors d'une itération d'abeille spectatrice, une nouvelle solution N_i est générée de la même manière que lors d'une itération d'abeille ouvrière, en utilisant l'équation (3.10).

Vol des exploratrices : Lors de ces deux précédentes phases, lorsqu'une nouvelle solution N_i , générée à partir d'une solution X_i , n'améliore pas cette dernière, un compteur de visites nbV_i est incrémenté pour la solution X_i . Lorsque ce compteur atteint une valeur limite, la solution est abandonnée et remplacée par une nouvelle solution générée selon (3.8).

L'avantage de cet algorithme est qu'il ne possède que peu de paramètres : le nombre de sources de nourriture, le nombre d'abeilles exploratrices et le nombre maximal de visites non améliorantes sur une source de nourriture

Améliorations

Le déplacement unidimensionnel de l'algorithme ABC induit un faible taux de convergence ; de plus, comme les autres méta-heuristiques, il souffre de convergence prématurée. Par ailleurs les problématiques étudiées se consacrent principalement à la résolution de ces deux questions, mais aussi à l'optimisation de ses différentes caractéristiques (paramètres, différentes phases, équation de base, probabilité de sélection...), ou encore, comme les autres méta-heuristiques, à la dichotomie entre exploration et exploitation. Plusieurs études de l'algorithme proposent des solutions pour améliorer ces différents points.

3.4. Etude comparative entre les méthodes d'optimisation

Dans le contexte de l'ingénierie et de la recherche opérationnelle, l'importance des méthodes d'optimisation méta-heuristique ne peut être sous-estimée, car elles fournissent des solutions pratiques à des problèmes d'optimisation extrêmement complexes. Cette étude examine de près quatre méthodes particulièrement influentes. Les Algorithmes Génétiques (GA) s'inspirent du processus d'évolution naturelle, utilisant des mécanismes de sélection, de croisement, et de mutation pour affiner les solutions. L'Optimisation par Essaims de Particules (PSO) imite le comportement social des oiseaux et des poissons, ajustant les trajectoires des particules dans l'espace de recherche en fonction des expériences partagées et individuelles. L'Optimisation de la Recherche Bactérienne (BFO) reproduit le comportement alimentaire des bactéries, telles qu'E. coli, utilisant des stratégies de chimiotaxie, de reproduction, et d'élimination. Enfin, l'Algorithme de la Colonie d'Abeilles (ABC) est inspiré par le comportement de recherche de nourriture des abeilles, divisant la colonie en exploratrices et exploitatrices pour trouver les meilleures sources de nourriture. Ces méthodes, en s'inspirant de phénomènes naturels, offrent des cadres uniques pour résoudre les défis d'optimisation.

3.4.1. Critères de comparaison

La comparaison entre ces méthodes se base sur plusieurs critères essentiels à l'efficacité d'une méthode d'optimisation :

- *Rapidité de convergence* : Capacité d'une méthode à atteindre une solution acceptable dans un nombre réduit d'itérations.

- *Précision des solutions* : Qualité des solutions obtenues, mesurée par leur proximité avec l'optimum global.
- *Capacité à éviter les optima locaux* : Efficacité d'une méthode à explorer l'espace de recherche sans rester piégée dans des solutions sub-optimales.
- *Complexité computationnelle* : Ressources nécessaires pour exécuter l'algorithme, en termes de temps de calcul et de mémoire.

Les courbes de performance, générées à partir de simulations, illustrent la vitesse de convergence et la qualité des solutions pour chaque méthode. Ces simulations utilisent des fonctions de test standardisées, permettant une évaluation objective.

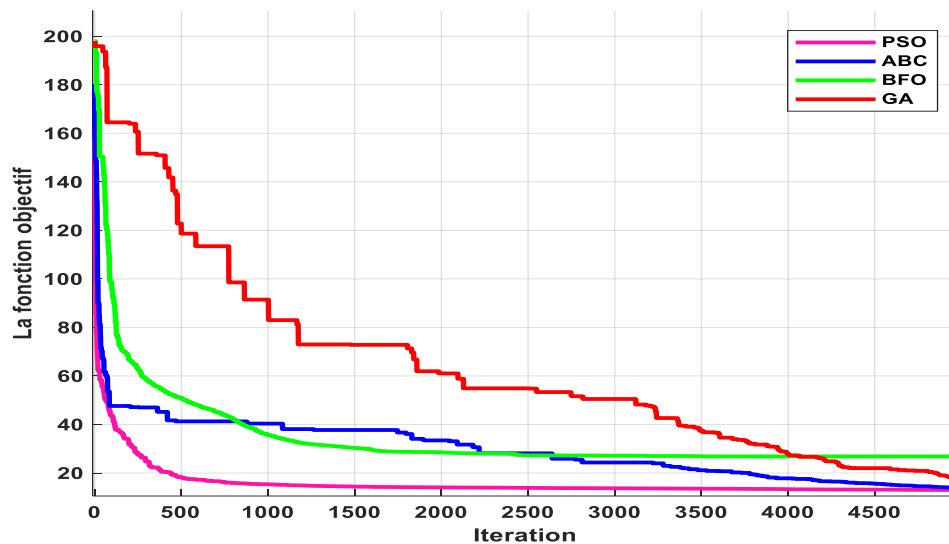


Figure.3.5 : Fonction objective par différentes méthodes (PSO, ABC, BFO et GA).

L'analyse comparative de la figure présentée montre la performance de quatre méthodes d'optimisation méta-heuristique distinctes en fonction de l'itération. Le graphique trace la fonction objective, où une valeur plus basse indique une meilleure optimisation.

D'après le graphique, l'Optimisation par Essaims de Particules (PSO) manifeste une convergence rapide vers une valeur faible de la fonction objective, ce qui suggère une efficacité notable en termes de vitesse et de qualité de la solution optimale trouvée. Le PSO est suivi de près par l'Algorithme de la Colonie d'Abeilles (ABC), qui montre aussi une convergence rapide, mais qui semble s'arrêter à une valeur légèrement supérieure à celle du PSO, indiquant une optimisation moins efficace.

L'Optimisation de la Recherche Bactérienne (BFO) et les Algorithmes Génétiques (GA) montrent des performances comparables au début, mais le GA présente une convergence plus lente et s'achève sur une valeur plus élevée que le BFO, ce qui implique une efficacité moindre dans la recherche de l'optimum global.

3.5. Conclusion

En conclusion, selon cette analyse, le PSO démontre la meilleure performance globale par rapport aux méthodes sélectionnées, avec une convergence rapide et efficace vers les valeurs optimales les plus basses sur le graphique, indiquant une capacité supérieure à optimiser la fonction objectif donnée.

Simulations et Résultats

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, une simulation sous matlab des performances et des caractéristiques des systèmes PV (poly cristallin et monocristallin) est exécutée. Par la suite, une comparaison entre les résultats de deux systèmes est faite en termes de production d'énergie, espace occupée, poids, coût et réduction d'émissions de dioxyde de carbone pour savoir le quel est meilleur et plus adaptable à la région étudiée.

4.2 Présentation de l'algorithme de la simulation

4.2.1. Fonction d'évaluation

L'évaluation consiste à mesurer la performance de chaque individu de la population. On utilise pour cela une fonction directement liée à la fonction objective (fonction à optimiser) appelée fonction fitness. C'est une fonction réelle positive qui reflète la force de l'individu.

Contrairement aux méthodes d'optimisation classiques, aucune condition liée à la dérivabilité, à la continuité, à la convexité ou la concavité n'est requise pour la fonction objective. Il suffit juste qu'elle fournisse une valeur numérique finie pour chaque individu. Cela donne à l'algorithme à essaim de particules un caractère très attrayant pour la résolution de problèmes dont les propriétés mathématiques sont méconnues ou très délicates à déterminer.

4.2.2 Optimisation du dimensionnement d'un Système Hybride photovoltaïque/éolien/batterie

L'étude présentée dans cette partie, porte sur l'optimisation du dimensionnement d'un système d'énergie hybride photovoltaïque/éolien en utilisant les batteries Lithium Ion comme moyen de stockage, où les. Cette méthodologie est décrite en utilisant la méthode d'essaim de particules (Particle Swarm Optimisation PSO).

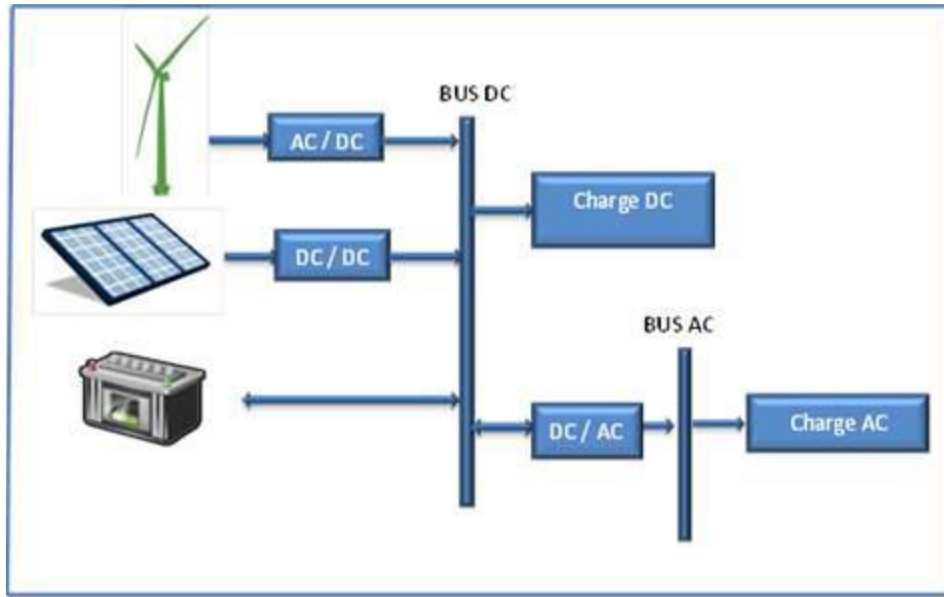


Fig. 4.1 : Système Hybride photovoltaïque/éolien/batterie

4.2.3. Fonction objective

Notre problème d'optimisation est caractérisé par une fonction objective représentée par le coût du kilowattheure d'énergie, et une contrainte qui est :

$$F_{obj} = P_{éol} C_{i,éol} + P_{pv} C_{i,pv} + N_{bat} C_{i,bat} \quad (4.1)$$

où

$C_{i,éol}$: coût initial de l'aérogénérateur (\$/W)

$C_{i,pv}$: coût initial du cellules photovoltaïque (\$/W)

$C_{i,bat}$: coût initial du Bloc de batterie (\$/W)

Puissance délivrée par l'éolien :

$$\left. \begin{array}{l} 0 \\ V^3 \left(\frac{P_r}{V_r^3 - V_{cut-in}^3} \right) - P_r \left(\frac{V_{cut-in}^3}{V_r^3 - V_{cut-in}^3} \right) \\ P_r \end{array} \right\} \begin{array}{l} V < V_{cut-in}, V > V_{cut-out} \\ V_{cut-in} \leq V < V_{rated} \\ V_{rated} \leq V \leq V_{cut-out} \end{array} \quad (4.2)$$

Puissance délivrée par les cellules photovoltaïques :

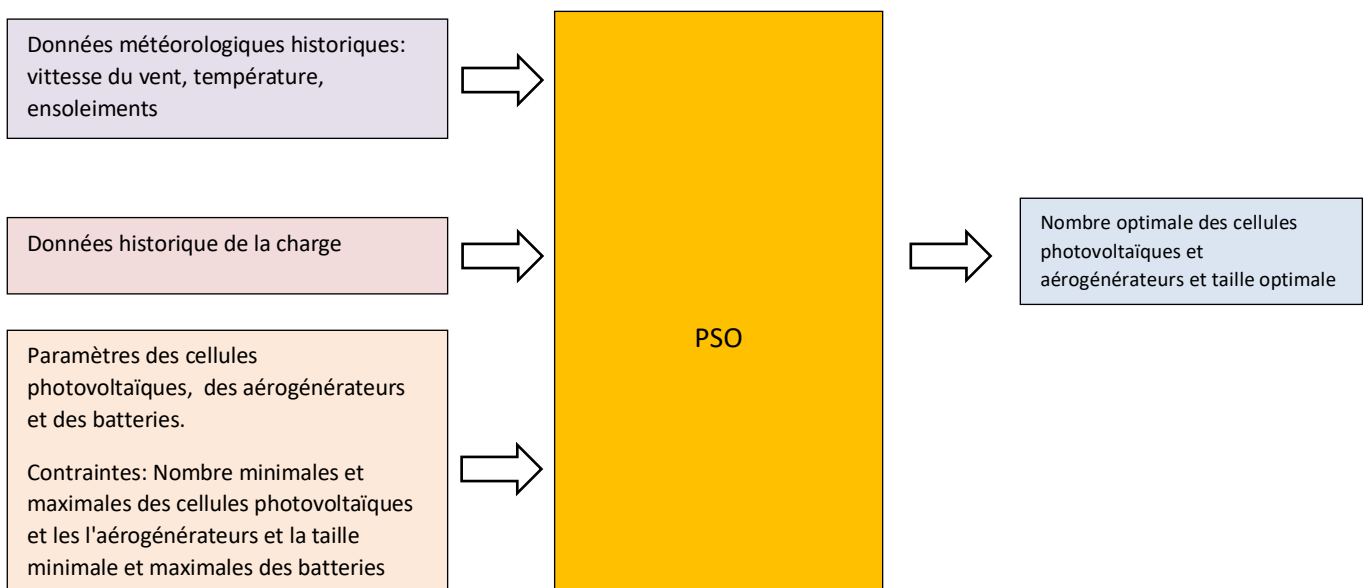
$$P_{Pv-out} = P_{N-Pv} \times \frac{G}{G_{ref}} \times \left[1 + K_t \left((T_{amb} + (0.0256 \times G)) - T_{ref} \right) \right] \quad (4.3)$$

Où : P_{pv-out} est la puissance de sortie du PV, P_{N-pv} est la puissance nominale dans les conditions de référence, G est le rayonnement solaire (W/m^2), G_{ref} est le rayonnement solaire dans les conditions de référence, T_{ref} est la température de la cellule dans les conditions de référence, K_t est le coefficient de température de puissance maximale, T_{amb} est la température ambiante ($G_{ref}=1000W/m^2$, $T_{ref}=25^\circ C$, $K_t=-3.7*10^{-3}(1/^\circ C)$).

4.2.4. Contraintes

Contrainte égalité : La somme des puissances générées par les cellules photovoltaïques et les l'aérogénérateurs doit être égal à la charge prévisée.

Contraintes inégalité : Sont les puissances minimales et maximales des cellules photovoltaïques et les l'aérogénérateurs et la taille minimale et maximales des batteries.



Exemple

```

>> main2
Optimization ended: relative change in the objective value
over the last OPTIONS.MaxStallIterations iterations is less than OPTIONS.FunctionTolerance.
Optimal PV Array Size: 1200.00 kW
Optimal Wind Turbine Size: 900.00 kW
Optimal Battery Capacity: 780.31 kWh
Optimal Objective Function Value: 355860.00
  
```

4.3. Modélisation des modules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque convertit directement l'énergie d'irradiation reçue du soleil en énergie électrique avec une efficacité différente selon les technologies utilisées, qui sont largement disponibles ces dernières années. Cependant, l'efficacité est encore modérée même avec le développement rapide réel de nouvelles technologies de matériaux de cellules PV. D'autre part, de nombreux circuits équivalents de cellules PV a été présentés en fonction du nombre de diodes parallèles. Cependant, le modèle à diode unique (SDM) est couramment adopté pour le paramétrage et la modélisation des cellules PV [81-82]. Ce circuit équivalent est représenté sur la figure 4.2.

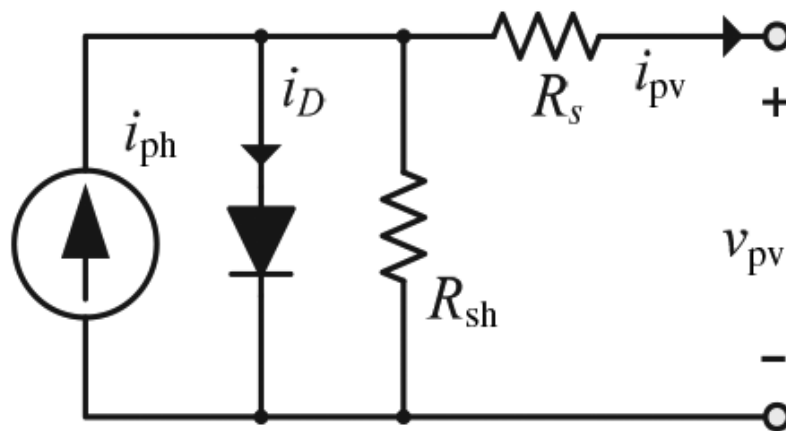


Fig. 4.2 : Circuit équivalent du modèle à diode unique de la cellule PV.

À partir de cette figure, on peut voir clairement que le courant de sortie de la cellule PV i_{pv} peut être obtenu sur la base de la loi de Kirschoff comme suit [83-88] :

$$i_{pv} = i_{ph} - i_D - i_{sh} \quad (4.4)$$

Où :

i_{ph} : est le photo- courant ;

i_D : est le courant traversant la diode parallèle ;

i_{sh} : est le courant dans la résistance shunt ;

Habituellement, la résistance de shunt R_{sh} ont une valeur élevée et la résistance série R_s a une faible valeur. En utilisant la célèbre équation de Shockley, le courant de diode est évalué comme suit [76-81] :

$$i_{ph} = I_0 \left(\exp\left(\frac{q(v_{pv} + i_{pv}R_s)}{aKT}\right) - 1 \right) \quad (4.5)$$

Où :

I_0 : est le courant de saturation de la diode ;

T : est la température de la jonction p-n (°K) ;

K : est la constante de Boltzmann ($1,3806 \times 10^{-23}$ J/ °K) ;

q : est la charge des électrons (1.602×10^{-19} C) ;

a : est le facteur d'idéalité de la diode ;

v_{pv} : est la tension de sortie de la cellule PV ;

Sur la base des équations (4.1) et (4.2) et du circuit équivalent choisi, le courant de sortie de la cellule PV peut être réécrit comme suit [76-81]:

$$i_{pv} = i_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{q(v_{pv} + i_{pv}R_s)}{aKT}\right) - 1 \right) - \frac{v_{pv} + R_s \cdot i_{pv}}{R_{sh}} \quad (4.6)$$

Pratiquement les cellules PV sont regroupées pour former des modules, elles sont disposées en série et/ou en parallèle suivant la tension et le courant de sortie requis du module. Le courant de sortie à travers le module peut être calculé sur la base de l'équation (4.6) et du nombre de groupes parallèles de cellules PV (N_p), qui sont identiques et du nombre de cellules PV connectées en série dans un groupe parallèle (N_s), et il est donné par l'expression suivante :

$$i_{pv} = \left\{ \begin{array}{l} i_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{q\left(\frac{v_{pv} + R_s \cdot i_{pv}}{N_s}\right)}{aKT}\right) - 1 \right) \\ - \frac{v_{pv} + R_s \cdot i_{pv}}{R_{sh}} \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

L'irradiation solaire horizontale globale et la température dans les steppes en Algérie sont présentées dans les figures 4.3 et 4.4, respectivement. L'efficacité de la cellule PV dépend de la position géographique et des conditions climatiques de chaque région. Ainsi, le type de cellules PV doit être bien sélectionné en fonction de ces critères. De ce point de vue, et puisqu'aucune étude n'a été menée dans la région de Djelfa (Algérie), le présent travail est réalisé pour trouver le panneau photovoltaïque optimal pour cette zone steppique. Cette région est bien connue par son potentiel important en termes de rayonnement solaire. Deux types de

panneaux photovoltaïques polycristallins et monocristallins sont utilisés. Le poids, la surface d'installation requise, le coût et la production d'énergie sont définis pour chaque système.

4.4. Région d'étude

La région étudiée se trouve à proximité de la ville « Hassi Bahbah », qui est un lieu habité (classe P - lieux habités) dans l'état de Djelfa. Il est situé à 877 mètres d'altitude. Les coordonnées géographiques sont 35°, 3'59" N et 3°, 1'60" E en DMS (degrés, minutes, secondes).

Dans ce chapitre, une usine de panneaux PV à petite échelle de deux types de technologies telles que le monocristallin (CEM250M-60) et le polycristallin (CEM250P-60) fournies sur le marché local par la société CONDOR. Les mesures réelles de l'irradiation mensuelle et de la température de quatre mois au cours de l'année 2020, tels que février, mai, août et novembre, sont présentées respectivement dans les figures 4.3 et 4.4.

Ces mesures présentent les valeurs moyennes par jour, alors que l'irradiation moyenne par mois/jour des mois considérés, comme le montre la figure 4.5, est de 4 632 kW/jour, 7 370 kW/jour, 7 270 kW/jour et 3 206 kW/jour respectivement. L'irradiation totale reçue par mois est respectivement de 134 328 kW/mois, 228 473 kW/mois, 225 355 kW/mois et 96 182 kW/mois. Il est évident que l'irradiation durant l'été (mai et août) est importante par rapport à l'irradiation captée durant l'hiver (février et novembre), elle est près du double. Cela peut être très avantageux pour les régions éloignées car pendant l'été, plus d'eau est nécessaire pour la vie quotidienne, l'irrigation et l'abreuvement des animaux et des troupeaux, de plus la consommation d'énergie électrique peut être plus importante lorsqu'elle est utilisée pour le refroidissement et la réfrigération. D'un autre côté, pendant l'hiver, très peu d'eau est requise du système de pompage et parfois pas du tout lorsque les précipitations sont suffisantes et généralement le système de chauffage est basé sur des moyens traditionnels tels que le bois ou le gaz et il n'y a pas de consommation électrique pour une telle tâche. On peut noter, que l'irradiation moyenne par jour des 15 et 17 août est moindre, ceci est dû à la météo de ces deux jours qui se caractérise par des nuages et parfois par des pluies.

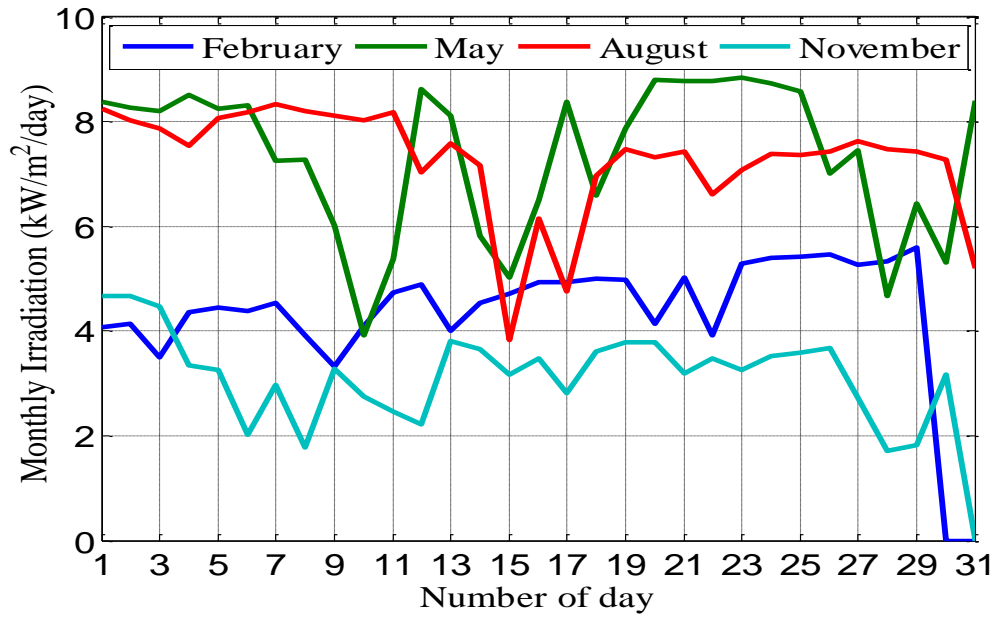


Fig.4.3 : L'irradiation moyenne quotidienne pour l'emplacement considéré dans les quatre mois sélectionnés.

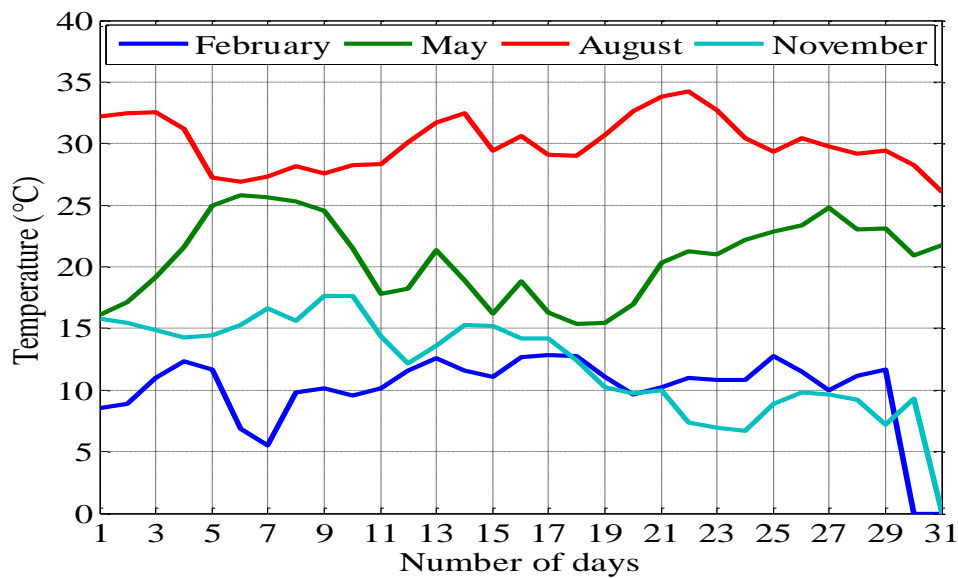


Fig.4.4 : Température moyenne quotidienne pour l'emplacement considéré dans les quatre mois sélectionnés.

Figure 4.6 montre la variation de la température moyenne par jour pendant les mois considérés qui peuvent avoir des valeurs maximales en août et des valeurs moindres en novembre. Il convient de préciser que la plage de variation de la température moyenne par jour est acceptable suivant la range de fonctionnement des panneaux utilisés et par conséquent, l'efficacité de la centrale photovoltaïque à petite échelle mise en œuvre n'est pas

affectée et elle peut fonctionner à son efficacité nominale qui est élevée dans le cas du monocristallin par rapport au cas du polycristallin.

L'irradiation moyenne annuelle et la température moyenne par mois sont présentées respectivement dans les figures 4.2 et 4.3. On voit clairement que l'irradiation moyenne par mois est maximale de les mois de mars à octobre avec la valeur moyenne minimale de (153,682 kW/mois) mesurée en mars et la valeur moyenne maximale (256,56 kW/mois) mesurée en juillet, ce qui signifie que pendant ces huit mois, l'énergie électrique produite par la centrale photovoltaïque à petite échelle considérée peut être très suffisante pour répondre aux besoins de la demande locale sans aucun type de carence. Dans les quatre mois restants tels que Novembre, décembre, janvier et février l'irradiation est moindre et dont la valeur moyenne par mois varie entre la valeur moyenne minimale (88 060 kW/mois) mesurée en décembre et la valeur moyenne maximale (135 330 kW/ mois) mesurée en février comme le montre la figure 4.5.

Ces mesures réelles globales sur site indiquent que le potentiel d'énergie solaire est très suffisant et peut être exploité tout au long de l'année pour répondre à la demande locale sans courir après le réseau régional ou national, encore plus, on peut dire que de telles centrales électriques à petite échelle qui peuvent être réparties sur la région étudiée contribuent au soutien du réseau local ou, à l'avenir, de l'éventuel réseau intelligent.

Cette stratégie peut être d'une grande importance pour le pays, l'opérateur du système électrique et les utilisateurs finaux, alors que le rôle du consul peut être changé en consommateur. D'autre part, la feuille de route prévue par le gouvernement de la transition énergétique et donc pour la diminution de la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles et la protection de l'environnement peut être réalisée.

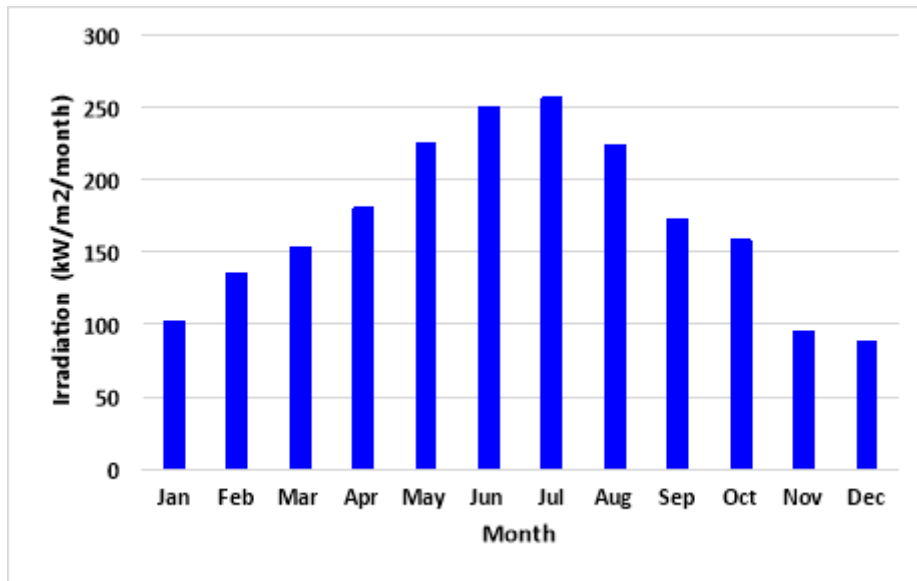


Fig.4.5 : L'irradiation moyenne mensuelle pour l'emplacement considéré tout au long de l'année 2020.

La figure 4.6 montre la variation de la température moyenne par mois mesurée le long de l'année 2020. Il est clairement montré d'avril à octobre que la température moyenne par mois est plus élevée dans la plage de (15,31°C – 29,79° C) par rapport à la période de novembre à mars dans la fourchette de (6,03°C – 12,27°C). Cependant, la plage de variation de la température moyenne à son maximum n'affecte pas l'efficacité des panneaux utilisés, qui sont conçus pour fonctionner dans la plage de température de -40°C à 85°C.

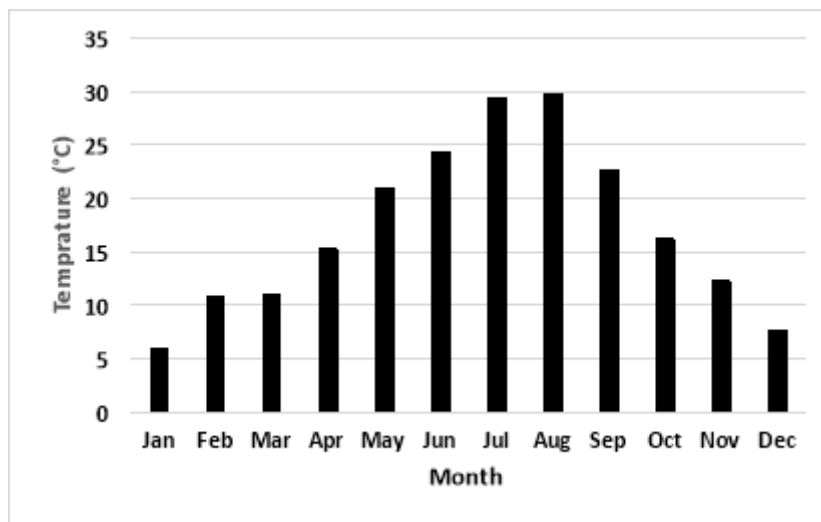


Fig.4.6 : La température moyenne mensuelle pour l'emplacement considéré tout au long de l'année 2020.

4.5. Description du système photovoltaïque PV

La mise en œuvre des panneaux photovoltaïques installés dans la steppe susmentionnée consiste en deux modules technologiques différents fixés sur une structure en acier galvanisé, orientés vers le sud et inclinés avec un angle de 37 °C. Les panneaux utilisés sont de deux types de technologies telles que le monocristallin (CEM250M-60) et le polycristallin (CEM250P-60) fournis sur le marché local par la société CONDOR et dont les principales caractéristiques sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2.

Dans le présent chapitre, pour couvrir l'étude de la centrale photovoltaïque à petite échelle avec des cas de demande de charges réalistes, sept cas de puissance de sortie requise sont pris en compte, tels que 0,5 kW, 1 kW, 1,5 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW et 5 kW, l'objectif principal étant de proposer les meilleures solutions aux utilisateurs locaux en fonction des équipements disponibles sur le marché local. L'étude sera réalisée pour les types de panneaux tels que CEM250M-60 et CEM250P-60 en tenant compte de l'utilisation d'un seul onduleur pour faciliter l'installation et le contrôle de la puissance de sortie. De plus, un système de stockage basé sur des batteries obtenues sur le marché local est intégré dans cette centrale PV pour surmonter le problème de discontinuité de l'énergie électrique en tenant compte du facteur d'autonomie dû aux périodes d'absence ou d'insuffisance d'ensoleillement. Du fait que les panneaux des deux technologies ont la même surface de 1640x992x50 mm, la surface utilisée, les câbles et le nombre de panneaux pour chaque puissance installée restent les mêmes, dans le même temps l'orientation et l'angle des tuiles sont maintenus identique et la structure de fixation des panneaux sont identiques. Enfin, les deux panneaux PV de type pf ont la même puissance nominale qui est de 250 W. Ils ne sont donc pas pris en compte en cas de comparaison des deux installations.

Les caractéristiques principales et les paramètres du panneau PV monocristallin CEM250M-60 utilisé dans cette étude sont mentionnées dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 : Caractéristiques principales et paramètres du panneau PV monocristallin CEM250M-60 utilisé dans cette étude.

	Mono-Crystalline CEM250M-60
Rate power (W_c)	250 W
Open circuit voltage (V_{oc})	37.08V
Short circuit current (I_{sc})	8.83 A
MPP Voltage	30.00 V
MPP current	8.33 A
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C
Temperature coefficient of power	-0.41 %/°C
Temperature coefficient of current	0.06 %/°C
Temperature coefficient of voltage	-0.32 %/°C
Operation temperature range	-40°C to 85°C
Dimensions	1640x992x50 mm
Weight	19.5 Kg

Les caractéristiques principales et les paramètres du panneau PV polycristallin CEM250P-60 utilisé dans cette étude sont mentionnées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Caractéristiques principales et paramètres du panneau PV polycristallin CEM250P-60 utilisé dans cette étude.

	Poly-Crystalline CEM250P-60
Rate power (Wc)	250 W
Open circuit voltage (V_{oc})	38.10V
Short circuit current (I_{sc})	8.80 A
MPP Voltage	30.70 V
MPP current	8.15 A
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C
Temperature coefficient of power	-0.39 %/°C
Temperature coefficient of current	0.06 %/°C
Temperature coefficient of voltage	-0.33 %/°C
Operation temperature range	-40°C to 85°C
Dimensions	1640x992x45 mm
Weight	18.5 Kg

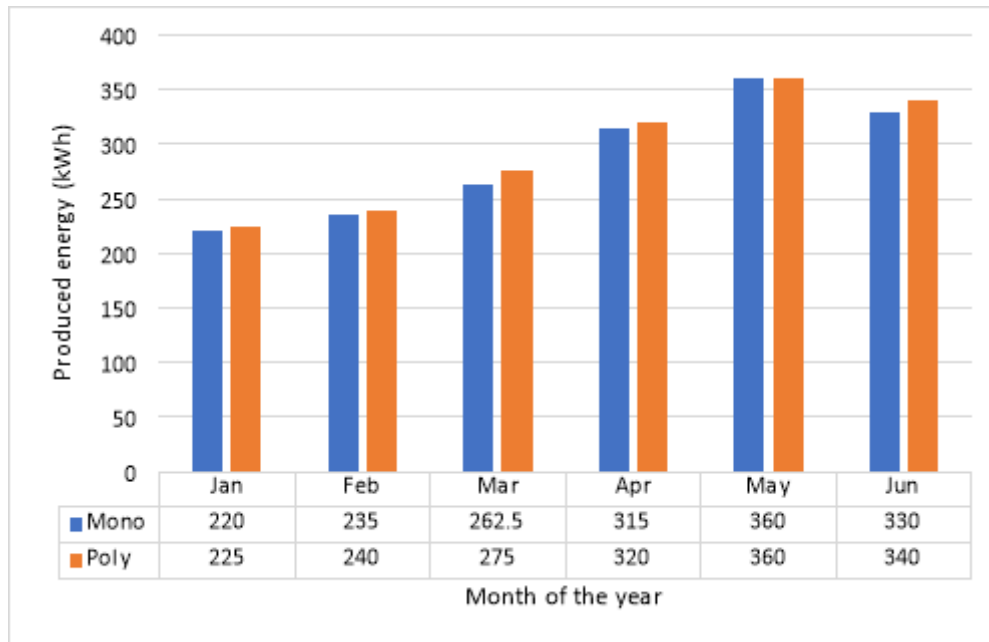
4.6. Résultats et discussion

Pour la meilleure sélection du modèle approprié pour l'emplacement étudié dans la ville voisine de Hassi Bahbah (Djelfa), une comparaison est faite entre les deux centrales photovoltaïques sur la base des technologies utilisées en termes de production d'énergie du 1er janvier 2020 au 31 décembre 2020. D'autre part, pour la validité de la présente étude, sept cas de puissance produite sont considérés tels que 0,5 kW, 1 kW, 1,5 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW et 5 kW où un seul onduleur est utilisé et un système de stockage de batterie est incorporé.

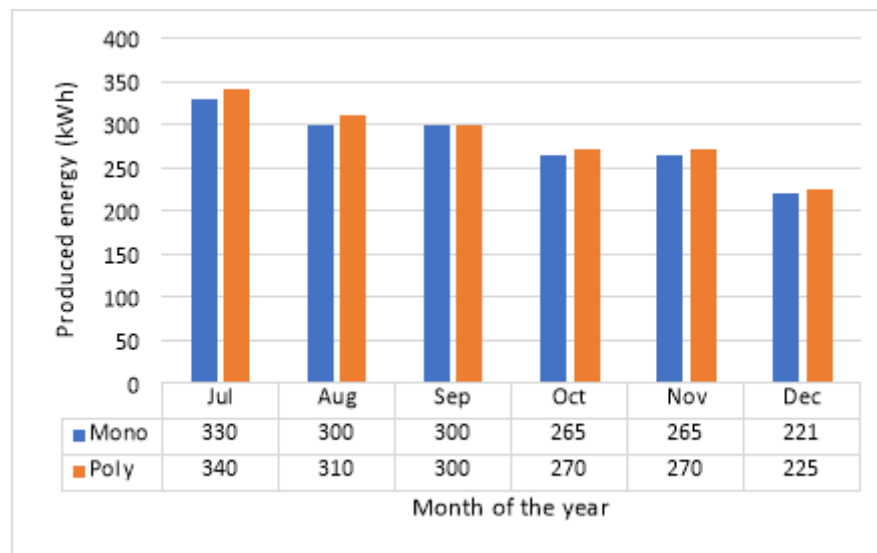
4.6.1. Analyse de la production d'énergie

La figure 4.7 montre la production d'énergie par mois tout au long de l'année 2020 par les deux panneaux photovoltaïques sous différents niveaux de puissance nominale installée, où la puissance nominale installée est considérée comme étant de 1,5 kW. On peut voir que la production maximale par mois est atteinte en mai d'un montant de 360 kWh pour les

panneaux monocristallins et polycristallins, et la puissance produite minimale par mois est en janvier et décembre d'un montant de 225 kWh par le polycristallin et 221 par le monocristallin.



(a)



(b)

Fig.4.7 : Profil énergétique récolté par les deux centrales tout au long de chaque mois tout au long de l'année 2020. (a) premier semestre, (b) deuxième semestre.

Alors que la différence de production tout au long de l'année est de 71,5 kWh. Cet écart présente environ 8 jours de production en été et 12 jours en hiver. D'après la figure

4.7, on peut dire que le polycristallin est le plus réceptif pendant les mois à haute température et irradiation (juin, juillet et août). Tandis que les deux modules (monocristallin et polycristallin) sont pratiquement identiques dans les autres mois. Cela doit être expliqué car cela n'est pas prévu, puisque généralement le monocristallin a un rendement élevé que le polycristallin. En effet, après vérification des tableaux 4.1 et 4.2 qui représentent les caractéristiques des deux technologies utilisées dans cette étude, on peut constater que le coefficient thermique de puissance est respectivement de -0,41% et -0,39% pour le monocristallin et le polycristallin, ce qui signifie que lorsque la température à la surface du panneau augmente, l'efficacité du monocristallin diminue plus rapidement que celle du polycristallin. La température à la surface du panneau peut être estimée comme suit :

$$T_{Panel} = T_{am} + \frac{NOCT-20}{80} \cdot S \quad (4.8)$$

Où :

T_{Panel} : est la température à la surface du panneau en °C ;

T_{am} : est la température ambiante ou de l'air en °C ;

S : est la mesure d'irradiation en mW/cm^2 ;

A titre d'exemple, si la température est considérée comme étant dans les trois mois susmentionnés est de 35°C et l'irradiation est de 1000 kW/m² = 100 mW/ [cm] ² alors le T_{Panel} prend la valeur de 66°C qui présente une différence de 66°C par rapport à la température de fonctionnement nominale des cellules du panneau (NOCT) et avec un coefficient de température de puissance de -0,41% affectera considérablement l'efficacité du panneau de monocristallin par rapport à celle du poly-cristalline. On peut conclure que sur la base de la technologie utilisée, les panneaux CEM250P-60 correspondent mieux à l'emplacement étudié en termes de production d'énergie annuelle par rapport au CEM250M-60.

4.6.2. Analyse de coût

Une analyse des coûts est nécessaire pour sélectionner les meilleurs panneaux photovoltaïques entre les deux technologies étudiées, où l'objectif principal est d'obtenir le coût d'investissement minimum et une meilleure efficacité ou production énergétique. A cet effet, en tenant compte de l'ensemble de l'installation du système, l'analyse des coûts est basée sur les prix des panneaux, le système de stockage ou les prix des batteries et le prix de

l'onduleur car les autres équipements seront les mêmes pour les deux types de panneaux comme expliqué dans une section précédente.

La figure 4.8 montre le choix optimal du nombre de batteries en fonction de leurs capacités 100 Ah, 130 Ah, 150 Ah, 200 Ah, 250 Ah, pour différentes échelles de production d'énergie. Ces types de batteries proviennent du marché local et sont produites par la même entreprise. Dans cette thèse le choix de la batterie a pris les critères suivants :

- ✓ Le rendement de l'onduleur est pris à 90 % ;
- ✓ Les pertes en ligne sont prises 3% ;
- ✓ La profondeur de décharge (DoD) est prise à 50 % ;

Aussi l'autonomie des batteries est prise en compte où l'énergie consommée par jour et le nombre de jours pour assurer sans interruption pendant aucune irradiation solaire.

On peut facilement déduire que les batteries de capacités 200 Ah et 250 Ah ont le même nombre de batteries, cependant les batteries w200 Ah ont des prix inférieurs à leur homologue de 250 Ah. Il sera donc retenu pour le cas étudié de la localité concernée.

Les coûts obtenus de l'onduleur utilisé (courbe verte) et le nombre optimal de batteries sont présentés dans la Figure 4.9. Ce résultat est basé sur la batterie sélectionnée qui a une capacité de 200 Ah. D'autre part, les onduleurs sélectionnés sont également obtenus auprès du marché local de la même entreprise où son choix se fait sur les critères suivants :

- L'utilisation d'un seul onduleur ;
- Sa puissance doit correspondre à la puissance à transférer ;

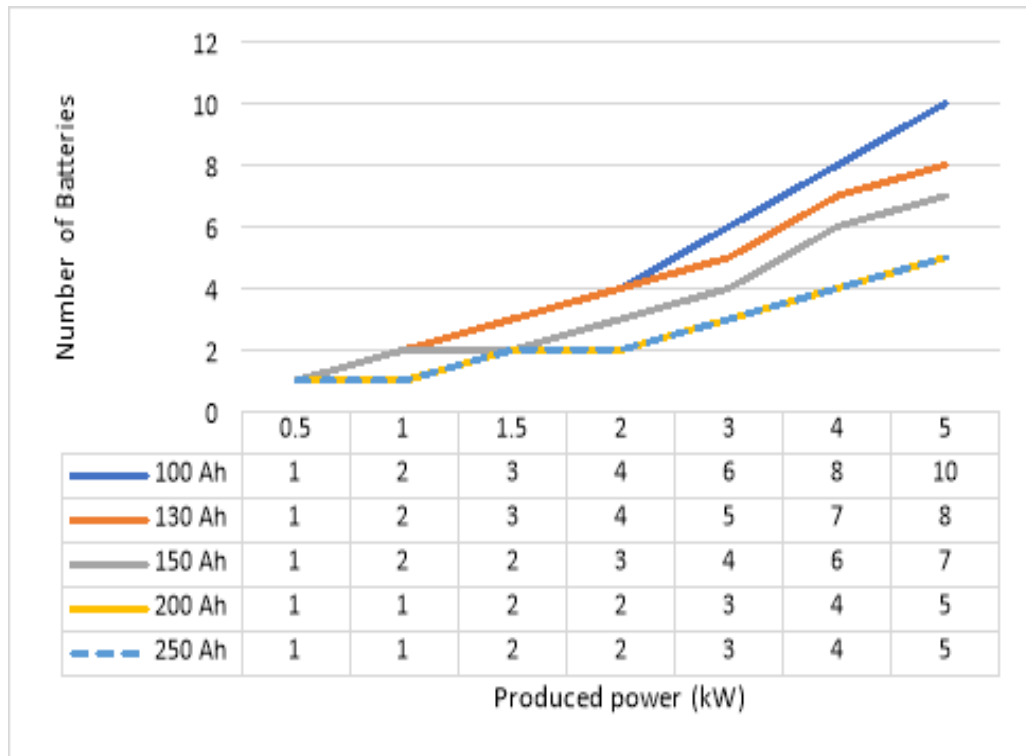


Fig.4.8 : Nombre de batteries selon leur capacité et la puissance produite.

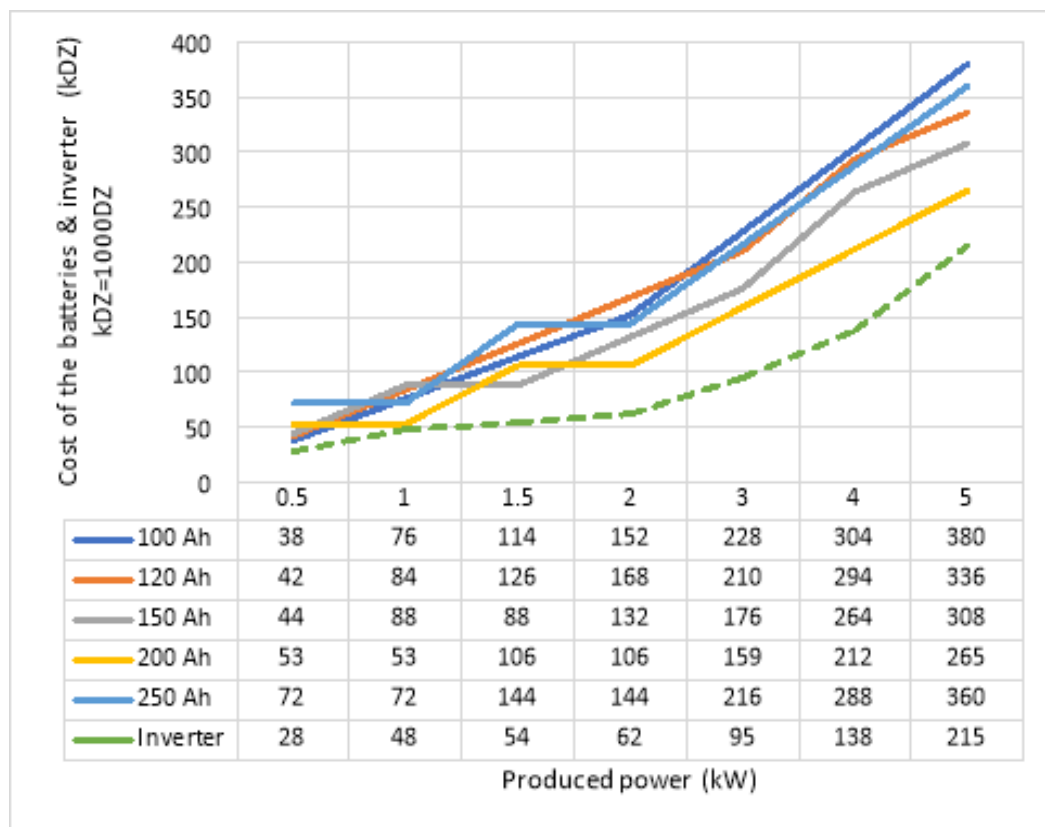


Fig.4.9 : Coûts totaux du nombre optimal de batteries utilisées et de l'onduleur sélectionné.

4.6.3. Analyse du poids total des panneaux utilisés

La figure 4.10 montre une comparaison du poids total des panneaux utilisés pour les deux technologies pour différentes puissances produites. On peut facilement remarquer qu'avec l'augmentation de la puissance produite, la différence de poids augmente, là où les panneaux polycristallins ont moins de poids. Cependant, ce facteur est moins important car l'installation se fera une seule fois pour un endroit précis. Au contraire si cette installation sera sur toiture, cela peut avoir un impact important qui doit être pris en considération lors de la sélection de la meilleure technologie à utiliser.

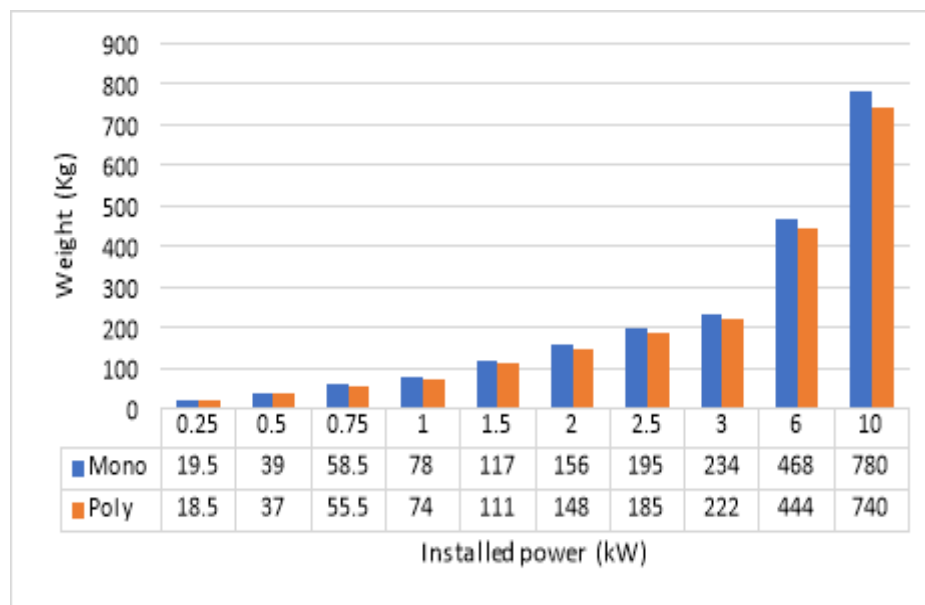


Fig.4.10 : Poids total des panneaux utilisés pour les deux types.

4.7. Analyse de la réduction des émissions de CO2

L'oxyde de carbone est considéré comme le principal gaz responsable de la pollution de l'environnement et du réchauffement climatique, notamment en raison de l'utilisation des sources d'énergie conventionnelles. En effet, l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'énergie électrique via des panneaux PV peut contribuer positivement à la réduction de l'émission de CO2. Sur la base de l'idée présentée dans les références [88-91], l'émission de CO2 évitée résultant de l'utilisation de systèmes PV peut être calculée en supposant que pour chaque kWh produit par le système solaire équivaut à chaque kWh produit par les systèmes énergétiques conventionnels. L'émission de CO2 évitée (EMAV en tonnes) peut être exprimée comme suit :

$$EM_{AV} = \frac{E_C - F_C}{1000} \quad (4.9)$$

Où :

E_C : est l'énergie produite par les systèmes conventionnels (kWh) pendant une période de référence spécifiée ; F_C : est le facteur d'atténuation du carbone qui peut être déterminé par le rapport entre la quantité équivalente de CO₂ en gramme et la puissance équivalente des systèmes PV. Il est estimé à 53g Co₂.eq/kWh pour les panneaux polycristallins et 61g co₂.eq/kWh pour les panneaux monocristallins [67-70].

Les émissions évitées liées aux cas étudiés dans ce chapitre, sont présentées dans le tableau 4.3 pour les deux technologies utilisées. Les émissions mensuelles et annuelles de CO₂ évitées grâce à l'utilisation des panneaux PV pour tous les cas étudiés pour les deux technologies Monocristallin et Polycristallin sont mentionnées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Emissions mensuelles et annuelles de CO₂ évitées grâce à l'utilisation des panneaux PV pour tous les cas étudiés pour les deux technologies Monocristallin et Poly cristallin.

	Month	Mono-crystalline	Poly-crystalline
Avoided Co ₂ emission (EM_{AV}) in tons	Jan	0,01342	0,011925
	Feb	0,014335	0,01272
	Mar	0,016013	0,014575
	Apr	0,019215	0,01696
	May	0,02196	0,01908
	Jun	0,02013	0,01802
	Jul	0,02013	0,01802
	Aug	0,0183	0,01643
	Sep	0,0183	0,0159
	Oct	0,016165	0,01431
	Nov	0,016165	0,01431
	Dec	0,013481	0,011925

	Annual	0,207614	0,184175
--	--------	----------	----------

4.8. Conclusion

Une comparaison a été faite entre les performances et les caractéristiques de systèmes PV polycristallins et monochromes cristallins de 2 kWc situés dans une zone steppique (en Algérie). La production d'énergie, l'espace occupé, le poids et le coût ont été définis pour chaque système. Les principaux résultats de cette étude sont : Le système composé de panneaux PV polycristallins est plus adaptable à la région étudiée et plus efficace que l'autre système.

L'analyse des coûts a démontré que le coût PV de l'électricité, le revenu annuel et la période de récupération monochromatique sont satisfaisants. Il est également démontré que les systèmes PV composites ont le potentiel de réduire environ 5,14 tonnes d'émissions de dioxyde de carbone : 2,56 tonnes par monocristal et 2,58 tonnes par polycristallin. Enfin, le système polycristallin composite peut être sélectionné comme le type optimal pour la zone steppique.

Conclusion générale

Dans cette thèse, une simulation sous matlab des performances et des caractéristiques des systèmes PV (polycristallin et monocristallin) est exécutée. Par la suite, une comparaison entre les résultats de deux systèmes est faite en termes de production d'énergie, espace occupée, poids, coût et réduction d'émissions de dioxyde de carbone pour savoir le quel est meilleur et plus adaptable à la région étudiée.

Une comparaison a été faite entre les performances et les caractéristiques de systèmes PV polycristallins et monochromes cristallins de 2 kWc situés dans une zone steppique (en Algérie). La production d'énergie, l'espace occupé, le poids et le coût ont été définis pour chaque système. Les principaux résultats de cette étude sont : Le système composé de panneaux PV polycristallins est plus adaptable à la région étudiée et plus efficace que l'autre système.

L'analyse des coûts a démontré que le coût PV de l'électricité, le revenu annuel et la période de récupération monochromatique sont satisfaisants. Il est également démontré que les systèmes PV composites ont le potentiel de réduire environ 5,14 tonnes d'émissions de dioxyde de carbone : 2,56 tonnes par monocristal et 2,58 tonnes par polycristallin. Enfin, le système polycristallin composite peut être sélectionné comme le type optimal pour la zone steppique.

Perspectives

Les travaux futurs sont résumés dans les points les plus pertinents suivants :

- ✓ Etendre la méthodologie de cette thèse à d'autres domaines autre les réseaux intelligents.
- ✓ Concevoir de nouvelles méthodes et techniques pour optimiser les performances des systèmes PV.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] Dilip Ahuja et Marika Tatsutani, « Sustainable energy for developing countries », S.A.P.I.EN. S, Vol. 2, n° 1, 2009, URL: <http://journals.openedition.org/sapiens/823>
- [2] Phebe Asantewaa Owusu & Samuel Asumadu-Sarkodie, “A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation,” Cogent Engineering, Vol.3, DOI: 10.1080/23311916.2016.1167990
- [3] Djeddaoui, F.; Chadli, M.; Gloaguen, R. Desertification Susceptibility Mapping Using Logistic Regression Analysis in the Djelfa Area, Algeria. Remote Sens. 2017, 9, 1031. <https://doi.org/10.3390/rs9101031>
- [4] Brague-Bouragba, N. ; Brague, A. ; Dellouli, S. ; Lieutier, F. Comparaison des peuplements de Coléoptères et d’Araignées en zone reboisée et en zone steppique dans une région présaharienne d’Algérie. C. R. Biol. 2007, 330, 923–939. 42.
- [5] Office National de la Météorologie (ONM). Données Mensuelles de Relevés des Paramètres Climatologiques (1975–2009), Station Djelfa ; ONM : Djelfa, Algeria, 2010
- [6] Schroeder, M. (2009). Utilizing the clean development mechanism for the deployment of renewable energies in China. Applied Energy, 86(2), 237-242.
- [7] Hasanuzzaman, M., Al-Amin, A. Q., Khanam, S., & Hosenuzzaman, M. (2015). Photovoltaic power generation and its economic and environmental future in Bangladesh. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 7(1), 013108.
- [8] Jacovides, C. P., Theophilou, C., Tymvios, F. S., & Pashiardes, S. (2002). Wind statistics for coastal stations in Cyprus. Theoretical and applied climatology, 72(3-4), 259-263.
- [9] Chen, A. A., Chin, P. N., Forrest, W., McLean, P., & Grey, C. (1994). Solar radiation in Jamaica. Solar Energy, 53(5), 455-460.
- [10] Jain, P. C. (1990). A model for diffuse and global irradiation on horizontal surfaces. Solar Energy, 45(5), 301-308.
- [11] Casla A. 2008. Evolución del Mercado Eólico. Jornada de Energías Renovables de la Expo. Spain, pp. 14.
- [12] Portman, M. 2009. Offshore wind energy development in the exclusive economic zone: Legal and policy supports and impediments in Germany and the US. Energy Policy. Vol. 37(9), pp. 3596-3607.
- [13] Mostafa eipour, A. 2010. Productivity and development issues of global wind turbine industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 14(3), pp. 1048-1058.
- [14] Energie éolienne transformer le vent en électricité, disponible dans le lien : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite> (Consulté le 17/03/2022 à 22h 30min)
- [15] Fried, L., Shukla, S. and Sawyer, S. 2012. Global Wind Report. Annual market update 2011. Global Wind Energy Council (GWEC). www.gwec.net (June 2012).
- [16] European Commission. December 2011. Energy Roadmap 2050.
- [17] Ric Leroy, Le moulin à vent « Éolienne Larousse 1907 » : Homonyme du passé disponible dans le lien <https://books.google.fr>
- [18] L'hydroélectricité disponible dans le lien : <http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydroelectricite/> (Consulté le 10/03/2022 à 18h 27 min).
- [19] Énergie de biomasse et biogaz disponible dans le lien : <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/energias-renovables/energia-de-la-biomasa> (Consulté le 10/03/2022 à 19h 32min).

- [20] ---, "Rapport sur le Statut Mondial des Energies Renouvelables 2016", Document d'Internet Disponible à : <http://www.ren21.net>, Consulté en Décembre 2018.
- [21] ---, "Renewables 2018 Global Status Report", Document d'Internet Disponible à : <http://www.ren21.net>, Consulté en Décembre 2018.
- [22] Générateur photovoltaïque disponible dans le lien : <https://www.energyavm.es/que-es-un-generador-fotovoltaico/>
- [23] Le panneau solaire mono cristallin disponible dans le lien : <https://www.jade-technologie.com/panneau-solaire-mono-cristallin/> (Consulté le 02/03/2022 à 10h 20 min)
- [24] Le panneau solaire polycristallin disponible dans le lien : <https://www.jade-technologie.com/panneau-solaire-polycristallin-2/> (Consulté le 02/03/2022 à 10h 37 min)
- [25] Solaire à couche mince disponible dans le lien : <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/elements/panneau-photovoltaique/cellule-photovoltaique/cellule-solaire-a-couche-mince> (Consulté le 02/03/2022 à 11h 02 min)
- [26] Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques disponible dans le lien : <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/> (Consulté le 02/03/2022 à 12h 15 min).
- [27] Énergie de biomasse et biogaz disponible dans le lien : <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/energias-renovables/energia-de-la-biomasa> (Consulté le 10/03/2022 à 19h 32min).
- [28] ---, "Le Système Photovoltaïque Autonome", Document d'Internet Disponible à : <https://www.info-solaire.fr>, Consulté en Juin 2019.
- [29] L. Stoyanov, "Etude de Différentes Structures de Systèmes Hybrides à Sources d'Energie Renouvelables", Thèse de Doctorat, Université Technique de Sofia, Bulgarie, 2011.
- [30] ---, "114 549 MW la Puissance Photovoltaïque Cumulée de l'Union Européenne Fin 2018", Document d'Internet Disponible à : <http://www.eurobserv-er.org>, Consulté en Juin 2019.
- [31] ---, "106 606 MW la Puissance Photovoltaïque Cumulée de l'Union Européenne Fin 2017", Document d'Internet Disponible à : <http://www.eurobserv-er.org>, Consulté en Juin 2019.
- [32] A. Ouai, "Commande et Gestion d'Energie d'une Centrale Photovoltaïque de Grande Puissance Connectée à un Réseau Électrique", Mémoire de Magister, Université de Laghouat, Algérie, 2012.
- [33] R. Mechouma, "Contribution à l'Etude des Onduleurs dans les Systèmes Photovoltaïques : Applications pour les Charges Commerciales", Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2015.
- [34] ---, "Le Développement du Photovoltaïque dans le Monde", Document d'Internet Disponible à : <http://www.photovoltaique.info>, Consulté en Décembre 2018.
- [35] Y. Riffonneau, F. Barruel et S. Bacha, "Problématique du Stockage Associé aux Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau", Revue des Energies Renouvelables Vol. 11, No. 3, pp. 407-422, 2008.
- [36] S. Petibon, "Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l'Energie pour les Applications Photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France 2009.
- [37] Y. Tiam Tan, "Impact on the Power System with a Large Penetration of Photovoltaic Generation", PhD Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, England, 2004.
- [38] M. Makhoulouf, "Etude et Optimisation d'un Modèle de Conversion d'Energie Photovoltaïque Application au Pompage", Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie, 2006.

- [39] G. Porrometo, "La Chine Veut se Doter de la Plus Grande Centrale Photovoltaïque du Monde", Document d'Internet Disponible à : <https://www.chine-magazine.com>, Consulté en Décembre 2018.
- [40] ---, "La Chine Va Construire la Plus Grande Centrale Solaire du Monde ", Document d'Internet Disponible à : <https://www.notre-planete.info>, Consulté en Décembre 2018.
- [41] --, "Large-Scale PV Power Plants", Document d'Internet Disponible à : <https://www.pvresources.com>, Consulté en Décembre 2018.
- [42] A. Mekemeche, "Modélisation à Deux Dimensions des Propriétés Physiques de Cellules Solaires au Silicium à Base de Substrat de Type N. Etude de Quelques Cas Particuliers de Cellules Innovantes", Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, Algérie, 2017.
- [43] T. Tafticht, "Analyse et Commande d'un Système Hybride Photovoltaïque Eolien", Thèse de Doctorat, Université de Québec, Canada, 2006.
- [44] B. Toual, "Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d'Energie Electrique", Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, 2018.
- [45] M. Ouada, "Analyse, Conception et Optimisation des Systèmes de Commande Relative aux Energies Renouvelables", Thèse de Doctorat, Université d'Annaba, Algérie, 2017.
- [46] ---, "Energie en Algérie", Document d'Internet Disponible à : <https://www.energy.gov.dz>, Consulté en Juin 2019.
- [47] ---, "Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie", Document d'Internet Disponible à : <https://www.energy.gov.dz>, Consulté en Juin 2019.
- [48] ---, "Programme National des Energies Nouvelles et Renouvelables", Document d'Internet Disponible à : <https://www.energy.gov.dz>, Consulté en Juin 2019.
- [49] ---, "Programme des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique", Document d'Internet Disponible à : www.portail.cder.dz, Consulté en Juin 2019.
- [50] ---, "Principaux Projets Réalisés / en Cours de Réalisation en Matière des Energies Renouvelables", Document d'Internet Disponible à : <https://www.energy.gov.dz>, Consulté en Juin 2018.
- [51] Rafique, Z., Khalid, H.M., and Muyeen, S.M. (2020). Communication systems in distributed generation: a bibliographical review and frameworks. *IEEE Access* 8: 207226–207239. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037196>.
- [52] Elyengui, S., Bouhouchi, R. and Ezzedine, T. (2014). The enhancement of communication technologies and networks for smart grid applications. *arXiv preprint arXiv:1403.0530*, Cornell University.
- [53] Kelly, M. and Elberg, R. (2017). *Customer Management and Experience Technologies. Global Analysis and Market Forecasts*, Navigant research.
- [54] S. Yashwant, S. C. Gupta, K. B. Aashish, "PV-wind hybrid system: A review with case study," *Cogent Engineering*, vol. 3, no 1, 2016, Art. no. 1189305, doi: 10.1080/23311916.2016.1189305.
- [55] E. L. V. Eriksson, E. Mac A. Gray, "Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems-A critical review," *Applied energy*, vol. 202, pp. 348-364, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.132

- [56] M. Tao, Y. Hongxing, L. Lin, P. Jinqing, “Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong,” *Renewable energy*, vol. 69, pp. 7-15, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.03.028.
- [57] Loschi, H.J., Leon, J., Iano, Y. et al. (2015). Energy efficiency in smart grid: a prospective study on energy management systems. *Smart Grid and Renewable Energy* 6 (08): 250.
- [58] Electricity Advisory Committee (2008). *Smart Grid: Enabler of the New Energy Economy. A Report by the Electricity Advisory Committee.* <https://www.energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/final-smart-grid-report.pdf> (accessed 1 February 2021).
- [59] European Technology Platform Smart Grids (2008). *Strategic Deployment Document for European’s Electricity Networks of the Future. Draft for 3rd General Assembly Belgium.* http://kigeit.org.pl/FTP/PRCIP/Literatura/020_SmartGrids_ETP_SDD_FINAL_APRIL2010.pdf (accessed 1 February 2021).
- [60] Veldman, E., Gibescu, M., Postma, A. et al. (2009). *Unlocking the hidden potential of electricity distribution grids. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Prague, Czech Republic (8–11 June 2009).*
- [61] 61 DOE (2008). *Metrics for Measuring Progress toward Implementation of the Smart Grid.* Washington, DC: DOE, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability,
- [62] Liao, T., M. A. Montes de Oca, D. Aydin, T. St`utzle et M. Dorigo. 2011, «An incremental ant colony algorithm with local search for continuous optimization», dans *Proceedings of the 13th annual conference on Genetic and evolutionary computation, GECCO’11, Jul. 12–16 2011, Dublin (Ireland)*, p. 125–132.
- [63] Liao, T., T. St`utzle, M. A. M. de Oca et M. Dorigo. 2014, «A unified ant colony optimization algorithm for continuous optimization», *European Journal of Operational Research*, vol. 234, no 3, p. 597–609.
- [64] Lim, W. H. et N. A. M. Isa. 2014, «Particle swarm optimization with increasing topology connectivity», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 27, p. 80–102.
- [65] Loubi`ere, P., A. Jourdan, P. Siarry et R. Chelouah. 2016a, «A modified sensitivity analysis method for driving a multidimensional search in the artificial bee colony algorithm», dans *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC2016 (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, Jul. 24–29 2016, Vancouver (Canada).
- [66] Loubi`ere, P., A. Jourdan, P. Siarry et R. Chelouah. 2016b, «A sensitivity analysis method aimed at enhancing the metaheuristics for continuous optimization», *Submitted to Artificial Intelligence Review*, Avril 2016 .
- [67] Loubi`ere, P., A. Jourdan, P. Siarry et R. Chelouah. 2016c, «A sensitivity analysis method for driving the artificial bee colony algorithm’s search process», *Applied Soft Computing*, vol. 41, p. 515–531.
- [68] Lynn, N., R. Mallipeddi et P. N. Suganthan. 2015, *Differential Evolution with Two Subpopulations*, Springer, Cham, ISBN 978-3-319-20294-5, p. 1–13.
- [69] Mallipeddi, R., P. Suganthan, Q. Pan et M. Tasgetiren. 2011, «Differential evolution algorithm with ensemble
- [70] Mandelbrot, B. B. 1977, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Company, 289–290 p..

- [71] Maréchal, W. Septembre 2014, Utilisation de méthodes inverses pour la caractérisation de matériaux à changement de phase, thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- [72] Mendes, R., J. Kennedy et J. Neves. 2004, «The fully informed particle swarm : simpler, maybe better», *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no 3, p. 204–210.
- [73] Mendes, R. et J. Neves. 2004, *What Makes a Successful Society ?*, Springer, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-540-28645-5, p. 346–355.
- [74] Mernik, M., S. Liu, D. Karaboga et M. Crepinsek. 2015, «On clarifying misconceptions when comparing variants of the artificial bee colony algorithm by offering a new implementation», *Information Sciences*, vol. 291, p. 115–127.
- [75] Michalewicz, Z. 1996, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs (3rd Ed.)*, Springer, London, UK, UK, ISBN 3-540-60676-9.
- [76] Mohais, A. S., R. Mendes, C. Ward et C. Posthoff. 2005, *Neighborhood Re-structuring in Particle Swarm Optimization*, Springer, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-540-31652-7, p. 776–785.
- [77] M. Behnke, A. Ellis, Y. Kazachkov, T. McCoy, E. Muljadi, W. Price, and J. Sanchez- Gasca, Development and validation of WECC variable speed wind turbine dynamic models for grid integration studies: National Renewable Energy Laboratory, 2007.
- [78] Hosenuzzaman, M., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Hasanuzzaman, M., Malek, A. A., & Nahar, A. (2015). Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 284-297.
- [79] J. Kennedy and R.C. Eberhart, "Particle swarm optimization", *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, November 1995.
- [80] S. Arif, J. Duveau, A. Hellal, A. Choucha, "Optimisation par essaim de particules appliquée à l'écoulement optimal de puissance réactive", *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 10/6 – 2007, pp. 777-792, Editions HERMES Science, France
- [81] A. Kalogirou, *Solar energy engineering: processes and systems*: Academic Press, 2013.
- [82] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*: John Wiley & Sons, 2011.
- [83] T. Tafticht, *Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien*: ProQuest, 2007.
- [84] I. Tegani, A. Aboubou, R. Saadi, M. Y. Ayad, and M. Becherif, "Differential Flatness Using the Predictive Neural Network Control Law for Hybrid Power System," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 5, pp. 635-647, 2015.[85] 97G. W. E. Council. (2015, 29/11/2015). Global statistics. Available: <http://www.gwec.net/>
- [86] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs," Université de Poitiers, 2013.
- [87] P. Gipe, *Wind energy comes of age vol. 4*: John Wiley & Sons, 1995.
- [88] W. Cao, Y. Xie, and Z. Tan, *Wind turbine generator technologies*: INTECH Open Access Publisher, 2012.